



**UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**T E S I S**

**ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES Y  
EVENTOS TRANSITORIOS EN LA LÍNEA DE  
TRANSMISIÓN 138 KV ILO 1 - ILO  
ELECTROSUR**

**PRESENTADA POR**

**BACHILLER CLEVER ANDERSON ARISACA MORALES**

**ASESOR:**

**MGR. HUGO ALFREDO QUISPE COAQUIRA**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**MOQUEGUA - PERÚ**

**2023**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Página de jurado.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
CONTENIDO DE TABLAS.....	viii
CONTENIDO DE FIGURAS.....	x
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general. ....	3
1.3.2 Objetivos específicos. ....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Alcances y limitaciones.....	4
1.5.1 Alcances. ....	4
1.5.2 Limitaciones. ....	4

1.6 Variables.....	4
1.6.1 Variable dependiente.....	4
1.6.2 Variables independiente.....	4
1.6.3 Operacionalización de variables. ....	6
1.7 Hipótesis de la investigación.....	7
1.7.1 Hipótesis general. ....	7
1.7.2 Hipótesis específicas. ....	7

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1 Antecedentes de la investigación.....	8
2.2 Bases Teóricas.....	21
2.2.1 Línea de Transmisión. ....	21
2.2.2 RMG.....	22
2.2.3 Red monofásica de dos hilos. ....	23
2.2.4 Parámetros de una línea de transmisión. ....	26
2.2.5 Clasificación de una Línea de Transmisión.....	32
2.2.6 Fallas en una Línea de Transmisión.....	36
2.2.7 Resistencia de Falla. ....	40
2.2.8 Transitorios Electromagnéticos en un SEP.....	42
2.2.9 Sobrevoltajes.....	44
2.2.10 Rango de Frecuencias de Sobrevoltajes.....	50
2.2.11 Modelos Matemáticos de Líneas de Transmisión.....	54
2.2.12 Normatividad.....	59
2.3. Definición de términos.....	61

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

3.1 Tipo de investigación.....	65
3.2 Diseño de la investigación.....	65
3.3 Población y muestra.....	65
3.4 Descripción de instrumentos para recolección de datos.....	66

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1. Presentación de Resultados.....	67
4.2 Contratación de hipótesis.....	81
4.3 Discusión de resultados.....	82

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	84
5.2 Recomendaciones.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	94
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	96

## CONTENIDO DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.Operacionalización de variables.....	6
Tabla 2.Características técnicas de la LT 138 kV.....	68
Tabla 3.Tipos de estructuras utilizadas en el recorrido de la LT.....	69
Tabla 4.Parámetros del transformador de la SE Ilo 1.....	69
Tabla 5.Parámetros del transformador de la SE Ilo Electrosur.....	70
Tabla 6.Impedancia de la línea de transmisión.....	70
Tabla 7.Características del conductor HD CU.....	71
Tabla 8.Características del cable de Guarda OPGW.....	71
Tabla 9.Transformador de Corriente.....	73
Tabla 10.Transformador de Voltaje.....	73
Tabla 11.Flujo de Potencia en el inicio de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda máxima.....	75
Tabla 12.Flujo de potencia para el fin de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda máxima.....	75
Tabla 13.Flujo de Potencia en el inicio de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda mínima.....	76
Tabla 14.Flujo de potencia para el fin de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda minima.....	76
Tabla 15.Cortocircuitos en la L.T. L-1391 (Ilo 1 - Ilo Electrosur).....	76
Tabla 16.Constantes para las curvas norma ANSI/IEEE.....	78
Tabla 17.Valores de corriente de falla y corriente de pick up.....	79
Tabla 18.Corriente de ajuste y tiempo de operación fase.....	80
Tabla 19.Corriente de ajuste y tiempo de operación neutro.....	80

Tabla 20.Tiempos de actuación de los relés 51 en falla 3F.....	81
Tabla 21.Tiempos de actuación de los relés 51 en falla bifásica.....	82
Tabla 22.Tiempos de actuación de los relés 51 en falla monofásica.....	82
Tabla 23.Línea L-1391 Ilo 1 - Ilo Electrosur.....	83
Tabla 24.Características nominales de la LT L-1391.....	83

## CONTENIDO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Configuración para n conductores en haz.....	25
Figura 2. Sección de un conductor.....	28
Figura 3. Voltaje.....	29
Figura 4. Comparaciones.....	33
Figura 5. Línea de transmisión corta.....	34
Figura 6. Línea de transmisión central.....	34
Figura 7. Capacitancia.....	35
Figura 8. Longitud de la línea de transmisión.....	35
Figura 9. Calculo de cortocircuito.....	36
Figura 10. Falla monofásica a tierra.....	38
Figura 11. Falla línea - línea.....	38
Figura 12. Falla línea - línea - tierra.....	39
Figura 13. Corrientes de falla.....	39
Figura 14. Ejemplo de puesta a tierra.....	42
Figura 15. Sobretensión.....	51
Figura 16. Atractores A1 y A2 con sus dominios de atracción.....	56
Figura 17. Etapa del proceso.....	57
Figura 18. Malla rápida.....	58
Figura 19. Características de la línea.....	72
Figura 20. Diagramación del SEP.....	74

## CONTENIDO DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1.....	24
Ecuación 2.....	24
Ecuación 3.....	24
Ecuación 4.....	25
Ecuación 5.....	25
Ecuación 6.....	27
Ecuación 7.....	29
Ecuación 8.....	31
Ecuación 9.....	77
Ecuación 10.....	78
Ecuación 11.....	79

## RESUMEN

La presente investigación realizó el ajuste, coordinación de protecciones y eventos de la línea de transmisión Ilo 1 - Ilo Electrosur, denominada L-1391, la cual tiene una máxima capacidad de 60 MVAR en una tensión nominal de 138 kV. La presente investigación contempla un estudio explorativo y descriptivo; se realizó sobre el modelado del SEP, realizando el ajuste de las protecciones de sobrecorrientes, es decir la función de los relés de protección, así como los eventos transitorios en distintos escenarios de operatividad de la línea. A partir de la herramienta computacional POWER FACTORY DIGSILENT se diseñó el estudio de flujo de potencias, eventos de cortocircuito y visualizaciones del comportamiento de la línea durante los eventos transitorios. Para el análisis de los eventos transitorios se define en estado estable, en apertura y cierre de la línea, así como estados de falla monofásica, bifásica y trifásica. Para realizar el ajuste de protección, se calculó la corriente de arranque del relé y el tiempo de disparo. Finalmente, el estudio obtuvo resultados de los tiempos de actuación de los relevadores, coordinando entre ellos para así aislar y mitigar la o las fallas dentro de su espacio de impacto, así también se concluyó que la óptima coordinación y el conocimiento de los eventos transitorios de la línea Ilo 1 – Ilo Electrosur permitió la mejora en respuesta de la misma ante comportamientos de maniobra y/o perturbaciones del sistema.

**Palabras clave:** Líneas de transmisión, diseño de mejora, eventos transitorios, optimización.

## ABSTRACT

The present research carried out the adjustment, coordination of protections and events of the Ilo 1 - Ilo Electrosur transmission line, called L-1391, which has a maximum capacity of 60 MVAR at a nominal voltage of 138 kV. The present investigation contemplates an exploratory and descriptive study; it was carried out on the SEP modeling, making the adjustment of the overcurrent protections, that is to say, the function of the protection relays, as well as the transient events in different scenarios of line operation. Using the POWER FACTORY DIGSILENT computational tool, the study of power flow, short-circuit events and visualizations of the line behavior during transient events was designed. For the analysis of transient events, the transient events are defined in steady state, in opening and closing of the line, as well as single-phase, two-phase and three-phase fault states. To perform the protection setting, the relay inrush current and tripping time were calculated. Finally, the study obtained results of the trip times of the relays, coordinating among them in order to isolate and mitigate the fault or faults within their impact space. It was also concluded that the optimal coordination and knowledge of the transient events of the Ilo 1 - Ilo Electrosur line allowed the improvement of its response to maneuvering behaviors and/or system disturbances.

**Keywords:** Transmission lines, improvement design, transient events, optimization.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo investigativo se enfoca en la determinación y el diseño de mejoras en los sistemas de protección de líneas de transmisión de 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur con la finalidad de mejorar la transmisión de energía eléctrica. Asimismo, el incremento de la tecnificación de las operaciones a escala industrial demanda el consumo de energía eléctrica de calidad y estable; no obstante, durante el transporte y transformación de la energía eléctrica proveniente de las centrales se genera múltiples fallas que reducen la calidad del servicio eléctrico, lo cual produce fallas en la producción, equipos industriales y posibles accidentes en los trabajadores. Además, se ha identificado la ausencia de automatización y procedimientos modernos para el mantenimiento eléctrico, lo cual genera paradas de planta que reducen notablemente la producción industrial. Por estas razones, se pretende optimizar el sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, mediante la supervisión y reconocimiento de fallas eléctricas y reducciones de tensiones

El ingreso de nuevas centrales industriales requiere actualizar los sistemas de coordinación de protección, debido a que la operación de industrias demanda gran cantidad de flujo eléctrico, por esta razón, Vargas y Ospina (2018) realiza una investigación para analizar este nuevo escenario para un sistema que opera a 500 kV.

Las simulaciones de estos nuevos escenarios cobran gran importancia para el desarrollo de coordinación de protecciones, ya que permite identificar puntos de mejora al momento de cambiar las variables operativas. De esta manera, Uscamayta (2020) realiza una investigación en la cual se utiliza el software de apoyo Digsilent

para identificar los valores de tensión de barra actuales de su empresa y verificar los estándares de operación.

Para Mafla (2017), uno de los inconvenientes al momento de diseñar y mejorar los sistemas de coordinación de protección es la presencia de equipos de protección provenientes de diferentes fabricantes, ya que genera inconvenientes y problemas técnicos en la similitud de equipos; sin embargo, esto se puede solucionar diseñando el sistema con un mayor margen de tolerancia.

Según Ccapa (2022) es importante supervisar y evaluar constantemente los sistemas de coordinación de protección, debido a que se requiere conocer el comportamiento de estas protecciones bajo sus condiciones de operación nominales iniciales con la finalidad de verificar la pérdida de sus propiedades o si se requiere reemplazar dichos equipos.

Por último, se logró realizar mejoras en las protecciones de líneas de transmisión de 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur mediante ajustes en el tiempo de disparo de los relés de protección de distancia y sobrecorriente.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1 Descripción de la realidad del problema**

Se ha visto en la creciente tecnificación de los procesos industriales, se ha desarrollado la necesidad de tener una buena calidad en la generación y uso de la energía eléctrica, ya que, al ser transferida desde las centrales de producción de energía y luego transformada en las cajas de transformadores y dirigidas por las líneas de alta y baja tensión, según como sea el tipo de trabajo que se realicen, se ha visto que pueden generar fallas y con estas, reducir la calidad de servicio dando fallas en la producción y a la vez generando problemas en los equipos y maquinas a utilizar.

En este estudio, se va a considerar la coordinación de protecciones de la línea que va desde la subestación Ilo 1 hasta la subestación Ilo Electrosur, debido a que presentan un sistema de transmisión de 138 kV de transmisión de potencia, además que posee un sistema de gestión de mantenimiento electromecánico que le permite establecer las pautas, para la construcción y activación de postes para las líneas de transmisión de potencia, pero no se cuenta totalmente con un sistema que integre una evaluación total de los efectos que las causales de fallas naturales

puedan causar en estos postes y líneas de transmisión, tales como son las fallas por descargas atmosféricas, cortes de energía por emergencias, vientos fuertes entre otros. Con estos factores de generación de fallas, se le suma la misma falta de procedimientos modernos, ya que actualmente se realizan el mantenimiento eléctrico de forma manual o desactivando la transmisión de energía, dando con esto múltiples paradas en la producción de la planta.

Por estos motivos, se está realizando la presente investigación, para dar una solución viable a la generación de las fallas y poder sistematizar una forma técnica viable para reducirlas y mejorar la calidad en el sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

## **1.2 Definición del problema**

### **1.2.1 Problema general.**

¿Se podrá realizar el estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur para mejorar la operación del sistema?

### **1.2.2 Problemas específicos.**

- ¿Sera posible determinar la relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios?
- ¿Sera posible analizar y aplicar acciones para mejorar la operación de líneas de transmisión mediante detección de fallas?
- ¿Sera posible mejorar la operación del sistema y calidad de la energía en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

- Realizar el estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios en la línea de 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur para la mejora de la operación del sistema.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Determinar la relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios de la línea de 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.
- Analizar las acciones para mejorar las líneas de transmisión mediante detección de fallas.
- Mejorar la operación del sistema y calidad de energía en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

### **1.4 Justificación**

La presente investigación es realizada para dar la mejora en el sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, ya que dicho sistema de transmisión debe tener un nivel de protección adecuada para realizar los procesos en la planta y como serán luego transmitidos.

Por este motivo, se logra justificar analizando los siguientes puntos de vista debido a la presente y continua observación de fallas y reducciones de la potencia eléctrica en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

- De forma tecnológica, se justifica debido a que, al realizar la mejora de la protección de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, los equipos que se benefician de esta energía no tendrán pérdidas o problemas en su funcionamiento, además que se dará un impulso a la tecnificación eléctrica, para seguir mejorando sus procesos continuamente.

- En el plano social, se observa que, al mejorar la protección de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, la calidad de energía que vaya a llegar a los hogares a través de las subestaciones conectadas, va a subir dando un repunte en la calidad del servicio entregado a los pobladores de la ciudad y cercanías.

Con estos puntos de vista se ve la importancia de realizar un estudio para mejorar la coordinación de protecciones en dicha línea de estudio, con todo esto se generará un impacto positivo en todos los sectores que se ven correlacionados al mismo, además de que podrá ser puesto en forma de idea y proyecto para ser evaluado en otras líneas de transmisión dando así una mejor calidad de servicio a las personas y empresas que utilizan el sistema de integrado de transmisión eléctrica en las regiones aledañas.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

### **1.5.1 Alcances.**

Se realizará mejoras en la protección de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, para una mejor transmisión de energía eléctrica a través de un correcto ajuste del tiempo de disparo de los relés de sobrecorriente y relés de distancia.

### **1.5.2 Limitaciones.**

Se realizará las actividades de estudio solo en la protección de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, ya que estos sistemas tienen impactos mayores en funcionamiento y desempeño.

## **1.6 Variables**

Las variables a ser analizadas en la presente investigación, será las siguientes:

### **1.6.1 Variable dependiente.**

- Protección del sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur; esta variable se define como las condiciones de operación nominal que se adaptan a dicho sistema eléctrico, dando así un modelamiento en el que se restringirá las propiedades eléctricas para así asegurar que no se lleguen a presentar fallas y otras eventualidades.

### **1.6.2 Variable independiente.**

- Transitorios Electromagnéticos por Descarga Atmosférica, se definen como las condiciones anormales de funcionamiento de un sistema eléctrico, se deben normalmente a fenómenos transitorios.
- Cortocircuito Trifásico, se le define como la capacidad de corte de cortocircuito que representa el poder de corte, que se da evaluando valores y factores específicos en la continuidad de la transmisión de corriente eléctrica

### 1.6.3 Operacionalización de variables.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Variable	Definición Conceptual	Indicadores	Escala
Dependiente			
Protección del sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.	Se define como las condiciones de operación nominal que se adaptan al sistema eléctrico, dando así un modelamiento en el que se restringirá las propiedades eléctricas para así asegurar que no se lleguen a presentar fallas y otras eventualidades.	Horas de protección debido al ajuste correcto del tiempo de disparo de los relés de sobrecorriente y de distancia.	Numérica
Independiente			
Transitorios Electromagnéticos por Descarga Atmosférica	Se definen como las condiciones anormales de funcionamiento de un sistema eléctrico, se deben normalmente a fenómenos transitorios.	Numero de desconexiones de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur. debido a fenómenos transitorios y cortocircuitos.	Numéricas
Cortocircuito Trifásico	Se le define como la capacidad de corte de cortocircuito que representa el poder de corte, que se da evaluando valores y factores específicos en la continuidad de la transmisión de corriente eléctrica.	El tipo de falla que se pueda dar en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.	Alfabética

## **1.7 Hipótesis de la investigación**

### **1.7.1 Hipótesis general.**

La implementación de un estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur mejorará la operación del sistema.

### **1.7.2 Hipótesis específicas.**

- Existe una relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios de las líneas de transmisión.
- El análisis de acciones y detección de fallas permitirán mejorar la operación de las líneas de transmisión.
- La operación del sistema y calidad de la energía de la línea de transmisión de 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur mejorara con la aplicación de un estudio.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales.

##### *2.1.1.1. “Estudio de la coordinación de protecciones para la línea en 69 kV de transmisión San Antonio-alazán”.*

**Autores:** César Augusto Calderón Bernal, Juan Diego Nieves Sinche, 2022

**Resumen:** Según los autores Calderón y Nieves (2022) esta obra tiene por objeto regular y coordinar las protecciones de la línea de transmisión San Antonio - Alazán. El objetivo de la línea es retirar 7.198 MW de capacidad en un nivel de tensión de 69 kV de la central San Antonio, con lo que se pretende completar la segunda fase del proyecto Mazar - Dudas. El estudio es de tipo descriptivo y exploratorio, en base a la información proporcionada por la Corporación Eléctrica del Ecuador unidad de negocio CELEC EP - HIDROAZOGUES, se realiza la modelación del sistema eléctrico, y también se seleccionan las características que se pretenden seleccionar. activada, en este caso se selecciona la protección principal (función 51) como protección contra desbordamiento y respaldo (21) protección de impedancia.

Se utiliza la calculadora Digsilent de Power factory para hacer un estudio de los flujos de potencia y cortocircuitos, de este estudio se extrae información para ajustar los relés 51 y 21. De la corriente de alimentación se saca el valor de la corriente del cortocircuito de la corriente nominal y de falla.

El ajuste de la protección de sobrecorriente se realiza calculando la corriente de detección del relé y el tiempo de arranque, y las zonas de protección de la protección de impedancia se seleccionan observando su rango y analizando aspectos del funcionamiento de este relé.

Palabras clave: Regulación de protección, coordinación de protección, SEP, línea de transmisión.

#### ***2.1.1.2 “Estudio de coordinación de protecciones en líneas de transmisión de la zona norte considerando la influencia del ingreso en operación del sistema de 500 kV, Quito-Ecuador”.***

**Autor:** Vargas Sampedro, Mayra Araceli

**Resumen:** Según el autor Vargas (2018) la configuración y concertación de protecciones dentro de las líneas de transmisión en la zona norte del país se realiza evaluando la afectación del aparato de 500 kV. Cuando la central Coca Codo Sinclair entró a través del aparato de 500 kV hasta la subestación El Inga, fue imprescindible implementar un estudio de ajuste y coordinación de seguridad. Este examen se hizo en la región de predominio, que se decidió principalmente sobre la base de un examen de circuito rápido. Se realizó un estudio de coordinación de seguridad direccional para todas las líneas de transmisión situadas en la zona de dominancia. Dentro de la zona de influencia. Adicionalmente se evaluó la

coordinación de sobrecorrientes para los transformadores de las subestaciones Santa Rosa y Pomasqui. Dentro del grupo de estudios realizados se encuentra el asociado únicamente a las defensas eléctricas de las líneas de transmisión actuales, las cuales funcionan con voltajes de 230 kV y 138 kV. El cálculo y coordinación de estos factores pasó a ser probada con el uso de los diagramas de tiempo-presente y de las zonas de seguridad dentro del complejo aeronáutico R - X para los relés de sobrecorriente espacial y direccional. Los ajustes de las protecciones que se coordinaron se identificaron mediante la simulación de diferentes tipos de circuitos breves en puntos diferentes del aparato y pensando en data excepcionales de resistencia de falla, en diferentes posibilidades de la línea de emisión para estados de demanda mínima y máxima.

Palabras clave: Sistemas eléctricos de potencia, Protecciones eléctricas, Líneas de transmisión

El proyecto hidroeléctrico Mazar-Dudas es obra de la unidad empresarial Hidrozogues (CELECEP) de la Corporación Eléctrica Ecuatoriana; con una capacidad nominal de 20,82 MW y consta de tres proyectos hidroeléctricos: Alazán, San Antonio y Dudas. La planta hidroeléctrica Alazán de 6,23 MW figura como comercial, mientras que las plantas San Antonio y Dudas se encuentran en las etapas de construcción y diseño final. La planta de energía San Antonio de 7,19 MW continúa progresando significativamente en la construcción y los planes están en marcha a ensamblar el equipo electromecánico y conectar la línea de transferencia entre ésta y la central Alazán para permitir la salida de la energía generada por el Sistema Interconectado Nacional SNI. Como parte del diseño del montaje de los equipos electromecánicos, se deben delimitarse a algunos factores técnicos para que

la energía producida en la central de San Antonio se dirija al sistema interconectado nacional para este fin; El diagrama de cálculo unifilar determina que la central San Antonio se conectará a la central Alazán a través de una línea de transmisión de 69 kV que deberá estar protegida eléctricamente para asegurar la probidad y respaldo del sistema, equipo y personal.

***2.1.1.3 “Guía de selección de sistema de protección en subestaciones por medio de relés basados en microprocesadores aplicado en subestaciones de transmisión”.***

**Autores:** Espinoza y Estupiñán, 2010

**Resumen:** Según los autores Espinoza y Estupiñán (2010) la Guía de selección para sistemas de protección de subestaciones que usan relé basado en microprocesador, cuando se aplica a una subestación de transmisión, tiene propósitos muy importantes para ayudar a comprender mejor la protección eléctrica. Se brinda información de relés utilizados para la protección de subestaciones y la elección de dichos dispositivos y, a su vez, la posterior parataxis del estudio, que es algo muy importante para detener las protecciones de la subestación. Esta propuesta da a conocer el concepto de la estación de transmisión, los factores que componen la subestación, los niveles de tensión e información general sobre las características de transmisión del Ecuador. Sin embargo, los distintos ensamblajes de barras colectoras en subestaciones de transmisión, operación de relés relacionados con protección de línea, barras colectoras y transformadores, características operativas de relés tales como selectividad, sensibilidad, confiabilidad, velocidad, ahorro de dinero, que son características

importantes de relé selección, así como clasificación de relés según su función y tipo.

Introducimos dispositivos de medida que toman señales del campo de la subestación, por ejemplo: PT'S, CT'S, que son los principales dispositivos de monitoreo que se comunican con los relés. Además, se entregan diagramas de funcionamiento de los sistemas de protección primaria y secundaria de esta subestación y nomenclatura de protecciones eléctricas. Arquitectura de subestaciones, niveles de control de campo y sistemas de protección de estaciones de transmisión.

La tecnología se desarrolla día a día, por lo que la protección eléctrica también genera cambios. Se reemplazan los relés electromecánicos por relés multifunción, esta tecnología ahorra espacio en los módulos y el tiempo de respuesta para eliminar la falla es más rápido. Para que sus costes de inversión se amortizan rápidamente gracias a las infinitas ventajas técnicas más eficientes que ofrece este tipo de equipos.

#### ***2.1.1.4 “Coordinación automática de protecciones de sobrecorriente para un sistema de distribución ante desastres naturales”.***

**Autor:** Sebastián Andreé Caviedes Correa

**Resumen:** Según el autor Caviedes (2018) en el siguiente archivo se observa la concordancia inmediata de protecciones de sobrecorriente con propiedades de tiempo inverso empleando algoritmos en MATLAB y PowerFactory para una máquina de repartición.

Se pretende eliminar la desconexión general y optimizar la resiliencia eléctrica o capacidad de la máquina para sobreponerse a perturbaciones, perseverando en el suministro eléctrico con ocasión de la afección que pueda sufrir la red por la incidencia de una catástrofe natural. Partimos de la coordinación de protección inicial en PowerFactory y simulamos el efecto de una catástrofe natural, con la ayuda de una alternancia de topología aleatoria debido a la pérdida de tramos dentro de la comunidad de distribución. Por ello, basándose principalmente en un análisis de avería de circuito rápido, se recalculan robóticamente los valores del día actual de desconexión y del dial de tiempo (TMS) de cada herramienta de seguridad. Esto garantiza que la máquina mantiene la seguridad del proveedor en las zonas no afectadas de cierre y previene la pérdida de la máquina de repartición debido a un corte por ausencia de coordinación de seguridad o coordinación errónea de las protecciones.

Palabras Clave: Pickup, Sistema de Protección, Relé de sobrecorriente, Red de Distribución, Resiliencia, TMS.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales.**

***2.1.2.1 “Ajustes de coordinación de protección en la línea de transmisión de 138 kV Juliaca - Puno, para el sistema eléctrico Saman Provincia de Juliaca departamento Puno – Perú”.***

**Autores:** Marco Fernando Lopez Suni, Alexis André Suarez Fuentes, Amilcar Inga Cancho, 2018

**Resumen:** Según los autores Inga, López y Suarez (2018) considerando que las ampliaciones de las líneas de transmisión se realizan en las principales líneas a

nivel nacional, en el departamento de Puno, por ejemplo, la implementación de la conexión entre la subestación Juliaca subestación Puno y Azángaro. Central eléctrica, presenta problemas como la desconexión de esta nueva central y subestación ocasionada por la nueva topología del sistema eléctrico esta tesis trata sobre la regulación de los dispositivos de protección de transmisión de potencia 138 kV Juliaca - Puno, en la subestación Juliaca y la subestación Puno para que le brinde suministro eléctrico a P.S.E. A la misma tensión de 22,9 kV, en el sistema eléctrico conectado antes de la alarma. Con estos arreglos de protección, es posible cumplir con los requisitos básicos de tecnología de protección, que son: velocidad, selectividad y confiabilidad. El análisis de cortocircuito permite verificar el comportamiento térmico de los componentes del sistema para fallas trifásicas y monofásicas, y también permite que el calibre o ajuste los relés de protección verifique su capacidad de resistir cortocircuitos en equipos y redes, tales como: cables, hilos de antena, interruptores y transformadores de corriente.

***2.1.2.2 “Propuesta de implementación del plan de mantenimiento basado en criterios de RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad) para una línea de transmisión de 500 kV”.***

**Autor:** Zorrilla Salas, José Alonso, 2019

**Resumen:** Según el autor Zorrilla (2019) en este trabajo aplican los conceptos de la teoría RCM en una línea de transmisión de alta tensión (500 kV); Se consideran los principios generales de RCM y se lleva a cabo el mantenimiento de la línea de transmisión de tal manera que se puedan preparar planes de mantenimiento basados en la confiabilidad para un determinado sistema utilizando

este método. Además, presenta los fundamentos generales de la teoría RCM, explica cómo responder cada pregunta que surge de la metodología para obtener la información necesaria para comprender la filosofía RCM, se aplica a cualquier propiedad. Se describe fundamentos formales de RCM, fallas operacionales, análisis de modos de falla y sus efectos: consecuencias de fallas, mantenimiento predictivo y esquemas de decisión de RCM. Se proporciona información sobre técnicas de mantenimiento predictivo para líneas de transmisión, en qué consisten y cómo se utilizan en este activo. Se propone adaptar la filosofía RCM de la línea de transmisión para que los principios definidos en el Capítulo 1 se apliquen a estos recursos y se defina el método. Se presenta la aplicación del método en un sistema de prueba, como una línea de transmisión de 500 kV.

***2.1.2.3 “Análisis de la estabilidad en estado estacionario y corto circuito de la línea de transmisión 138 kV Talta - Tambomayo y el impacto que genera al conectarse al sistema eléctrico interconectado nacional”.***

**Autor:** Ccori Huamani Johan Manuel, 2019

**Resumen:** Según el autor Ccori (2019) la compañía Minera Buenaventura S.A.A. desarrolló el Proyecto Minero Tambomayo ubicado en el Distrito Tapay de la Provincia de Caylloma de Arequipa y requirió energía y potencia para la operación de dicho Proyecto y su posterior expansión. La distribución de energía para el proyecto minero Tambomayo se realiza a través de la línea de transmisión 138 kV Callalli - Ares entre los edificios T-116 y T-117, donde se construye la nueva subestación Talta 138 kV, a partir de la mencionado Th.22. punto km de línea de 138kV, energía y corriente se transportan al proyecto Minero Tambomayo,

donde se construye la subestación Tambomayo 138/22/10kV, y desde allí se dirigen por circuitos de 10 kV a reservas mineras diferentes. La demanda esperada de energía de la mina se estima en 12 MW durante la puesta en operación de en el primer trimestre de 2016. LÍNEA ENERGÉTICA 138 kV TALTA - TAMBOMAYO Y EFECTO DE CONEXIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO A LA CONEXIÓN NACIONAL según el Gobierno Decisión que es técnica 0c035 - 20135 OSINERGMIN. Se aprobó PR-20 “Adición, Modificación y Desactivación de Brechas de Muro”.

### **2.1.3 Antecedentes Locales.**

#### ***2.1.3.1 “Mejoramiento del mantenimiento de la red de transmisión en 138 kV área Ilo de Southern Perú Copper Corporation (SPCC)”.***

**Autor:** Mayorga Salas, Alonso, 2022

**Resumen:** Según el autor Mayorga (2022) desde 1997, y por más de 20 años, la jefatura de sistemas de potencia de la empresa de generación eléctrica “ENGIE Energía Perú”, antes EnerSur, brinda el servicio de mantenimiento a la red de transmisión eléctrica en 138 kV (y desde el 2017, también en 220 kV) de la empresa minera Southern Perú Copper Corporation (SPCC), la que está compuesta por líneas de transmisión y subestaciones eléctricas que suministran energía a las diversas instalaciones de la compañía minera, distribuidas en 3 grandes áreas a lo largo de la región Moquegua: Ilo, Toquepala y Cuajone. Así, desde 1997 hasta el 2017, se han logrado avances significativos en la gestión de mantenimiento con una mejora constante, sin embargo, ha sido un proceso lento, con una metodología basada, principalmente, en los mantenimientos correctivo y preventivo dejando a

segundo plano el predictivo. Esto, sumado con el limitado personal y equipamiento, generó una deficiente programación y ejecución de las actividades; a pesar que los índices de confiabilidad de la red de transmisión se han mantenido por encima del mercado actual, el costo de mantenimiento ha sido elevado en comparación con otras empresas de servicio de mantenimiento en alta tensión. Por otro lado, en el área Ilo está concentrada la mayor cantidad de planes y actividades de mantenimiento de la red de transmisión en 138 kV, así como una serie de condiciones externas desfavorables: drástica variación de humedad y temperatura, polución salina y ácida, precipitaciones pluviales anormales y alta contaminación por plantas de fundición y refinería de cobre cercanas; en esta área se identifica una potencial optimización del mantenimiento para reducir costos sin perder los altos índices de confiabilidad.

En este contexto, a partir del 2017, ENGIE renovó su contrato con SPCC, igualmente, la jefatura de sistemas de potencia reclutó mayor cantidad de personal, adquirió nuevo equipamiento, renovó infraestructura e ingresó en una nueva era digital, lo que ha permitido, en especial, al área principal “líneas y subestaciones”, dedicada, específicamente, a la ejecución del mantenimiento, una serie de cambios positivos y mejoras palpables en el diseño de su plan de mantenimiento. Por ello, el presente trabajo tiene el objetivo principal de describir las propuestas teórico-técnicas y las consecuentes acciones de mejora en el plan de mantenimiento del área líneas y subestaciones para la red de transmisión en 138 kV, área Ilo de SPCC, esto desde el 2017 hasta el 2021 para realizar una comparación de ambos años a través de resultados reales tales como la optimización de recursos, la reducción de costos

de mantenimiento, la eficiencia y la eficacia en la ejecución de actividades, esto con los altos índices de confiabilidad y disponibilidad operativa de las instalaciones.

### ***2.1.3.2 “Creación de la línea de transmisión 138 kV Moquegua – Alto Zapata y SE Alto Zapata, Región Moquegua”.***

**Autor:** Prieto Ingenieros y consultores ,2019

**Resumen:** Según el autor Prieto Ingenieros y Consultores (2019) el propósito del análisis de alternativas es identificar las mejores alternativas para aspectos clave del desarrollo del proyecto. Este análisis permite comparar diferentes tipos de criterios como punto de partida para sus alternativas viables en función de características como ubicación, tecnología o diseño. Además, este análisis debe realizarse al principio de la conceptualización del proyecto y continuar durante todo el proceso de bosquejo. Esto es fundamental ya que a medida que avanza el proyecto, los cambios fundamentales en el concepto son menos probables y, por lo tanto, las decisiones tomadas al principio de la fase de diseño tienen un mayor impacto en el proyecto y su impacto en el medio ambiente. La presentación del análisis de alternativas debe centrarse en la elección de la característica más importante del proyecto y, por lo tanto, suponer una justificación apropiada para el proceso de toma de decisiones relacionado. La elección de alternativas además de otras debería mejorar el desarrollo del proyecto, incluyendo opciones que faciliten las actividades de construcción, mejoren la eficiencia operativa y al mismo tiempo permitan una mayor protección ambiental. Los siguientes criterios y estándares de seguridad fueron considerados en orden de importancia al elegir una ruta aerodinámica: Evitar pasar por áreas que contienen restos arqueológicos. En la línea

deberá estar presente el arqueólogo para garantizar que el recorrido de la línea no afecte las zonas arqueológicas, luego se realizarán los operativos en la dirección regional del Ministerio de Cultura, Moquegua, la cual recibirá un certificado de la existencia de restos arqueológicos - CIRA. Evite cruzar áreas protegidas nacionales consultando la última Lista Oficial de Áreas Protegidas y el Mapa Nacional de Áreas Protegidas Servicio Nacional de Áreas Protegidas – SERNANP.

Esta información confirmó que la ruta de la línea de transmisión y la ubicación del SET propuesto no afectaría las áreas protegidas o sus zonas de amortiguamiento. Evitar cruzar planicies de inundación, suelos hidromórficos, geológicamente inestables o terrenos con fuertes pendientes donde son comunes las rocas y los derrumbes (huaycos). Minimizar el impacto en terrenos de propiedad privada; el cual es determinado por las autoridades de cada lugar. Desarrollo de un plan de ruta en las cercanías de las carreteras, utilizando las vías de acceso existentes como rutas de transporte; y respetando el derecho de paso en Hwy. Maneje lo más recto posible, tratando de minimizar los desvíos bruscos. Se propusieron 02 opciones para el proyecto de línea, la primera con pilares de hormigón y la segunda con pilares de acero y hormigón. La opción, que es técnica y económicamente la mejor, resulta ser la elegida. En los planos a escala 1/20 000 se pueden ver huellas del recorrido de la línea. Desarrollando la definición de puntos importantes en las rutas de la línea, sus coordenadas UTM (georeferencia) fueron tomadas por GPS simétrico con precisión de un centímetro.

Electrosur S.A. Es integrante de las Entidades y Empresas con Ayuda de Sectores y Etapas del Gobierno, de conformidad con lo dispuesto en el numeral cuatro. 1 del artículo 4 del Reglamento del Decreto Legislativo N° 1252, Decreto

Legislativo que crea el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de la Inversión y deroga la Ley N° 27293, Ley del Sistema Nacional de Inversión Pública, aprobado mediante Decreto Supremo N° 027-2017-EF y vinculada al Sector Energía y Minas (MEM), es una concesionaria de distribución de energía y adicionalmente desarrolla deportes de generación hidroeléctrica a pequeña escala. Se concentra en el departamento de Tacna y Moquegua. Electrosur S.A. tiene la concesión del Sistema de Distribución dentro del departamento de Tacna y Moquegua, por lo que se analiza con líneas de transmisión y subtransmisión confiables que puedan asegurar la entrega de potencia a sus clientes (Prieto Ingenieros y Consultores, 2019)

El suministro eléctrico es una necesidad pública y fundamental para el desarrollo socioeconómico de la localidad. Para la ejecución de las obras de refuerzo que permitan incrementar el sistema de transmisión de Electrosur S.A., es de suma importancia contar con los estudios de prefinanciamiento a nivel del perfil del emprendimiento de inversión pública de acuerdo a las normas vigentes del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones (Prieto Ingenieros y Consultores, 2019).

Con fecha 26.05.2016, en la Publicación del Plan de Inversiones (PIT) 2017- 2021, por parte de Osinergmin, con Resolución de Consejo Directivo Organismo de la Inversión en Energía y Minería Osinergmin N° 104-2016- OS/CD se aprueba el Informe N° 0347-2016-GART “Revisión y Aprobación del Plan de Inversiones en Transmisión para el Área de Demanda 13 - Regulación para el período 2017-2021” el cual considera en sus cálculos la implementación de la LT

138 kV Moquegua – Alto Zapata y SE Alto Zapata, Región Moquegua (Prieto Ingenieros y Consultores, 2019).

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Línea de Transmisión.**

La línea de transmisión es un agrupamiento de cables y una conformación de metales cuya finalidad es llevar enormes bloques de energía eléctrica (Neri,2013).

Las líneas de transmisión limitan la energía electromagnética a un área del tamaño de espacios, limitada por el entorno físico que forma la línea, a comparación de las ondas de aire, sin obstáculos que existen en su camino. La línea consta de conductores eléctricos con una estructura geométrica prescrita que determina la peculiaridad de las ondas electromagnéticas que hay en ella (Neri,2013).

En los sistemas de telecomunicaciones, las líneas de transmisión tienen muchos usos, no solo para transmitir señales entre la fuente y la carga, sino también como circuitos resonantes, filtros y conmutadores de impedancia. Las aplicaciones más comunes son la transmisión de señales telefónicas, televisión, y la conexión entre transmisores y antenas y sus receptores (Neri,2013).

La evaluación de las líneas de transmisión requiere resolver las ecuaciones de campo electromagnético a menos que las condiciones de contorno establecidas por la geometría directa y la teoría de circuitos clásica en general no puedan aplicarse, porque trata con circuitos de parámetros agrupados; mientras que en la línea se distribuyen los parámetros. Estos parámetros son: resistencia, inductancia, capacitancia y conductividad, y en circuitos eléctricos normales están concentrados en un solo elemento o componente que se encuentra físicamente bien ubicado. Se

supone que un circuito tiene parámetros concentrados cuando las dimensiones físicas de sus componentes, incluidos los cables de conexión, son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la energía que maneja el circuito. Si el tamaño del circuito y sus componentes son comparables o menores que la longitud de onda, el circuito debe considerarse un parámetro distribuido y se requiere la teoría de la línea de transmisión derivada de la teoría del campo electromagnético para manejarlo. Por lo tanto, la resistencia, la inductancia, la capacitancia y la conductividad en una línea de transmisión no se pueden estar concentradas en un punto específico de la línea, sino distribuidas uniformemente en toda la línea de transmisión (Neri,2013).

Una línea de transmisión es una estructura utilizada para transmitir energía eléctrica de un sitio a otro. Las líneas de transmisión se utilizan para cubrir distancias particularmente largas y transmitir potencias de altas cantidades. Las líneas de transmisión generalmente usan 138 kV o un voltaje nominal más alto, llamado alto voltaje. Las líneas de transmisión se utilizan para transmitir energía eléctrica desde los puntos de producción hasta los puntos de consumo llamados cargas (Ccori,2019).

### **2.2.2 RMG.**

El radio Medio Geométrico (RMG) es el de un cable artificial que en su interior no existe flujo. Para la estructura de conductores el radio Medio Geométrico (RMG) se calcula por medio de las longitudes del haz de conductores (Gonzales,2001).

Entonces el radio medio geométrico (RMG) es la media geométrica de las distancias entre bucles de conductores, es decir es la raíz “n” sima del producto de

las distancias. Esta es un radio de controlador falsa sin enlace de flujo en el interior, solo un enlace de flujo externo. Para determinar el valor del RMG, hay que comprender el cálculo de la inductancia de una línea de una sola fase de dos cables.

### **2.2.3 Red monofásica de dos hilos.**

El sistema de una sola fase de dos cables está formado de dos conductores, uno de los cuales es el conductor de fase y el otro es el conductor neutro. Aunque no existe el concepto de corriente IR y Retorno en el sistema de CA, siempre podemos analizar las corrientes utilizando el valor rms. Por lo tanto, se puede suponer que el conductor de fase es el conductor IR y el conductor neutro es el conductor de RETORNO. Aquí, GO significa que la corriente va a la carga a través de la fase y RETURN significa que la corriente retorna a la fuente por medio del hilo neutro. Aparentemente, el valor de la corriente en los cables de ida y regreso es el mismo, pero su dirección es opuesta (Gonzales, 2001)

En matemática radio Medio Geométrico (RMG) es el cálculo de la inductancia; para lo cual la inductancia depende de los rasgos físicos del conductor y de su tamaño, por lo cual si el conductor se enrolla la inductancia aparece. Entonces el RMG es el radio de un conductor de forma de un tubo de base circular y el radio es la distancia de cualquier punto del contorno al centro del mismo y su pared es de grosor ínfimo que a partir del centro del conductor se tiene presente el flujo interno y el externo. El RMG para una estructura es la media geométrica del radio medio geométrico de cada subconductor de un medio con las distancias de ese subconductor a cada uno de los conductores secundarios del mismo conjunto (Riofrio, 2000)

Para un circuito de tres fases el RMG es el RMG del conductor. Para un circuito de tres fases de circuito dobles donde hay entre los conductores de una misma fase distancias  $D_{aa'}$ ,  $D_{bb'}$  y  $D_{cc'}$  y es un circuito transpuesto (Riofrio, 2000)

$$RMG = \sqrt[n]{(D_{aa'} D_{aa''} D_{aa'''} \dots D_{aa^{(n)}})(D_{bb'} D_{bb''} D_{bb'''} \dots D_{bb^{(n)}}) \dots (D_{nn'} D_{nn''} D_{nn'''} \dots D_{nn^{(n)}})} \dots [Ecuación 1]$$

A través de la siguiente ecuación se determina el RMG de un conductor con “n” número de cables:

Si los conductores son circulares que pertenecen a la misma fase de radio R el RMG es:

$$RMG = \sqrt[n]{(d_{11} * d_{12}) * (d_{21} * d_{22})} \dots [Ecuación 2]$$

Donde  $d_{11}$  y  $d_{12}$  son las distancias del centro del conductor hacia el mismo, por lo tanto “r” se da por :

$$RMG = \sqrt[n]{(R \varepsilon^{-1/4} * 2R)^2} \quad | \quad = \quad RMG = R \sqrt[n]{2 \varepsilon^{-1/4}} \dots [Ecuación 3]$$

Para el caso de un circuito trifásico sencillo el RMG es el RMG del conductor, ahora bien, las ecuaciones para estructuras de dos, tres y cuatro conductores en haz, están dado por las siguientes expresiones:

$$RMG = RMG_{Conductor}$$

$$RMG (haz) = \sqrt[n]{RMG * d}$$

$$RMG (haz) = \sqrt[3]{RMG * d^2}$$

$$RMG (haz) = \sqrt[4]{RMG * d^3 * \sqrt[2]{2}} \dots\dots\dots [Ecuación 4]$$

Para calcula el RMG para “n” conductores en haz se utiliza la siguiente ecuación:

$$RMG (haz) = \sqrt[n]{n * RMG * A^{n-1}} \dots\dots\dots [Ecuación 5]$$

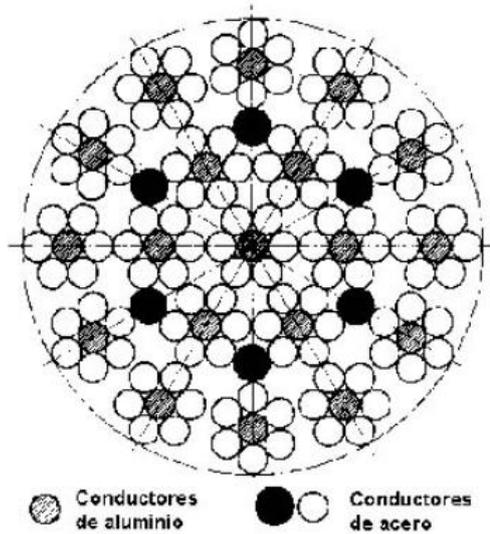
Donde:

n= número de conductores

A= radio de configuración definido

**Figura 1**

*Configuración para n conductores en haz*



*Nota:* La figura muestra la configuración para n conductores en haz. Fuente: Inducor (2023)

## **2.2.4 Parámetros de una línea de transmisión.**

### **2.2.4.1 Resistencia.**

La Resistencia “R” es la aversión u oposición al flujo de corriente eléctrica por medio de un conductor. Según el Sistema Internacional de unidades la unidad de la Resistencia es el Ohmio cuyo símbolo es  $\Omega$ . Resistencia en serie por unidad de longitud, R, expresada en  $\Omega/m$  (Jaén, 2001)

### **2.2.4.2 Efecto Skin.**

La resistencia está en función de la resistividad de los conductores y de la frecuencia. A frecuencias altas, la resistencia incrementa con la frecuencia debido al efecto pelicular o efecto skin, ya que la corriente solo pasa a través de una pequeña capa cerca de la superficie del conductor.

La inductancia proviene de cada cable que pasa por el, lo que crea una corriente variable que tiene una inductancia asociada. Dado que la línea consta de dos o más conductores separados por aislamiento, forma un capacitor cuya capacidad depende del área de los conductores, la separación y la constante dieléctrica del mismo carácter que los separa. Por lo que, la conductancia se obtiene al hecho de que el aislamiento no es perfecto y tiene una resistencia finita, por lo que parte de la "fuga" entre los conductores y junto con la resistencia en serie brinda a las pérdidas o atenuación de la fila (Neri,2013).

### **2.2.4.3 Temperatura.**

La Resistencia de cualquier elemento metálico está en función a la temperatura ( $T^\circ$ ). Debido a que la resistividad “r” está en función a la temperatura; como la temperatura depende de la corriente, si se da un incremento de  $\Delta V$  se le asigna un

de “I” seguido por un nuevo incremento de temperatura y que a su vez con lleva un aumento de resistencia y este limita la variación de intensidad “ΔI” lo cual matemáticamente es una función de grado uno cuya pendiente es decreciente y su regla de correspondencia es:  $I=f(V)$ . En la realidad las resistencias de grado uno no existe, pero se puede aproximar con materiales de un coeficiente constante. En las tablas de resistividad se da el valor para 20 °C “p<sub>20</sub>” y al mismo tiempo se da el coeficiente “a” de diferencia de resistencia “ΔR” con la Temperatura (Zandman & Stein, 1964)

Un cambio en la temperatura provoca un cambio en la resistencia. En los materiales metálicos, su resistencia incrementa al incrementar la temperatura, por el contrario, en otros elementos, como el carbono (C) o el germanio (Ge), la resistencia de su valor se minimiza.

Por lo que algunos materiales pierden su durabilidad cuando la temperatura desciende lo suficiente, a estos materiales se les conoce como de superconductores.

Matemáticamente a temperaturas no muy altas la resistencia a una temperatura dada ( $R_T$ ) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \dots\dots\dots[\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

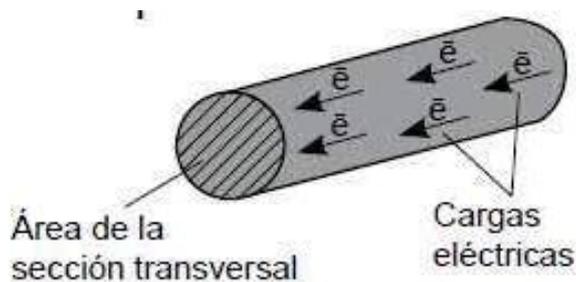
- $R_0$ = Resistencia de referencia a la temperatura  $T_0$ .
- $\alpha$ = Coeficiente de temperatura. Para el cobre  $\alpha=0,00393$ .
- $T_0$ = Temperatura de referencia en la cual se conoce  $R_0$ .

Una de las consecuencias negativas del efecto Joule es el calentamiento que se da en los conductores eléctricos cuando están en un flujo por corriente eléctrica. Se construyen de varias secciones para que el calentamiento que se origina no dañe a los mismos: Mientras mayor sea la corriente que va a pasar por ellos su sección será mayor (Iturbe, 2020)

Cuando a un conductor se le hace un corte perpendicular es decir formando un ángulo recto de  $90^\circ$  en su superficie se obtiene una sección, los conductores tienen forma tubular y su sección es un área circular y se expresa en milímetros al cuadrado ( $\text{mm}^2$ ) (Iturbe, 2020).

**Figura 2**

*Sección de un conductor*



*Nota:* La figura muestra el área de la sección transversal y cargas eléctricas de un conductor.  
Fuente: Departamento de matemática y física (2020)

#### **2.2.4.4 Inductancia.**

##### **2.2.4.4.1 Inductancia en una Línea Eléctrica.**

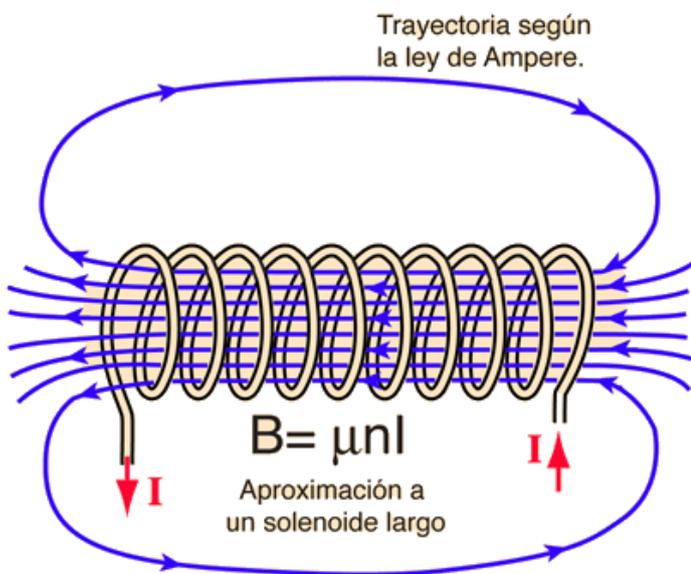
La inductancia en una línea eléctrica es una característica de un flujo eléctrico que se opone a la variación de corriente. Una corriente que se dirige a través de un cable se origina un campo magnético alrededor es decir habrá dos campos eléctrico y magnético conocido como campo electromagnético. El flujo magnético está en función de la corriente y cuando esta cambie el flujo magnético también cambia.

De acuerdo a la ley de Faraday cuando el flujo magnético varia se da un “emf” por medio del conductor. El flujo magnético en un solenoide largo se concentra en su centro en un campo uniforme. El campo externo es frágil y distinto (Totalenergies, 2020)

Esta “emf” está en la dirección contraria a la de la corriente, así como indica la ley de Lenz. El emf se da por la siguiente ecuación:

**Figura 3**

*Voltaje*



*Nota:* La figura muestra la trayectoria basada en la Ley de Ampere. Fuente: Olmo & Nave (2023)

$$V = -L \frac{dI}{dt} \dots \dots \dots [Ecuación 7]$$

Donde

L: Inductancia en a la ley de Henry

I: Intensidad de corriente

#### **2.2.4.5 Capacitancia.**

La capacitancia es la facultad de un circuito para recolectar y almacenar energía de manera de carga eléctrica. Este almacenamiento de carga eléctrica se da en capacitores. Los capacitores son dos placas de material conductor (generalmente metal delgado) intercaladas entre un aislante hecho de cerámica, película, vidrio u otros materiales, incluido el aire. El aislador llamado también como dieléctrico y aumenta la capacidad de carga del capacitor. Las placas internas están conectadas a dos enchufes externos, que a veces son largos y delgados, similares a pequeñas antenas o patas de metal. Estos enchufes se pueden conectar a un flujo eléctrico (Fluke, 2014)

Los capacitores y las baterías almacenan energía. Las baterías liberan energía gradualmente, pero los capacitores la agotan rápidamente. Por ejemplo: Un capacitor conectado al flash de una cámara digital recolecta energía de la batería de la cámara y luego la libera en una ráfaga cuando se abre el obturador. Dependiendo del tamaño del condensador, puede tomar uno o dos segundos acumular suficiente energía para el segundo destello. Un capacitor almacena energía (voltaje) cuando la corriente fluye a través de un circuito eléctrico. Las dos placas tienen las mismas cargas, y cuando la placa positiva toma carga, una cantidad igual de carga sale de la placa negativa. Cuando el circuito está apagado, el capacitor retiene la energía almacenada, por lo general hay pocas fugas (Fluke, 2014)

La capacitancia se expresa en función entre la carga eléctrica de cada conductor y la variación de potencial (es decir, voltaje). El valor de capacitancia de un capacitor se mide en faradios (F); Recibió el nombre del físico inglés Michael Faraday (1791-1867). Un faradio es de alta capacitancia. Los electrodomésticos

contienen capacitores que producen solo una infima cantidad de faradio, por lo general una millonésima de faradio (o microfaradio) o tan pequeñas como un picofaradio (millonésima de pF). En cambio, los supercapacitores almacenan grandes cargas eléctricas de miles de faradios. La capacitancia puede aumentar si: Las placas de capacitores (conductores) se colocan más cerca unas de otras. Las placas más grandes ofrecen más superficie. Dielectric es el mejor aislante posible para la aplicación. Los capacitores vienen en diferentes formas. En los circuitos eléctricos, los condensadores se utilizan a menudo para bloquear la corriente continua (CC) y permitir que fluya la corriente alterna (CA). Algunos multímetros digitales ofrecen una función de medición de capacitancia para que los técnicos puedan: Identificar un capacitor desconocido o sin marcar. Detectar condensadores abiertos o en cortocircuito. Medir condensadores directamente y mostrar su valor (Fluke, 2014)

#### ***2.2.4.6 Conductancia.***

La conductancia eléctrica (G) es la característica que posee un material para el paso de la corriente eléctrica de manera sencilla por lo tanto la conductancia es la peculiaridad inversa a la resistencia. La conductancia se mide en siemens(S) (Unicrom, 2023).

La conductancia es útil cuando se trabajan con valores de resistencia muy pequeños como es cuando se desarrollan conductores eléctricos. Esta facilidad que ofrece el material al paso de la corriente eléctrica no es igual a la conducción el cual es el proceso en el cual las cargas fluyen, tampoco confundirse con conductividad que es la conductancia específica de un material (Calero, 2023)

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \dots\dots\dots[Ecuación 8]$$

Donde:

G: Conductancia

R: Resistencia en ohmios

I: Intensidad de corriente en amperios

V: Voltaje en voltios

### **2.2.5 Clasificación de una Línea de Transmisión.**

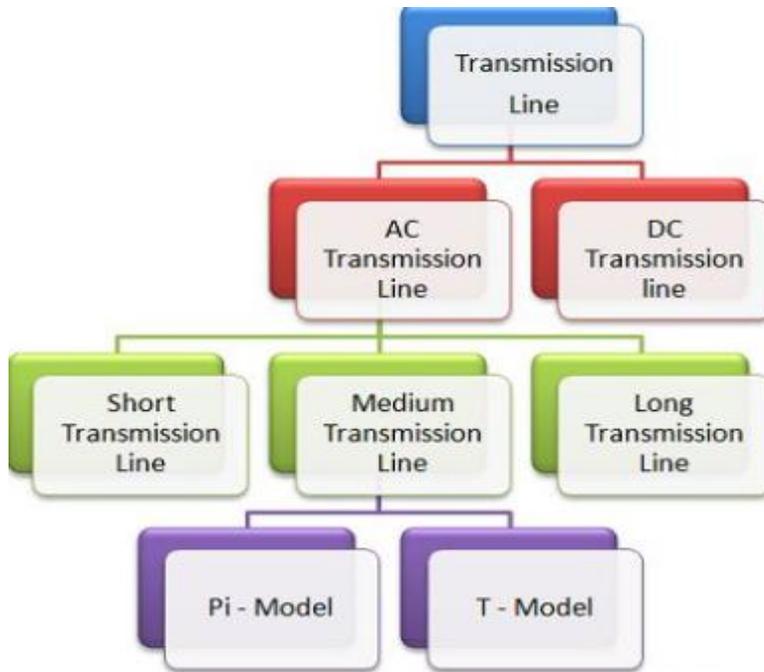
Una Línea de transmisión es el medio de pasar la energía desde la estación en la que se genera al centro de carga. Las líneas de transmisión se dividen teniendo en cuenta el voltaje y el tamaño del conductor, se clasifican en dos grandes grupos, los cuales son Línea de transmisión de CA y Línea de transmisión DC, según esta clasificación tenemos:

#### **2.2.5.1 Línea de transmisión de CA.**

Una línea de transmisión tiene resistencia R, inductancia L, capacitancia C y derivación o conductancia de fuga G. Estos parámetros, junto con la carga y la línea de transmisión, determinan el rendimiento de la línea. El término eficiencia significa voltaje de suministro final, corrientes de suministro final, factor de potencia de suministro final, pérdida de potencia de la línea, eficiencia de la línea de transmisión, límites de regulación y flujo de potencia durante la eficiencia y transmisión, límites de regulación y potencia en estado estable y transitorio. la tabla de comparación se muestra en la siguiente figura (Circuit Globe, 2023).

**Figura 4**

*Comparaciones*



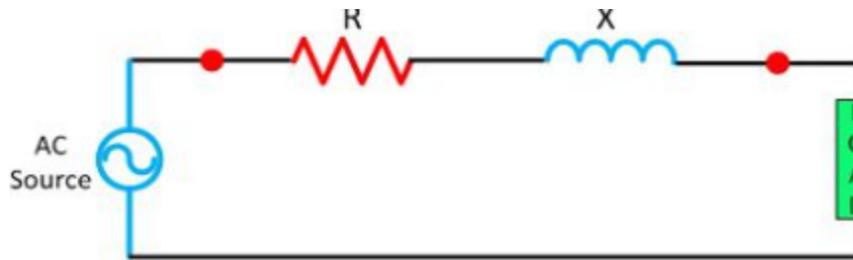
*Nota:* La figura muestra comparaciones de líneas de transmisión Circuit Globe (2023)

#### *2.2.5.1.1 Línea de transmisión corta.*

Si la línea no supera los 80 kV o si el voltaje de la línea no supera los 66 kV, la línea se denomina línea de transmisión corta. La capacidad de una línea está determinada por su longitud. El efecto de la capacitancia en una línea de transmisión corta es insignificante, pero en un cable donde el espacio entre los conductores es pequeño, el efecto de la capacitancia no puede despreciarse. Al estudiar el desempeño de una línea de transmisión corta, solo se calculan la resistencia y la inductancia de la línea (Circuit Globe, 2023).

**Figura 5**

*Línea de transmisión corta*



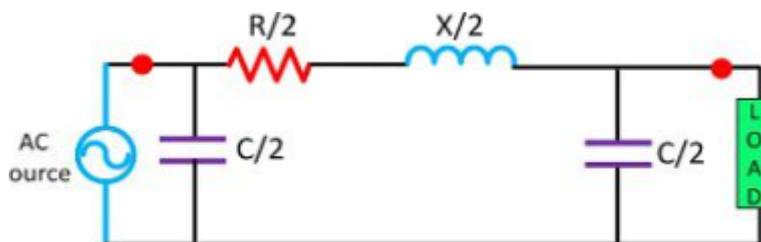
*Nota:* La figura muestra una línea de transmisión corta. Fuente: Circuit Globe (2023)

### 2.2.5.1.2 Línea de transmisión media.

Una línea que recorre entre 80 y 200 kilómetros se denomina línea de transmisión de tamaño medio. La capacitancia promedio de la línea de transmisión no se puede ignorar. La capacitancia promedio de una línea de transmisión se considera en el rango de frecuencias de uno o más puntos de la línea. El efecto de la línea es más a alta frecuencia y su inductancia y capacitancia de fuga se consideran despreciables. La línea de transmisión central se divide en Pi: modelo y T: modelo (Circuit Globe, 2023)

**Figura 6**

*Línea de transmisión central*



*Nota:* La figura muestra una línea de transmisión central. Fuente: Circuit Globe (2023)

### 2.2.5.1.3 Modelo pi de una línea de transmisión mediana.

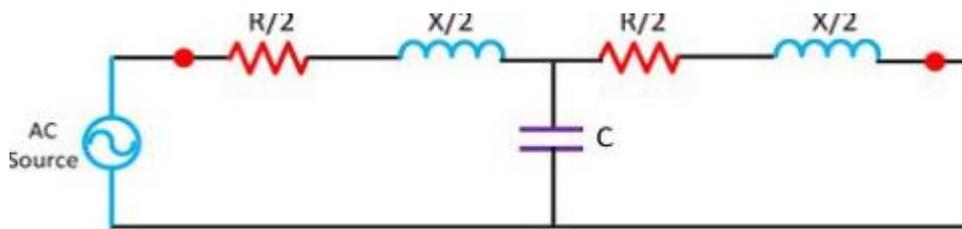
En este modelo hay que tener en cuenta que la segunda parte de la capacidad se dirige a cada extremo de la línea (Circuit Globe, 2023)

#### 2.2.5.1.4 T - Modelo de una línea de transmisión media.

En el modelo T en el centro de la línea se dirige la capacitancia (Circuit Globe, 2023)

**Figura 7**

Capacitancia



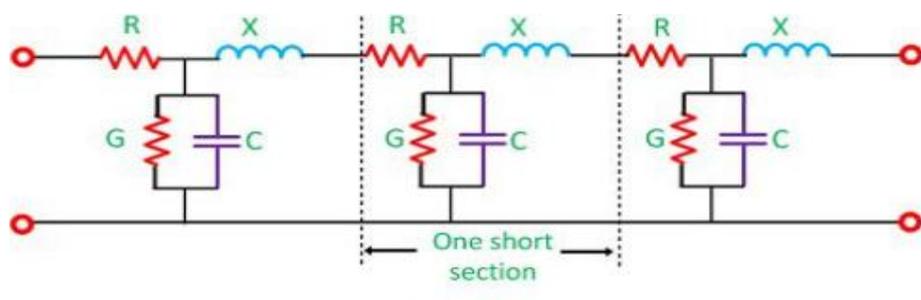
Nota: La figura muestra la capacitancia de una línea de transmisión media. Fuente: Circuit Globe (2023)

#### 2.2.5.1.5 Línea de transmisión larga.

Es aquella que su distancia es mayor a 230 Km los parámetros de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia de fuga esta distribuidos equivalentemente en toda la longitud de la línea de transmisión (Circuit Globe, 2023)

**Figura 8**

Longitud de la línea de transmisión



Nota: La figura muestra la longitud de una línea de transmisión. Fuente: Circuit Globe (2023)

#### 2.2.5.1.6 Línea de transmisión DC.

La transmisión de DC se utiliza principalmente para la transmisión de energía a enormes distancias de recorridos. Para la transmisión remota, el CD es más económico y tiene bajas pérdidas eléctricas. El costo de los sistemas de transmisión de CC es mayor para una línea de transmisión de corta distancia porque se necesita más equipo para convertirla que para un sistema de CA (Circuit Globe, 2023).

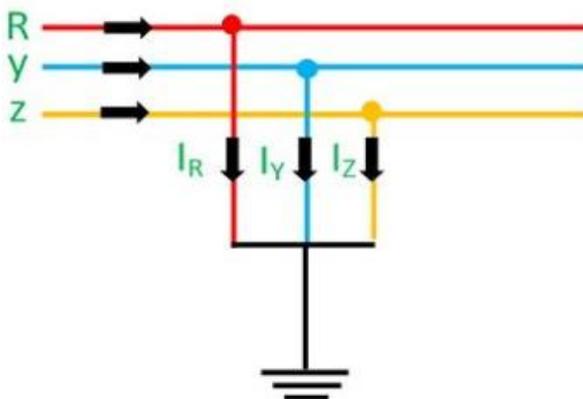
### 2.2.6 Fallas en una Línea de Transmisión.

#### 2.2.6.1 Fallas Simétricas.

En las fallas simétricas, todos los grupos se cortocircuitan entre sí y, a constante, a tierra. Tal falla está balanceada en el sentido de que los sistemas permanecen simétricos es decir si se traza una línea con respecto al centro quedan cortados de la misma forma, o podemos decir que las líneas están desplazadas por un ángulo igual (es decir,  $120^\circ$  en una línea trifásica). Este es el tipo de falla más importante, que involucra la corriente más alta, pero rara vez se encuentra. Por lo tanto, se realiza un cálculo de cortocircuito balanceado para determinar estas grandes corrientes (Circuit Globe, 2023)

**Figura 9**

*Cálculo de cortocircuito*



*Nota:* La figura muestra un cortocircuito. Fuente: Unigal (2023)

### **2.2.6.2 Fallas Asimétricas.**

#### **2.2.6.2.1 Monofásica (Línea -Tierra).**

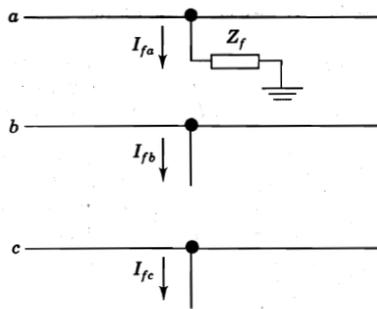
Según Rendon (2020) las fallas asimétricas tienen solo una o dos fases. En las fallas asimétricas, las líneas trifásicas están desequilibradas. Este tipo de falla ocurre entre línea y tierra o entre líneas. Una falla en serie desbalanceada es entre fases o entre una fase y tierra, mientras que una falla desbalanceada es un desequilibrio de impedancia en la línea. Según Rendon (2020) una falla en derivación en un sistema trifásico se puede clasificar como:

- Fallo de línea a tierra (LG).
- Fallo línea a línea (LL).
- Doble falla de línea a tierra (LLG).
- Fallo de cortocircuito trifásico (LLL).
- Fallo trifásico a tierra (LLLG).

En el caso de una sola línea y falla a tierra, un conductor hace contacto con el cable neutro o de tierra. Una falla de línea a línea ocurre cuando dos conductores están en cortocircuito. Una falla de dos cables a tierra ocurre cuando dos conductores caen a tierra o entran en contacto con el cable neutro. LG, LL y LLG son fallas asimétricas, mientras que LLL y LLLG son fallas simétricas. Por lo tanto, se realiza un cálculo de cortocircuito balanceado para determinar estas gigantes corrientes (Rendon, 2020).

**Figura 10**

*Falla monofásica a tierra*



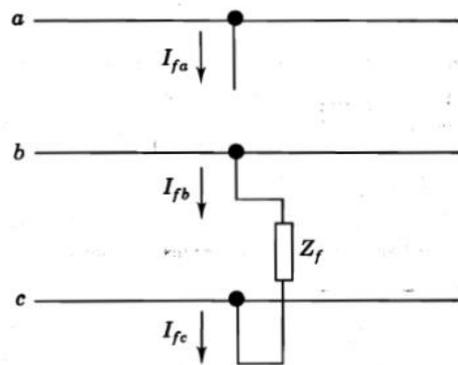
*Nota:* La figura muestra una falla monofásica a tierra. Fuente: Grainger & Stevenson (2015)

#### 2.2.6.2.2 Bifásica (línea - línea sin tierra).

Este tipo de falla es un grupo de generación y repartición de energía eléctrica en función a dos tensiones eléctricas alternas sin fase en su frecuencia perpendicular (Rendon, 2020).

**Figura 11**

*Falla línea - línea*

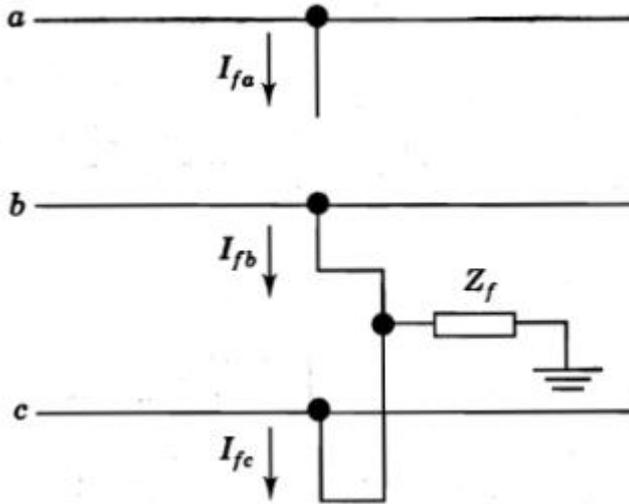


*Nota:* La figura muestra una falla de línea-línea. Fuente: Grainger & Stevenson (2015)

2.2.6.2.3 Bifásica (línea - línea con tierra).

**Figura 12**

Falla línea - línea - tierra



Nota: La figura muestra una falla de línea-línea-tierra. Fuente: Grainger & Stevenson (2015)

Resultan tres corrientes de fallo:

**Figura 13**

Corrientes de falla

$$i_{Fa}^1 = \frac{V_F}{Z_{kk}^1 + \left[ \frac{Z_{kk}^2 (Z_{kk}^0 + 3Z_F)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]}$$

$$i_{Fa}^2 = -i_{Fa}^1 \left[ \frac{Z_{kk}^0 + 3Z_F}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]$$

$$i_{Fa}^0 = -i_{Fa}^1 \left[ \frac{Z_{kk}^2}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]$$

Nota: La figura muestra la fórmula de corrientes de falla. Fuente: Grainger & Stevenson (2015)

### **2.2.7 Resistencia de Falla.**

Según Rendon (2020) las resistencias de puesta a tierra (RPT) se utilizan para limitar la corriente de falla para garantizar la seguridad de los equipos y el personal en los sistemas industriales. En un sistema con un neutro fuertemente conectado a tierra, la corriente de falla está limitada solo por la resistencia de tierra. La corriente de falla puede ser muy grande y dañar transformadores, generadores, motores, cables y otros equipos del sistema. Los RPT se conectan entre el neutro y la tierra para aumentar la resistencia de la red en caso de falla a tierra y así limitar la corriente a un nivel seguro.

Según Rendon (2020) las ventajas de utilizar RPT son:

- Reducción de las corrientes de falla monofásicas para mejorar la seguridad de cada dispositivo en la red eléctrica de MT,
- Reducción de las sobretensiones transitorias durante una falta a tierra permite también su monitorización por un relé de falta a tierra, mejor protección de generadores, transformadores y equipos relacionados, menores costos de operación y mantenimiento.

El valor de la corriente de falla debe limitarse a un valor que la máquina o el transformador pueda manejar con seguridad. También debe ser lo suficientemente alto para ser detectado por los relés de protección contra fallas a tierra. Si el valor de resistencia de RPT es demasiado alto, la corriente de falla es demasiado baja y no puede activar el relé de protección de falla a tierra en caso de falla (Rendon, 2020).

En una conexión en estrella trifásica se producen capacidades contra tierra.

En caso de defecto a tierra, estas capacidades pueden cargarse con la tensión de red y provocar sobretensiones transitorias. RPT debe tener un valor que permita descargar las capacidades. Las resistencias también están clasificadas por cuánto tiempo soportarán la corriente de falla. Las duraciones típicas son de 5 a 10 segundos. Las resistencias de largo plazo se utilizan en sistemas donde la confiabilidad del sistema es crítica: industria petrolera, minas, etc. En tales situaciones, se utilizan grandes resistencias para soportar fallas a tierra durante largos períodos de tiempo. Si se produce un defecto a tierra en una fase, se genera una alarma. Sin embargo, el sistema seguirá funcionando hasta el próximo cierre programado. Las resistencias de puesta a tierra de Hilkar (Rendon, 2020).

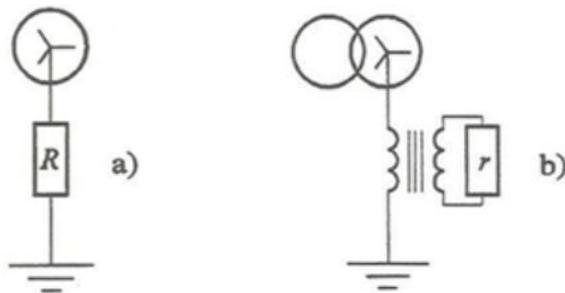
Están diseñadas para absorber grandes cantidades de energía sin exceder los límites de temperatura definidos en IEEE 32. Los RPT de Hilkar se pueden utilizar para instalaciones en interiores y exteriores, con el punto neutro colocado sobre aislamiento de porcelana, conectado desde la parte inferior, superior o lateral con cable AT (XLPE) (sección mínima = 70 mm<sup>2</sup> cobre o 95 mm<sup>2</sup> aluminio). La clase de protección más utilizada para los RPT es IP23, porque permite que los elementos de resistencia se enfríen más fácilmente y se puede usar tanto en zonas costeras como en desiertos, porque los elementos de resistencia son completamente inoxidables y no se ven afectados a condiciones ambientales extremas. Los RPT se suministran con instrucciones de mantenimiento e instalación. Estas pautas también enumeran la configuración recomendada para cada RPT. Hilkar ofrece soporte técnico completo para adaptarse a sus requisitos o condiciones de trabajo (Rendon, 2020).

### 2.2.7.1 Características generales.

- Elementos de resistencia de acero inoxidable
- Transformador de corriente incluido (EN 61869-2)
- Conexiones soldadas por resistencia en lugar de conexiones soldadas para reemplazo inmediato de piezas en el sitio
- Alta capacidad térmica suprime corrientes altas
- Construcción fuerte resistente a impactos
- La cubierta superior inclinada fuerte evita la acumulación
- Carácter de acero inoxidable resistente a la corrosión

**Figura 14**

*Ejemplo de puesta a tierra*



*Nota:* Ejemplo de puesta a tierra por conexión directa “a” y “b” conexión por medio de un transformador monofásico. Fuente: Imse (2015)

### 2.2.8 Transitorios Electromagnéticos en un SEP.

Un Transitorio Electromagnético es el resultado de un flujo eléctrico debido a una variación en su estado original a su estado resultante originado por maniobras dentro del flujo eléctrico, por fallas. Forma un sistema eléctrico. El período transitorio es extremadamente corto, en comparación con el estado estacionario, el período transitorio electromagnético es insignificante, pero al mismo tiempo tiene

un gran efecto en el sistema, porque durante esos pequeños períodos es parte del sistema. Es alto voltaje debido a altas corrientes y voltajes que pueden dañar permanentemente el dispositivo. Actualmente, el análisis del factor de transferencia electromagnético es un componente clave relacionado con la investigación, el funcionamiento, la confiabilidad, el diseño y la calidad del suministro de energía del sistema de energía, entre otros. Esta sección examina las causas y consecuencias de esto, con énfasis en los elementos del tren motriz que son más sensibles a las operaciones de suministro de energía y más sensibles a las emisiones atmosféricas (Cabrera, 2012)

Es decir, es una respuesta instantánea de un sistema eléctrico en variables electromagnéticas debido a un cambio repentino de su estado inicial a otro o estado final debido a movimiento interno del sistema eléctrico, fallas o descarga atmosférica en la celda (Morales, 2008)

El período transitorio es muy corto, del orden de microsegundos, que se compara con el tiempo de equilibrio, pero al mismo tiempo tiene un gran efecto en el sistema porque estos pequeños períodos tienen componentes del sistema. están sujetos a esfuerzos elevados resultantes de voltajes o corrientes superiores a la magnitud nominal, que pueden dañar permanentemente el dispositivo. El estudio de los transitorios comenzó con aproximaciones que condujeron a la teoría de circuitos, una aproximación que podría aplicarse a sistemas cuasi-estáticos después del desarrollo de esa teoría y las contribuciones de Maxwell quien formuló las ecuaciones que llevaron a la comprensión, considerando los fenómenos eléctricos como fenómenos electromagnéticos, fue posible analizar los fenómenos de propagación profundamente desde la perspectiva de las ondas electromagnéticas.

El análisis de transitorios electromagnéticos es actualmente un componente central incluido en los sistemas eléctricos, la operación, la confiabilidad, el diseño, la calidad del suministro de energía y más (Morales, 2008)

## **2.2.9 Sobrevoltajes.**

### ***2.2.9.1 Sobrevoltajes de Baja Frecuencia.***

Cuando ocurre una falla en un sistema eléctrico, se presenta un estado transitorio que decae rápidamente, dejando el equilibrio, pero donde las variables eléctricas no son las mismas que antes de la falla. Este estado permanece hasta que se elimina el error. La situación de sobretensión más crítica se presenta en caso de fallas asimétricas, donde existe un aumento de tensión en todas las fases dependiendo del nivel de puesta a tierra del sistema, la situación de sobretensión transitoria no se normaliza hasta que se elimina la falla. La sobretensión resultante depende de la relación  $X_0/X_1$  y  $R_0/X_1$  (Cabrera, 2012)

### ***2.2.9.2 Voltaje permanente a frecuencia Industrial.***

En condiciones normales de operación, la magnitud del voltaje de frecuencia industrial varíe un poco y difiera de un punto del flujo a otro. Por otro lado, la planificación y coordinación del aislamiento, la tensión de reposo a la frecuencia actual debe mantenerse constante e igual a la tensión máxima del sistema. En la práctica, el voltaje máximo del sistema  $U_s$  puede ser de hasta 72.5 kV significativamente más bajo que el voltaje del dispositivo  $U_m$  más alto, mientras que el voltaje aumenta, en ambos valores suelen ser los mismos. Sobretensiones temporales. Las sobretensiones temporales se caracterizan por su amplitud, forma de tensión y duración. Todos los parámetros dependen de la fuente de los voltajes,

y las amplitudes y formas pueden incluso variar durante la duración del pico. En la coordinación del aislamiento, una tensión normalizada de frecuencia industrial a corto plazo (1 min) se considera una sobretensión temporal típica. Esta amplitud puede definirse por un valor (máximo esperado), un grupo de valores pico o una distribución estadística completa de valores pico. La amplitud seleccionada de la sobretensión transitoria típica considerada es: el alcance y la duración de la sobretensión real en uso; la perturbación de amplitud/duración característica de la frecuencia de potencia del aislamiento considerado. Si no se conoce la última propiedad, por simplicidad, la amplitud puede tomarse como la sobretensión máxima real, cuya duración real es inferior a 1 min en uso, y la duración puede tomarse como 1 min. En ciertos casos se puede utilizar un procedimiento de coordinación estadística que describe la sobretensión típica ICONTEC Norma Técnica Colombiana NTC 3389 Guía de Aplicación de Coordinación de Aislamiento (Equivalente a IEC 71-2, Norma Británica) Cap. 2-página 11-28 Probable amplitud/duración de la sobretensión temporal esperada (Morales, 2008)

### ***2.2.9.3 Sobrevoltaje Temporal.***

Las fallas a tierra monofásicas y bifásicas producen las sobretensiones más altas en las fases de falla. Generalmente se cree que una falla a tierra monofásica produce las sobretensiones más altas y es típica de ese tipo de sobretensión. Estas sobretensiones se pueden calcular utilizando componentes simétricos utilizando las curvas recomendadas por la compañía de servicios públicos, usando estándares o herramientas de simulación. El factor de falla a tierra se define para un sistema de potencia trifásico como la relación entre el voltaje de frecuencia de potencia máxima entre una fase completa y tierra durante una falla a tierra que afecta a una

o más fases en cualquier punto del sistema al valor rms de la red, voltaje de fase a tierra, la frecuencia de potencia que se obtendría en un lugar dado si no hubiera falla. El factor de falla se define para el punto de falla (Cabrera, 2012)

#### ***2.2.9.4 Sobrevoltajes Transitorios.***

Se producen perturbaciones en la red eléctrica por descargas atmosféricas y/o paros libres o de tensión de los equipos, que provocan problemas que dañan los equipos principales o el aislamiento. Estos efectos resultan de sobretensiones asociadas con transitorios electromagnéticos causados por cambios repentinos en las condiciones de operación o configuración a lo largo de las líneas de transmisión. Esta tesis se estudió en la red eléctrica, especialmente se analizan las sobretensiones transitorias que se producen en las líneas de transmisión mediante el método propuesto por J. Martí en el dominio del tiempo disponible en el código ATP/DRAW (Morales, 2008)

#### ***2.2.9.5 Sobrevoltaje de Freno Lento.***

##### ***2.2.9.5.1 Maniobras de energización y recierre de líneas de transmisión.***

Estas operaciones de conmutación son las más comunes en los sistemas eléctricos y se pueden analizar en tres ciclos diferentes. El primero es el período de transición, cuando dominan los efectos de las ondas viajeras, cuya duración depende de la longitud de la línea de transmisión en la que se realiza la operación de control, este tiempo suele ser del orden de milisegundos. El segundo es el período dinámico, que se encuentra entre el período transitorio y el sistema estable, de naturaleza repetitiva y caracterizado por pequeñas variaciones en la forma de onda, que es aproximadamente periódica y consta de una tensión de frecuencia fundamental y

armónicos, especialmente el segundo y tercer armónico, este período puede durar hasta un segundo. Finalmente, el tercer período es el estado estable, donde el voltaje es periódico, pero puede estar muy distorsionado, por lo general durante este período ocurren sobretensiones cuando el polo receptor de la línea de transmisión está abierto, como en voltaje e inversa, ese tipo de voltajes puede tardar unos minutos (Jimenez, 2023)

Las sobretensiones resultantes del encendido y apagado dependen de las condiciones del sistema, siendo las más importantes:

- a) Potencia de cortocircuito del sistema eléctrico.
- b) Grado de compensación de la transmisión.
- c) Longitud de la línea eléctrica.
- d) Pérdidas en la docencia.
- e) Disponibilidad de equipo de protección.
- f) Sistema a nivel del suelo.
- g) Tensión antes del movimiento.
- h) Valor de la resistencia de preinstalación.
- i) Tiempo para aumentar la resistencia.
- i) Propagación entre varas.
- j) El valor de la carga residual de la línea en caso de terminación.

#### *2.2.9.5.2 Tensión de la línea de alimentación.*

Los picos de tensión de la línea de alimentación dependen de la tensión en cada fase del sistema donde se cierran los terminales del interruptor; Luego de cerrada la primera fase, las demás fases tienen ondas viajeras debido al acoplamiento entre ellas, estas ondas de tensión se esparcen por el cable, las cuales se reflejan en los terminales abiertos, donde ocurren las mayores sobretensiones.

El siguiente diagrama muestra los oscilogramas de los voltajes al principio y al final de la línea de transmisión cuando es energizada por una fuente infinita y una fuente de inducción, y es posible observar el aumento exponencial del voltaje de la línea de transmisión. Frente lento cuya constante de tiempo está determinada por la inductancia de la fuente y la impedancia de la línea, este aumento inicial exponencial también se produce al final de la línea. Las reflexiones múltiples producen cambios en las formas de onda, los intervalos de tiempo en los que ocurren estos cambios están determinados por otra constante de tiempo, el tiempo de propagación lineal (Jimenez, 2023)

#### *2.2.9.6 Sobrevoltaje de Freno Rápido.*

La sobretensión transitoria se produce en microsegundos (1/1000 de segundo) o incluso en milisegundos (1/1000000 de segundo) en un arranque y parada. Ahora entiendes lo rápido que puede ser el ascenso.

Y esto plantea otra pregunta: ¿cuánto dura un tiempo más largo que la transición y cómo reacciona un esparcidor (o protector contra sobretensiones) ante esta situación?

Esta sobretensión se denomina sobretensión transitoria (TOV). Una salpicadura temporal no es nada que un protector contra salpicaduras no pueda manejar. En realidad, la protección contra sobretensiones es víctima de una sobretensión temporal. Una sobretensión, sin importar cuán severa sea, dura solo microsegundos o milisegundos y, por lo tanto, solo entrega una cantidad limitada de energía al protector contra sobretensiones. Sin embargo, debido a que el TOV es mucho más largo, en realidad tiene un efecto destructivo en los protectores contra sobretensiones, que generalmente se basan en el varistor de óxido de metal (MOV) y, por lo tanto, en el MOV dentro del protector contra sobretensiones. El sobrevoltaje se calentará y eventualmente producirá humo y se incendiará.

Por lo tanto, una red eléctrica estable es crucial para todos los productos eléctricos, incluida la protección contra sobretensiones. Bueno, podría preguntar: vivo en un área donde la red eléctrica está dañada. ¿En este caso TVSS no es adecuado? Los fabricantes europeos de protectores contra salpicaduras nos han dado un muy buen ejemplo. Hace aproximadamente 20 años, los fabricantes europeos de protectores contra sobretensiones comenzaron a exportar protectores contra sobretensiones a China, pero muchos de esos SPD que funcionan muy bien en Europa se han grabado en las aplicaciones. Una de las principales razones es que Europa tiene una red eléctrica muy estable y, por lo tanto, los fabricantes de SPD lanzan protectores contra sobretensiones con un  $U_c/MCOV$  (Voltaje continuo/Voltaje máximo sobre continuo) de alrededor de 255 V. Sin embargo, hace 20 años, la red eléctrica de China estaba lejos de ser perfecta y las fluctuaciones de voltaje son comunes. El problema se resolverá si los fabricantes de SPD adoptan una  $U_c/MCOV$  más alta.

Siempre que elija TVSS con  $U_c/MCOV$  más alto, puede usar TVSS en áreas con fluctuaciones de voltaje. Por ejemplo, cuando exportamos nuestros protectores contra sobretensiones a la India, generalmente usamos  $U_c/MCOV$  a 320 V o 385 V (Briñez, 2002)

#### ***2.2.9.7 Sobrevoltaje de Freno muy Rápido.***

Una de las consideraciones más importantes cuando se ajusta correctamente una unidad es el tiempo de aceleración desde cero hasta la velocidad nominal. El tiempo de subida es importante para evitar el sobrecalentamiento debido a las corrientes de arranque altas. Cuanto mayor sea el par de aceleración, menor será el tiempo de arranque; los fabricantes de motores eléctricos suelen especificar un tiempo máximo de arranque que debe elegirse según la aplicación, porque el tiempo que tarda el motor en alcanzar la velocidad nominal depende de la carga que se utilice. Por las razones anteriores, es común que cuando cambia el proceso o la carga, es necesario redefinir el tiempo de aceleración del variador, que es un parámetro que se puede inyectar en el variador (Briñez, 2002).

#### **2.2.10 Rango de Frecuencias de Sobrevoltajes.**

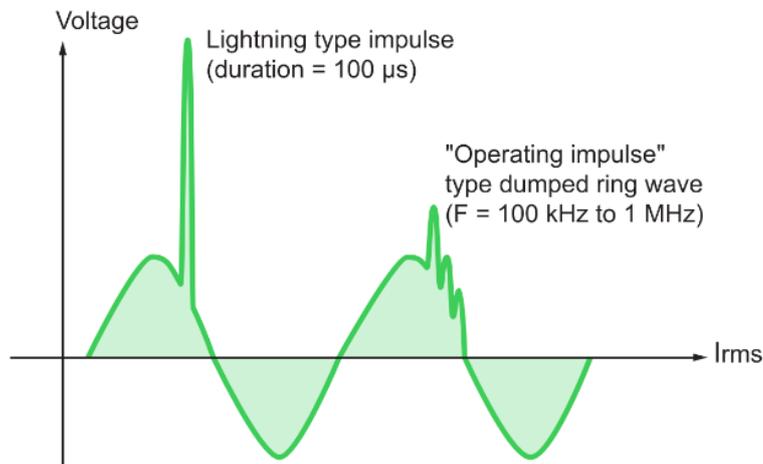
Sobretensión (en un sistema) Cualquier tensión de fase a fase o tensión de fase a fase cuyo valor pico exceda el pico correspondiente a la tensión más alta de la definición del dispositivo en el Diccionario Electrotécnico Internacional (IEV 60-03-09).

##### ***2.2.10.1 Diferentes tipos de sobretensión.***

La sobretensión es un pulso u onda de tensión que coincide con la tensión nominal de la red.

**Figura 15**

*Sobretensión*



*Nota:* La figura muestra la sobretensión. Fuente: SZ Cominsa (2023)

Este tipo de sobretensión se caracteriza: tiempo de subida  $t_f$  ( $\mu\text{s}$ ); gradiente  $S$  ( $\text{kV}/\mu\text{s}$ ). La sobretensión perturba el equipo y genera radiación electromagnética. Además, la duración del voltaje ( $T$ ) provoca un pico de energía en los circuitos eléctricos que puede destruir el equipo. Principales características de las sobretensiones. Cuatro tipos de cargas pueden perturbar las instalaciones y cargas eléctricas: Sobretensiones de conmutación: sobretensiones o averías de alta frecuencia provocadas por un cambio en el estado estable de la red eléctrica (durante el funcionamiento de la tarjeta). Sobretensiones en la frecuencia de alimentación: sobretensiones de la misma frecuencia que la red (50, 60 ó 00 Hz) provocadas por un cambio permanente en el estado de la red (después de un defecto: defecto de aislamiento, defecto de neutro, etc.). Picos de descarga electrostática: descargas muy breves (unos pocos nanosegundos) de muy alta frecuencia provocadas por la descarga de cargas eléctricas acumuladas (p. ej., una persona que camina sobre una alfombra sobre un suelo aislado está cargada eléctricamente con varios kilovoltios). Sobretensiones atmosféricas (Briñez,2002).

### **2.2.10.2 Ondas viajeras en Líneas de Transmisión.**

#### *2.2.10.2.1 Ecuación de la onda Viajera.*

$$y_1(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi)$$

Las ondas estacionarias son creadas por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza, que tienen las mismas propiedades físicas, pero que se mueven en direcciones opuestas, o en otras palabras son el resultado de la superposición de la onda entrante y la onda reflejada. Las ondas estacionarias son ondas donde los puntos específicos de la onda, llamados nodos, permanecen estacionarios.

Los puntos llamados nodos son aquellos que nunca se mueven y donde la amplitud de la onda estacionaria es siempre cero. En el centro de los nodos hay puntos llamados antinodos donde la amplitud del movimiento es máxima. Un cierto tiempo dos nodos adyacentes están separados por una distancia  $\lambda/2$ , que es lo mismo que dos antinodos adyacentes (Jimenez, 2023)

#### *2.2.10.2.2 Impedancia característica.*

La Impedancia Característica es la resistencia característica de una línea de transmisión es la relación entre la variación de potencial aplicada y la corriente sometida por la línea en el supuesto caso de que su longitud sea infinita o que sea finita pero no haya reflejos (Jimenez, 2023)

Para transmitir la máxima potencia desde la fuente a la carga (sin potencia reflejada), la línea de transmisión debe terminar en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea. La resistencia característica de una línea de transmisión ( $Z_0$ ) es una cantidad compleja expresada en ohmios, que idealmente no depende de la longitud de la línea y no se puede medir. La

impedancia característica (a veces llamada impedancia de drenaje) es la impedancia vista desde una línea infinitamente larga, o la impedancia vista desde una longitud finita de línea terminada con una carga completamente resistiva igual a la impedancia característica de la línea. Una línea de transmisión almacena energía en su inductancia y capacitancia disipadas (Briñez,2002).

#### *2.2.10.2.3 Reflexión y Refracción de ondas viajeras.*

Cuando el interruptor se cierra en  $t = 0$  s, el valor máximo de la fuente de alimentación es uno por unidades, y una onda de voltaje con una amplitud de 1 por unidad viaja a lo largo de la línea de aire. Cuando la onda de voltaje alcanza la discontinuidad donde el cable está conectado al cable, la onda incidente decae en una onda reflejada de amplitud  $(0 - 00) / (0 00) = -0.818$  por unidad, y se emite la onda con una extensión de  $2 \times 0 / (0 00) = 0,182$  unidades aprox. La onda transmitida viaja a lo largo del cable hasta los transformadores descargados. Un transformador descargado tiene una impedancia característica muy alta en comparación con el cable y, por lo tanto, puede tratarse como un terminal de circuito abierto; el voltaje se duplica cuando la onda reflejada se suma a la onda de voltaje entrante. La onda de voltaje que viaja desde el transformador descargado regresa al conductor y se encuentra nuevamente con la ruptura donde se conectan la línea y el cable y la onda reflejada regresa al transformador y la ola emitida cabalga hacia la fuente. Teoría de las ondas viajeras solo con fines académicos o de evaluación. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin permiso del autor. Este proceso continuo y continuo. Dado que el fenómeno de la onda está en la escala de tiempo de microsegundos, se puede suponer que el voltaje de la fuente permanece constante, lo que permite que las ondas electromagnéticas se reflejen y

refracten. Si crea un diagrama en el que el tiempo de viaje se coloca en el eje vertical de y la distancia en el eje horizontal, entonces se llama, diagrama de cuadrícula (González, 2007)

## **2.2.11 Modelos Matemáticos de Líneas de Transmisión.**

### ***2.2.11.1 Modelo de Línea de Parámetros Concentrados Constantes.***

Los modelos para calcular los parámetros de la línea de transmisión están relacionados con el tipo de fenómeno electromagnético que se estudia. Estos modelos representan la línea eléctrica en toda su longitud.

En soluciones de equilibrio, las líneas se pueden modelar con parámetros agrupados, lo que genera resultados bastante precisos. Las soluciones transitorias utilizan modelos de parámetros agrupados de acuerdo con el análisis transitorio deseado, ya sea con parámetros agrupados constantes, como el modelo de Bergeron, o con parámetros dependientes de la frecuencia, como el modelo J. Marti con parámetros agrupados (transitorios) Parámetros agrupados estándar Parámetros dispersos dependientes de la frecuencia.

Este artículo analiza los transitorios electromagnéticos lentos, de modo que las sobretensiones pueden describirse como ondas viajeras. Por lo tanto, se debe considerar representar una línea de transmisión con parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia, ya que tanto la corriente como el voltaje varían a lo largo de la línea. Los modelos matemáticos de línea de transmisión de parámetros distribuidos se basan en ecuaciones diferenciales con acoplamiento de matriz.

### ***2.2.11.2 Modelo de parámetros distribuidos constantes.***

El modelo de parámetros distribuidos constantes es un modelo de frecuencia constante y se basa en la teoría de ondas viajeras en línea de transmisión sin pérdidas, cuyos parámetros P y Q son constantes y están distribuidos a lo largo de toda su longitud.

### ***2.2.11.3 Modelo de Bergeron.***

El modelo de Bergeron es un modelo lineal que utiliza parámetros de dispersión constante, es menos preciso que los modelos lineales dependientes de la frecuencia, pero se puede utilizar con éxito para analizar problemas con variaciones de frecuencia no muy grandes (Jimenez, 2023)

### ***2.2.11.4 Modelo Pi Nominal.***

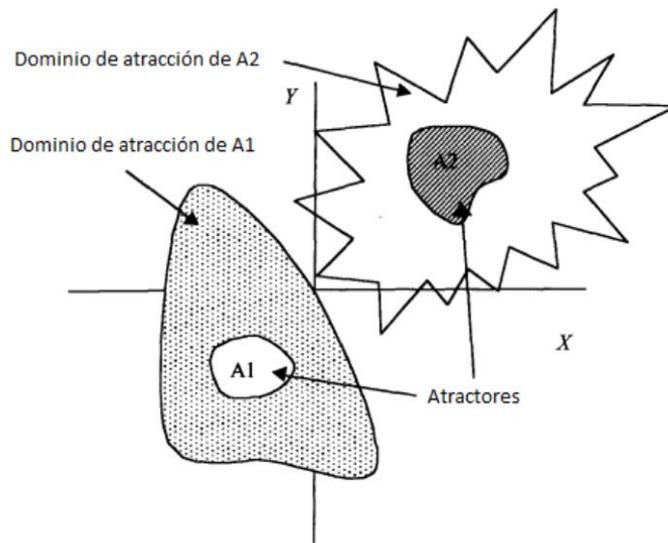
Modelo PI nominal se usar para analizar soluciones transitorias, particularmente porque las ondas viajeras no se muestran en forma exacta, en función a la longitud de la línea (Jimenez, 2023)

Se pueden conectar en cascada múltiples bucles de PI para estimar la naturaleza distribuida de una línea larga, pero esto conduce a un tiempo de simulación más largo y una menor precisión. Una ventaja muy importante es que los circuitos PI no requieren pasos de tiempo de simulación. Por tanto, estos modelos son adecuados para estudios de transitorios, donde es necesario ahorrar tiempo de ordenador para poder dar un paso de tiempo superior al tiempo de propagación de la línea modelada. De hecho, esta ventaja es importante para simular franjas relativamente cortas donde los tiempos de propagación son muy pequeños. Otra ventaja de los modelos PI es que la solución de estado estacionario es precisa.

Además, los modelos PI suelen ser bastante precisos en aplicaciones en las que el contenido de frecuencia se encuentra principalmente alrededor del componente principal para el que se calculan los parámetros (Bríñez,2002).

**Figura 16**

*Atractores A1 y A2 con sus dominios de atracción*



Representación esquemática de dos atractores A1 y A2 con sus dominios de atracción.

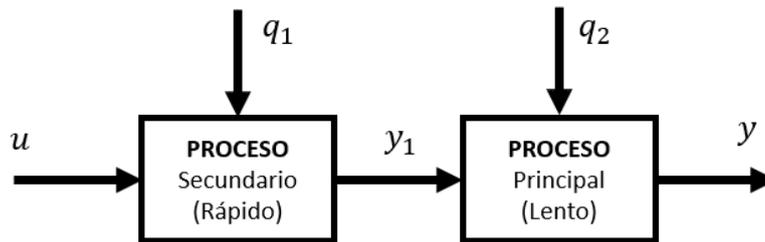
*Nota:* La figura muestra atractores con sus respectivos dominios de atracción. Fuente: Avila (2016)

### **2.2.11.5 Modelo Pi en Cascada.**

Es una estructura de control que utiliza de manera más efectiva el diseño y el diseño de cualquier estructura de control de retroalimentación. Para comprender mejor el concepto de control en cascada, suponga que todo proceso industrial se divide en varias etapas por las cuales pasa la principal variable controlada, excepto que en cada etapa del proceso puede haber una perturbación que afectaría significativamente mi variable principal, como podemos ver en la siguiente figura:

**Figura 17**

*Etapa del proceso*



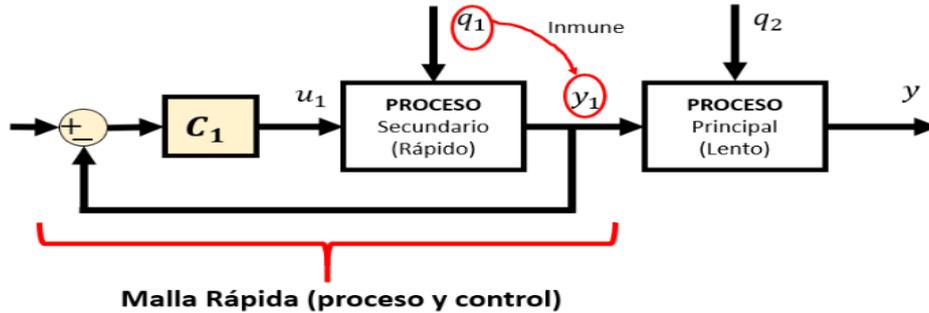
*Nota:* La figura muestra un diagrama de flujo del proceso principal y secundario. Fuente: Castaño (2023)

Del diagrama anterior, podemos concluir que sería muy interesante si pudiéramos medir algunas de estas perturbaciones antes de que afecten mi proceso de variable clave. También se puede entender que cuantos más elementos (bloques) tengamos, más lento es mi proceso porque recoge toda la dinámica de cada bloque. Del gráfico anterior, sería muy interesante si pudiéramos medir algunas de estas perturbaciones antes de que afecten a la variable principal de mi proceso.

También se puede entender que cuantos más elementos (bloques) tengamos, más lento es mi proceso porque recoge toda la dinámica de cada bloque. Si logro medir la variable intermedia  $y_1$ , es interesante poner la variable intermedia configurada o diseñada de acuerdo a alguna estrategia mostrada en la página web para hacer inmune a la variable intermedia  $y_1$  a la posible variable de perturbación  $q_1$ .

**Figura 18**

*Malla rápida*



*Nota:* La figura muestra el diagrama de flujo del proceso de una malla rápida. Fuente: Castaño (2023)

Con esta red de control, borramos la alarma  $q_1$  rápidamente porque la red de control es rápida. Porque mantuvimos el hilo rápido y al incluir un controlador puede hacer que la respuesta sea aún más rápida. Con esto, mi segunda dinámica, que es el proceso principal, no ve el efecto de la perturbación  $q_1$ , porque ya la matamos en el primer lazo de control. Este nuevo controlador busca un nuevo conjunto de procesos pertenecientes a la red para un control efectivo, donde debido a la velocidad muy rápida de la dinámica interna, no se siente en la red externa, por lo que es solo como un proceso maestro diseñado del controlador. Por eso se llama control en cascada porque hay varios controladores en la cadena de control. En el bucle interno cerrado (que se dibuja en el diagrama de bloques), tiene su propia dinámica, pero dado que estas dinámicas son mucho más rápidas que las externas, la dinámica del bucle interno casi no tiene efecto en el controlador externo. Loop, sería como reemplazar ese bloque con 1, porque casi siempre está en el punto fijo, y el loop externo ya no tiene esta perturbación  $q_1$  porque fue eliminada, así que en

realidad es como si agregáramos el loop principal del controlador (C2) (Jimenez, 2023)

## **2.2.12 Normatividad.**

### ***2.2.12.1 Guía IEEE para aplicaciones de relés de protección en líneas de transmisión; Normatividad (IEEE C37.113).***

En esta guía contiene información sobre conceptos de línea de resguardo de CA. Además, se presentan las aplicaciones de los conceptos a los sistemas de seguridad eléctrica aprobados. Se trata la coordinación de ajustes, los tiempos de funcionamiento, las características de los relés, las conexiones de línea, el reenganche automático y el uso de canales de comunicación. A demás se incluyen sistemas de protección dedicados, protección de línea multiterminal y disparo y reenganche en una etapa. Se examina la influencia de varios parámetros eléctricos y consideraciones de rendimiento del sistema en la selección de relés y sistemas de protección. El propósito de este manual es proporcionar una referencia para seleccionar sistemas de relés y ayudar a los ingenieros de relés de protección menos experimentados a aplicar sistemas de resguardo a las líneas de transmisión. (Espinoza & Estupiñán,2010)

Las instalaciones de ST, incluyendo las subestaciones eléctricas de las centrales de generación conectadas al SEN, deberán cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

a. El diseño, la fabricación, las pruebas y la instalación se llevan a cabo de acuerdo con los estándares nacionales aplicables. En ausencia de estándares nacionales específicos, se aplican los estándares internacionales o los estándares publicados por organizaciones como IEC. MAJRA; DIN/VDE; ASTM/ANSI; IEEE; ASCE;

CIGRE y Grupos de Investigación del Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T).

b. Deben permitir el funcionamiento de la educación especial de acuerdo con los requisitos de la Regla vigente.

c. Deben trabajar con el nivel máximo de corriente de cortocircuito de al menos puntos de conexión SEN. Las condiciones y el método para calcular el nivel máximo de corriente de cortocircuito se definen en el apéndice técnico de NT "Cálculo del nivel máximo de corriente de cortocircuito".

d. El nivel de aislamiento de estos puntos de conexión debe estar debidamente coordinado con la instalación a la que están conectados y confirmado por la Encuesta de coordinación de aislamiento.

e. Si una instalación existente se traslada a otro sitio, se usa de manera diferente, se usa para un propósito diferente o se modifica, se aplicarán las disposiciones vigentes en la fecha de cualquier instalación mencionado anteriormente. Sin perjuicio de lo anterior, si las situaciones mencionadas son anteriores a la instalación del nuevo equipo y se ha informado al coordinador en consecuencia y con antecedentes sobre la adquisición de nuevos equipos, antes de la normativa vigente al principio de tales situaciones, a menos que pueda representar un riesgo de seguridad para el maestro de educación especial.

f. El lineamiento de las subestaciones, cuartos eléctricos y equipos de cuarto eléctrico debe permitir el crecimiento armónico de subestaciones y el libre acceso a transmisiones, sitios, considerando los planes de expansión de la transmisión y las decisiones de la Comisión autorizando la ejecución de obras relacionadas con las instalaciones de transmisión.

g. En montajes con tensión mayor o igual a 23 kV, AIS no deberá utilizar varillas rígidas o varillas tubulares montadas sobre aislantes de pedestal. Como excepción a y en casos con justificación, se pueden utilizar barras rígidas con elementos para absorber desplazamientos relativos entre apoyos de manera que no se apliquen los esfuerzos correspondientes. Como excepción se consideran los elementos del interruptor, cuya tensión no supere los 33 kV.

h. Las estructuras deben diseñarse modularmente para que las extensiones y los cambios de configuración se realicen de manera sencilla, minimizando el impacto en las instalaciones existentes y los tiempos de despliegue.

i. La conexión de dispositivos no debe reducir el rendimiento de las instalaciones existentes, es decir, reducir el grado de fiabilidad. Para ello, los dispositivos de conexión deben mantener la configuración de bus de la subestación a la que está conectado.

j. No se deben realizar conexiones de bypass en las líneas de la red de transmisión del servicio público. (Espinoza & Estupiñán,2010)

### **2.3. Definición de términos**

**2.3.1 SEP:** Se define como un sistema eléctrico de potencia, en el cual intervienen diferentes componentes eléctricos de potencia como Transformadores, líneas de Transmisión, Subestaciones entre otros.

**2.3.2 FALLA:** Se define como el evento temporal o continuo que genera la detención de operaciones de transmisión, generación o distribución, esta es producida por eventos externos o internos al SEP.

**2.3.3 SOBREVOLTAJE:** Condición en la cual uno o más elementos del SEP, se encuentran por encima de los valores nominales de tensión o voltaje, este es producido por diferentes eventos de falla dentro del SEP.

**2.3.4 IMPEDANCIA:** Característica eléctrica de los componentes de un SEP que nos indica la oposición de estos al paso de la corriente eléctrica.

**2.3.5 RELE:** Equipamiento eléctrico y/o dispositivo de protección en el cual existen diferentes funciones para diferentes eventos de falla y posterior consecuencia dentro del SEP.

**2.3.6 DEMANDA:** Se define como la capacidad de consumo de potencia eléctrica por un determinado sector de clientes o un solo cliente, esta puede ser máxima o mínima de acuerdo con la utilización de la misma.

**2.3.7 PROTECCION:** La disposición para uno o más elementos del SEP que permite la mitigación y aislamiento en el menor tiempo posible de una falla producida dentro del SEP.

**2.3.8 TRANSITORIOS:** Eventos definidos en un periodo corto de tiempo, pero con impactos importantes dentro de un SEP.

**2.3.9 TRANSMISION:** Se define como el conjunto de elementos eléctricos que permiten el transporte de la energía eléctrica optimizando las pérdidas y garantizando calidad como continuidad del servicio.

**2.3.10 OPERACIÓN:** Estado de SEP, en el cual se logra generar, transmitir o distribuir energía eléctrica.

**2.3.11 SOBRECORRIENTE:** Se define como los valores de corriente de un elemento o más del SEP, sobrepasan los valores nominales de los mismos, esto producto de una falla dentro del SEP.

**2.3.12 AJUSTE:** Condiciones en las cuales se logra la parametrización de elementos de protección de acuerdo con la normativa como a los cálculos eléctricos de los mismos.

**2.3.13 COORDINACION:** Acción que permite que los dispositivos de protección actúen de tal forma de garantizar la mitigación y aislamiento de la falla lo más cercano al lugar físico del evento de falla.

**2.3.14 REACTANCIA:** Se define como la oposición al paso de corriente alterna por elementos de composición inductiva o capacitiva dentro de un SEP.

**2.3.15 CORTOCIRCUITOS:** Evento de falla en uno o más elementos de un SEP, tienen un contacto franco entre sus fases o contacto con tierra, provocando que el valor de la tensión tienda a cero elevando los valores de corriente, generando así daños dentro del SEP.

**2.3.16 FLUJO:** Se define como el paso de potencia por todos los elementos de un SEP, en una operatividad en condiciones de máxima y mínima demanda.

**2.3.17 EVENTO:** Acción dentro de SEP, temporal o sostenida en el tiempo, pero esta es externa a una operatividad normal del mismo, es decir, se define como la acción que perturba la operatividad de un SEP.

**2.3.18 CONEXIÓN:** Acción de ingresar un elemento del SEP a la operación cuando está ya se encuentra en funcionamiento.

**2.3.19 APERTURAR:** Acción que se define como la desconexión de uno o más elementos de un SEP, por acción de una falla o por condiciones definidas por maniobras de operatividad.

**2.3.20 OPERACIÓN:** Se define como la puesta en marcha de un SEP, esta puede darse en diferentes condiciones de funcionamiento y operatividad de los elementos del SEP.

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Según lo explicado por Borja (2016); se puede clasificar esta investigación por el tipo aplicada, ya que al realizar los ajustes idóneos para los relés de sobrecorriente y relés de distancia y dichos ajustes se aplicará para mejorar la coordinación de protecciones tanto instantáneas como temporales.

#### **3.2 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación, según se indicó por Borja (2016) será del tipo explicativa, ya que se va a realizar un estudio donde se realizará un análisis de como las fallas eléctricas pueden causar daños a los equipos que pertenecen al sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur, y se explicara como un correcto ajuste de los tiempos de disparo de los relés de protección harán nuestro sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

#### **3.3 Población y muestra**

En este trabajo de investigación la población vendría hacer todas las instalaciones líneas de Transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

En este trabajo de investigación la muestra vendría hacer el sistema de Protección y los Transitorios de toda la línea de Transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.

### **3.4 Descripción de instrumentos para recolección de datos**

Se utilizarán los siguientes instrumentos para la recolección de datos y el análisis del presente trabajo que serán a continuación:

- Microsoft Office (Excel, Word)
- AutoCAD
- Software de Sistemas de Potencia Digsilent Power Factory.

Estos instrumentos nos permitirán la Recolección de datos técnicos tanto de la línea 138 kV, subestación Ilo 1 y subestación Ilo Electrosur, pertenecientes al sistema de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur. De esta manera buscaremos instrumentos de Búsqueda del cronograma de cortocircuitos y fallas y Técnicas utilizadas para el cálculo de parámetros eléctricos.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Presentación de Resultados**

##### **4.1.1 Adquisición de datos y Modelamiento del SEP.**

Desarrollaremos la data del SEP, obteniendo características que permiten la aplicación de modelos eléctricos y matemáticos que conllevaran a una delimitación del área de intervención.

La información es proporcionada por la base de datos de fichas técnicas registradas en el COES (2014) la cual es evaluada y se fundamenta para su utilización de los análisis.

##### ***4.1.1.1. Línea de transmisión en 138 kV.***

La línea de transmisión Ilo 1 - Ilo Electrosur está diseñada para la distribución de energía a 138 kV producida por la empresa Engie Energía Perú.

**Tabla 2***Características técnicas de la LT 138 kV*

Línea de transmisión	Longitud [Km]	Capacidad		Descripción
		Total (MVA)		
SE Ilo 1 - SE Ilo Electro sur (L-1391)	14.51	60		1 línea simple haz de 3 conductores HD-CU

La línea de transmisión Ilo 1 - Ilo Electro sur, se encuentra ubicada en la Región de Moquegua, provincia de Ilo, distrito de Pacocha.

La línea de transmisión Ilo 1 - Ilo Electro sur, cuenta con 49 estructuras desde su salida en la SE Ilo 1 hasta su llegada a la SE Electro sur.

#### ***4.1.1.2. Tipo de Estructura.***

Las líneas de transmisión de este proyecto son de 138 kV y van desde SE Ilo 1 hasta SE Ilo Electro sur atravesando diferentes tipos de altitudes y por ello se utilizan diferentes tipos de estructuras que se detalla en la siguiente lista.

**Tabla 3***Tipos de estructuras utilizadas en el recorrido de la LT*

<b>Numero de Estructuras</b>	<b>Tipo de Estructuras</b>
1	A
2	A1
3	C
4	D
5	D1
6	E
7	E1
8	F
9	J
10	J1
11	3TL

**4.1.1.3. Subestaciones.****4.1.1.3.1 Subestación Ilo 1.****Tabla 4***Parámetros del transformador de la SE Ilo 1*

<b>Descripción</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Potencia Nominal	70	MVA
Voltaje en el Primario	13.8	kV
Voltaje en el Secundario	138	kV
Tipo de Conexión	YNd1	

#### 4.1.1.3.2 Subestación Ilo Electrosur.

**Tabla 5**

*Parámetros del transformador de la SE Ilo Electrosur*

Descripción	Valores	Unidades
Potencia Nominal	25	MVA
Voltaje en el Primario	138	kV
Voltaje en el Secundario	10.5	kV
Tipo de Conexión	YNd1	

#### 4.1.1.4. Impedancias de las Líneas de Transmisión.

Dado que la línea sometida a estudio, es parte de un sistema interconectado es necesario tener las líneas próximas, tomando de ellas sus características mecánicas eléctricas.

**Tabla 6**

*Impedancia de la línea de transmisión*

Descripción	Longitud Km	Impedancia de la LT en ohm	Impedancia de Secuencia 0	Impedancia de secuencia positiva
SE Ilo 1 - SE Ilo Electrosur	14.51	1.642+7.83j	0.452+1.427j	<b>0.528j</b>

#### 4.1.1.5 Modelamiento del Tipo de torre de la LT Ilo 1 – Ilo Electrosur.

La línea de transmisión L-1391 (ILO 1 - ILO ELECTROSUR) alcanza una longitud de 14.51 Km, conformada por un circuito simple de una terna, suspendida a través de torres del tipo A.

- Un circuito constituido por una terna, es decir tres fases y cada uno constituido por un conductor del tipo HD CU, con una capacidad máxima de 60 MVA de potencia transferida.
- Hilo de guarda OPGW, para la comunicación con los equipos de la central.

#### **4.1.1.6 Modelamiento de la línea de Transmisión.**

La línea de transmisión L-1391 (ILO 1 - ILO ELECTROSUR), debe ser modelada bajo los criterios obtenidos de los datos del conductor, como las características del conductor, el tipo de torre y el distanciamiento tanto vertical como horizontal a lo largo del recorrido, como así también los datos del cable de guarda (OPGW) y la disposición geométrica de los conductores.

**Tabla 7**

*Características del conductor HD CU*

<b>Cable Conductor HD CU</b>	
Resistencia	0.0713 Ohm/km
GMR	10.22 mm
Diámetro Externo	28.15 mm

**Tabla 8**

*Características del cable de Guarda OPGW*

<b>Cable de Guarda OPGW</b>	
Resistencia	0.3342 Ohm/km
GMR	4.81 mm
Diámetro Externo	14 mm

Con los datos de la tabla 4 y 5 procedemos a ingresar los datos al software Power Factory Digsilent, de esta manera se determina los valores de impedancia de la línea.

Los datos característicos de la línea de transmisión L-1391, se muestran en el siguiente cuadro luego de ser obtenidos mediante el instrumento computacional.

**Figura 19**

*Características de la línea*

Rated Current (act.)	0.251 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	2.312242 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	74.71126 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.6097 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	2.23041 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	1.82364 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	7.045675 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	1.770322 A
Earth Factor, Magnitude	0.715889
Earth Factor, Angle	1.139178 deg

*Nota:* La figura muestra las características de la línea

#### ***4.1.1.7 Instrumentos de Medida.***

Los transformadores de medida, tanto los TC y TP, nos permitirán obtener un menor voltaje y corriente en su devanado secundario, logrando así que los instrumentos de protección puedan realizar las lecturas para su funcionamiento, las especificaciones técnicas son detalladas en la tabla 9 y 10.

**Tabla 9***Transformador de Corriente*

<b>Descripción</b>	<b>TC</b>	<b>Unidades</b>
Relación de transformación	2x100/5	A
Frecuencia	60	Hz
Burden y clase de precisión	Medición	30VA,0.2
	Protección	30VA, 5P20

**Tabla 10***Transformador de Voltaje*

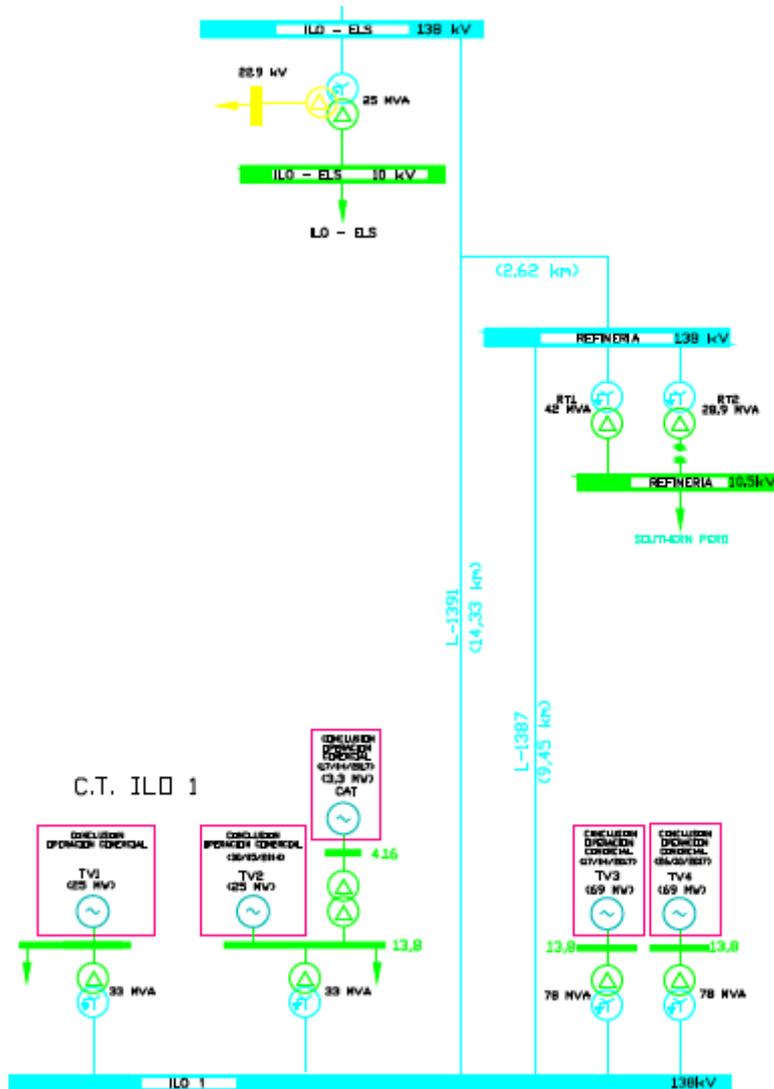
<b>Descripción</b>	<b>TC</b>	<b>Unidades</b>
Lado de Alta	69	kV
Lado de Baja	6.6	kV
Frecuencia	60	Hz

**4.1.1.8 Modelamiento del SEP Mediante el Software P.F. Digsilent.**

El estudio es en la línea L-1391, sin embargo, es prioritario realizar el modelamiento general del SEP que rodea a dicha línea para así lograr un análisis fidedigno de protecciones y análisis transitorio, en la fig. 20 se puede observar el equivalente del sistema que rodea a la línea L-1391.

Figura 20

Diagramación del SEP



Nota: La figura muestra la diagramación del SEP

#### 4.1.1.9 Flujos de Potencia y Cortocircuitos.

Para analizar la mejora en la línea de transmisión mediante la parametrización adecuada de equipos de protección es necesario obtener resultados de las fallas que eventualmente existen en esta, por consiguiente, la investigación presenta los análisis realizados para este fin.

#### 4.1.1.9.1 Flujo de Potencia.

El comportamiento de los flujos de potencia realizados denota el comportamiento del SEP en condiciones normales de operación, también se obtiene datos como el voltaje y la corriente nominal, para este caso con los datos anteriormente proporcionados.

Los flujos de potencia se realizan también para una futura proyección sobre el SEP, es así como la tabla 11 y 12 nos muestra los valores obtenidos en máxima demanda de flujo, las corrientes de interés son la que se encuentran al inicio y final de la línea de Transmisión.

**Tabla 11**

*Flujo de Potencia en el inicio de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda máxima*

Descripción	Início LT	P[MW]	Q[Mvar]	L [%]	I[kA]
LT Ilo 1 - Ilo Electrosur	Barra Ilo 1 138 kV	14.91	1.11	14.81	0.063

**Tabla 12**

*Flujo de potencia para el fin de la LT Ilo 1 - Ilo Electrosur con demanda máxima*

Descripción	Início LT	P[MW]	Q[Mvar]	L [%]	I[kA]
LT Ilo 1 - Ilo Electrosur	Barra Ilo Electrosur 138 kV	14.95	0.19	25.132	0.063

La tabla muestra los resultados del flujo de potencia ejecutado en mínima demanda.

**Tabla 13***Flujo de Potencia en el inicio de la LT Ilo 1 - Ilo Electro sur con demanda mínima*

Descripción	Início LT	P[MW]	Q[Mvar]	L [%]	I[kA]
LT Ilo 1 - Ilo Electro sur	Barra Ilo 1 138 kV	1.52	16.54	27.41	0.07

**Tabla 14***Flujo de potencia para el fin de la LT Ilo 1 - Ilo Electro sur con demanda minima*

Descripción	Início LT	P[MW]	Q[Mvar]	L [%]	I[kA]
LT Ilo 1 - Ilo Electro sur	Barra Electro sur 138 kV	0.42	11.49	25.77	0.05

**4.1.1.9.2 Cortocircuitos en la L.T. L-1391 (Ilo 1 - Ilo Electro sur).**

Realizar cortocircuitos en máxima y mínima demanda (1f-t 2f-t 2f-3f)

**Tabla 15***Cortocircuitos en la L.T. L-1391 (Ilo 1 - Ilo Electro sur)*

LT Ilo 1 - Ilo Electro sur	1F-T[A]			2F-T[A]			2F[A]			3F[A]		
	0Ω	10Ω	20Ω	0Ω	10Ω	20Ω	0Ω	10Ω	20Ω	0Ω	10Ω	20Ω
Resistencia de Falla												
Cortocircuito al 1% de la Línea	355	348	334	339	351	346	247	247	246	250	250	249
Cortocircuito al 99% de la Línea	339	308	281	315	310	291	188	168	183	244	338	231

**4.1.1.10 Ajustes y Coordinación de Protecciones.**

*4.1.1.10.1 Coordinaciones y Ajuste de la Protección de Sobrecorriente 51/50 de la LT.*

Las acciones realizadas para la mejora de la línea de transmisión será la correcta parametrización de dispositivos de protección en el SEP, para ello es necesario la correcta obtención de criterios de coordinación y ajustes de tal forma que se garantice la continuidad del servicio y la calidad del mismo.

*4.1.1.10.2 Configuración de la Función 51P.*

Para realizar el ajuste en un valor que se ubique en el rango de la corriente mínima de cortocircuito y la corriente de demanda, a esta corriente la llamaremos corriente de pick up o corriente de arranque de relé.

Para la obtención de las corrientes pick up, se sigue el procedimiento detallado por la IEEE C57.13 en donde se determina el valor de K, el cual para casos generales se encuentra en 1 y 1.5, luego de ello se procede a la obtención de la corriente pick up del relé 51P.

$$K = \sqrt{1 + 2e^{\left(\frac{4\pi\tau}{X}\right)}} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 9}]$$

Donde:

X = Reactancia de la línea

r = Resistencia de Línea

$\tau$  = Constante de tiempo

De allí podemos expresar la corriente pick up como:

$$I_{pickup} = \frac{K * ID_{max}}{RTC} \dots\dots\dots [Ecuación 10]$$

Donde:

$I_{pickup}$  = Corriente de arranque del rele.

$ID_{max}$  = Corriente de demanda Maxima.

$RTC$  = Relacion de Transformacion

La corriente de demanda máxima que se encuentra en la tabla 11 y 12 y la relación de transformación ubicada en la tabla 4 y 5 para el valor de K normalizado con la IEEE se tomará un valor de 1.5 para el cálculo de la corriente de fase y el valor de 1.2 para tierra.

Para el cálculo del tiempo de actuación de cada relé se utilizan las constantes de la curva brindadas por la normatividad IEEE C57.13 dichos valores se presentan en la tabla 16.

**Tabla 16**

*Constantes para las curvas norma ANSI/IEEE*

<b>Tipo de Curva</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>\gamma</math></b>
Inversa	2.0938	8.9342	0.17966
Inversa Corta	1.2938	0.2663	0.03393
Inversa Larga	1	5.6143	2.18592
Moderadamente Inversa	0.02	0.0103	0.0228
Muy Inversa	2	3.922	0.0982

Los tiempos de actuación para cada relé se obtienen mediante:

$$t[s] = \left[ \frac{\beta}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^\alpha - 1} + \gamma \right] * k \dots\dots\dots[\text{Ecuación 11}]$$

Donde:

*t = Tiempo de actuación del rele en segundos*

*k = Dial (Multiplicador del tiempo)*

*I<sub>f</sub> = Corriente de Falla*

*I<sub>s</sub> = Pick up (Corriente de arranque)*

*α, β, γ = Constantes*

Usando la ecuación 11 logramos encontrar.

**Tabla 17**

*Valores de corriente de falla y corriente de pick up*

<b>Corrientes de Ajuste</b>	<b>Barra Ilo 1</b>	<b>Barra Ilo Electrosur</b>
If	243.2	8.9342
Is	1.2938	0.2663

*4.1.1.10.3 Configuración de la función 50P.*

El ajuste de la función instantánea 50 se obtiene mediante una falla 3F (trifásica) al 99% de la LT, el resultado se multiplico por el valor de “k” (Ecuación 9) La norma IEEE C57.13 indica que el rango del valor de K varia 1-1.5. Para el análisis de este

proyecto se considerará el valor de 1.2. valor tomado de dicho resultado que se encuentra en la tabla 17. obteniendo así la corriente pick up del relé 50.

Los criterios expuestos en las ecuaciones (9, 10, 11) nos parametrizan el desarrollo del cálculo matemático en el software MATLAB obteniendo los valores de ajustes para cada uno de los relés.

#### 4.1.1.10.3.1 Fichas de ajuste.

La curva que se utilizará para la determinación de todos los casos de coordinación que se realiza en el presente estudio, será la curva normalizada ANSI-IEEE de tiempo inverso.

**Tabla 18**

*Corriente de ajuste y tiempo de operación fase*

Relé	Fase			
	51		50	
Barra	$I_{Tap}$	$T_{dial}$	$I_{Tap}$	$T_{dial}$
Ilo 1	1.2938	0.2663	0.03393	
Ilo Electrosur	2	3.922	0.0982	

**Tabla 19**

*Corriente de ajuste y tiempo de operación neutro*

Relé	Fase			
	51		50	
Barra	$I_{Tap}$	$T_{dial}$	$I_{Tap}$	$T_{dial}$
Ilo 1	1.2938	0.2663	0.03393	
Ilo Electrosur	2	3.922	0.0982	

## 4.2 Contratación de hipótesis

Para la obtención de las métricas correspondientes a la actuación de cada relé, se simulará fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas de tal forma que se pueda verificar si la coordinación y su ajuste son correctos en cada zona de solapamiento.

### 4.2.1 Ajustes del Relé 50 – 51F Para una falla Trifásica.

Se requiere analizar una falla trifásica y observar, los tiempos de actuación de cada relé en su función de sobrecorrientes, siendo así que la actuación de ellos está en los 0.579s y 0.230s como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Tiempos de actuación de los relés 51 en falla 3F*

<b>Tiempos de actuación falla trifásica (Barra Ilo 1 138 kV)</b>	
Barra Ilo 1	579ms
Barra Ilo Electrosur	230ms

### 4.2.2 Ajustes del Relé 50 – 51F Para una falla Bifásica.

El ajuste al 1% de la línea para su análisis de la falla bifásica mediante el método completo obteniendo que los tiempos para estos son los que se muestran en la tabla 21.

**Tabla 21**

*Tiempos de actuación de los relés 51 en falla bifásica*

---

<b>Tiempos de actuación falla bifásica (Barra Ilo 1 138 kV)</b>	
Barra Ilo 1	345ms
Barra Ilo Electrosur	583ms

---

#### **4.2.3 Ajustes del Relé 50 – 51F Para una falla Monofásica.**

El ajuste al 1% de la línea para su análisis de la falla trifásica mediante el método completo obteniendo que los tiempos para estos son los que se muestran en la tabla 22.

**Tabla 22**

*Tiempos de actuación de los relés 51 en falla monofásica*

---

<b>Tiempos de actuación falla monofásica (Barra Ilo 1 138 kV)</b>	
Barra Ilo 1	103ms
Barra Ilo Electrosur	286ms

---

### **4.3 Discusión de resultados**

#### **4.3.1 Análisis de Transitorios Electromagnéticos de la L.T.**

##### ***4.3.1.1 Revisión de Modelos de Línea.***

La línea L-1391 Ilo 1 - Ilo Electrosur se encuentra establecida dentro de una línea larga pues esta cuenta con las características que estas implican siendo así que se detallan en la tabla 23.

**Tabla 23***Línea L-1391 Ilo 1 - Ilo Electrosur*

<b>Operador</b>	<b>Código</b>	<b>SE Salida</b>	<b>SE Llegada</b>	<b>Sistema</b>	<b>Calf.</b>	<b>Propietario</b>	<b>Tipo</b>
Southern Perú Copper Corporation Sucursal del Perú	L-1391	Ilo 1	Ilo Electrosur	I	S	Southern Perú Copper Corporation Sucursal del Perú	A

**Tabla 24***Características nominales de la LT L-1391*

<b>Ternas</b>	<b>Longitud</b>	<b>Tensión Nominal (kV)</b>	<b>Capacidad (MVA)</b>	<b>Tipo de Conductor</b>	<b>Calibre(mm<sup>2</sup>)</b>
1	14.51	138	60	HD-CU	151

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Primera.** Al establecer la coordinación de protecciones, es necesario conocer el comportamiento de estos en condiciones extremas o eventos transitorios, es por ello que las simulaciones nos muestran un tipo de protección de acuerdo a la situación.
- Segunda.** Es necesario una correcta coordinación de sistemas de protecciones eléctricas y un adecuado funcionamiento, para así evitar que, al ocurrir diferentes fallas, estas sean mitigadas y aisladas lo antes posible.
- Tercera.** Al ser implementada una correcta coordinación de protecciones, se obtendrán característica como sensibilidad, rapidez y una adecuada selectividad en el sistema que ocasionara menos perturbaciones o una rápida solución.
- Cuarta.** La línea Ilo 1 - Ilo Electrosur, al ser analizada y desarrollar sus eventos transitorios permite un mejor conocimiento de su comportamiento que permitirá que se optimice el desgaste de equipos por acción de maniobras.

## **5.2 Recomendaciones**

- Primera.** Se recomienda realizar las simulaciones de falla o cortocircuito en el escenario con una demanda menor para conseguir corrientes de falla menores.
- Segunda.** Se debe buscar aquellos puntos de mayor cercanía a la protección para configurar las corrientes de falla de mayor valor.
- Tercera.** Se recomienda simular distintos eventos de falla alrededor de la zona protegida, para así evaluar si la protección de distancia funciona correctamente en todas las zonas o si el tiempo de reacción del relé de sobrecorriente es parecida a alguna de las zonas del relé de distancia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avila, L. (2016). *Aportes al Estudio de la Ferroresonancia en Sistemas de Distribución Eléctrica Rural*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/figure/Representacion-esquemática-de-dos-atradores-A1-y-A2-con-sus-dominios-de-atraccion\\_fig1\\_314404964](https://www.researchgate.net/figure/Representacion-esquemática-de-dos-atradores-A1-y-A2-con-sus-dominios-de-atraccion_fig1_314404964)
- Borja, M. (2016). *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. Chiclayo, Lambayeque, Perú. Recuperado de <https://1library.co/document/y90kr2wy-metodologia-de-la-investigacion-para-ingenieros.html>
- Briñez, D. (2002). *Análisis de sobretensiones en sistemas de potencia con dispositivos FACTS* (Tesis de pregrado). Universidad La Salle, Bogotá, Colombia. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1564&context=ing\\_eléctrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1564&context=ing_eléctrica)
- Cabrera, M. (2012). *Simulación de transientes electromagnéticos en las líneas de transmisión de EAT* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/45626/1/D-83416.pdf>
- Calderon, C. & Nieves, J. (2022). *Estudio de la coordinación de protecciones para la línea en 69kV de transmisión San Antonio-Alazán* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21864>

- Calero, J. (2023). *La resistencia es la oposición que presentan los cuerpos al paso de la corriente eléctrica. Se mide en ohmios [W]*. Recuperado de [https://iesmjuancalero.educarex.es/archivos\\_insti/recurdptos/tecnolog/electrotenia/t2.htm](https://iesmjuancalero.educarex.es/archivos_insti/recurdptos/tecnolog/electrotenia/t2.htm)
- Castaño, S. (2023). *Control en Cascada*. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/>
- Caviedes, S. (2018). *Coordinación automática de protecciones de sobrecorriente para un sistema de distribución ante desastres naturales* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15771/1/UPS%20-%20ST003602.pdf>
- Ccapa, J. (2022). *Evaluación y optimización de sistema contra descargas atmosféricas en la interconexión de la central hidroeléctrica Chijisia - Set. Ananea en la línea de transmisión 22.9 kV* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/18331>
- Ccori, J. (2019). *Análisis de la estabilidad en estado estacionario y corto circuito de la línea de transmisión 138 kV Talta - Tambomayo y el impacto que genera al conectarse al sistema eléctrico interconectado nacional* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12617>

Circuit Globe. (2023). *Classification of Transmission Lines*. Recuperado de <https://circuitglobe.com/classification-of-transmission-lines.html>

COES (2014). *Criterios de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN*. Recuperado de <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-antioquia/ingeniería-eléctrica/criterios-de-ajuste-y-coordinacion-de-proteccion/4668385>

Departamento de matemática y física. (2020). *Guía N°6 física: Ley de ohm iv ° enseñanza media*. Recuperado de [https://www.colegiosantamariademaipu.cl/wp-content/uploads/2020/07/FISICA\\_Gu%C3%ADaN%C2%B06\\_IV%C2%B0EM\\_MagnitudesEléctricas\\_Ley\\_de\\_Ohm.pdf](https://www.colegiosantamariademaipu.cl/wp-content/uploads/2020/07/FISICA_Gu%C3%ADaN%C2%B06_IV%C2%B0EM_MagnitudesEléctricas_Ley_de_Ohm.pdf)

Espinoza, J. & Estupiñan, P. (2010). *Guía de selección de sistema de protección en subestaciones por medio de relés basados en microprocesadores aplicado en subestaciones de transmisión* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2093/13/UPS-GT000155.pdf>

Fluke. (2014). *¿Qué es la capacitancia?* Obtenido de <https://www.fluke.com/es-pe/informacion/blog/eléctrica/que-es-la-capacitancia>

Gonzales, C. (2001). *Conceptos Generales de Redes Eléctricas*. Recuperado de <http://www.oocities.org/stselectricos/clase1.pdf>

González, F. (2007). *Teoría de Onda Viajera*. 1-3. Recuperado de <https://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/AT/Anexo1.1HV-2007.pdf>

- Grainger, J. & Stevenson, W. (2015). *Fallas desbalanceadas de los sistemas de potencia*. Recuperado de <https://asp2dh.wordpress.com/fallas-desbalanceadas-de-los-sistemas-de-potencia/>
- Imse. (2015). *Ejecución del neutro puesto a tierra por resistencia de limitación en instalaciones de Alta Tensión*. Recuperado de <http://imseingeniería.blogspot.com/2015/05/ejecucion-del-neutro-puesto-tierra-por.html>
- Inducor. (2023). *El campo eléctrico*. Recuperado de <https://www.inducor.com.ar/academicos/alta-tension/alta-tension-capitulo4.html>
- Inga, A. Lopez, M. & Suarez, A. (2018). *Ajustes de coordinación de protección en la línea de transmisión de 138 kV Juliaca - Puno, para el sistema eléctrico Saman Provincia de Juliaca departamento Puno* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3876>
- Iturbe, M. (2020). *¿Qué es el Efecto Joule? Aplicaciones para calefacción*. Recuperado de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/que-es-el-efecto-joule-aplicaciones-para-calefaccion.html>
- Jaén, M. (2001). *Tesla: la electricidad tiene un doble sentido*. Recuperado de [http://www.librosmaravillosos.com/Tesla\\_la\\_corriente\\_eléctrica\\_tiene\\_un\\_sentido/index.html](http://www.librosmaravillosos.com/Tesla_la_corriente_eléctrica_tiene_un_sentido/index.html)

- Jimenez, C. (2023). *Ondas estacionarias*. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10190/Ondas%20estacionarias.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mafla, H. (2017). *Estudio de coordinación de protecciones para la línea de transmisión de tres terminales Manduriacu - Santo Domingo - Los Bancos a 69 kV*. Quito (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17017/1/CD-7598.pdf>
- Mayorga, A. (2022). *Mejoramiento del mantenimiento de la red de transmisión en 138 kV área Ilo de Southern Perú Copper Corporation (SPCC)*. Arequipa (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/14723>
- Morales, N. E. (2008). *Coordinación de aislamiento en subestaciones a nivel de 500 kV*. Quito (Tesis de pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/729/1/CD-1673%282008-09-17-11-12-42%29.pdf>
- Neri, R. (2013). *Líneas de transmisión*. Veracruz: Primera Edición. Recuperado de <https://libros.uv.mx/index.php/UV/catalog/download/FC173/124/384-1?inline=1>
- Olmo, M. & Nave, R. (2023). *Solenóide*. Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/solenoid.html>
- Prieto Ingenieros y Consultores (2019). *Creación de la línea de transmisión 138 kV Moquegua – Alto Zapata y SE Alto Zapata, Región Moquegua*. Recuperado

de [http://www.energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/Estudios\\_Ambientales/EIAsd/EIASD\\_Linea\\_Transmision\\_Alto\\_Zapata\\_Electrosur.pdf](http://www.energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/Estudios_Ambientales/EIAsd/EIASD_Linea_Transmision_Alto_Zapata_Electrosur.pdf).

Rendon, F. (2020). *Calculo de fallas asimétricas en sistemas eléctricos de potencia*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/FrancilesRendon/fallas-asimetricas-presentacion>

Riofrio, C. (2000). *Programa computacional didáctico para el calculo de rámetros en redes de distribución aereas y subterráneas* (Tesis de pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8794/3/T1673.pdf>

Ruíz, J. (2019). Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 33-51. doi:<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9745>

SZ Cominsa. (2023). *Aprende a prevenir las sobretensiones transitorias de voltaje*. Recuperado de <https://syzcominsa.pe/blog/aprende-a-prevenir-las-sobretensiones-transitorias-de-voltaje>

Totalenergies. (2020). *¿Qué es la inducción electromagnética?* Recuperado de <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/induccionelectromagnetica#:~:text=As%C3%AD%2C%20la%20Ley%20de%20Faraday,flujo%20magn%C3%A9tico%20que%20lo%20atraviesa>.

Unicrom. (2023). *Conductancia (inverso de la resistencia)*. Recuperado de <https://unicrom.com/conductancia-inverso-de-la-resistencia/>

- Unigal. (2023). *Fallas simétricas y asimétricas*. Recuperado de <https://unigal.mx/fallas-simetricas-y-asimetricas/>
- Uscamayta, R. (2020). *Estudio de coordinación de protección en la subestación de Totorani acorde a los nuevos cambios de la topología en alta y media tensión para el año 2021* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/14279>
- Vargas, E., & Ospina, M. (2018). *Informe de coordinación de protecciones con el software etap, para los servicios auxiliares AC de una central hidroeléctrica* (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13450/VargasRuizEsneiderAndres2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, M. (2018). *Estudio de coordinación de protecciones en líneas de transmisión de la zona norte considerando la influencia del ingreso en operación del sistema de 500 kV, Quito-Ecuador* (Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19131/1/CD-8516.pdf>
- Zandman, F. & Stein, S. (1964). A New Precision Film Resistor Exhibiting Bulk Properties. *Journals & Magazines*. 11(2), 107-119. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1135008>
- Zorrilla, J. (2019). *Propuesta de implementación del plan de mantenimiento basado en criterios de RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad) para una línea de transmisión de 500 kV* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional

de San Agustín, Arequipa, Perú.

<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10653>

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

<b>ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES Y EVENTOS TRANSITORIOS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN 138 KV ILO 1 - ILO ELECTROSUR</b>			
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>Metodología</b>
¿Se podrá realizar el estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios de la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur para mejorar la operación del sistema?	Realizar el estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios en la línea de 138 kV Ilo 1–Ilo Electrosur para la mejora de la operación del sistema	La implementación de un estudio de coordinación de protecciones y eventos transitorios en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1–Ilo Electrosur mejorará la operación del sistema.	<p><b>Tipo de investigación</b> Según lo explicado por (Borja Suarez, 2016) ; se puede clasificar esta investigación por el tipo aplicativa.</p> <p><b>Diseño de investigación</b> El diseño de la investigación, según se indicó por (Borja Suarez, 2016) será del tipo explicativa.</p> <p><b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b> Se utilizarán las siguientes técnicas para la recolección de datos para el presente trabajo que serán a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recolección de datos técnicos tanto de la línea 138 kV, subestación Ilo 1 y subestación Ilo Electrosur pertenecientes al sistema de transmisión 138kV Ilo 1 – Ilo Electrosur.</li> <li>• Búsqueda del cronograma de cortocircuitos y fallas.</li> <li>• Técnicas utilizadas para el cálculo de parámetros eléctricos.</li> </ul> <p><b>Técnicas de procesamiento y análisis de datos.</b> Se utilizarán los siguientes softwares para procesamiento y análisis de datos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microsoft Office (Excel, Word)</li> <li>• AutoCAD</li> <li>• Software de Sistemas de Potencia Digsilent Power Factory.</li> </ul>
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivo específico</b>	<b>Hipótesis específica</b>	
¿Sera posible determinar la relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios?	Determinar la relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios de la línea de 138 kV Ilo 1–Ilo Electrosur.	Existe una relación entre la coordinación de protecciones y eventos transitorios de las líneas de transmisión	
¿Sera posible analizar y aplicar acciones para mejorar la operación de líneas de transmisión mediante detección de fallas?	Analizar las acciones para mejorar las líneas de transmisión mediante detección de fallas.	El análisis de acciones y detección de fallas permitirán mejorar la operación de las líneas de transmisión	
¿Sera posible mejorar la operación del sistema y calidad de la energía en la	Mejorar la operación del sistema y calidad de energía en la línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electrosur.	La operación del sistema y calidad de la energía de la línea de transmisión de 138 kV Ilo 1–Ilo	

línea de transmisión 138 kV Ilo 1 - Ilo Electro sur?		Electro sur mejorara con la aplicación de un estudio	
---	--	---	--