

# Estado del Arte criterios de coordinación de protecciones en líneas de transmisión

**Rosalía Revelo<sup>1</sup>, Ricardo Rosero<sup>2</sup>, Andrés Cuasapaz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Politécnica Salesiana, Maestría en electricidad Mención Sistemas Eléctrico en Potencia. Quito, (Ecuador)

<sup>2</sup>SUCRE Instituto Tecnológico Superior, Carrera de Electricidad Av. 10 de Agosto N26-27 y Luis Mosquera Narvárez, Quito, Ecuador.

*1rrevelos@est.ups.edu.ec, 2rrosero@tecnologicosucre.edu.ec, dcuasapaz@tecnologicosucre.edu.ec*

## RESUMEN.

En un sistema eléctrico de potencia (SEP), se ejecutan diversas interacciones entre los actores y componentes internos y externos, que involucran acciones y toma de decisiones económicas y técnicas. La confiabilidad del sistema viene ligado a su diseño, construcción, operación, mantenimiento y respuesta oportuna ante fallas eléctricas. En esta recopilación de información técnica, se ha realizado una investigación abordando los temas de las protecciones eléctricas, enfocadas principalmente en los competentes de Líneas de Transmisión, logrando tener un criterio de coordinación de protecciones, considerando la interacción de elementos activos y su comportamiento ante fallas, logrando encontrar fenómenos asociados en la dinámica del sistema como problemas topológicos, fenómenos transitorios, condiciones extremas, fenómenos naturales y analizar en base a lo ocurrido en los antecedentes de posibles aperturas incorrectas de los relés, aportando con criterios de calibración, para lograr una óptima operación y actuación correcta de protecciones en estado estable y transitorio.

**Palabras Clave:** Protecciones eléctricas, relé, sobre corriente; relé de distancia, condiciones extremas, línea de transmisión, coordinación, estado del arte.

## Introduction

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) conformados por generadores, líneas de transmisión y cargas están interconectados e interactúan todo el tiempo debido al comportamiento natural del sistema eléctrico. Además, la relación existente entre generación y demanda, existen elementos dinámicos como los generadores y elementos estáticos como líneas de transmisión y cargas que se relacionan entre sí por las leyes físicas que rigen la transformación de energía eléctrica y mecánica [1].

El principal problema que tienen los sistemas de transmisión específicamente el alto voltaje superior a 500 kV es mantener la estabilidad frente a fallas [2]. En ocasiones y dependiendo del tipo de falla, el SEP es incapaz de volver a un punto de estabilidad a pesar de aplicar sus mecanismos de reacción y defensa como la regulación en distintos niveles del valor de frecuencia.

Para prevenir todos estos fenómenos y tener control sobre ellos, se han implantado esquemas de protección sofisticados. Entre estos esquemas de protección se tiene: alivio de carga, de alivio de generación, de protección sistémica, de protección local, sistemas de medición en tiempo real, estimador de estado, sistemas de protección ante oscilaciones. Además, en los generadores se han implementado sistemas de control de alto nivel de respuesta como reguladores de velocidad, reguladores de voltaje. Y a pesar de todos los esfuerzos, se tienen fallas catastróficas, que evaden todo sistema de control. Más aún si se incluyen a toda la dinámica del SEP, la ocurrencia de condiciones extremas como fenómenos naturales y/o rechazos de carga que llevan al SEP a un sistema de emergencia y colapso.

Para abordar toda la problemática descrita, en esta investigación se realiza un aporte significativo en el estudio del estado del arte de las protecciones eléctricas. El presente documento se divide en cuatro secciones: la problemática en el área de protecciones, los fundamentos básicos y principios de las protecciones, y las metodologías existentes para el desarrollo matemático y algoritmos utilizados en diferentes aplicaciones. Finalmente se presentan las conclusiones del presente artículo.

## Problemática

Diseñar un sistema de protección que sea preciso, confiable, seguro, rápido, selectivo y sensitivo ante mínimas variaciones es un arte. A través de la historia los sistemas de protección se han desarrollado junto a la academia, quienes han aportado con metodologías avanzadas y precisas para la calibración, detección de fallas y diseño de protecciones que hoy tienen gran avance tecnológico [3].

Con las tecnologías actuales en la computación y la velocidad de procesamiento de los equipos, han aportado en la creación de nuevas herramientas computacionales en software y hardware, siendo capaces de reaccionar rápidamente en el orden de milisegundos y microsegundos.

La matemática en la actualidad es capaz de resolver problemas de gran complejidad, con muchas variables y llegar a una respuesta muy cercana al óptimo, con métodos de optimización, algoritmos, heurísticas y solución de ecuaciones diferenciales no lineales.

Un tema complejo y con aplicaciones puntuales es el tema de la actuación de una protección ante una contingencia N-x, casos que se presentan cuando ocurre una salida en cascada de equipos o a su vez cuando se tiene un desastre natural o de vandalismo. Entre los desastres naturales podemos mencionar huracanes terremotos, maremotos, tsunamis, erupción volcánica y entre los casos de vandalismo se tienen ataques, guerras, terrorismo [4], prevenir un desastre natural es un reto para la ingeniería actual, sin embargo se debe destacar que el desarrollo tecnológico considera equipamiento antisísmico, y esta característica es parte del diseño de una nueva infraestructura donde se debe garantizar que la subestación que contiene los equipos más costosos de la instalación, como el transformador de potencia, y el equipo primario, interruptores, seccionadores, pararrayos, se afecten en mínima cantidad [5].

Los desastres naturales causan blackouts que dejan al sistema eléctrico en emergencia, y se necesita entender los impactos de aquellos fenómenos para incrementar la resiliencia del SEP. La tecnología que se ha implementado para prevenir y predecir estos fenómenos consiste en equipos de medición inteligente y las Smart Grids [6].

Los efectos en el SEP en un desastre natural van más allá de los daños físicos en infraestructuras, produciendo averías en el sistema eléctrico, en los sistemas de transporte, bombeo, agua potable e hidrosanitarios [4], la recuperación del sistema eléctrico posterior a un desastre natural es un problema muy complejo [7]. El concepto de sistema resiliente es una idea que surge luego de años de investigación de blackouts relacionados con desastres naturales como en 2005 Huracán Katrina, 2011 Terremoto de Japón, 2012 Huracán Sandy [8], entre otros.

### A. Errores en actuación de protecciones

En toda la red interconectada, existen fenómenos transitorios causados por perturbaciones internas o externas [9]. Los elementos involucrados y que deben ser consideradas por su aporte en las fallas son los generadores asincrónicos [10], [11]. Las protecciones juegan un papel importante debido a que deben despejar fallas en milésimas de segundo, para proteger al equipo más costoso de la instalación.

Los principales problemas que se observan de la investigación realizada son:

- El Colapso de voltaje y reversión de corriente, efecto indirecto debido a la contaminación armónica debido al comportamiento de los sistemas de control FACTS [12].
- Incorrecto tiempo de apertura, coordinación inadecuada, entre la zona principal y de respaldo, debido a que no se tiene el valor exacto del tiempo de coordinación respecto al tiempo de apertura, Traslape de zonas de protección de distancia, incorrecto ajuste y delimitación de la zona [13].
- Cambio de topología, salida de equipos en cascada provoca una incorrecta actuación ante la contingencia N-x, el relé no puede saber el estado de la topología posterior a un colapso en cascada.
- Cambio de la capacidad electrostática, influencia del efecto capacitivo en líneas largas, influencia en el cálculo de la impedancia efecto de la falla a tierra en sistemas aterrizados [14].
- Error de detección de fallas frente a contaminación UVH producidas por ondas transitorias viajeras, donde el efecto distorsiona el comportamiento del voltaje y la corriente, evitando que la protección sea selectiva en la apertura de una falla. Sin embargo, esta propiedad puede ser aprovechada con protecciones especiales que utilizan esta información de alta frecuencia para la detección de la falla [15].
- Falla en la detección, por la influencia de la impedancia a tierra y por la desviación del factor de potencia de la carga [10].
- Error en la delimitación de la zona de protección distancia, con calibración cuadrilateral. En la ocurrencia de una falla la impedancia de la línea de transmisión es afectada por los componentes transitorios de la corriente de secuencia cero en los primeros ciclos, por ello se tiene el problema en las protecciones convencionales que determinan una zona de protección cuadrilateral sin considerar los efectos transitorios [13].
- Actuación incorrecta de relés debido a la variación de impedancia durante una oscilación de potencia, incorrecto bloqueo del disparo por oscilación de potencia. OST: Disparo por oscilación de potencia (out-of-step tripping) [16].
- Error de la actuación de la protección de distancia debido a la compensación serie y paralelo de potencia en un colapso de voltaje (VARS insuficiente) [17].
- En la protección sobrecorriente ocurre un problema en la coordinación de relés, debido a que el relé de respaldo debe funcionar solamente si el relé primario ha fallado [18].

## **Protecciones de líneas de transmisión**

En el año 1976 se desarrolló el primer relé basado en ondas viajeras, protección utilizada en líneas de transmisión largas, para fallas a tierra con resistencia [19]. En los últimos años se han incluido en las protecciones elementos de electrónica de potencia para sistemas de corriente alterna para compensación de voltaje como también para el control de flujo de potencia [17], [19].

Los análisis de falla en las protecciones digitales, comprenden tres etapas: en la primera se detecta la falla, en la segunda se clasifica el tipo de falla y en la tercera etapa se localiza y estima el valor de corriente y actuación de la falla. Para que estas etapas entreguen resultados reales, se necesita una unidad de detección de fallas que sea capaz de discriminar las fallas de eventos que no son fallas. Los equipos FACTS [17], influyen directamente en la detección y discriminación de la falla, por ello su influencia debe analizarse cuando se trata del tema de coordinación en Extra Altos Voltaje y Ultra altos voltajes

Las protecciones utilizadas para líneas de transmisión en sobrecorriente y distancia, con sus combinaciones permiten tener una protección más segura, debido a que se mantiene confiabilidad ante la contingencia N-1, sus combinaciones se usan de la siguiente manera, en la primera zona, la protección de distancia es la principal y la protección sobrecorriente su respaldo, otra combinación posible es viceversa en la segunda zona [20]. Existen protecciones adicionales como la protección de distancia 21, sobrecorriente instantánea 50, sobrecorriente temporizada 51N de resistencia a tierra y la protección diferencial de línea 87L.

## **B. Protección sobre corriente en L/T**

El bajo costo y la facilidad para la calibración e instalación son las características que hacen a la protección sobrecorriente una de las más utilizadas para la protección de líneas de transmisión, el relé funciona después un de un tiempo siempre y cuando la protección asignada como principal, no despeje la falla en un tiempo determinado. Esta protección es capaz de observar el sentido de la corriente por lo que solo podrá observar fallas que están hacia su zona de protección además podrá observar si la corriente cambia repentinamente su sentido de dirección.

La protección de corriente, puede ser calibrada por la filosofía convencional, así como con técnicas de optimización de parámetros. El método convencional determina el Break Point Set Point, con la teoría gráfica, mientras que el *minimum Break Point Set*, en la cual se ubica en la curva tiempo corriente en escala logarítmica el tiempo de actuación y la corriente máxima de cortocircuito en la que debe actuar, los software especializados como Power Factory, Etap se utilizan para este fin, para sistemas interconectados y con la tecnología y algoritmos matemáticos desarrollados, se calculan los tiempos de actuación con métodos de optimización [21].

El análisis de fallas en la técnica convencional divide a la malla en circuitos radiales y se calibra el relé que se encuentra ubicado en el extremo de la red radial, posteriormente se calibran todos los relés que se encuentran en la malla. El método convencional se aplica en redes pequeñas, mientras que en redes de gran complejidad el método de calibración convencional es inviable. En la figura 2 se observa la curva tiempo corriente para la protección sobrecorriente.

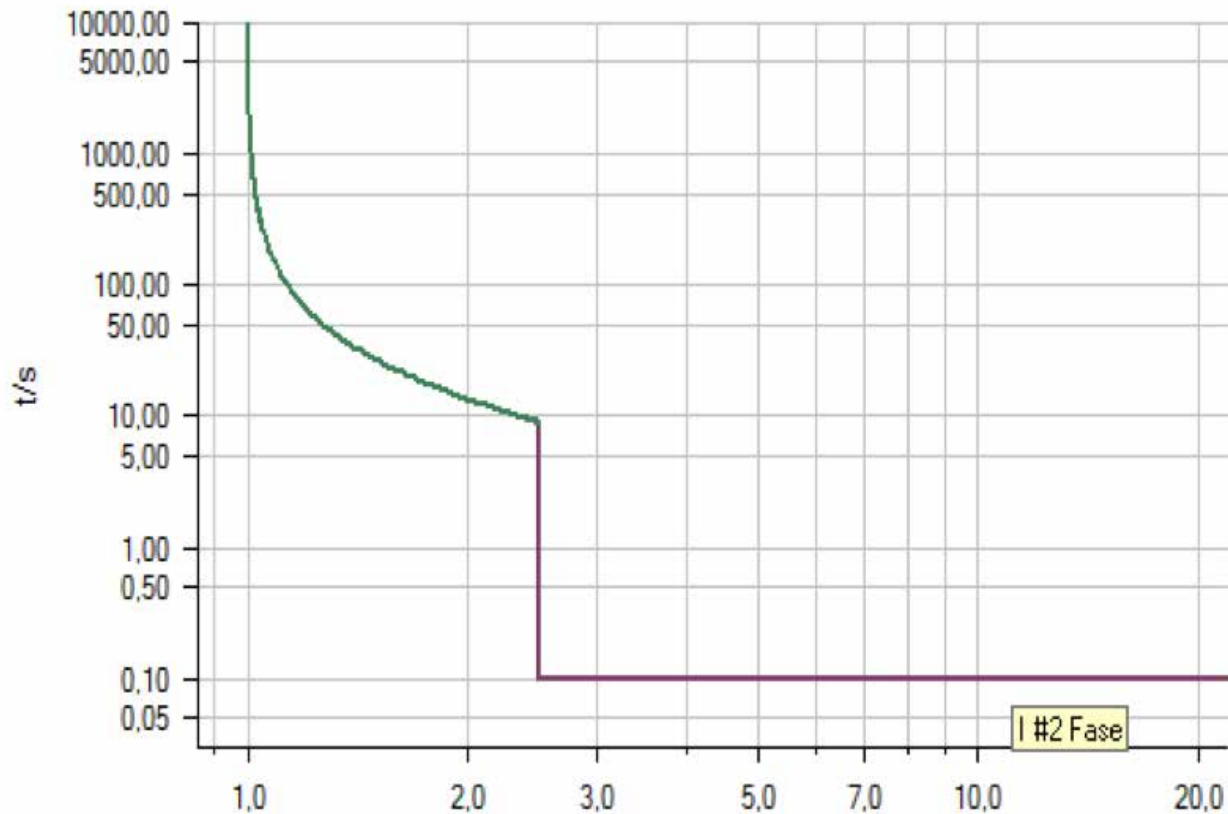


Fig. 2. Curva tiempo –corriente relé de protección sobrecorriente [22]

### C. Protección distancia en L/T

El relé de distancia calcula la impedancia de la línea de transmisión, para ello necesita mediciones de corriente y voltaje, que son adquiridos a través de los equipos de medición como TC transformadores de corriente y TP transformadores de voltaje, utilizados para el monitoreo de la línea, el relé debe operar siempre, antes de la ocurrencia de un cortocircuito, la impedancia medida debe ser menor que la impedancia de ajuste [22].

Las zonas de protección de un relé de distancia son 4: Zona 1 protege hasta el 80% de la impedancia de línea de la sección 1, Zona 2 protege el 100% de la impedancia de línea de la sección 1, más el 50% de la impedancia de la línea de la línea contigua más corta en la siguiente sección. Zona 3 tiene dos ajustes, el primero considera el 100% de la impedancia de línea de la sección 1, más el 100% de la impedancia de línea de la sección 2 + 25% de la línea impedancia de la sección 3, el segundo ajuste considera el 100% de la impedancia de línea de sección 1 + 120% de la impedancia de línea de la más larga Línea contigua en la sección 2. Finalmente, la Zona 4 o llamada también Zona 3 (reverso) protege el 15% de la Zona 1. En la figura 3 se observan las zonas de protección de forma gráfica.

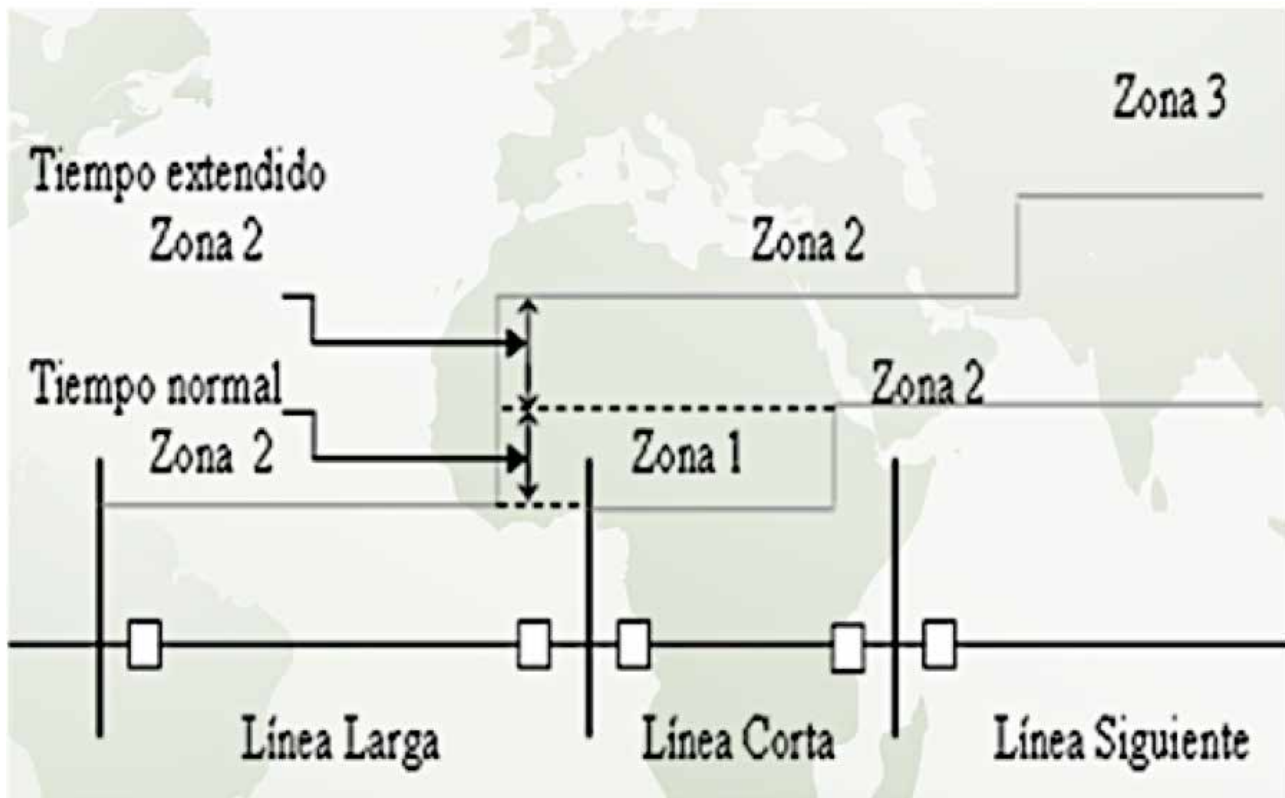


Fig. 3. Zonas de protección relé 21 [22]

El relé de distancia se utiliza en las líneas de transmisión L/T como protección principal y de respaldo dependiendo de la zona de actuación [23]. La tecnología actual ha desarrollado un relé adaptativo capaz de adaptarse y variar las condiciones de protección en el momento de la falla, los relés actuales utilizan microprocesadores de alta velocidad [6].

### Métodos de óptima coordinación de protección sobre corriente y distancia

Existen métodos de optimización que se aplican en los ámbitos de coordinación de protecciones para líneas de transmisión, en este trabajo se han recopilado investigaciones que datan 30 años, desarrollados para aplicaciones específicas, el enfoque va dirigido a las protecciones sobrecorriente y distancia, con la relación de los criterios de coordinación, una descripción general de la metodología se desarrolla a continuación en cada método se ha enfocado un problema y un algoritmo de solución, entre los cuales se pueden destacar los siguientes métodos de optimización del tiempo de operación de las protecciones basados en algoritmos genéticos GA, que minimizan el error en cuanto al tiempo óptimo de actuación, otros métodos trabajan sobre la metodología de algoritmos genéticos y aumentan restricciones y desarrollan algoritmos Teaching Learning Based Optimization TBLO. También las investigaciones se enfocan en el método de inteligencia artificial (AI) y Natural inspire Algoritmo (NIA) estas metodologías se establecen criterios de optimización para los relés de sobrecorriente resolviendo el problema de coordinación.

En [24], se menciona el método de lógica difusa junto al método de algoritmos genéticos para optimizar el tiempo y obtener el mínimo valor de descoordinación en el relé de sobrecorriente. En [15], se menciona el método Teaching Learning Based Optimization (TLBO). método utilizado para determinar el time dial Setting (TDS) del relé de sobre corriente. En [22], utiliza el método de programación lineal para encontrar la calibración

del relé de sobre corriente y distancia utilizando la curva tiempo corriente inversa para el relé dirección de sobre corriente. En [25], se aplica un método de coordinación basado en la adaptación de la función cuadrática que involucra la adaptación de la zona cuadrilateral del relé de distancia En [10], se consideran las características no estándares del relé de sobre corriente y se las incluye en un nuevo modelo matemático. En [26], se presenta un relé numérico con algoritmos matemáticos y microprocesador de alta velocidad. En [27], se explica un modelo basado en la distribución de parámetros de las líneas largas y el diseño de un algoritmo computacional capaz de variar la zona de protección en base a la distribución de voltaje. Otro método basado en AI Artificial Inteligencies and NAI, natural Inspire Algoritmos se utiliza para la coordinación de la protección sobrecorriente en [28].

En [29], se presenta una coordinación óptima utilizando un algoritmo no lineal JAYA que encuentra el óptimo Tiempo apertura de Trip del relé de sobre corriente un algoritmo descubierto por Ravidipudi Venkata en el año 2015 y que significa Victoria.

## **A. Métodos de Optimización de Algoritmos genéticos**

Existe métodos de óptima coordinación en [30], [31], [32], [33], de los relés de distancia, y sobrecorriente basados en el método de algoritmos genéticos que se aplican para optimizar el tiempo de apertura del relé y obtener el mínimo valor de descoordinación en el relé de sobrecorriente.

En esta metodología, como en todos los métodos de optimización por algoritmos genéticos GA se necesita una población al azar para escoger el TSMs Minimum Time Set para cada relé, a esta población se la denomina Genomas de los cromosomas, para la optimización se forman grupos denominando a los relés  $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ , y los tiempos de seteo,  $TSM_1, TSM_2, TSM_3 \dots SMS$ , posteriormente se realizar la combinación entre cada uno de ellos, formando pares, la combinación es aleatoria, convirtiéndose en un método iterativo, en cada iteración son eliminados los genomas que no sobrevivieron a la mutación, este proceso es repetitivo, finito y termina cuando el número de iteraciones es igual al tamaño de la población. El objetivo este método es definir una función objetivo OF, Los cromosomas son evaluados respecto a la función Objetivo OF y los mejores cromosomas se utilizarán para formar una generación nueva de cromosomas mejorados. Es necesario que la mutación se de en cada iteración para que no se cometa el error de atrapar los mínimos locales.[30]

El GA es un algoritmo popular que realiza una búsqueda heurística basada en ideas evolutivas de selección natural de genes. Se crea una población de espacio de búsqueda que contiene conjuntos de soluciones factibles (cromosomas). Las variables de decisión (dial, k) se codifican como genes en las cadenas del cromosoma. Luego, los genes se evalúan, penalizan, clasifican y seleccionan de acuerdo con su valor de aptitud de la función objetivo. Posteriormente, se aplican los principios de la evolución genética (cruce, mutación) y se forma la nueva población. Todo el proceso se repite hasta que se cumple el criterio de parada. El tamaño de la población indica el número de cromosomas en la población (en una generación). Si hay muy pocos cromosomas, el algoritmo tendrá pocas posibilidades de realizar un cruce y solo se explorará una pequeña parte del espacio de búsqueda. Por otro lado, si hay demasiados cromosomas, el algoritmo explorará una mayor variedad de soluciones posibles, pero el tiempo de ejecución aumenta excesivamente.



La metodología sigue los siguientes pasos.

1. Genera aleatoriamente la población inicial de  $n$  cromosomas, en los que cada gen es una posible solución al problema.
2. Calcula el tiempo primario y de respaldo de cada relé de acuerdo con cada cromosoma.
3. Evaluar la aptitud  $f(x)$  de cada cromosoma  $x$  en la población.
4. Crear una nueva población en cada iteración:
5. Ejecutar el algoritmo nuevamente usando la nueva población.
6. Terminar el algoritmo si se cumplen los criterios de detención; de lo contrario, repita los pasos 2-5 [32].

## **B. Métodos de Optimización TLBO**

En [18], se menciona el método Teaching Learning Based Optimization (TLBO) método utilizado para determinar el time dial settings (TDS) del relé de sobrecorriente. Este algoritmo se basa en el comportamiento de una clase, donde existen alumnos y profesor, existiendo una dependencia de los alumnos hacia la calidad del profesor, un buen profesor ayuda a que los estudiantes sean buenos, y los compañeros motivan a los demás estudiantes lo sean también, este proceso es repetitivo y continuo de mejora, donde cada alumno trata de seguir al profesor y cada alumno interactúa entre sí. Esta es la metodología del TLBO, que se desarrolla en dos partes, la inicialización, donde se generan aleatoriamente  $N$  números de dimensión  $D$ , se forma una matriz de vectores aleatorios, donde cada vector corresponde a una solución, esta matriz se denomina el aprendiz, la dimensión corresponde a los temas que se ofrecen en la clase, cada alumno tiene un vector tridimensional que se le ha asignado, en dos fases, la fase de profesor y la fase de alumno. Al igual que cualquier otro algoritmo de búsqueda aleatoria, el TLBO comienza con el procedimiento de inicialización. En este procedimiento, se generan  $N$  números aleatorios de soluciones iniciales dentro del espacio de búsqueda. Así, en esta fase de inicialización, se genera  $N$  número de vectores aleatorios donde, cada vector es de dimensión  $D$ . Por lo tanto, se genera aleatoriamente una matriz de  $N$  filas y columnas  $D$ , dentro del espacio de búsqueda. Cada vector es una solución probable en el espacio de búsqueda y se conoce como aprendiz.  $N$  representa el tamaño de la población o el "tamaño de clase", El valor  $D$  representa el número de "temas o cursos ofrecidos", que es igual a la dimensionalidad del problema tomado. Cada alumno está representado como un vector tridimensional en la búsqueda. El profesor evalúa el rendimiento de la clase y busca entre los estudiantes al mejor y el proceso se repite de manera que el promedio de la clase avanza. El vector que contiene a los mejores de la clase forma un nuevo conjunto de vectores mejorados, el proceso termina cuando se ha mejorado al nivel esperado, el último vector contiene los tiempos óptimos para la calibración del relé de sobrecorriente [18].

## **C. Métodos de Optimización PSO Particle Swarm Optimization**

Esta técnica de optimización consiste en el comportamiento que tienen las partículas, y su relación con la velocidad. Las partículas se mueven a una velocidad asociada y se definen funciones objetivo, que relacionan el movimiento hacia una mejor posición, el problema se resuelve cuando se entregan resultados de convergencia y una partícula ha pasado de una posición  $X_1$  hacia una mejor posición  $X_i$  [28].

#### **D. Métodos de Optimización Computacional, Microprocesados de alto nivel**

Los métodos numéricos se aplican para los relés de sobrecorriente y distancia. El principal beneficio sobre los relés de sobrecorriente es el bajo costo y la capacidad de multifunciones en un solo producto. Dentro de este tipo de relés se se monitorean las señales de voltaje y corriente, además se tiene un módulo que está calculando las zonas de protección no solo con los valores RMS de las mediciones sino con las mediciones de amplitud y ángulo [34], [35].

#### **E. Métodos de distribución de parámetros.**

En [27], se explica un modelo basado en la distribución de parámetros de las líneas largas y el diseño de un algoritmo computacional capaz de variar la zona de protección en base a la distribución de voltaje. Una línea larga necesita modelarse con sus parámetros distribuidos, existen protecciones para líneas de transmisión que operaran en extra alto voltaje, y ultra alto voltaje EHV/UHV. En estas metodologías se necesita de bajas muestras de frecuencia, para modelar la L/T y realizar simulaciones y determinar cuándo una falla ocurre, en que zona se encuentra, y garantizar estabilidad ante fallas externas, si comparamos la protección de parámetros distribuidos, con el modelo de transmisión de parámetros concentrados, se observa que las actuaciones erróneas se dan el segundo caso.

#### **F. Métodos de Inteligencia Artificial**

Otro método basado en AI inteligencia artificial y NAI, Natural Inspire Algoritmos se utiliza para la coordinación de la protección sobre corriente [28]. Existe un método de coordinación óptima no lineal denominada JAYA que se usa para encontrar el óptimo tiempo de apertura de trip del relé de sobrecorriente. Existe una diferencia de este método respecto a los métodos convencionales y técnicas de programación simple, el método de algoritmos genéticas el PSO logrando encontrar la óptima calibración de los relés, mientras que el JAYA, es un algoritmo que se basa en una lucha donde existe un ganador y un perdedor, de este modo los ganadores son considerados en la optimización, mientras los perdedores son descartados [36].

#### **G. Métodos de lógica Difusa**

La metodología de lógica difusa es un método matemático de optimización que se adapta al mundo real, debido a que tiene cuantificadores que son capaces de interpretar inferencias. Esta metodología se utiliza cuando la complejidad del proceso es muy alta, y no existen modelos matemáticos precisos. Además, se aplica también para problemas altamente no lineales y cuando el fenómeno se comporta sin seguir una lógica predecible. Aplicando esta metodología a la teoría de protecciones se realiza una fusión entre el método de algoritmos genéticos y el de lógica difusa, conocido como Fuzzy-GA. Esta metodología utiliza los resultados entregados en GA, y se definen dos funciones objetivas, para reducir el TMS (mínimo time set).

En la figura 4 se realiza un resumen de las metodologías aplicadas para la optimización de relés de sobrecorriente.

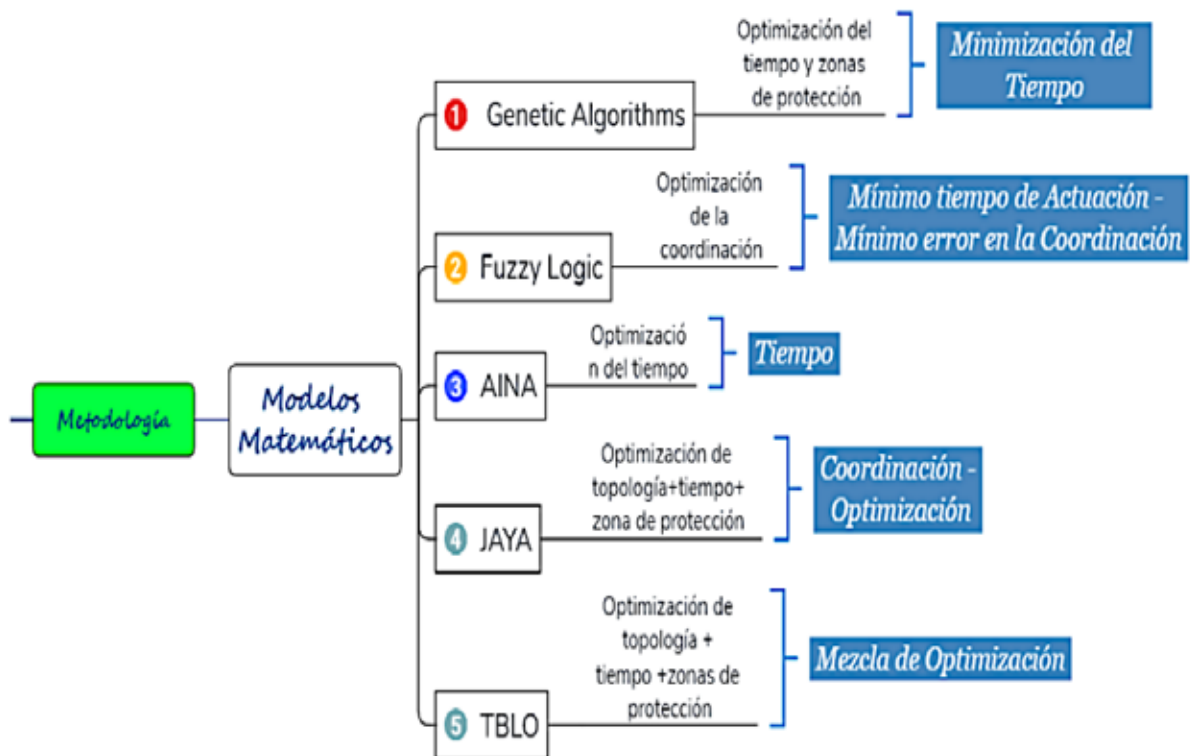


Fig. 4. Metodologías Aplicadas para la optimización de los relés de sobrecorriente

## V. Conclusiones

- La protección adaptativa es una filosofía de protección que permite y busca realizar ajustes en las diferentes funciones de protección para que estén en sintonía con las condiciones de los sistemas de potencia predominantes. En la actualidad la tendencia es ir hacia la digitalización, una protección adaptativa actúa correctamente dentro de su zona de protección si esta ha sido correctamente sesteada, la confiabilidad se garantiza teniendo equipos de protección redundantes. Se aclara además que el sistema de transmisión posee cantidad de equipos instalados geográficamente en diferentes puntos y una protección fija no puede estar evaluando las condiciones del sistema en cada instante, mientras que una protección adaptativa hace esto en milésimas de segundo, observando estados y condiciones de estrés eléctrico con una frecuencia de muestreo.
- Existen técnicas de control adaptativo en el cual el problema consiste en obtener la mejor adaptación de la región de la zona protección, utilizando algoritmos de optimización para hallar asocialmente los límites de corriente y voltaje para delimitar la zona. Esta es una técnica que ha superado las series de compensación y que se aplica para líneas de transmisión de Ultra alto Voltaje y válida para sistemas interconectados con áreas claramente definidas.
- Las investigaciones indican que el método más utilizado para atacar el problema de condiciones extremas consiste en protecciones adaptativas, con la utilización de métodos computacionales desarrollados con sistemas micro-procesados ultrarrápidos capaces de medir, simular y cambiar parámetros de protección en milésimas de segundos.

- La optimización en coordinación de protecciones de sobrecorriente y distancia está orientada en su mayoría a la optimización de la selectividad, velocidad, precisión de actuación de los relés de tiempo y apertura y cierre, determinación de zonas óptimas. La metodología más utilizada es el método de algoritmos genéticos, donde se encuentra un mínimo TDS time dial seting, y un mínimo tiempo de descoordinación respecto al valor real.
- Existen problemas que distorsionan la calibración de protecciones que deben ser analizados con mayor detalle y son el origen de investigaciones futuras como error de la actuación de la protección de distancia debido a la compensación serie y paralelo de potencia en un colapso de voltaje, el cambio de la capacidad electrostática, influencia del efecto capacitivo en líneas largas, influencia en el cálculo de la impedancia efecto de la falla a tierra en sistemas aterrizados. Y problemas en la calibración, de fenómenos asociados a condiciones extremas que pueden causar una mala actuación debido a la contaminación UVH producidas por ondas transitorias viajeras, donde el efecto distorsiona el comportamiento del voltaje y la corriente, evitando que la protección sea selectiva en la apertura de una falla.
- Este paper identifica las metodologías utilizadas para la coordinación de protecciones, así como los principales problemas y sus consecuencias, estudios futuros deberán encontrar funciones objetivo que logren involucrar escenarios críticos como desconexiones en cascada y /o un desastre natural que llevan al SEP a un estado de emergencia.
- Las metodologías analizadas y las funciones objetivo, en su mayoría se aplican a líneas cortas. Los efectos y fenómenos que ocurren en líneas de transmisión con parámetros distribuidos junto a fallas de alta impedancia a tierra son descartados en la mayoría de metodologías por lo tanto se deberá incursionar investigaciones en este sentido.
- Se ha realizado una investigación profunda y exhaustiva sobre la coordinación del relé de sobrecorriente y se resumen los métodos más utilizados para coordinar la protección sobrecorriente, la protección distancia, y la combinación de los dos. En el presente documento se realiza una descripción general de las metodologías, se recopila la información para identificar el algoritmo e identificar el proceso de optimización.
- Los métodos de optimización para relés de distancia y sobrecorriente permiten determinar el time dial seting TDS y el tipo de curva en cada relé. El algoritmo GA puede ser aplicado en diferentes protecciones, sobre todo en las topologías de sistemas que utilizan relé de sobre corriente debido a la simplicidad en la aplicación del procedimiento. Sin embargo, también existen otros métodos propuestos como el método de PSO híbrido que fue propuesto y tuvo mejor éxito que la programación lineal. Al comparar los métodos de PSO y GA se puede concluir que estos son iguales para una red de similares características, pero se debe aclarar que PSO realiza una coordinación con menos población y menos tiempo de iteración.

## VI. Referencias

- B. B. Khandare and B. T. Deshmukh, "A literature review on wide area protection technique using PMU," 2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput., pp. 1449–1454, 2017.
- S. Liberman, "f) Dynamic Braking tlaunc Uspi," no. 6, pp. 2104–2116, 1978.
- S. Dambhare, S. A. Soman, and M. C. Chandorkar, "for Transmission-Line Protection," vol. 24, no. 4, pp. 1832–1841, 2009.
- B. Oral and F. Dönmez, "The Impacts of Natural Disasters on Power Systems : Anatomy of the Marmara Earthquake Blackout," vol. 7, no. 2, pp. 107–118, 2010.
- M. Bastami, "SEISMIC ASSESSMENT OF MEDIUM AND HIGH VOLTAGE POWER," pp. 1–8, 2008.
- Y. Q. Xia and A. K. David, "Adaptive relay setting for stand-alone digital distance protection - Power Delivery, IEEE Transactions on," vol. 9, no. 1, pp. 480–491, 1994.
- "Battling the Extreme : A Study on the Power System Resilience," vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266, 2017.
- Y. Wang, S. Member, C. Chen, J. Wang, S. Member, and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters — A Review," vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, 2016.
- R. Mohammadi Chabanloo and M. Ghotbi Maleki, "An accurate method for overcurrent–distance relays coordination in the presence of transient states of fault currents," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 158, pp. 207–218, 2018.
- H. C. Kiliçkiran, İ. Şengör, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinç, and N. G. Paterakis, "Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 164, no. March, pp. 89–102, 2018.
- H. Pineda and J. L. Flores, "Macagua-Callao-Claritas 400," vol. 00, pp. 3–6, 2006.
- H. Kang, S. Subramanian, F. Hassan, and L. Yao, "Distance protection under extreme conditions," 10th IET Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot. (DPSP 2010). *Manag. Chang.*, pp. 152–152, 2010.
- T. Penthong, "An Efficient Method of Automatic Distance Relay Settings for Transmission Line Protection," pp. 5–8, 2013.
- T. Smith, M. E. Lacedonia, and S. Pitts, "Review of Application of Ground Distance Protection."
- G. Equipments and H. District, "Traveling Waves based Protection Relaying of Power Lines," pp. 2467–2471, 2011.
- A. Halim, A. Bakar, F. Mat, S. Yusof, and M. Ridzal, "Electrical Power and Energy Systems Analysis of overload conditions in distance relay under severe system contingencies Simulated Power Swing Loci ( R2 ) vs Actual Record ( R3 )," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 345–350, 2010.

- S. Biswas and P. K. Nayak, "State-of-the-art on the protection of FACTS compensated high-voltage transmission lines : a review," vol. 3, pp. 21–30, 2018.
- M. Singh, B. K. Panigrahi, and A. R. Abhyankar, "Electrical Power and Energy Systems Optimal coordination of directional over-current relays using Teaching Learning-Based Optimization ( TLBO ) algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 50, pp. 33–41, 2013.
- A. Lashkar Ara, A. Kazemi, and S. A. Nabavi Niaki, "Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 2, pp. 481–490, 2012.
- S. A. Ahmadi, H. Karami, and B. Gharehpetian, "Comprehensive coordination of combined directional overcurrent and distance relays considering miscoordination reduction," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 92, pp. 42–52, 2017.
- K. Zare, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 12, pp. 1455–1463, 2015.
- L. G. Pérez, S. Member, A. J. Urdaneta, and S. Member, "Optimal Computation of Distance Relays Second Zone Timing in a Mixed Protection Scheme with Directional Overcurrent Relays," vol. 16, no. 3, pp. 385–388, 2001.
- A. F. Z. S. Corp, "Adaptative Transmission System Relaying," vol. 3, no. 4, pp. 1436–1445, 1988.
- D. Solati Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, and M. S. Naderi, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3091–3101, 2018.
- J.- Kim, "Transmission Line Protection," vol. 00, no. 1, pp. 1465–1468, 2000.
- A. Z. Saleem, Z. A. Khan, and A. Imran, "Algorithms and hardware design of modern numeric overcurrent and distance relays," *2nd Int. Conf. Electr. Eng. ICEE*, no. March, pp. 7–11, 2008.
- L. T. Lines, G. Song, X. Chu, S. Gao, X. Kang, and Z. Jiao, "on Distributed Parameter Model for," vol. 28, no. 4, pp. 2116–2123, 2013.
- M. H. Hussain, S. R. A. Rahim, and I. Musirin, "Optimal Overcurrent Relay Coordination : A Review," *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 332–336, 2013.
- D. Ramaswami, M. J. Damborg, S. S. Venkata, A. K. Jampala, and J. Postforoosh, "Enhanced algorithms for transmission protective relay coordination," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 1, pp. 280–287, 1986.
- S. S. V. R. Ramaswami, M. J. Damborg, "Coordination of Directional Overcurrent Relays in," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, pp. 64–71, 1990.
- H. Askariana Abyaneh, S. Sadat Hashemi Kamangar, F. Razavi, and R. Mohammadi Chabanloo, "A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent relays in a mixed protection scheme with distance relays," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2008.

- M. H. Marcolino, J. B. Leite, and J. R. S. Mantovani, "Optimal Coordination of Overcurrent Directional and Distance Relays in Meshed Networks Using Genetic Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 9, pp. 2975–2982, 2015.
- G. Idarraga-Ospina, N. A. Mesa-Quintero, J. A. Valencia, A. Cavazos, and E. Orduna, "Directional overcurrent relay coordination by means of genetic algorithms of Chu–Beasley," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 522–528, 2018.
- B. C. P. E and C. E. Houston, "Everyday Modern Protective Relay Engineering Applications : Review of Interesting Electric Power Utility Events , Challenges , & Concerns," pp. 22–42, 2012.
- E. Bartosiewicz, R. Kowalik, and M. Januszewski, "Overview and Test Results of Modern Pilot Schemes for Coordination of Line Distance Protection Relays," 2013.
- H. Can, İ. Ş, H. Akdemir, B. Kekezo, O. Erdiñç, and N. G. Paterakis, "Power system protection with digital overcurrent relays : A review of non- standard characteristics," vol. 164, no. July, pp. 89–102, 2018.

