



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

AJUSTE
AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE
SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA APLICADA
A SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN BASADO EN SIMULACIONES
SUCESIVAS Y EL ALGORITMO DE
OPTIMIZACIÓN
BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: PATRICIA ALEXANDRA CARRILLO LLANGA
TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

Quito -Ecuador
2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Patricia Alexandra Carrillo Llanga con documento de identificación N° 0605437672 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 03 de octubre del año 2025

Atentamente,



Patricia Alexandra Carrillo Llanga
0605437672

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Patricia Alexandra Carrillo Llanga con documento de identificación No. 0605437672, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Ajuste automático de la protección de sobrecorriente temporizada aplicada a sistemas de transmisión basado en simulaciones sucesivas y el algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de octubre del año 2025

Atentamente,



Patricia Alexandra Carrillo Llanga
0605437672

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: AJUSTE AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA APLICADA A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN SIMULACIONES SUCESIVAS Y EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES, realizado por Patricia Alexandra Carrillo Llanga con documento de identificación N° 0605437672, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de octubre del año 2025

Atentamente,



Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc
0503503336

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Esquema de Protecciones en el sistema de transmisión.....	4
2.2	Sistemas de protecciones eléctricas	4
2.3	Características de los sistemas de Protección	4
2.3.1	Selectividad	4
2.3.2	Sensibilidad	4
2.3.3	Rapidez	4
2.3.4	Fiabilidad.....	4
2.4	Clasificación de relés que permiten realizar el ajuste automático.....	4
2.4.1	Relé de sobrecorriente direccional	4
2.4.2	Relé de sobrecorriente temporizado	5
2.5	Efecto Infeed.....	5
2.6	Criterios para el ajuste de la protección	5
2.6.1	Ajuste de la	5
2.6.2	Coordinación del tiempo intervalo.....	5
2.6.3	Curvas de operación de los relés Tiempo-Corriente.....	5
2.7	Implementación de algoritmos de optimización en el ajuste de la protección de sobrecorriente.....	6
2.8	Algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes.....	6
2.8.1	Inspiración biológica.....	6
2.8.2	Función del algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes.....	7
2.8.3	Función Objetivo	7
2.9	Restricciones para el ajuste de la protección.....	7
2.10	Restricción por intervalo de tiempo de coordinación.....	7
2.11	Formulación matemática del algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes	8
3	Planteamiento del problema y solución al problema	8
3.1	Sistema de Prueba	10
3.2	Metodología	11
3.3	Configuración inicial del Sistema de transmisión	14
4	Análisis de Resultados	15
4.1	Escenario 1	16
4.2	Escenario 2	19

4.3	Escenario 3	21
4.4	Análisis de resultados del algoritmo de optimización frente a las técnicas tradicionales.	24
5	Conclusiones	24
6	Trabajos Futuros.....	25
7	Referencias.....	25
8	Matriz de Estado del Arte	29
8.1	Resumen de indicadores	33

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 EFECTO INFEED VARIABLE SEGÚN LA POSICIÓN DE LA FALLA.....	5
FIGURA 2 INTERACCIÓN ENTRE SALTAMONTES CON RESPECTO A SU ZONA DE CONFORT.	6
FIGURA 3 AJUSTE AUTOMÁTICO PARA LOS RELÉS	9
FIGURA 4 SISTEMA INICIAL DE TRANSMISIÓN	10
FIGURA 5 VINCULACIÓN ENTRE PYTHON Y POWER FACTORY	11
FIGURA 6 OBTENCIÓN DE LAS CORRIENTES DEL FLUJO DE POTENCIA PARA EL CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE PICKUP.....	11
FIGURA 7 FUNCIONAMIENTO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	12
FIGURA 8 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE SALTAMONTES (GOA).	13
FIGURA 9 ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE LOS VALORES.....	14
FIGURA 10 UBICACIÓN INICIAL DE LOS RELÉS DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADO.	15
FIGURA 11 UBICACIÓN DE LOS RELÉS PARA EL ESCENARIO 1.....	16
FIGURA 12 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 20% DE LA LÍNEA 4-5.....	17
FIGURA 13 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 50% DE LA LÍNEA 4-5.....	18
FIGURA 14 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 80% DE LA LÍNEA 4-5.....	18
FIGURA 15 UBICACIÓN DE LOS RELÉS PARA EL ESCENARIO 2.....	19
FIGURA 16 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 10% DE LA LÍNEA 4-6.....	20
FIGURA 17 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 50% DE LA LÍNEA 4-6.....	20
FIGURA 18 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 90% DE LA LÍNEA 4-6.....	21
FIGURA 19 UBICACIÓN DE LOS RELÉS PARA EL ESCENARIO 3.....	21
FIGURA 20 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 10% DE LA LÍNEA 8-9.....	22

FIGURA 21 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 90% DE LA LÍNEA 8-9.....	23
FIGURA 22 TIEMPOS DE OPERACIÓN ANTE LA PRESENCIA DE UNA FALLA AL 60% DE LA LÍNEA 8-9.....	23
FIGURA 23 INDICADOR DE FORMULACIÓN DEL PROBLEMA-ESTADO DEL ARTE	33
FIGURA 24 INDICADOR DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA ESTADO DEL ARTE ...	33
FIGURA 25 INDICADOR DE LA TEMÁTICA ESTADO DEL ARTE	33

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CTI RECOMENDADO SEGÚN TECNOLOGÍA DEL RELÉ	5
TABLA 2 CONSTANTES DEFINIDAS PARA LAS DISTINTAS CURVAS DE FUNCIONAMIENTO DEL RELÉ DE SOBRECORRIENTE.....	6
TABLA 3 ASIGNACIÓN DE RELÉS 51 EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PROTECCIÓN PRINCIPAL Y DE RESPALDO.....	15
TABLA 4 VALORES TRADICIONALES VS VALORES OPTIMIZADOS	16
TABLA 5 VALORES TRADICIONALES VS VALORES OPTIMIZADOS	19
TABLA 6 VALORES TRADICIONALES VS VALORES OPTIMIZADOS	21
TABLA 7: MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE.....	29

AJUSTE AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA MEDIANTE SIMULACIONES SUCECIVAS Y EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES

Resumen

Este documento de investigación resuelve el problema del ajuste de las protecciones de sobrecorriente temporizada de tiempo inverso, utilizando simulaciones sucesivas en el entorno Power Factory y el algoritmo de optimización bioinspirado en el comportamiento de saltamontes. La investigación surge por la dificultad de ajustar de forma precisa y eficiente los relés 51 debido a que el método tradicional resulta poco eficiente. El sistema base de estudio es el modelo IEEE de 9 barras, sobre el cual se ubicaron relés de sobrecorriente en cada una de las líneas de transmisión, se establece criterios de protección principal y de respaldo. El procedimiento incluye la extracción automática de datos de corriente de cortocircuito en múltiples puntos de falla a lo largo de cada línea. Se consigue un ajuste óptimo de los parámetros de protección en el sistema eléctrico de prueba del IEEE de 9 barras garantizando una sensibilidad, selectividad y la correcta operación de la protección de sobrecorriente. Como resultado final del ajuste automático de la protección de sobrecorriente temporizado se encuentran listas para actuar en caso de ocurrir una falla en las líneas de transmisión. Los principales resultados que se consiguen mediante la optimización del dial (TDS) y que garanticen el pronto respuesta del relé de protección de sobrecorriente y a la vez se garantice el CTI de 0.02ms.

Palabras clave: relé sobrecorriente (OCR), coordinación, sistema de transmisión, algoritmo de optimización saltamontes (GOA), ajuste del dial de tiempo (TDS).

Abstract

This research document addresses the problem of setting inverse time overcurrent protection using successive simulations in the PowerFactory environment and a bio-inspired optimization algorithm based on grasshopper behavior. The study arises from the difficulty of accurately and efficiently adjusting the 51 relays, as traditional methods prove to be inefficient. The base system used is the IEEE 9-bus model, in which overcurrent relays were placed on each transmission line, establishing criteria for primary and backup protection. The procedure includes the automated extraction of short-circuit current data at multiple fault points along each line. An optimal setting of the protection parameters is achieved in the IEEE 9-bus test system, ensuring sensitivity, selectivity, and correct operation of the overcurrent protection. As a result, the automatically adjusted overcurrent protection is ready to operate in the event of a transmission line fault. The main results obtained through the optimization of the time dial setting (TDS) guarantee a fast relay response while ensuring the coordination time interval (CTI) of 0.02 ms.

Keywords: overcurrent relay (OCR), transmission systems, Grasshopper optimization algorithm (GOA), time dial setting (TDS).

1 Introducción

A medida que el país avanza social e industrialmente, también se debe fortalecer el sistema eléctrico que sostiene este desarrollo. Para que el usuario final reciba un servicio estable y de calidad, es importante que el sistema funcione bien en todo momento. Las fallas eléctricas en el sistema pueden producirse sin previo aviso, por lo cual es importante que las protecciones se encuentren de una forma organizada, de forma que puedan responder de una manera eficaz minimizando los daños.

Dentro del sistema eléctrico es importante contar con esquemas de protección de una manera bien estructurada y organizada, ya que eso contribuye directamente a la estabilidad operativa del sistema. Al momento de presentarse una falla dentro del sistema, se generan múltiples cantidades de datos que son provenientes de los equipos de protección, la cual se debe procesar de una manera eficiente. Los datos obtenidos deben ser analizados en un tiempo muy corto para establecer medidas correctivas de una manera oportuna y poder restaurar la disponibilidad de los recursos involucrados. La rapidez con la cual se detecte es posible realizar las operaciones oportunas frente a las diversas contingencias operativas [1].

El sistema de transmisión permite que la energía se transporte de una manera eficiente desde el sistema de generación hasta el punto de carga. Los rangos de voltajes que operan van entre los 30 kV a 500 kV, generalmente están interconectadas para asegurar que cuenten con una operación estable y confiable en el sistema [2], [3].

La integración de la protección de sobrecorriente en el sistema de transmisión cuenta con algunas características importantes, su bajo costo y la calibración es fácil de realizar al igual que la instalación lo cual hace que sea una de las protecciones más aplicadas en el sistema, la protección de sobrecorriente actúa únicamente en

líneas de transmisión cuando la protección principal falla [3].

La protección de sobrecorriente opera mediante ciertos principios definidos dentro del esquema de la coordinación de protecciones, su función del ajuste de ciertos parámetros como la corriente de disparo y el retardo temporal, Generalmente los valores se ajustan para que se mantengan fijos la cual se espera que puedan responder correctamente ante una falla o cualquier perturbación en el sistema. Aunque la estabilidad extrema en los ajustes puede incrementar la probabilidad de que el sistema de protección pueda tener una falla, las cuales pueden ser disparos no selectivos o la imposibilidad de limitar rápidamente la exposición del sistema a corrientes elevadas [4].

Se implementa el algoritmo el cual forma parte de la categoría de los métodos heurísticos, los cuales son métodos de optimización inspirados en la naturaleza [5], Estos algoritmos se basan principalmente en dos ideas fundamentales: la exploración y la explotación. La primera también es conocida como diversificación, el objetivo es inspeccionar diferentes zonas de espacio de búsqueda, lo cual ayuda a evitar que el algoritmo se quede fijado con soluciones poco eficientes. La segunda, es la intensificación, la cual se basa en refinar soluciones dentro de una zona específica. Cualquier algoritmo de optimización metaheurístico debe contar con un equilibrio entre las dos es importante para asegurar unos resultados de calidad, un enfoque excesivamente exploratorio puede causar una ineficiencia lo que quiere decir que el algoritmo salta de un punto a otro y no puede considerar soluciones prometedoras, mientras que una explotación desmedida puede provocar una convergencia prematura. A pesar de las ventajas que cuenta los algoritmos metaheurísticos, una de sus principales

dificultades es la alta relación con el ajuste de los parámetros [6].

En la literatura se proponen varios artículos los cuales buscan que las protecciones eléctricas en el sistema sean más eficientes, algunos artículos se basan a través de algoritmos de optimización. En [7] se aplica un algoritmo el cual se encuentra inspirado en el comportamiento parasitario de las especies Cuckoo los cuales aprovechan dejando los huevos en nidos ajenos para que otras aves los incuben, cuenta con una técnica de manera aleatoria para la búsqueda de resultados óptimos para la protección de sobrecorriente además se realizó una evaluación el algoritmo de la luciérnaga, resultando el algoritmo Cuckoo ser una mejor opción para el ajuste de las protecciones. En [8] se emplea el algoritmo de optimización AMFA es un algoritmo el cual está inspirado en la naturaleza, es un algoritmo derivado del algoritmo de la Luciérnaga, pero fue mejorado, el algoritmo está fundamentado en el comportamiento natural de las luciérnagas y particularmente en su forma de comunicarse, la búsqueda del alimento, todo ello influye en la bioluminiscencia que generan las luciérnagas. Otro método de optimización es [9] el algoritmo de optimización (PSO) está inspirado en el comportamiento social que presentan especies como aves y peces. El propósito del algoritmo es encontrar la mejor solución para un problema específico. El principio fundamental del PSO trata sobre como simular la interacción de un conjunto de partículas (representan soluciones potenciales) dentro de un determinado espacio de búsqueda. En [10] se establece un algoritmo denominado LINKET para la coordinación adaptativa del relé el cual ha sido modificado para que, si se presentan cambios en la topología del sistema el programa mantenga la capacidad de diferenciar los pares de relés. es un método que contiene dos algoritmos el primero se encarga de almacenar la topología de la red eléctrica y el segundo se

encarga de identificar los emparejamientos de protección. En [11] se propone una solución novedosa para el ajuste de los relés utilizando un algoritmo híbrido el cual está inspirado en la naturaleza llamado WCMF (Water Cycle Moth Flame Optimization) es un algoritmo que cuenta con un alto rendimiento aprovecha las fortalezas de los dos métodos. El WCA tiene la capacidad de exploración de las soluciones debido a la formación de ríos y corrientes, mientras que el MFO tiene una eficaz explotación local mediante movimientos en espiral alrededor de las llamas. En el siguiente artículo [12] realizan una comparación de la efectividad de los algoritmos metaheurísticos del ave Cuckoo y el algoritmo gravitacional los dos algoritmos buscan determinar los ajustes óptimos para los relés de sobrecorriente implementados dentro de un modelo de prueba del IEEE. En [13] se presenta un estudio comparativo entre varios algoritmos metaheurísticos, aplicados al desafío que implica ajustar la coordinación de las protecciones de sobrecorriente. Por primera vez se aplicaron los métodos de optimización, Algoritmo de Pathfinder (PFA), y el Algoritmo de redes neuronales (NNA) para mejorar la coordinación de protecciones. En [14] se aplica un algoritmo de polinización de una manera mejorada su inspiración está en el proceso natural de la polinización alternando entre la explotación global mediante los vuelos de Levy, y una búsqueda local, dependiendo de la probabilidad de conmutación.

2 Marco teórico

El sistema de protección de sobrecorriente debe contar con ciertos aspectos para que pueda fortalecer el sistema eléctrico. Los mecanismos de la protección de sobrecorriente pueden actuar de forma inmediata o con un tiempo de retardo preestablecido, lo que posibilita la coordinación entre distintos niveles de protección y garantiza que cualquier interrupción del suministro se limite únicamente a la zona afectada.

2.1 Esquema de Protecciones en el sistema de transmisión.

Los esquemas de protección en las líneas de transmisión tienen como propósito principal localizar con precisión el punto de falla y desconectar únicamente el tramo afectado y así evitar mayores interrupciones. El principal reto en este tipo de protección consiste en lograr una detección precisa y una desconexión selectiva de sea segura y confiable incluso bajo condiciones complejas del sistema [15].

2.2 Sistemas de protecciones eléctricas

El sistema de protecciones eléctricas conforma un conjunto de componentes eléctricas, y se consideran como equipos secundarios las cuales se encargan de supervisar y proteger constantemente los equipos principales, el sistema de protección se encargan de encontrar si existen condiciones irregulares [16].

2.3 Características de los sistemas de Protección

2.3.1 Selectividad

Permite la identificación correcta de los escenarios en los que se desea operar con un tiempo de retardo o cuando se desea operar de manera inmediata, generando una respuesta adecuada ante fallas o evitando que se presenten activaciones innecesarias en ausencia de estas. Y al momento de ocurrir una falla se encarga de la apertura del interruptor para aislar únicamente al circuito afectado [17],[18].

2.3.2 Sensibilidad

Cuenta con la capacidad de identificar cualquier tipo de falla o alguna condición anormal que ocurra dentro de la zona previamente delimitada en el sistema eléctrico. La sensibilidad requiere de una determinación que se lleva a cabo mediante un proceso específico [17], [18].

2.3.3 Rapidez

Al momento en el que se identifica la falla, el sistema de protección debe operar de una manera inmediata para aislar en el menor tiempo posible. La reacción oportuna ayuda a mantener la operación del sistema y además ayudan a reducir los costos. Los sistemas pueden operar de dos maneras: instantáneas o con un tiempo dependiente o también conocidas como temporizadas [17],[18].

2.3.4 Fiabilidad

Para que la protección cumpla con su función confiable debe intervenir adecuadamente ante cualquier tipo de falla. Asegurando fiabilidad y seguridad de que el sistema siga operando correctamente [17],[18].

2.4 Clasificación de relés que permiten realizar el ajuste automático.

2.4.1 Relé de sobrecorriente direccional

Los relés direccionales forman parte de los esquemas de protección utilizados en líneas de transmisión cuando se trata de redes malladas. El procedimiento para la determinación de datos en los relés de sobrecorriente con sensibilidad direccionales se tiene como propósito establecer los parámetros como el umbral de disparo, el retardo de tiempo y la curva de operación. El ajuste de la detección direccional suele basarse en valores típicos y recomendaciones estándar. Los relés direccionales actúan como respaldo ante fallas que no son detectadas por otros sistemas de protección, especialmente cuando son fallas de alta impedancia [19].

2.4.2 Relé de sobrecorriente temporizado

Un relé de protección es un dispositivo que se utiliza procesos lógicos se encarga del monitoreo de múltiples variables como corrientes, voltajes, frecuencia con respecto a su señal de entrada y de salida y detectar si existen alguna anomalía entre ellas y al momento en el que ocurra una falla el relé en conjunto con el interruptor entran en operación aislando el elemento que se encuentre en fallo permitiendo que el servicio continúe operando [20].

La protección de sobrecorriente temporizado es uno de los elementos importantes en el sistema analiza y evalúa la corriente que se transporta por el circuito. Si la corriente que circula es mayor que la corriente predeterminada, el relé actúa después de cumplir el tiempo ajustado [21].

2.5 Efecto Infeed

El sistema eléctrico de transmisión presenta una estructura compleja con múltiples centrales de generación que se encuentran interconectadas. Esta disposición hace que, ante una falla, la corriente de cortocircuito no provenga únicamente de una sola fuente, sino de varios puntos del sistema. Como resultado, el relé de protección puede registrar una corriente de falla mayor debido a los aportes adicionales. Lo cual da lugar al fenómeno denominado como efecto infeed [22].

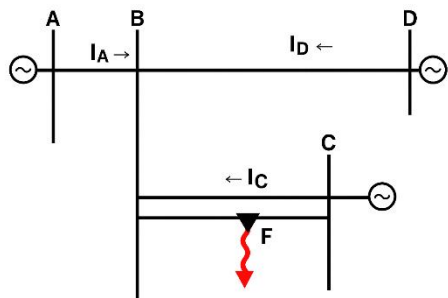


Figura 1 Efecto Infeed variable según la posición de la falla

2.6 Criterios para el ajuste de la protección

2.6.1 Ajuste de la

$$1.05 * I_n < I_p < 1.4 * I_n \quad (1)$$

En la ecuación 1 nos indica que la corriente de disparo debe estar entre el rango de 105% y el 140% de la corriente nominal. El criterio permite que el relé ignore pequeñas sobrecargas transitoria, pero responde adecuadamente ante sobrecargas que verdaderamente puedan afectar al sistema [23].

$$1.6 * I_n < I_p < 0.8 * I_{SC_MIN} \quad (2)$$

El ajuste de disparo del relé debe establecerse de manera que supere el 160% de la corriente nominal y no sobrepase el 80% de la corriente mínima de cortocircuito en el punto más lejano [23].

2.6.2 Coordinación del tiempo intervalo

El intervalo de coordinación de tiempo representa el tiempo de separación temporal necesaria entre la actuación del relé principal y el relé de respaldo [23].

Componentes	Tiempo	
	Electro-mecánica	Estático
Disyuntor para tiempo de apertura	0.08	0.08
Tolerancia de sobre carga del relé	0.1	0
Tolerancia de errores de relé y de configuración	0.12	0.12
Total of CTI	0.3	0.2

Tabla 1 CTI recomendado según tecnología del relé

2.6.3 Curvas de operación de los relés Tiempo-Corriente.

El principal funcionamiento para la operación de un relé de sobrecorriente temporizado consiste en la verificación entre la corriente que circula durante la falla

y un valor umbral previamente configurado, conocido como corriente de disparo. Existen diversas curvas características que ofrecen varias opciones para el ajuste del relé [24].

$$top = \frac{k * TDS}{\beta x \left(\frac{If}{Ip}\right)^\alpha - 1} \quad (3)$$

Donde:

Top=Tiempo de operación.

TDS=Time Dial Setting.

If =Corriente de falla o cortocircuito

Ip=Corriente pick up

En donde β , α y L son definidas mediante la curva característica según la norma ANSI-IEEE.

Descripción de la curva de sobrecorriente	K	α	B
Inverso de tiempo largo	120	1	13.33
Estándar inverso	0.14	0.02	2.97
Muy inverso	13.5	1	1.5
Extremadamente inverso	80	2	0.808
Ultra Inverso	315.2	2.5	1

Tabla 2 Constantes definidas para las distintas curvas de funcionamiento del relé de sobrecorriente.

2.7 Implementación de algoritmos de optimización en el ajuste de la protección de sobrecorriente.

La optimización se ha considerado como una alternativa efectiva para resolver problemas que surgen en diversos campos. Si bien los métodos clásicos de optimización han ofrecido soluciones eficaces en muchos casos, su dependencia de información precisa del gradiente, lo que limita su eficacia ante escenarios complejos. En consecuencia, encontrar soluciones óptimas se vuelve una tarea más complicada. Las limitaciones han impulsado la búsqueda de métodos

alternativos más robustos y flexibles, entre los cuales destacan los algoritmos metaheurísticos. Están inspirados en los comportamientos naturales y procesos adaptativos, como la evolución biológica y la dinámica de los sistemas físicos [25], [26].

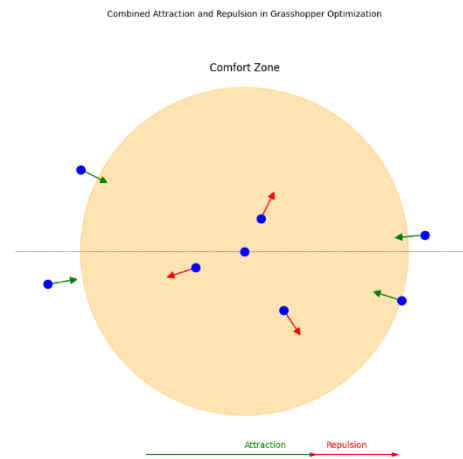


Figura 2 Interacción entre saltamontes con respecto a su zona de confort.

2.8 Algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes

2.8.1 Inspiración biológica

El algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes (GOA). Se basa en la dinámica grupal del comportamiento colectivo característico de los saltamontes, son insectos conocidos por su capacidad de formar enjambres extremadamente numerosos que pueden causar daños en las zonas agrícolas. Estos enjambres están entre los más grandes conocidos en el reino animal. Durante su ciclo de vida biológico, los insectos pasan por tres etapas: primero son huevos luego se convierten en ninfas y finalmente alcanzan la etapa de adulto. Los huevos permanecen en estado de incubación durante diez meses, tras la cual emergen las ninfas. Durante esta etapa, los jóvenes saltamontes presentan una conducta de desplazamiento colectivo, en la cual empujan unos a otros y consumen todo a su paso, A medida que alcanzan su madurez, se convierten en adultos capaces de

desplazarse en enjambres aéreos, buscando nuevas fuentes de alimentos [27].

2.8.2 Función del algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes

El GOA fue propuesto por [28], se centra en las conductas sociales de los saltamontes para modelar el procedimiento de identificación de soluciones óptimas dentro del espacio de solución. Cada agente del algoritmo representa un saltamontes, posicionado aleatoriamente en dicho espacio. El algoritmo distingue dos tipos de comportamiento clave: uno asociado a movimientos lentos y colaborativos en la etapa temprana, y otro más dinámico durante la fase de búsqueda intensiva [27]. En cada iteración, se evalúa la aptitud de los agentes saltamontes con base en una función objetivo. El agente con mejor desempeño actúa como referencia y guía al resto de la población. Los demás agentes actúan sus posiciones en función de la distancia, atracción y repulsión [27].

2.8.3 Función Objetivo

$$OF = \sum_{i=1}^n W_i * t_i \quad (4)$$

Donde n es el número de relés, t_i es el tiempo de funcionamiento del relé W_i es el peso asignado a cada relé.

Diversos estudios han señalado que la función objetivo tradicional presentan tres desventajas principales. Las dos primeras están relacionadas con la descoordinación, el relé de respaldo podría operar antes que el relé primario, lo cual significa que el tiempo de respuesta de los relés de respaldo es menor que el de los relés principales eso puede ocurrir rara vez en los casos prácticos, pero eso infringe (CTI) entre dos relés consecutivos, provoca que ambos relés desaparezcan sus interruptores al mismo tiempo. La tercera limitación es diferente a las anteriores y ocurre cuando el relé de

respaldo opera con una demora excesiva, dando como resultado un tiempo de discriminación innecesariamente largo [29].

$$\begin{aligned} OF & \dots \\ & = \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_{primary}^2 \dots \dots \dots \\ & + \alpha_2 \sum_{j=1}^N (top_{backup} - top_{primary} \dots \\ & - CTI)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

El primer componente tiene como punto reducir el tiempo de operación de los relés principales, mientras que el segundo agrega un factor de penalización que garantiza el cumplimiento del intervalo mínimo de coordinación, y su minimización asegura que se mantenga la secuencia correcta de operación α_1 y α_2 representan la ponderación que equilibran las dos prioridades dentro del proceso de optimización. De este modo, la optimización conjunta de los términos juntos[29].

2.9 Restricciones para el ajuste de la protección

Ecuación 5 representa que el TMS se mantenga dentro de un rango seguro y efectivo.

Ecuación 6 establece que la corriente de disparo determina el umbral a partir del cual el relé comienza a operar. Debe estar dentro de un rango mínimo y máximo para que responda correctamente ante fallas.

$$TMS_{min} \leq TMS_i \leq TMS_{max} \quad (6)$$

$$Ip_{min} \leq Ip_i \leq Ip_{max} \quad (7)$$

2.10 Restricción por intervalo de tiempo de coordinación

La coordinación entre los relés se encuentra condicionada por un intervalo de tiempo mínimo requerido para sus operaciones. Este margen temporal garantiza que el relé principal actúe antes que el relé de respaldo.

$$top_{backup} - top_{primary} \geq CTI \quad (8)$$

2.11 Formulación matemática del algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (9)$$

X_i nos indica la i -ésimo posición de los saltamontes, la interacción social entre saltamontes S_i La fuerza gravitatoria que actúa sobre el individuo G_i , la advección del viento, mediante A_i . Para introducir un componente aleatorio en la dinámica de los saltamontes, la Ecuación puede reescribirse.

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (10)$$

En la ecuación reescrita r_1 , r_2 y r_3 son números aleatorios que van en el intervalo de $[0,1]$.

$$X_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N s(|X_j - X_i|) \frac{X_j - X_i}{d_{ij}} - g \hat{e}_g + u \hat{e}_w \quad (11)$$

En la ecuación, n representa la cantidad total de saltamontes mientras que $|X_j - X_i|$ representa la distancia euclidiana entre los saltamontes i y j . $\frac{X_j - X_i}{d_{ij}}$ es un vector unitario que va del saltamontes i al j , $g \hat{e}_g$ representa a G_i la fuerza de gravedad, $u \hat{e}_w$ Donde u indica la constante de deriva y \hat{e}_w representa un vector unitario en la que señala la dirección del viento. Por último, la función s describe las fuerzas sociales y se define mediante La siguiente ecuación.

$$X_i^d = c \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|X_j - X_i|) \frac{X_j - X_i}{d_{ij}} - g \hat{e}_g + g \hat{e}_w \right) + \hat{T}_d \quad (12)$$

Debido a que los saltamontes entran en una región de comodidad y el modelo pierde la capacidad de dirigirse al punto deseado, la ecuación anterior resulta ser inapropiada

para la optimización. En su lugar se emplea una ecuación mejorada:

$$X_i^d = c \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|X_j - X_i|) \frac{X_j - X_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (13)$$

En la ecuación ub_d representa el límite inferior en la dimension d . Y lb_d representa el límite inferior en la dimension d . \hat{T}_d representa la mejor solución encontrada hasta ahora en el espacio de la dimension.

$$c = c_{max} - t \frac{c_{max} - c_{min}}{t_{max}} \quad (14)$$

c_{max} =es el valor máximo de la constante c .
 c_{min} =es el valor mínimo de la constante c .
 t =es el número actual de iteración.
 t_{max} =es el número actual de iteraciones.

3 Planteamiento del problema y solución al problema

El problema de estudio se destaca en la necesidad de optimizar el ajuste automático de la protección de sobrecorriente temporizada (Relé 51) en el sistema de transmisión presentado por el modelo IEEE 9 barras. Este sistema está ampliamente utilizado para estudios, permite analizar de manera precisa el comportamiento y la respuesta de las protecciones ante condiciones de falla. La configuración tradicional de los parámetros de protección, como el Pickup y el Time Multiplier Setting (TMS), se realiza de forma estática, lo cual limita la capacidad de respuesta efectiva ante modificaciones en las condiciones operativas, especialmente en situaciones de cortocircuito. Las características de métodos tradicionales aumentan el riesgo de daño en los equipos eléctricos y afectando a la continuidad del servicio, debido a que los tiempos de operación no se ajustan adecuadamente a la función de falla.

La falta de ajuste dinámico dificulta que los relés operen de una manera selectiva. Para abordar el problema, se propone la aplicación de un método basado en el algoritmo de optimización bioinspirado en Saltamontes (GOA). El código fue desarrollado en el lenguaje de programación Python, permitiendo optimizar automáticamente los parámetros de los relés de sobrecorriente temporizada (51). La integración con el software de simulación DIgSILENT Power Factory se logró mediante una interfaz que vincula ambos entornos, lo cual permite extraer las corrientes de cortocircuito y los tiempos de operación de los relés 51. La corriente de pick up ha sido previamente calculada mediante la ecuación 18, y se incorpora como un parámetro fijo dentro de la función objetivo. Los valores obtenidos mediante el criterio tradicional se transfieren,

directamente al algoritmo para la evaluación. La calidad de cada solución se determina mediante una función objetivo que considera dos componentes: el primero busca minimizar los tiempos de operación de los relés principales, y el segundo penaliza las desviaciones respecto al tiempo de coordinación (CTI) requerido entre el relé de respaldo y el relé principal. El algoritmo toma la mejor y peor condición descarta a las peores condiciones de tal manera obteniendo el mejor parámetro de TDS optimizando los tiempos de operación. Para validar su funcionamiento se realizan simulaciones sucesivas de cortocircuito a diferentes porcentajes de las líneas que se proponen a proteger. La técnica permite que los relés de sobrecorriente cuenten con ajustes óptimos mejorando los tiempos de actuación.

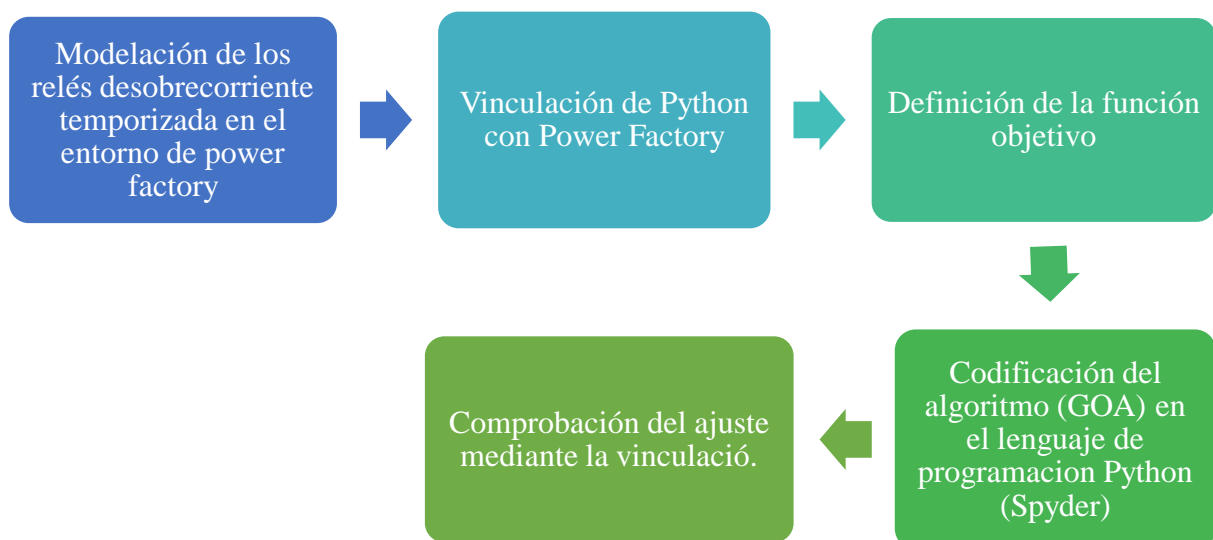


Figura 3 Ajuste automático para los relés

3.1 Sistema de Prueba

El sistema empleado para las pruebas corresponde al sistema de transmisión IEEE de 9 barras. La configuración representa de manera realista las condiciones operativas de redes de transmisión eléctrica, facilita el análisis detallado del desempeño y la selectividad de los relés de sobrecorriente temporizado. El sistema consta de tres generadores los cuales representan el punto de inyección de potencia del sistema se encargan de alimentar el sistema y garantizar el flujo continuo de energía. Tres transformadores destinados al ajuste de los niveles de voltaje optimizando el

transporte de energía y minimizando pérdidas eléctricas durante su recorrido por las distintas líneas. Nueve nodos interconectados mediante líneas de transmisión. Cada una de las líneas de transmisión cuentan con un relé principal y un relé de respaldo de sobrecorriente temporizada, esto con el fin de validar el ajuste y la coordinación de protecciones a nivel de selectividad, no se colocan relés en cada extremo de la línea ya que al hacerlo en sistema mallado involucra el uso de la protección de sobrecorriente direccional (67), la cual puede ser objeto de estudio en trabajos futuros.

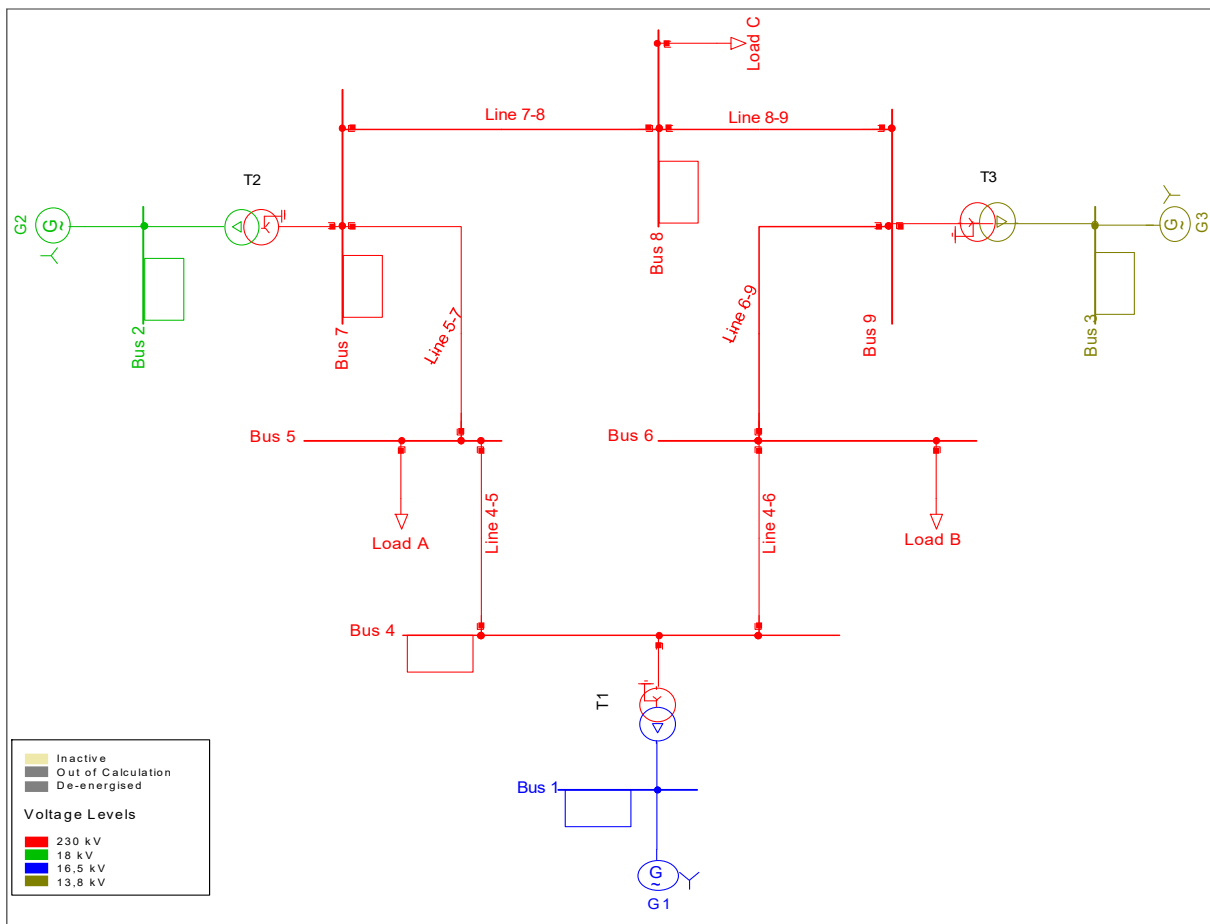


Figura 4 Sistema inicial de Transmisión

3.2 Metodología

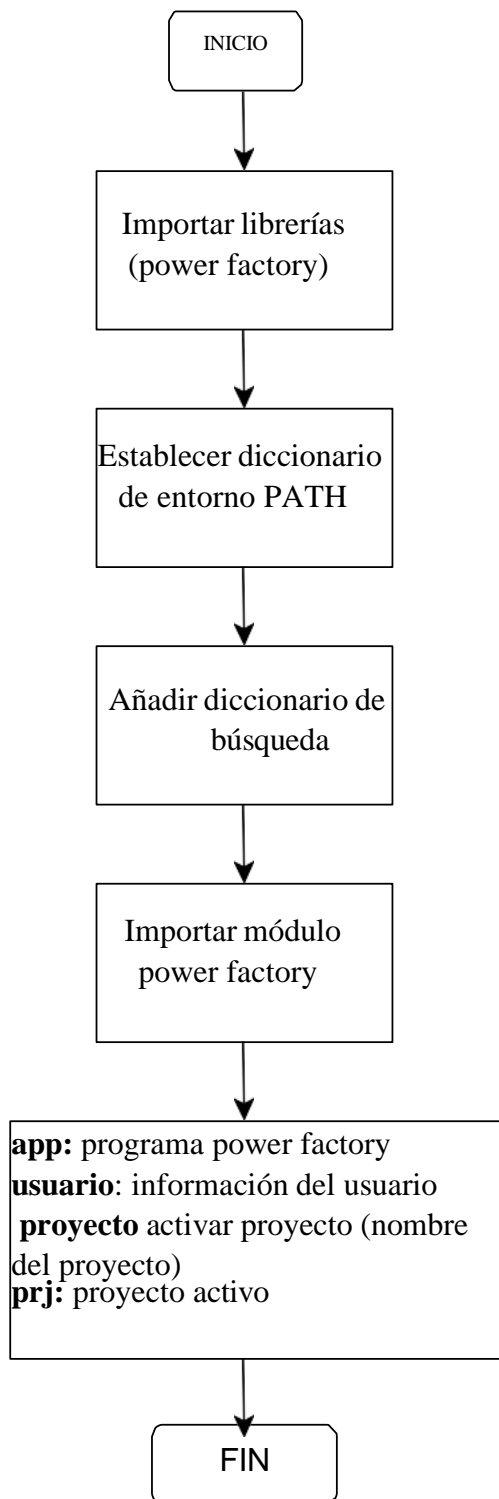


Figura 5 Vinculación entre Python y Power Factory

En la figura 5 El flujograma describe el proceso inicial de vinculación entre Python y PowerFactory. Primero se activa el

proyecto de PowerFactory, luego se obtienen los objetos relevantes del sistema, como barras (buses), líneas y relés, los cuales se organizan en diccionarios (bus_dict, line_dict, relay_dict). Esta estructura permite acceder de forma ordenada a los elementos del sistema, facilitando futuras simulaciones y análisis automáticos, como los ajustes de protección o estudios de fallas.

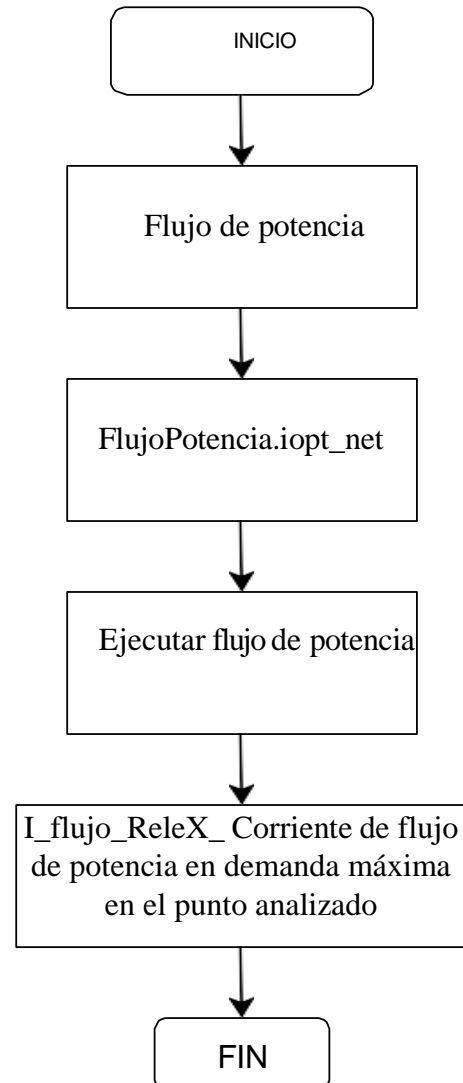


Figura 6 Obtención de las corrientes del flujo de potencia para el cálculo de la corriente de pickup.

En la figura 6 el flujograma representa el proceso para obtener las corrientes de flujo de potencia en condiciones de demanda máxima. El procedimiento comienza con la selección del estudio de flujo de carga

(FlujoPotencia.iopt_net), seguido por la ejecución del cálculo de flujo de potencia. Una vez realizado, se extrae la corriente de carga en el punto donde se encuentra el relé analizado ($I_{\text{flujo_ReleX}}$). Este valor representa la corriente bajo condiciones normales, indispensable para el cálculo de la corriente pick-up del relé 51.

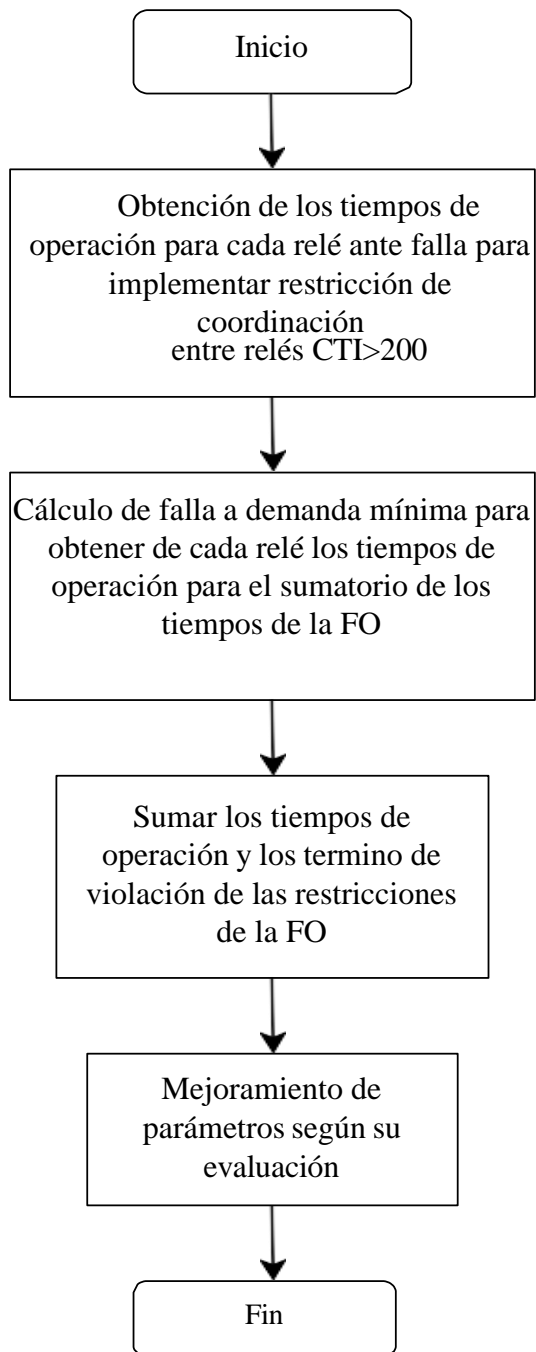


Figura 7 Funcionamiento de la función objetivo.

La figura 7 muestra el diagrama de flujo que representa el funcionamiento de la función objetivo (FO) representada en la ecuación(5) , utilizada para evaluar la calidad de los tiempos de operación de los relés de sobrecorriente temporizada (relé 51), considerando que los valores de pickup ya han sido previamente establecidos. El proceso inicia con la obtención de los tiempos de operación de cada relé ante fallas, aplicando la restricción de coordinación ($CTI > 200$ ms). Luego, se realiza un cálculo de fallas bajo demanda mínima para determinar los tiempos de operación que alimentan la FO. Esta función combina el sumatorio de tiempos de operación y penalizaciones por violaciones a restricciones técnicas como la coordinación y el tiempo máximo admisible.

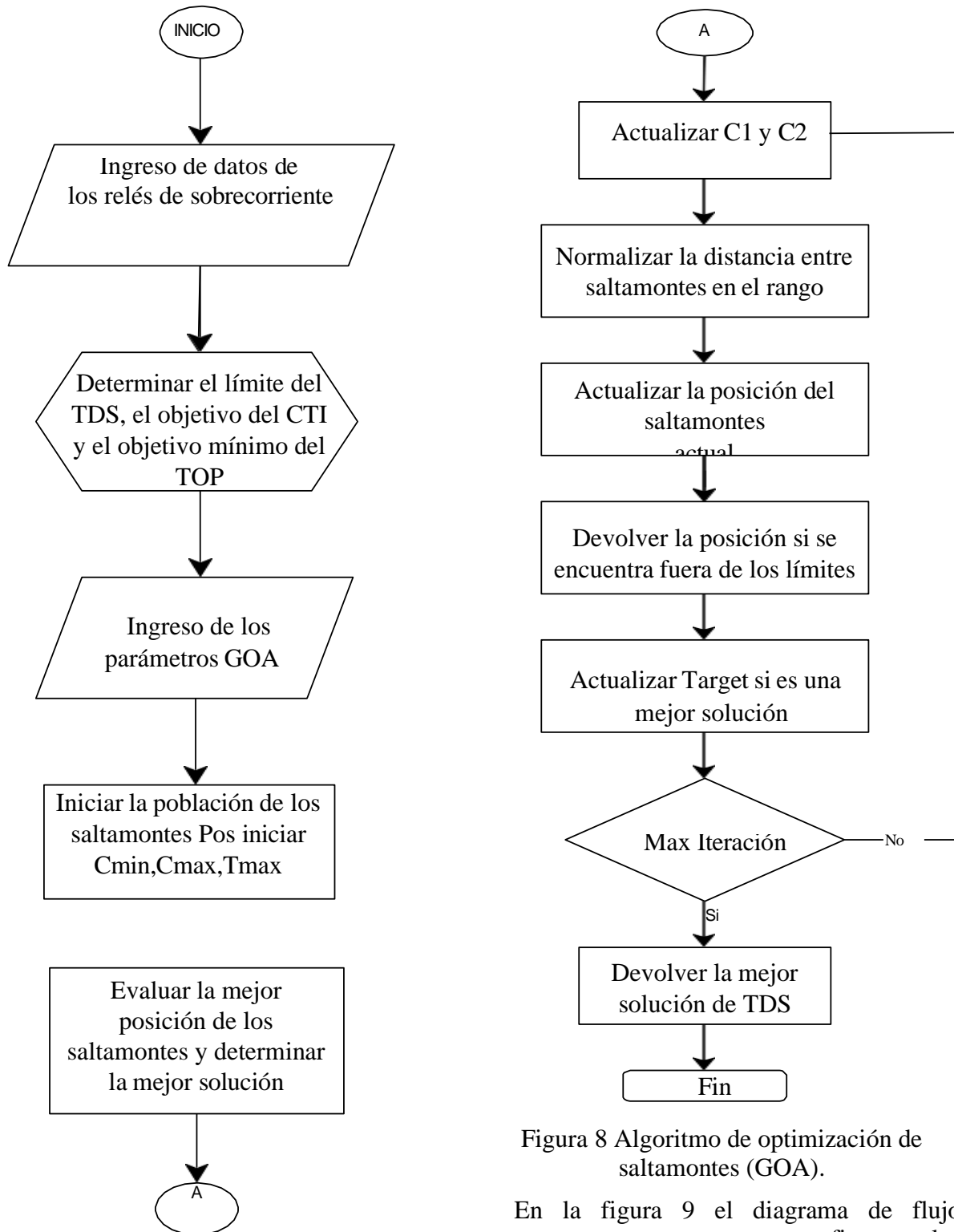


Figura 8 Algoritmo de optimización de saltamontes (GOA).

En la figura 9 el diagrama de flujo representa que, tras configurar los parámetros del algoritmo, se inicializa la población de saltamontes los cuales son posibles soluciones. En cada iteración, se actualizan las posiciones de los individuos según la dinámica del GOA. Cada nueva posición representa un nuevo conjunto de

valores de TDS, los cuales son evaluados externamente mediante la función objetivo, que considera aspectos como la suma de los tiempos de operación y el cumplimiento de restricciones técnicas. El algoritmo compara las soluciones generadas y conserva aquella que produce el mejor resultado de la función objetivo. Este ciclo se repite hasta cumplir el número máximo de iteraciones.

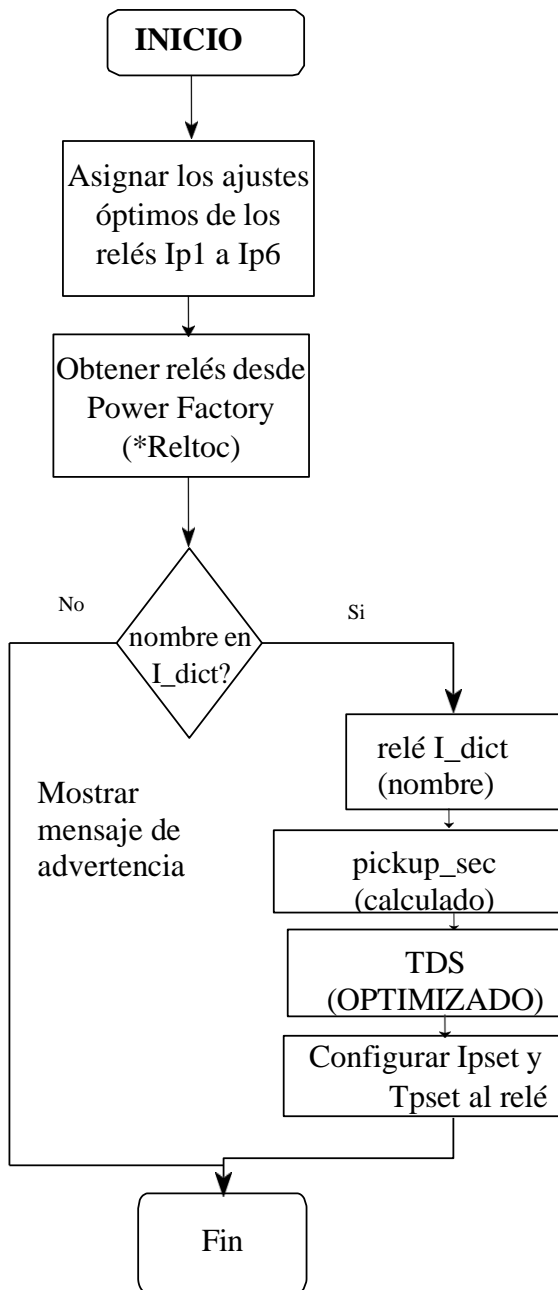


Figura 9 Asignación automática de los valores.

En la figura 10 el flujograma representa el proceso para la asignación automática de los parámetros de ajuste para cada relé. A partir de los valores ya optimizados o definidos previamente, se asigna directamente la corriente de disparo (Iset) y el tiempo dial o TMS (T_set) al relé correspondiente.

3.3 Configuración inicial del Sistema de transmisión

El primer paso, se realiza la configuración inicial del sistema de prueba IEEE de 9 barras en DIgSILENT PowerFactory.

Para esto, se inicia con un análisis de la configuración y operación del sistema mediante flujos de carga y simulaciones de fallas, Para establecer los puntos más críticos de protección y las ubicaciones estratégicas de los relés de sobrecorriente temporizada (Relé 51), con el objetivo de asegurar una cobertura optima en eventos de cortocircuito. A continuación, Primer lugar se identifica los TCs a ser incorporados, considerando los nodos críticos del sistema de prueba IEEE de 9 barras, esta selección se basa en buscar puntos estratégicos para el análisis de flujos, así como la operación del algoritmo GOA para validar la coordinación de protecciones entre el relé principal con su relé de respaldo ambos escogidos de la librería de Power Factory para el caso del relé se escoge de la marca Siemens modelo 7SJ600 es un equipo que ofrece la protección de sobrecorriente con tiempo definido e inverso, ofrece también protección contra sobrecarga y de secuencia negativa, y la cual por eso se eligió porque ofrece un paquete muy completo en el ámbito de protección especificando el relé principal y el relé de respaldo para cada sección crítica según la tabla 3.

Línea de transmisión	Relé principal	Relé de respaldo
Línea 4-5	R6	R1
Línea 6-4	R5	R4
Línea 8-9	R3	R2

Tabla 3 Asignación de Relés 51 en el Sistema de Transmisión protección principal y de respaldo

Para el análisis se considera un relé de sobrecorriente temporizado en un extremo de la línea que actúa como relé principal y un segundo relé aguas arriba que actúa como relé de respaldo para evaluar el ajuste y la coordinación de protecciones con un análisis de selectividad, para el caso de sistemas mallados existen limitaciones donde el colocar relés en ambos extremos

de la línea operaran con funciones de sobrecorriente direccional o a su vez funciones de protección de distancia o diferencial, mismos que pueden ser parte de un análisis para trabajos futuros. La asignación se realizó con el propósito de garantizar que, ante una falla en un punto crítico de la línea, el relé principal actúe de forma rápida y selectiva, mientras que el relé de respaldo intervenga en caso de falla del principal, asegurando que el sistema pueda contar con una protección adecuada al sistema, para los casos a ser analizados se considera la protección de sobrecorriente temporizada (51), el resto de protecciones que dispone el relé serán deshabilitadas para el análisis respectivo de los resultados.

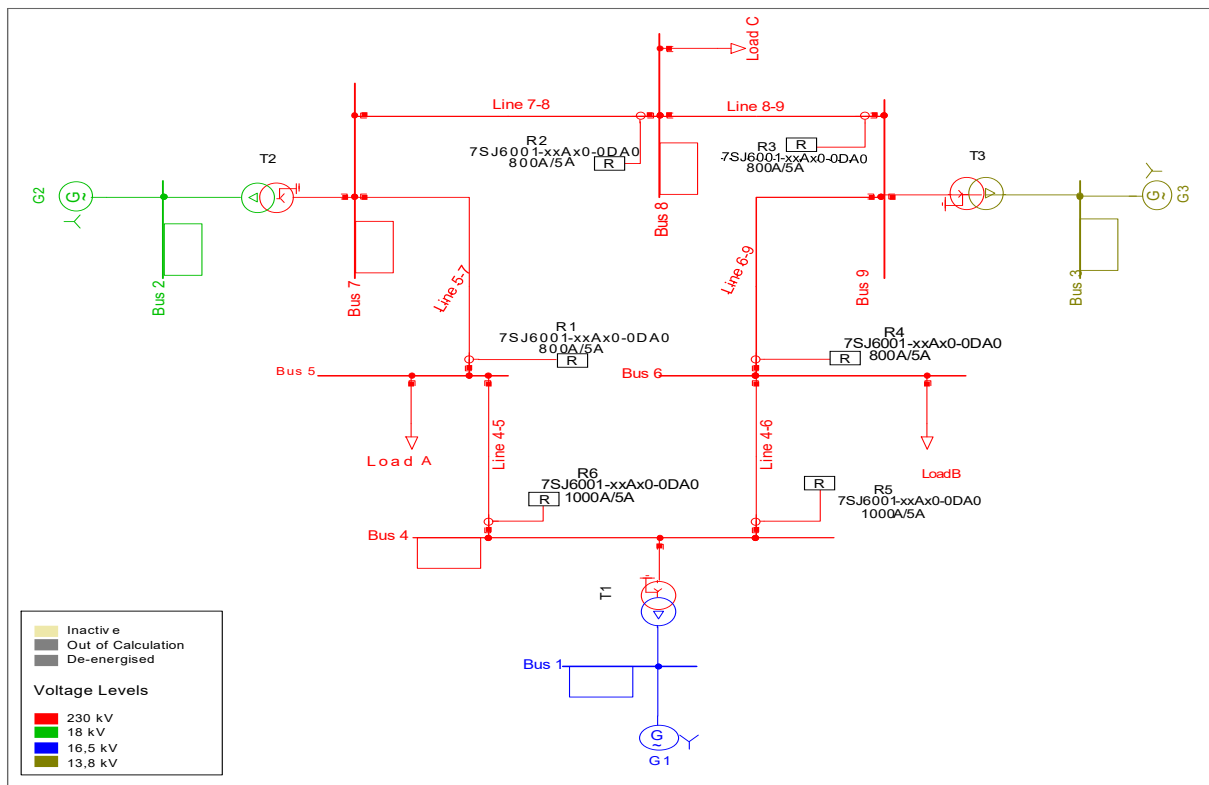


Figura 10 Ubicación inicial de los relés de sobrecorriente temporizado.

4 Análisis de Resultados

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} \quad (15)$$

RTC: Relación de transformación
Ip: Corriente del devanado primario

Is: Corriente del devanado secundario
 Para la selección de los TCs se tomará en cuenta la corriente nominal del transformador además dependerá de la I_{max} de carga la cual se determina mediante flujos de carga, donde la corriente del secundario a máxima carga no debe exceder de la corriente nominal del relé al que estará asociado. Finalmente se realiza un análisis de cortocircuito trifásico que permita identificar que el TC soporte adecuadamente esta corriente sin saturarse.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (16)$$

S: Potencia nominal del transformador
V: Voltaje de las líneas

$$I_{nmax} = 1.05 * I_n \quad (17)$$

La ecuación 16 y ecuación 17 nos ayuda a realizar una correcta selección de los TCs. Para los estudios el valor de pickup se mantiene en los valores no optimizados y en los valores optimizados siguiendo las restricciones de la ecuación (6), y fueron previamente obtenidos mediante la ecuación 18, se considera un valor del 105% para la corriente máxima de carga.

$$I_{pickup} = \frac{1.05 * I_n}{RTC} \quad (18)$$

In: corriente nominal que observa el relé
RTC: Relación de transformación

4.1 Escenario 1

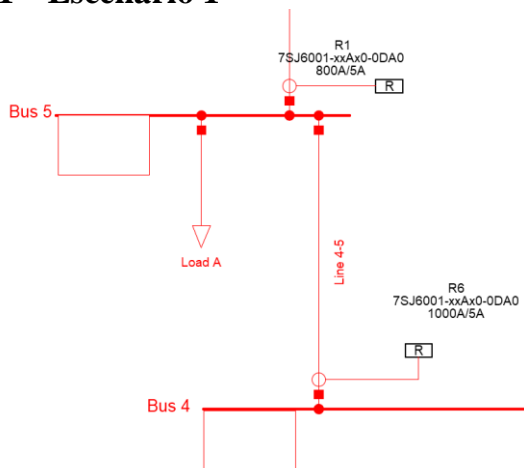


Figura 11 Ubicación de los relés para el escenario 1.

Para este caso se evaluarán los resultados mediante simulaciones sucesivas en las cuales se presentan las gráficas de coordinación de protecciones para los casos de fallas correspondiente al 20 50 y 80 % de la línea en el que se puede visualizar la correcta operación del dispositivo de protección tanto principal R6 como de Respaldo R1.

Relé	Ajuste	Valores no optimizados	Valor Optimizado
R6	Pick-up	0.77 sec. A	0.77 sec. A
	TDS	0.61[s]	0.52 [s]
	Top	167-149-135[ms]	139-124-112[ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA
R1	Pick-up	1.46 sec. A	1.46 sec. A
	TMS	1.29 [s]	1.22[s]
	Top	518-355-305[ms]	484-422-335[ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA

Tabla 4 Valores tradicionales vs Valores optimizados

En la figura 13 ara el caso de una falla al 20% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R6 opera a los 139 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 484 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 20 % de la línea 4-5 el relé R6 registra una corriente de falla de 785 A con un tiempo de operación de 1193 ms.

En la figura 14 Para el caso de una falla al 50% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R6 opera a los 124 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 422 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms, en este mismo

escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 50 % de la línea 4-5 el relé R6 registra una corriente de falla de 708A con un tiempo de operación de 1455 ms visto por el relé de respaldo.

En la figura 15 para el caso de una falla al 80% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R6 opera a los

112 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 335 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 80 % de la línea 4-5 el relé R6 registra una corriente de falla de 638 A con tiempo de operación de 1804 ms vistos por el relé de respaldo.

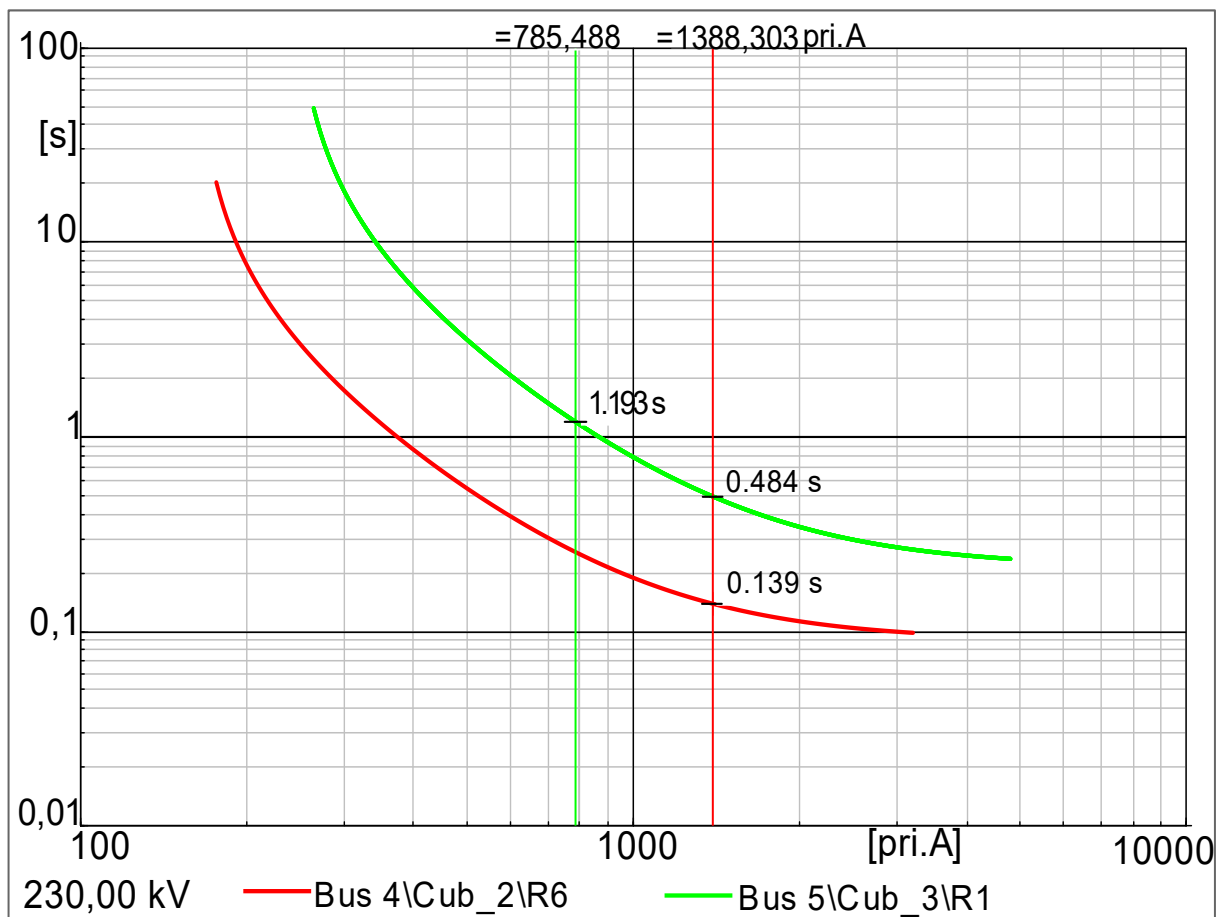


Figura 12 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 20% de la línea 4-5.

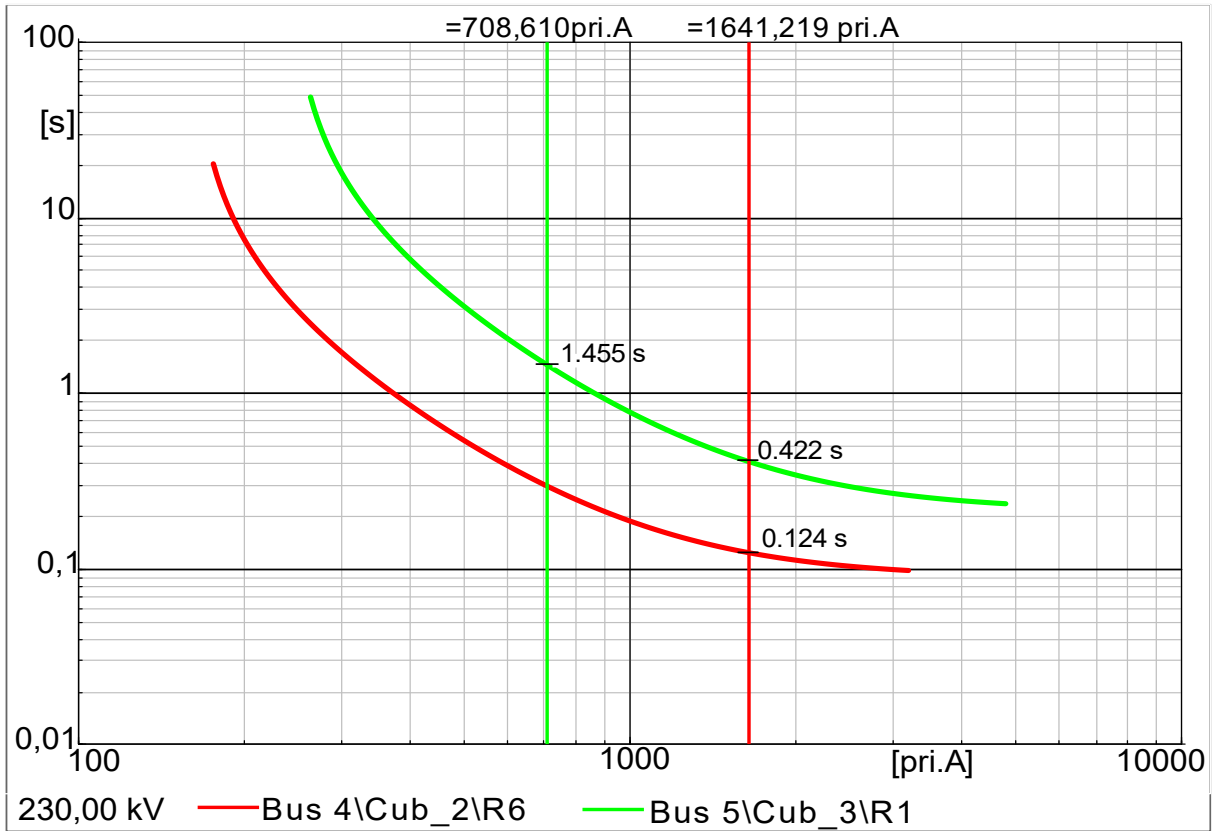


Figura 13 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 50% de la línea 4-5.

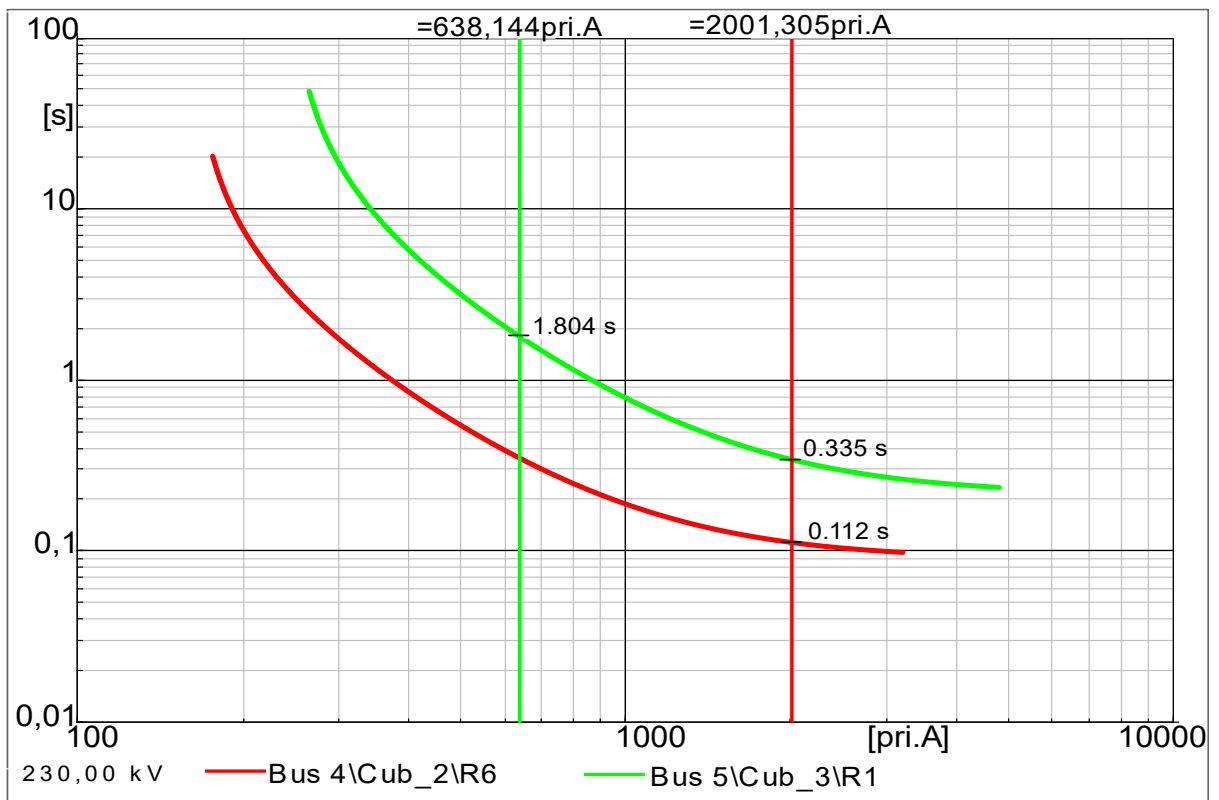


Figura 14 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 80% de la línea 4-5.

4.2 Escenario 2

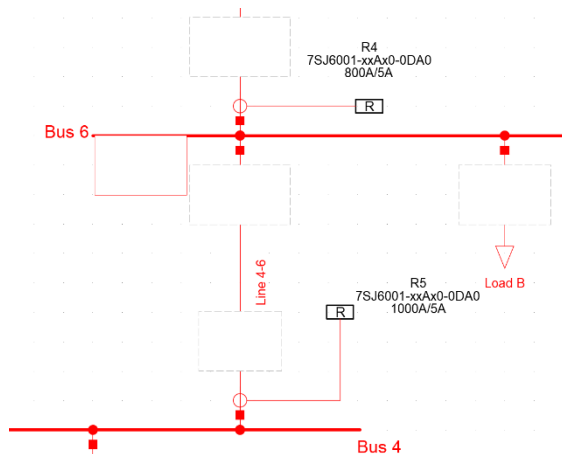


Figura 15 Ubicación de los relés para el escenario 2.

Para este caso se evaluarán los resultados mediante simulaciones sucesivas en las cuales se presentan las gráficas de coordinación de protecciones para los casos de fallas correspondiente al 10, 50 y 90 % de la línea en el que se puede visualizar la correcta operación del dispositivo de protección tanto principal R5 como de Respaldo R4.

Relé	Ajuste	Valores no optimizados	Valor Optimizado
R5	Pick-up	0.38 sec. A	0.38 sec. A
	TDS	0.57 [s]	0.53 [s]
	Top	124-118-118 [ms]	103-98-98[ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA
R4	Pick-up	0.99 sec. A	0.99 sec. A
	TDS	1.45[s]	1.42[s]
	Top	431-366-321 [ms]	404-341-300[ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA

Tabla 5 Valores tradicionales vs Valores optimizados

En la figura 17 para el caso de una falla al 10% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R5 opera a los 103 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 404 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 10 % de la línea 6-4 el relé R4 registra una corriente de falla de 742 A con un tiempo de operación de 776 ms.

En la figura 18 para el caso de una falla al 50% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R5 opera a los 98 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 341 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 50 % de la línea 6-4 el relé R4 registra una corriente de falla de 644 A con un tiempo de operación de 968 ms.

En la figura 19 para el caso de una falla al 90% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R5 opera a los 98 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 300 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms.

En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 90 % de la línea 6-4 el relé R4 registra una corriente de falla de 554 A con un tiempo de operación de 1074 ms.

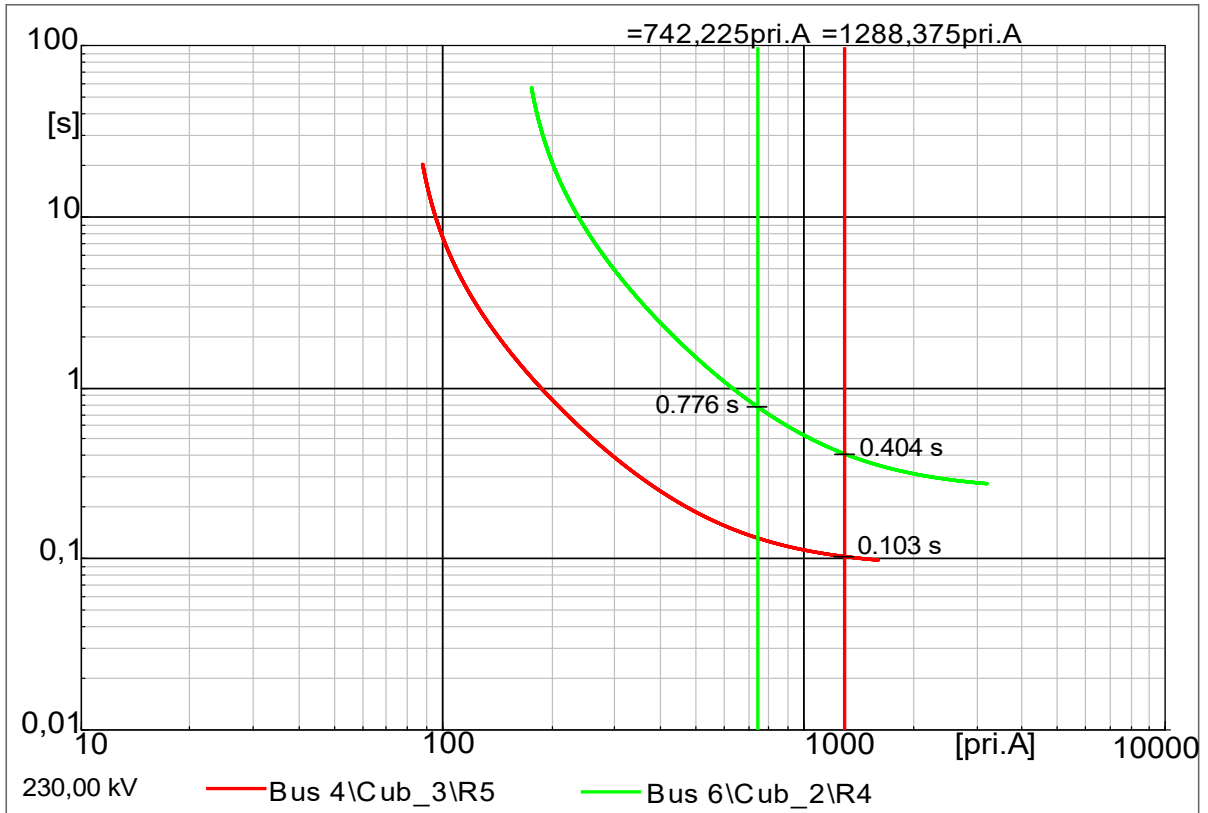


Figura 16 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 10% de la línea 4-6.

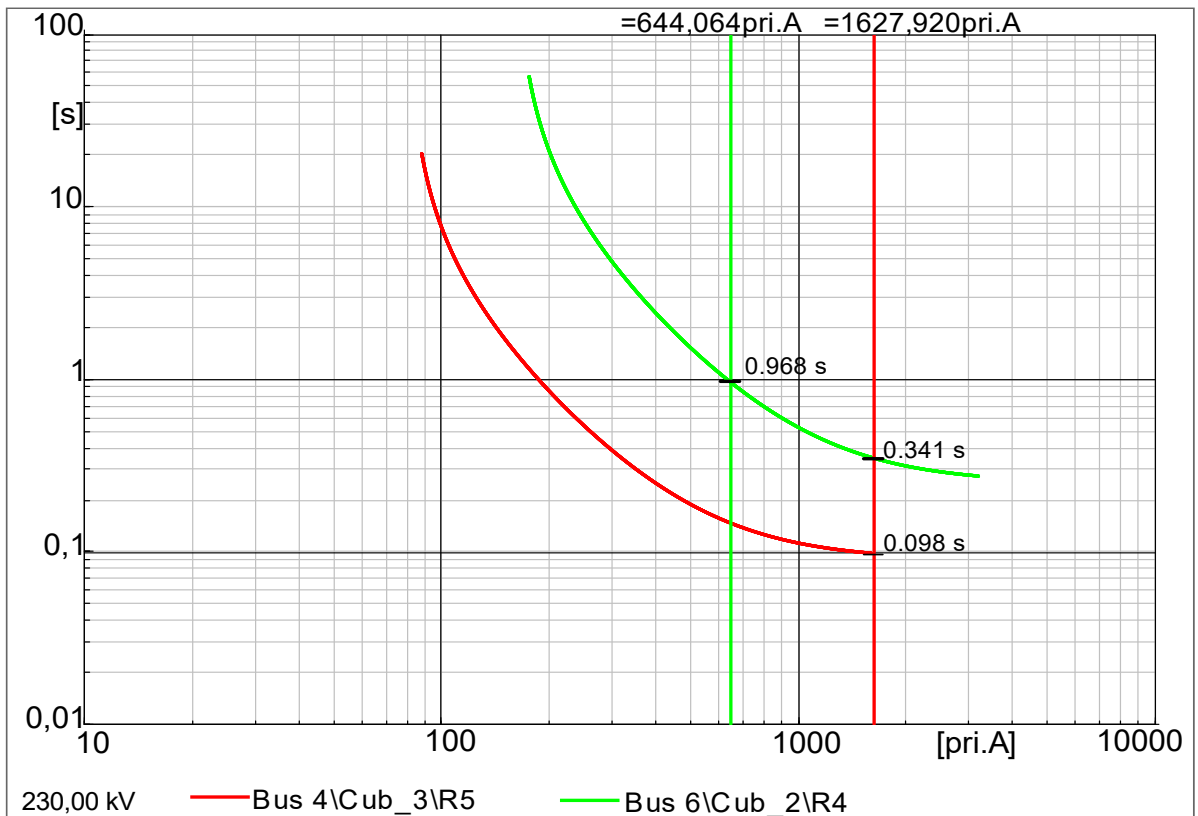


Figura 17 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 50% de la línea 4-6.

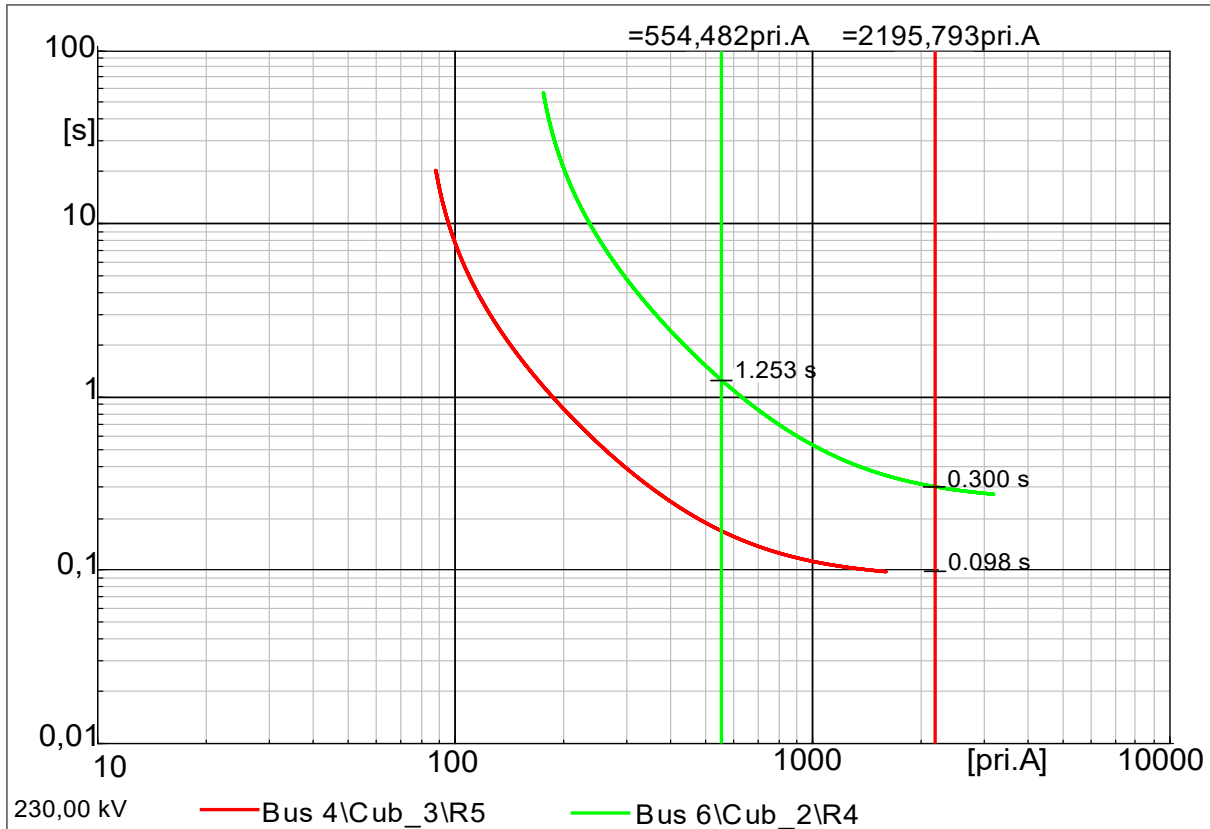


Figura 18 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 90% de la línea 4-6.

4.3 Escenario 3

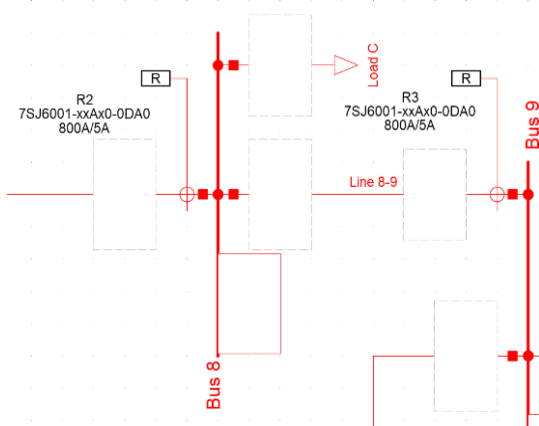


Figura 19 Ubicación de los relés para el escenario 3.

Para este caso se evaluarán los resultados mediante simulaciones sucesivas en las cuales se presentan las gráficas de coordinación de protecciones para los casos de fallas correspondiente al 10 60 y 90 % de la línea en el que se puede visualizar la

correcta operación del dispositivo de protección tanto principal R3 como de Respaldo R2.

Relé	Ajuste	Valores no optimizados	Valor Optimizado
R3	Pick-up	0.46 sec. A	0.46 sec. A
	TDS	0.61 [s]	0.54 [s]
	Top	134-125-118[ms]	112-102-98[ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA
R2	Pick-up	1.22 sec. A	1.22 sec. A
	TDS	1.32 [s]	1.21 [s]
	Top	453-379-317[ms]	466-356-300 [ms]
	Curva	IEEE INVERSA	IEEE INVERSA

Tabla 6 Valores tradicionales vs Valores optimizados

En la figura 21 para el caso de una falla al 10% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R3 opera a los

112 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 466 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 10 % de la línea 8-9 el relé R2 registra una corriente de falla de 1199A con un tiempo de operación de 376 ms. Además, que en la gráfica se puede ver una diferencia que el relé de respaldo se observa una corriente mayor que el relé principal.

En la figura 22 para el caso de una falla al 60% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R3 opera a los 102 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 356 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms. En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de

este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 60 % de la línea 8-9 el relé R2 registra una corriente de falla de 934A con un tiempo de operación de 4 ms. En la figura 2 para el caso de una falla al 90% de la línea se puede observar que el relé de protección principal R3 opera a los 98 ms mientras que el relé de respaldo opera a los 300 ms garantizando el CTI considerado de 200 ms.

En este mismo escenario se puede diferenciar las corrientes de cortocircuito de este sistema mallado cuya corriente de cortocircuito varía según el aporte de la fuente de generación tal es en este caso que al presentarse la falla al 90 % de la línea 8-9 el relé R2 registra una corriente de falla de 816A con un tiempo de operación de 581 ms.

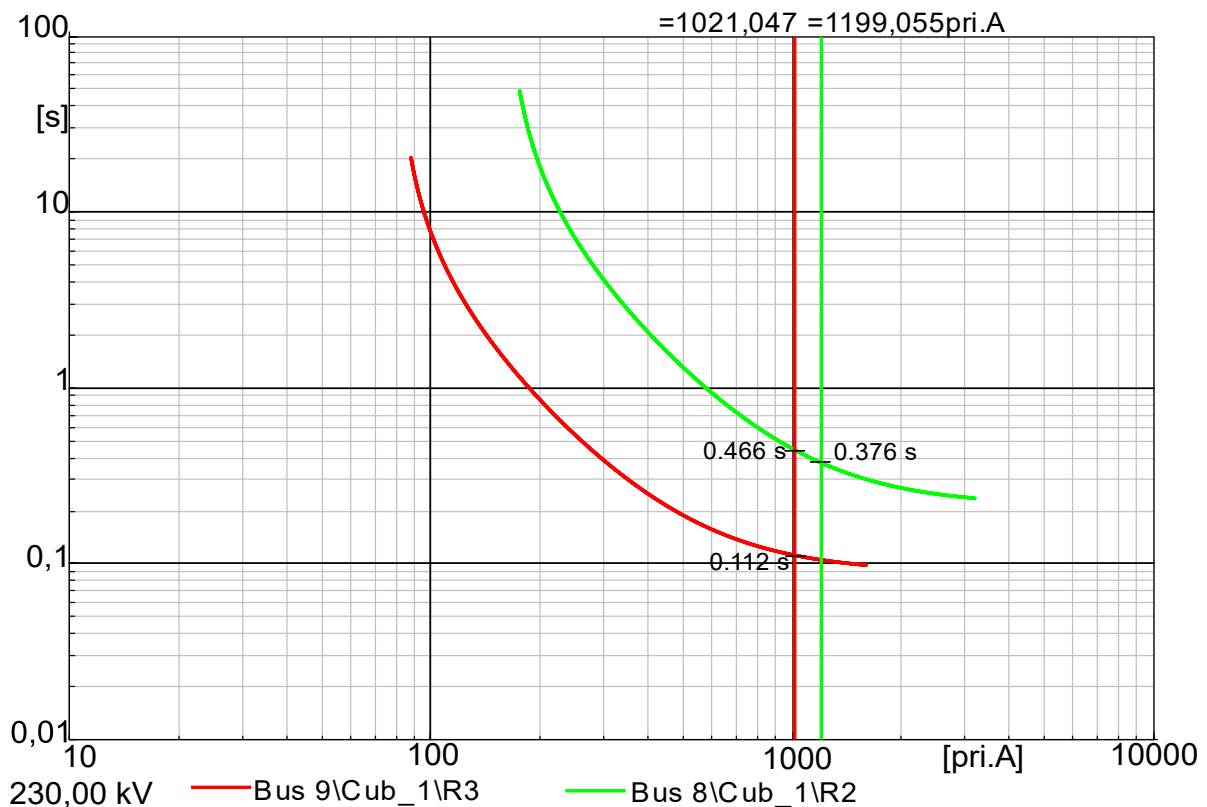


Figura 20 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 10% de la línea 8-9.

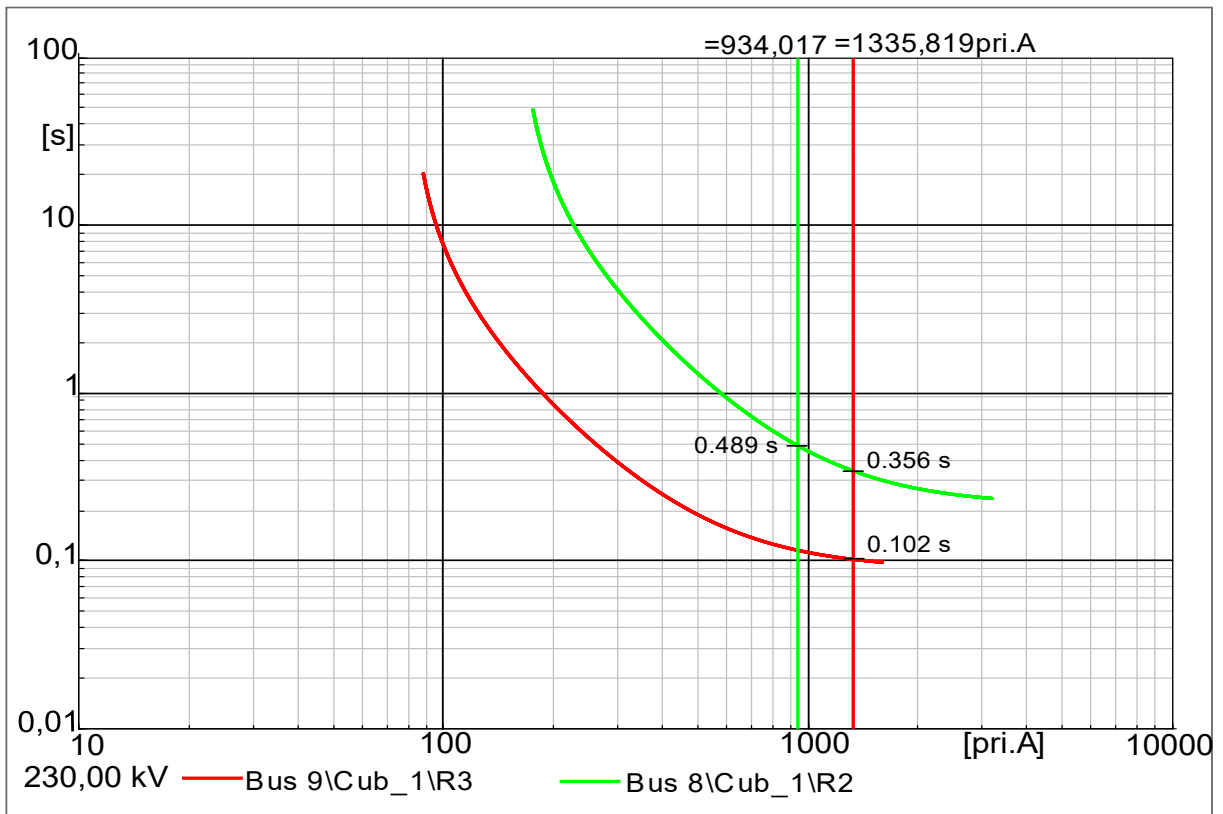


Figura 22 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 60% de la línea 8-9.

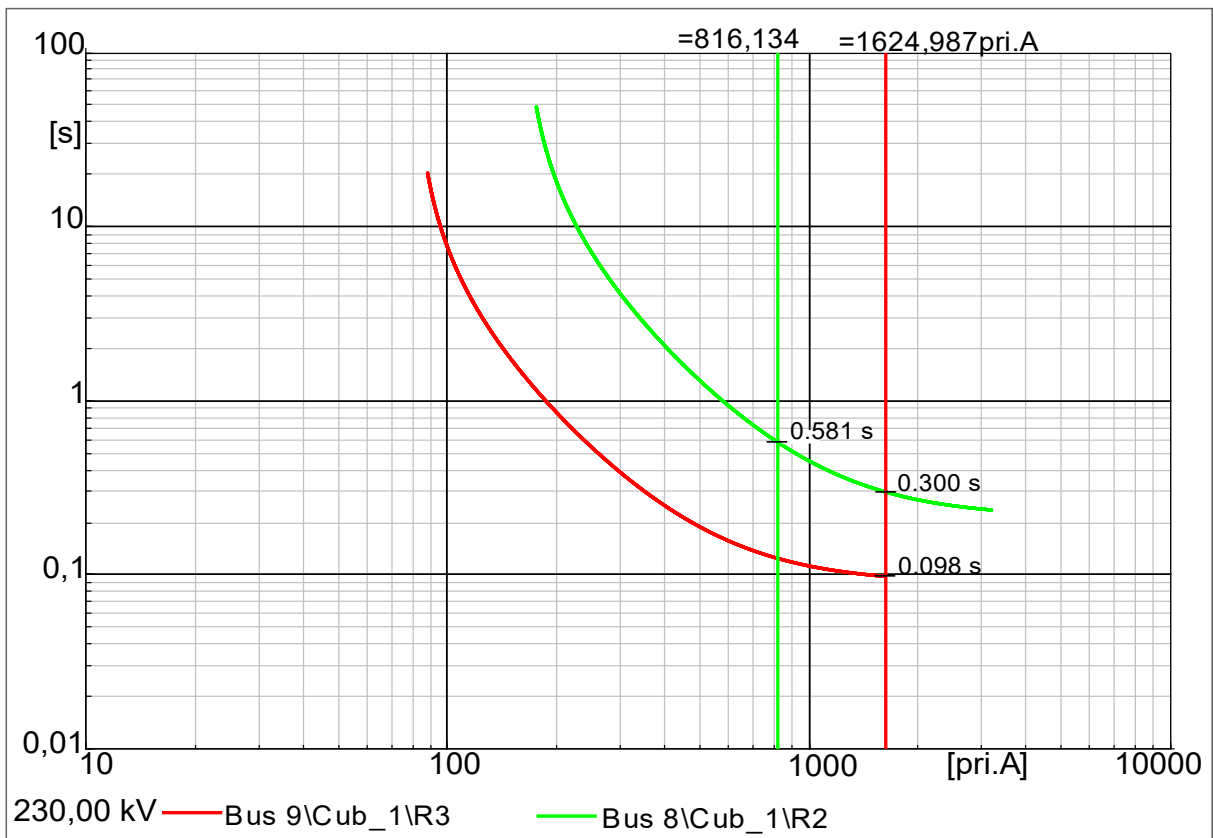


Figura 21 Tiempos de operación ante la presencia de una falla al 90% de la línea 8-9.

4.4 Análisis de resultados del algoritmo de optimización frente a las técnicas tradicionales.

Relé R5: Se mostró la mayor mejora individual con una reducción del **16.94%** en el tiempo de operación, disminuyendo de 124 ms a 103 ms. Este resultado indica una optimización altamente efectiva en uno de los puntos clave del sistema.

Relé R6: También se presentó una mejora importante del **16.77%**, reduciendo su tiempo máximo de 167 ms a 139 ms, lo que respalda la eficacia del algoritmo en reducir la latencia de respuesta sin comprometer la selectividad.

Relé R3: Alcanzó una mejora del **16.42%**, bajando de 134 ms a 112 ms. Este ajuste evidencia una respuesta más rápida y eficaz del relé frente a las fallas en su zona de protección.

Relé R4: Experimentó una disminución del **6.26%** en su tiempo de operación máximo (de 431 ms a 404 ms), manteniendo un margen de coordinación adecuado con los demás dispositivos del sistema.

Relé R1: Logró una mejora del **6.56%**, ajustando su tiempo de 518 ms a 484 ms. Este resultado refleja una actuación más eficiente frente a fallas, dentro del marco de coordinación definido.

Relé R2: Es el único dispositivo que presentó un ligero incremento del **2.87%** en su tiempo de operación (de 453 ms a 466 ms). Este aumento no representa una degradación del desempeño, sino más bien una necesidad de ajuste para preservar la coordinación con los relés de respaldo en condiciones críticas.

5 Conclusiones

El algoritmo propuesto aborda el problema de ajuste de protecciones de sobrecorriente temporizada, aunque suele actuar como sistema de respaldo en un sistema de transmisión, su correcto ajuste es

fundamental para garantizar una respuesta oportuna y coordinada ante fallas cumplir con los parámetros requeridos, como el valor de la Pickup y el TMS, permite asegurar que esta protección respalde adecuadamente a otras funciones primarias sin comprometer la sensibilidad ni la selectividad del sistema eléctrico.

El algoritmo posee una alta flexibilidad en los cálculos requeridos para el ajuste automático de protecciones de sobrecorriente temporizada, esta flexibilidad se evidencia en su capacidad de evaluar distintos tipos de curva de tiempo inverso y corrientes de falla como también los parámetros de ajuste para n cantidad de relés.

La función objetivo de minimización se orienta a disminuir el total de los tiempos de respuesta correspondientes a los relés (51), junto con las restricciones técnicas definidas como el cumplimiento de selectividad, el límite del TMS y los valores válidos de pickup, ha demostrado ser eficaz para optimizar el ajuste automático de estas protecciones. La implementación del algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes (GOA) permitió evaluar múltiples combinaciones de parámetros de ajuste, clasificarlas por desempeño, descartar soluciones no viables explorar nuevas combinaciones en función de las mejores soluciones encontradas en cada iteración. Como resultado, se logró reducir los tiempos de operación si comprometer la coordinación entre relés principales y de respaldo, validando la efectividad del enfoque propuesto mediante simulaciones sucesivas en el sistema IEEE 9 barras.

En redes mallados, donde el comportamiento de la corriente de falla es más complejo y dinámico que en sistemas radiales, el uso de la técnica de optimización como GOA permite ajustar de manera precisa los parámetros de protección. Los datos obtenidos mediante el algoritmo de optimización bioinspirado en saltamontes logra reducir de una manera

general los tiempos de operación de los relés en comparación con técnicas tradicionales. Una reducción promedio del 10.01% en los tiempos de operación (Top) de los relés analizados los resultados de optimización no solo contribuyen a una actuación selectiva de los relés principales, sino que también garantiza el cumplimiento de los márgenes de coordinación requeridos para los relés de respaldo.

6 Trabajos Futuros

Se recomienda aplicar otros algoritmos, con el fin de comparar resultados obtenidos mediante el algoritmo de optimización por cumulo de saltamontes (GOA). Esta comparación puede permitir verificar si se han alcanzado óptimos locales en la minimización de los tiempos de operación y determinar la robustez y eficiencia relativa de cada técnica. Además, se sugiere considerar todas las restricciones necesarias para poder resolver el problema de optimización y obtener los parámetros de ajuste que permitan operar de manera adecuada a los relés 51 al disminuir sus tiempos de operación con respecto al ajuste.

7 Referencias

- [1] D. Álvarez-Osorio, O. Arenas-Crespo, P. Arregocés-Guerra, J. C. Rodríguez Suárez, O. Tobar-Rosero, and G. Zapata-Madriral, "Modernización del Sistema de Diagnóstico Automático de Eventos en Líneas de Transmisión y Subtransmisión de Energía Eléctrica," *Revista EIA*, vol. 22, no. 43, pp. 1–41, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1768>.
- [2] J. Herrera Yarleque, M. Roja, F. F. Santamaria, and P. Valvidia, "PROTECCIONES EN LINEAS ELECTRICAS," Dec. 2020.
- [3] R. Rosero, "Estado del Arte criterios de coordinación de protecciones en líneas de transmisión," *IDEAS*, vol. 2, n.º 1, pp. 1–15, jun. 2020, Accessed: Apr. 09, 2025. [Online]. Available: <http://201.159.222.149/index.php/ideas/article/view/362>
- [4] V. R. Mahindra, D. F. C. Rodriguez, M. Pitjantjara, A. Prayed, M. H. Purnomo, and E. Muljadi, "Practical Challenges of Inverse and Definite-Time Overcurrent Protection Coordination in Modern Industrial and Commercial Power Distribution System," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 57, no. 1, pp. 187–197, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3030564.
- [5] X. S. Yang, "Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems," *J Comput Sci*, vol. 46, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jocs.2020.101104.
- [6] F. Zitouni, S. Harous, A. Belkeram, and L. E. B. Hammou, "The Archerfish Hunting Optimizer: a novel metaheuristic algorithm for global optimization," Feb. 2021, doi: 10.3233/FI-2021-0001.
- [7] R. A. Pratiwi, M. Pujiantara, and A. Priyadi, "Optimization of Time Dial Setting Overcurrent Relay Using Cuckoo Search Algorithm Considering Inrush Current and Motor Starting," in *Proceedings - 11th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, ICITACEE 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 128–133. doi: 10.1109/ICITACEE62763.2024.10762774.
- [8] R. R. Wibisono, M. Pujiantara, and A. Priyadi, "Optimizing of Protection Coordination Overcurrent Relay Using Adaptive Modified Firefly Algorithm in Gases

- Industrial,” in *ICEECIT 2024 - Proceedings: 2nd International Conference on Electrical Engineering, Computer and Information Technology 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 396–401. doi: 10.1109/ICEECIT63698.2024.10859710.
- [9] A. Kuriakose and S. Balamurugan, “Optimum Overcurrent Relay Coordination in Radial System using Particle Swarm Optimization,” in *2023 IEEE 7th Conference on Information and Communication Technology, CICT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/CICT59886.2023.10455379.
- [10] J. D. Alejandro and M. C. Pacis, “Adaptive Coordination of Time Overcurrent Relays (OCR) in a Radial Distribution Network with Distributed Generation using a Modified LINKNET Pairing Algorithm,” in *2024 10th International Conference on Automation, Robotics, and Applications, ICARA 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 407–410. doi: 10.1109/ICARA60736.2024.10552953.
- [11] T. S. S. Senarathna and K. T. M. U. Hemapala, “Optimized Adaptive Overcurrent Protection Using Hybridized Nature-Inspired Algorithm and Clustering in Microgrids,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13133324.
- [12] D. Jiménez, W. Andino, M. Soria, and F. Pérez, “Coordinación Óptima de Relés de Sobrecorriente Temporizados empleando Algoritmos Heurísticos COA y GSA,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 21, no. 1, pp. 34–43, Jul. 2024, doi: 10.37116/revistaenergia.v21.n1.2024.640.
- [13] M. B. Atsever, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu, “Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems,” in *2021 11th Smart Grid Conference, SGC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/SGC54087.2021.9664218.
- [14] C. Luo, Y. Xu, and Q. Liu, “Using Improved Pollen Algorithm to Optimize Coordination of Relay Protection; Using Improved Pollen Algorithm to Optimize Coordination of Relay Protection,” 2020, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349723/20/\$31.00.
- [15] H. Amreiz, A. Janbey, and M. Darwish, “Emulations of Overvoltage and Overcurrent Relays In Transmission Lines,” in *2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC55022.2022.9917757.
- [16] Ciufu John and Cooperberg Aaron, “Power System Protection: Fundamentals and Applications,” in *Power System Protection*, John Wiley & Sons, Ltd, 2021, ch. 1, pp. 1–12. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119847397.ch1>.
- [17] A. I. Quinte Sinchi and Á. J. Mendoza Puruncajas, “Análisis Técnico Económico de Protecciones en Líneas de Transmisión de 500kv para Cortocircuito y Sobrevoltaje en Referencia al Tramo San Rafael El Inga Investigación Tecnológica Ist

- Central Técnico,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 1, pp. 7700–7714, Mar. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i1.10100.
- [18] A. J. Martínez Peralta *et al.*, “Electrical protections in electrical substations: documentary analysis,” *Sapienza*, vol. 3, no. 1, pp. 1004–1021, 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i1.280.
- [19] J. de Jesús Jaramillo Serna and J. M. López-Lezama, “Alternative methodology to calculate the directional characteristic settings of directional overcurrent relays in transmission and distribution networks,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12193779.
- [20] C. Morales, C. Hernandez, and M. A. Arjona, “Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 5, pp. 807–814, 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9448315.
- [21] L. F. Martínez Cabrera, “Sistema de protección en estaciones de transmisión,” *Editorial Autores de Argentina*, p. 108, 2020.
- [22] “CRITERIOS DE AJUSTE Y COORDINACION DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION DEL SEIN,” 2005.
- [23] R. S. F. J. Putra, M. Pujiantara, and V. Lystianingrum, “Overcurrent Relay Coordination Setting on Distribution Power System Using Grasshopper optimization Algorithm,” in *2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications: Leveraging Intelligent Systems to Achieve Sustainable Development Goals, ISITIA 2023 - Proceeding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 804–809. doi: 10.1109/ISITIA59021.2023.10221124.
- [24] M. Rojnić, R. Prenc, M. Dubravac, and Z. Šimić, “Analyzing Standardized Inverse Time-Current Curve Types of Overcurrent Relays for Efficient Overcurrent Protection in Distribution Networks,” in *2024 47th ICT and Electronics Convention, MIPRO 2024 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 1688–1693. doi: 10.1109/MIPRO60963.2024.10569926.
- [25] A. Simonetto, E. Dall’Anese, S. Paternain, G. Leus, and G. B. Giannakis, “Time-Varying Convex Optimization: Time-Structured Algorithms and Applications,” Jun. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2006.08500>
- [26] Y. A. N. Yan, M. A. Hongzhong, and L. I. Zhendong, “An Improved Grasshopper Optimization Algorithm for Global Optimization,” *Chinese Journal of Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 451–459, May 2021, doi: 10.1049/cje.2021.03.008.
- [27] I. Ullah, I. Hussain, and M. Singh, “Exploiting grasshopper and cuckoo search bio-inspired optimization algorithms for industrial energy management system: Smart industries,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/electronics9010105.
- [28] S. Saremi, S. Mirjalili, and A. Lewis, “Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application,” *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30–47, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004>.
- [29] R. Prenc, M. Rojnić, D. Franković, and S. Vlahinić, “On the

Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks,” Sep. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15186528.

8 Matriz de Estado del Arte

Tabla 7: Matriz de estado del arte.

AJUSTE AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA APLICADA A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN SIMULACIONES SUCESIVAS Y EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES																						
	Año	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
				PROTECCION DE SISTEMAS DE TRANSMISION	AJUSTE DE RELÉS 51	SIMULACIÓN POWER FACTORY	ALGORITMO BIOINSPIRADOS	COORDINACION PRIMARIA Y DE RESPALDO	DESCOORDINACION DE RELÉS	TIEMPOS DE OPERACIÓN INADECUADOS	VALORES DE PICKUP POCO DELICIAS	INEFICIENCIA DE METODOS MANUALES	DIFICULTAD PARA SIMULAR MULTIPLESFALLAS	CORRIENTE DE CARGA	CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	RELACION DE TRANSFORMACIÓN	ALGORITMO GOA	FUNCION OBJETIVO CON PENALIZACION	VALIDACION EN EL SISTEMA IEEE9 BARRAS	INTERFAZ PYTHON' POWER FACTORY	AJUSTE OPTIMO Y AUTOMATICO DE PICKUP Y TMS	REDUCCION DE TIEMPO TOTAL DE OPERACION
1	2024	Modernización del Sistema de Diagnóstico Automático de Eventos	10	☒									☒				☒					
2	2020	Protecciones en Líneas Eléctricas	1	☒	☒				☒	☒				☒				☒		☒		
3	2020	Estado del Arte Criterios de Coordinación	1	☒	☒				☒	☒									☒	☒		
4	2021	Practical Challenges of Inverse and Definite-Time Overcurrent Protection Coordination in Modern Industrial and Commercial Power Distribution System	473		☒		☒												☒			
5	2020	Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems	314		☒								☒	☒			☒			☒		☒
6	2021	The Archerfish Hunting Optimizer: a novel metaheuristic algorithm for global optimization	61			☒		☒	☒	☒			☒	☒					☒	☒		☒
7	2024	Optimization of Time Dial Setting Overcurrent Relay Using Cuckoo Search Algorithm Considering Inrush Current and Motor Starting	1		☒		☒	☒	☒	☒									☒	☒		☒

AJUSTE AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA APLICADA A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN SIMULACIONES SUCESIVAS Y EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES

	Año	TÍTULO DEL ARTÍCULO		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
				PROTECCION DE SISTEMAS DE TRANSMISION	AJUSTE DE RELÉ DE SOBRECORRIENTE	SIMULACIÓN POWER FACTORY	ALGORITMO BIOINSPIRADOS	COORDINACION PRIMARIA Y DE RESPALDO	DESCOORDINACION DE RELÉS	TIEMPOS DE OPERACIÓN INADECUADOS	VALORES DE PICKUP POCO REALISTAS	INEFICIENCIA DE METODOS MANUALES	DIFICULTAD PARA SIMULAR MULTIPLES FALLAS	CORRIENTE DE CARGA	CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	RELACION DE TRANSFORMACIÓN	ALGORITMO GOA	FUNCION OBJETIVO CON PENALIZACIÓN	VALIDACION EN EL SISTEMA IEEE9 BARRAS	INTERFAZ PYTHON' POWER FACTORY
8	2024	Optimizing of Protection Coordination Overcurrent Relay Using Adaptive Modified Firefly Algorithm in Gases Industrial	12	✗	✗		✗	✗										✗	✗	✗
9	2023	Optimum Overcurrent Relay Coordination in Radial System using Particle Swarm Optimization	1	✗			✗	✗											✗	✗
10	2024	Adaptive Coordination of Time Overcurrent Relays (OCR) in a Radial Distribution Network with Distributed Generation using a Modified LINKNET Pairing Algorithm	250	✗			✗	✗											✗	✗
11	2020	Optimized Adaptive Overcurrent Protection Using Hybridized Nature-Inspired Algorithm and Clustering in Microgrids	21	✗			✗	✗											✗	✗
12	2024	Coordinación Óptima de Relés de Sobrecorriente Temporizados empleando Algoritmos Heurísticos COA y GSA	2	✗			✗	✗		✗	✗						✗			✗
13	2021	Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems	3	✗			✗	✗												✗
14	2020	Using Improved Pollen Algorithm to Optimize Coordination of Relay Protection; Using Improved Pollen Algorithm to Optimize Coordination of Relay Protection	1				✗	✗												
15	2022	Emulations of Overvoltage and Overcurrent Relays In Transmission Lines	1	✗	✗											✗				✗
16	2021	Power System Protection: Fundamentals and Applications," in Power System Protection																		

AJUSTE AUTOMÁTICO DE LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE TEMPORIZADA APLICADA A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN SIMULACIONES SUCESIVAS Y EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN BIOINSPIRADO EN SALTAMONTES

	Año	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				PROTECCION DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	AJUSTE DE RELÉ SOBRECORRIENTE	SIMULACIÓN POWER FACTORY	ALGORITMO BIOINSPIRADOS	COORDINACION PRIMARIA Y DE RESPALDO	DESCOORDINACION DE RELÉS	TIEMPOS DE OPERACIÓN INADECUADOS	VALORES DE PICKUP POCO REALISTAS	INEFICIENCIA DE METODOS MANUALES	DIFICULTAD PARA SIMULAR MULTIPLE FALLAS	CORRIENTE DE CARGA	CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	RELACION DE TRANSFORMACIÓN	ALGORITMO GOA	FUNCION OBJETIVO CON PENALIZACIÓN	VALIDACION EN EL SISTEMA IEEE9 BARRAS	INTERFAZ PYTHON' POWER FACTORY	AJUSTE OPTIMO Y AUTOMATICO DE PICKUP Y TMS
17	2024	Análisis Técnico Económico de Protecciones en Líneas de Transmisión de 500kv para Cortocircuito y Sobrevoltaje en Referencia al Tramo San Rafael El Inga Investigación Tecnológica Ist Central Técnico	1	☒	☒							☒									
18	2022	Electrical protections in electrical substations: documentary analysis	5																		
19	2019	Alternative methodology to calculate the directional characteristic settings of directional overcurrent relays in transmission and distribution networks	21	☒	☒																
20	2021	Undergraduate Teaching of Electric Network Protection Using Simulations and Lab Experiments	2						☒									☒	☒	☒	
21	2020	Sistema_de_protección_en_estaciones_de_transmisión	18	☒														☒	☒	☒	
22	2005	CRITERIOS DE AJUSTE Y COORDINACION DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION DEL SEIN		☒	☒																
23	2023	Overcurrent Relay Coordination Setting on Distribution Power System Using Grasshopper Optimization Algorithm	2	☒	☒		☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒	
24	2024	Analyzing Standardized Inverse Time-Current Curve Types of Overcurrent Relays for Efficient Overcurrent Protection in Distribution Networks	2	☒	☒				☒											☒	☒

8.1 Resumen de indicadores

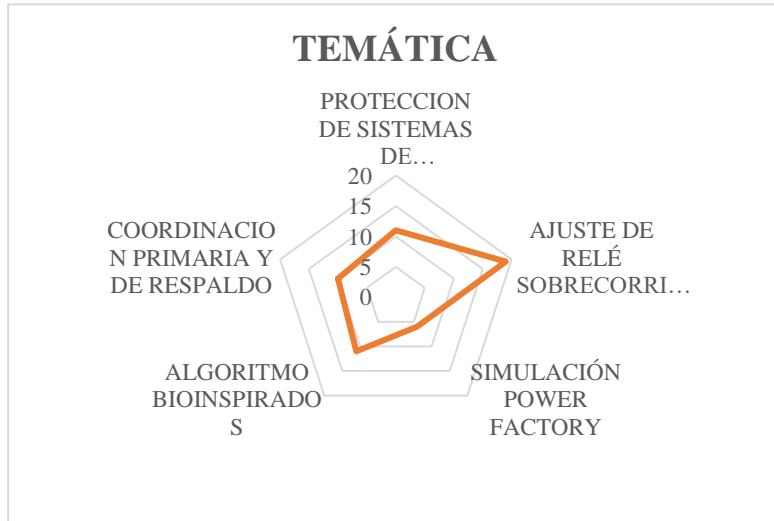


Figura 25 Indicador de la temática estado del arte

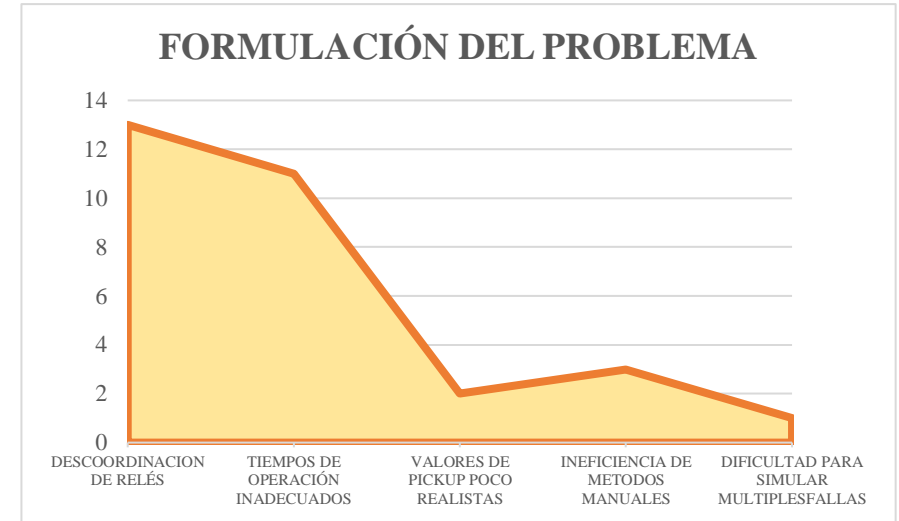


Figura 23 Indicador de formulación del problema-Estado del arte

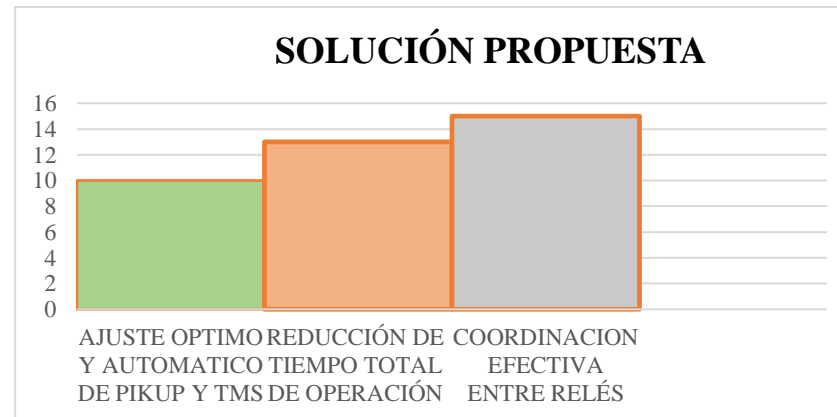


Figura 24 Indicador de la solución propuesta estado del arte