



Metodología de coordinación de protecciones en microrredes usando protecciones de corriente direccionales

Javier Eduardo Santos Ramos

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director

Jesús María Lopez Lezama, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Sergio Danilo Saldarriaga Zuluaga, Doctor (PhD) en Ingeniería Electrónica y Computación

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Referencia

- [1] J. Santos Ramos, “Metodología de coordinación de protecciones en microrredes usando protecciones de corriente direccionales”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
- Estilo IEEE (2020)



Maestría en Ingeniería,

Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Con profundo agradecimiento y amor infinito, deseo dedicar este logro, mi tesis de maestría, a mi padre Roberto Santos y mi madre Esther Ramos. Su constante inspiración, apoyo inquebrantable y sabiduría infinita han sido la fuerza motriz detrás de cada paso que he dado en este emocionante viaje académico. Cada logro alcanzado es un tributo a su amor y sacrificio. Con todo mi corazón, les agradezco por ser mis más grandes ejemplos de perseverancia, humildad y amor incondicional.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi director Jesús Lopez y codirector Sergio Saldarriaga por su valioso apoyo y contribución a mi tesis de maestría. Su experiencia, consejos expertos y perspicacia han enriquecido enormemente este proyecto y han sido esenciales para su éxito. Valoré enormemente sus comentarios constructivos, que me ayudaron a enfocar mis ideas y a alcanzar resultados significativos. Y agradezco a mi familia, compañeros y amigos por el apoyo y aliento que me brindaron en cada paso de este proceso.

Abstract

Microgrids have gained prominence recently, driven by a confluence of factors that encompass significant advances in small-scale generation technologies and a growing focus on environmental sustainability. Moreover, their adoption is envisioned as a crucial alternative in regions not connected to main grids, representing a significant innovation for the integration of distributed generation (DG). This type of generation introduces bidirectional energy flows that can impact the performance of traditional protection schemes.

This document presents an investigation and proposes a specific methodology for the coordination of electrical protections in microgrids, employing non-standard features of overcurrent relays, unsupervised learning techniques, and metaheuristic optimization strategies to address the challenge of protection coordination as a nonlinear programming problem. The protection coordination process commences with a comprehensive analysis of short circuits in various fault scenarios and topologies within a test system. Subsequently, unsupervised machine learning algorithms will be implemented to cluster similar operational states, considering the different types of faults identified beforehand. Finally, through the use of metaheuristic optimization techniques and taking into account the non-standard features of the relays, the optimal settings of the overcurrent relays will be derived as a solution to the proposed nonlinear programming problem. The evaluation of the obtained results will be conducted through a comparative analysis with previous studies documented in specialized literature. The simulation of the microgrids and the fault analysis were carried out using DigSilent Power Factory 2020 software, while the application of unsupervised machine learning techniques and metaheuristic techniques was performed in Python 3.9 with commercially available libraries and packages.

Resumen

Las microrredes han cobrado prominencia recientemente, impulsadas por una confluencia de factores que abarcan avances significativos en tecnologías de generación a pequeña escala y un creciente enfoque en la sostenibilidad ambiental. Además, su adopción se vislumbra como una alternativa crucial en regiones no conectadas a redes principales, representando una innovación significativa para la integración de generación distribuida (GD). Esta modalidad de generación introduce flujos de energía bidireccionales que pueden incidir en el desempeño de los tradicionales esquemas de protección.

Este documento presenta una investigación y propone una metodología específica para la coordinación de protecciones eléctricas en microrredes, empleando características no estándar de relés de sobrecorriente, técnicas de aprendizaje no supervisado y estrategias de optimización metaheurística con el fin de abordar el desafío de coordinación de protecciones como un problema de programación no lineal. El proceso de coordinación de protecciones se inicia con un análisis exhaustivo de cortocircuitos en diversos escenarios de falla y topologías dentro de un sistema de prueba. Posteriormente, se implementarán algoritmos de aprendizaje automático no supervisado para agrupar estados operativos similares, considerando los distintos tipos de fallas identificados previamente. Finalmente, mediante el empleo de técnicas de optimización metaheurística y tomando en cuenta las características no estándar de los relés, se obtendrán los ajustes óptimos de los relés de sobrecorriente de la solución al problema de programación no lineal planteado. La evaluación de los resultados obtenidos se realizará mediante una comparativa con estudios previos documentados en la literatura especializada. La simulación de las microrredes y el análisis de fallas se realizó en el software DigSilent Power Factory 2020, mientras que la aplicación de técnicas de aprendizaje automático no supervisado y técnicas metaheurísticas se realizó en Python 3.9 con librerías y paquetes disponibles comercialmente.

CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción y objetivos	8
Capítulo 2: Resultados del objetivo específico # 1.....	13
Capítulo 3: Resultados del objetivo específico # 2.....	26
Capítulo 4: Resultados de los objetivos específicos # 3 y # 4.....	27
Capítulo 5: Comparativa de resultados de metodologías de coordinación de protecciones en microrredes	29
Capítulo 6: Conclusiones, trabajos futuros y bibliografía	33

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El incremento demográfico, la modernización, la industrialización y el consumismo en la sociedad contemporánea han generado un aumento significativo en la demanda de energía, superando la capacidad de las fuentes convencionales de generación eléctrica, como la energía hidroeléctrica y los combustibles fósiles (carbón, gas natural y diésel). Además, estas fuentes convencionales conllevan serios impactos ambientales [1], [2].

En respuesta a esta situación, las microrredes eléctricas han surgido como una alternativa promisoriosa dentro del panorama energético actual. Estas redes, tanto autónomas como conectadas a la red principal, están diseñadas para operar de manera eficiente y coordinada, integrando una variedad de fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento energético y tecnologías de gestión de carga [3]. Este enfoque descentralizado y adaptable se presenta como una solución para fortalecer la resiliencia, la sostenibilidad y la confiabilidad de la infraestructura eléctrica [4].

A su vez las microrredes conllevan desafíos para la integración a un sistema eléctrico de distribución o su funcionamiento autónomo, como es el ajuste efectivo de las protecciones eléctricas ya que los esquemas de protección tradicionales diseñados para flujo radial con alta corriente de falla no funcionan fielmente en una microrred [5]. Los esquemas de protección en microrredes se enfrentan a dificultades singulares, principalmente debido a la variabilidad de las fuentes de generación distribuida y a la diversidad de modos de operación. Coordinar las protecciones en este entorno resulta especialmente desafiante, ya que las configuraciones no convencionales de las microrredes pueden generar desequilibrios, dificultando la detección y aislamiento de fallas, así como la preservación de la integridad del sistema [6].

La coordinación de protecciones en microrredes representa un desafío abordado por múltiples investigadores, quienes han explorado diversas estrategias en la literatura científica. Se han propuesto metodologías que sugieren la medición de variables eléctricas como voltajes, corrientes e impedancias para la detección y localización de fallas, lo que permite ajustar las protecciones correspondientes, como se observa en estudios como [7], [8], [9]. Además, en [10] se introduce un índice que vincula las corrientes en los alimentadores para la localización de fallas. Por otro lado, algunos autores plantean problemas de optimización y desarrollan metodologías para su resolución, empleando técnicas

metaheurísticas, como se evidencia en [11] - [15] así como la combinación de estas técnicas con características no estándar de los relés de sobrecorriente [16] - [20]. En [21] se hace uso de técnicas de aprendizaje automático, mientras que [22] y [23] estas se integran con técnicas metaheurísticas.

En este contexto, este trabajo aborda la aplicación y combinación estratégica de características no estándar de relés de sobrecorriente, técnicas de aprendizaje automático y técnicas metaheurísticas para resolver los desafíos de coordinación de protecciones en microrredes, explorando su eficacia en la optimización de esquemas de protección en entornos dinámicos y diversos. El uso de algoritmos de aprendizaje automático permite la identificación y agrupación eficiente de múltiples escenarios operativos, mientras que las técnicas metaheurísticas ofrecen soluciones ágiles para optimizar la coordinación de protecciones en sistemas eléctricos sofisticados como las microrredes [23].

a. Objetivo General

Proponer un modelo de coordinación de protecciones de sobrecorriente direccionales off-line para microrredes mediante la utilización de características no estándar, técnicas de optimización metaheurísticas y técnicas de aprendizaje automático que permita mejorar la seguridad y la confiabilidad de las microrredes.

b. Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión de la literatura especializada sobre la coordinación de protecciones en microrredes que permita identificar los tipos de protecciones más utilizadas, las técnicas de solución, como también los nuevos desafíos y tendencias en esta temática.
2. Valorar el impacto de la GD en los esquemas de protección de sobrecorriente mediante un estudio detallado de coordinación de protecciones utilizando herramientas computacionales que permita identificar las debilidades de dichos esquemas.
3. Implementar al menos dos técnicas de optimización metaheurística para validar la coordinación de protecciones con características no estándar en una microrred de prueba y contrastar con resultados previamente reportados en la literatura especializada.

4. Implementar al menos dos técnicas de aprendizaje automático para clasificar los estados operativos de una microrred y llevar a cabo su coordinación de protecciones considerando características no estándar.

Bibliografía

- [1] M. H. Saeed, W. Fangzong, B. A. Kalwar and S. Iqbal, "A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166502-166517, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135083.
- [2] R. Ramakumar, "Role of distributed generation in reinforcing the critical electric power infrastructure," 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2001, pp. 139-139, doi: 10.1109/PESW.2001.917016.
- [3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007, doi: 10.1109/MPAE.2007.376583.
- [4] Marnay, C.; Chatzivasileiadis, S.; Abbey, C.; Iravani, R.; Joos, G.; Lombardi, P.; Mancarella, P.; von Appen, J. Microgrid Evolution Roadmap. In *Proceedings of the 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Vienna, Austria, 8–11 September 2015; pp. 139–144.
- [5] Shahnia, F., Chandrasena, R.P.S., Rajakaruna, S. and Ghosh, A. (2014), Primary control level of parallel distributed energy resources converters in system of multiple interconnected autonomous microgrids within self-healing networks. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 8: 203-222. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0126>
- [6] Brearley, B.J.; Prabu, R.R. A review on issues and approaches for microgrid protection. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017,67, 988–997.
- [7] Zhang, F.; Mu, L. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid. *Protection and Control of Modern Power Systems* 2019, 4, 1–12.
- [8] Usta, Ö.; Kara, B.; Uzun, M.; Gocer, C. An Adaptive Setting Procedure for Multi-Source Microgrid Protection 2019.
- [9] Altaf, M.W.; Arif, M.T.; Saha, S.; Islam, S.; Haque, M.E.; Oo, A. Effective Protection Scheme for Reliable Operation of Multi-microgrid. In *Proceedings of the*

- 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [10] Seo, H.C. New Protection Scheme Based on Coordination with Tie Switch in an Open-Loop Microgrid. *Energies* 2019, 12, 4756.
- [11] So, C.; Li, K. Time coordination method for power system protection by evolutionary algorithm. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2000,36, 1235–1240.
- [12] Razavi, F.; Abyaneh, H.A.; Al-Dabbagh, M.; Mohammadi, R.; Torkaman, H. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. *Electr. Power Syst. Res.* 2008, 78, 713–720.
- [13] So, C.; Li, K. Intelligent method for protection coordination. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, China, 5–8 April 2004; Volume 1*, pp. 378–382.
- [14] Mohammadi, R.; Abyaneh, H.; Razavi, F.; Al-Dabbagh, M.; Sadeghi, S. Optimal relays coordination efficient method in interconnected power systems. *J. Electr. Eng.* 2010, 61, 75.
- [15] Baghaee, H.R.; Mirsalim, M.; Gharehpetian, G.B.; Talebi, H.A. MOPSO/FDMT-based Pareto-optimal solution for coordination of overcurrent relays in interconnected networks and multi-DER microgrids. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2018, 12, 2871–2886.
- [16] Alasali, F.; Zarour, E.; Holderbaum, W.; Nusair, K.N. Highly Fast Innovative Overcurrent Protection Scheme for Microgrid Using Metaheuristic Optimization Algorithms and Nonstandard Tripping Characteristics. *IEEE Access* 2022, 10, 42208–42231.
- [17] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Adaptive protection coordination scheme in microgrids using directional over-current relays with non-standard characteristics. *Heliyon* 2021, 7, e06665.
- [18] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Optimal coordination of overcurrent relays in microgrids considering a non-standard characteristic. *Energies* 2020, 13, 922.

- [19] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; Lopez-Lezama, J.M.; Munoz-Galeano, N. Optimal coordination of over-current relays in microgrids considering multiple characteristic curves. *Alex. Eng. J.* 2021, 60, 2093–2113.
- [20] Saad, S.M.; El-Naily, N.; Mohamed, F.A. A new constraint considering maximum PSM of industrial over-current relays to enhance the performance of the optimization techniques for microgrid protection schemes. *Sustain. Cities Soc.* 2019, 44, 445–457.
- [21] Ojaghi, M.; Mohammadi, V. Use of Clustering to Reduce the Number of Different Setting Groups for Adaptive Coordination of Overcurrent Relays. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2018, 33, 1204–1212.
- [22] Ghadiri, S.M.E.; Mazlumi, K. Adaptive protection scheme for microgrids based on SOM clustering technique. *Appl. Soft Comput.* 2020, 88, 106062.
- [23] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Optimal coordination of over-current relays in microgrids using unsupervised learning techniques. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1241.

CAPÍTULO 2: RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO # 1

Como se mencionó anteriormente, el objetivo específico #1 consiste en:

Realizar una revisión de la literatura especializada sobre la coordinación de protecciones en microrredes que permita identificar los tipos de protecciones más utilizadas, las técnicas de solución, como también los nuevos desafíos y tendencias en esta temática.

Con el fin de alcanzar el objetivo específico # 1, se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica con un enfoque preciso en la recopilación de información relacionada con redes de distribución, microrredes, esquemas de protección, desafíos en la coordinación de protecciones en microrredes y posibles soluciones. Esta revisión literaria sirvió como fundamento inicial para la redacción de los artículos que cumple con los objetivos específicos # 2, # 3 y # 4 que se mencionan posteriormente.

2.1 Motivación

La coordinación de protecciones desempeña un papel fundamental en el diseño y operación de los sistemas eléctricos. Esta coordinación implica la selección y ajuste de elementos de protección, como relés e interruptores, para garantizar el funcionamiento confiable y seguro de las redes eléctricas, tanto en microrredes como en redes eléctricas convencionales. El propósito principal de un esquema de coordinación de protecciones es detectar y aislar fallas o condiciones anómalas en el sistema con el objetivo de minimizar los daños y el tiempo de inactividad, al tiempo que se mantiene el suministro a las partes no afectadas de la red. Es fundamental contar con esquemas adecuados de coordinación de protecciones para garantizar la seguridad del personal y del equipamiento, aislar fallas y mejorar la seguridad de la red.

Los sistemas de distribución tradicionales presentan una operación radial con un flujo unidireccional de corriente, lo que facilita la coordinación de protecciones [1]. Por otro lado, las microrredes incluyen recursos energéticos distribuidos (DER, por sus siglas en inglés) que comprenden generación distribuida (GD) y sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS por sus siglas en inglés); además, no siempre operan de manera radial, lo que plantea nuevos desafíos en el cálculo de la coordinación de protecciones [2].

El rápido aumento de la GD renovable dentro de las redes de distribución modernas ha diversificado la combinación energética y reducido la huella de carbono; las microrredes permiten una integración masiva de generación distribuida y se presentan como una alternativa nueva y

poderosa para satisfacer las necesidades de la creciente demanda de energía [3]. Sin embargo, las microrredes plantean los siguientes desafíos a los ingenieros de planeación: condiciones desequilibradas entre oferta y demanda [4], baja inercia que conduce a anomalías críticas en la frecuencia durante la operación en isla [5], variaciones en los niveles de cortocircuito que pueden impactar negativamente el rendimiento de los esquemas de protección tradicionales [6] y [7], escasez de dispositivos y tecnologías de protección de bajo costo, entre otras [8].

Además, debido a la presencia de recursos energéticos distribuidos (DER por sus siglas en inglés) y al hecho de que las microrredes presentan diferentes topologías o modos de operación, los esquemas de protección convencionales (diseñados para flujos radiales con altas corrientes de falla) pueden no funcionar efectivamente debido a factores que incluyen: flujos de potencia bidireccionales en la red [9], características dinámicas de las fuentes de generación [10], limitación de corriente de falla en modo isla [11], cambios topológicos en la red debido a la naturaleza intermitente de los recursos de generación distribuida [12], variación de corrientes de falla en diferentes modos operativos [11], características de conexión de los recursos de generación distribuida (conectados a través de inversores, máquinas síncronas o máquinas asíncronas), número y naturaleza de los recursos de generación distribuida conectados a la red [13].

Los relés de sobrecorriente son los elementos de protección más comúnmente utilizados en sistemas eléctricos para actuar en caso de una falla. Operan con curvas que muestran los tiempos de operación del relé dados los valores de corriente de falla detectados en relación con la corriente de arranque del dispositivo [14]. Debido a su eficiencia, simplicidad y facilidad de instalación, los esquemas de protección han sido implementados en microrredes con estos elementos [3]. En la literatura técnica, hay muchos autores que buscan proponer metodologías para llevar a cabo un estudio de coordinación de protecciones de manera sistemática, efectiva para cualquier topología y modo de operación de cualquier microrred; sin embargo, este aún es un tema en investigación.

2.2 Revisión Bibliográfica

Los estudios de coordinación de protecciones son realizados para la expansión de las redes eléctricas. La planificación y ejecución adecuada de un sistema de protección, resulta fundamental en el contexto de la gestión eficiente y la operación confiable de sistemas de energías renovables. La coordinación efectiva entre los distintos dispositivos de protección no solo mejora la confiabilidad, sino que también refuerza la seguridad del sistema. Para avanzar en la formulación de metodologías de coordinación de protección en microrredes, es importante abordar de manera

detallada los desafíos que estas enfrentan. En la literatura técnica se han identificado algunos de estos desafíos, los cuales se han resumido en diferentes trabajos [3],[5],[13] y [14]. A continuación, se presentan los retos más destacados que se han señalado en dichas fuentes:

Alta penetración de GD: La GD se refiere a la producción de electricidad que se encuentra en estrecha proximidad a las necesidades de energía, generalmente conectada a redes eléctricas de baja o media tensión, como se menciona en la referencia [15].

Pero para obtener estos beneficios también deben considerarse problemas intrínsecos en la GD como lo son: características dinámicas del tipo de generador, intermitencia de la GD lo que trae problemas en la regulación del voltaje, etc. lo que modifica los niveles de cortocircuito [16]. Cuanto mayor sea la capacidad de GD agregada en un circuito en relación con la capacidad y la demanda del alimentador, más críticos serán los problemas mencionados [17]. Esto afecta directamente los esquemas de protección ya que la configuración de la microrred puede cambiar inadvertidamente dadas las dinámicas de la GD [18].

Flujos de potencia bidireccional: en una red de distribución convencional, la corriente de potencia activa fluye en una única dirección, y la referencia principal para la dirección de esta potencia es desde la fuente de energía hacia la carga [19]. Sin embargo, en una microrred que incorpora GD, la dirección de la potencia activa es variable y depende de varios factores, las características dinámicas de la generación distribuida, las fluctuaciones en la carga, el modo de operación específico de la microrred, entre otros aspectos [20]. Esta variabilidad en la dirección del flujo de potencia activa en una microrred introduce desafíos que dificultan la adaptación efectiva de los esquemas de protección diseñados originalmente para redes convencionales con topología radial.

Variación de la corriente de falla con respecto al modo de operación: en una microrred, es posible su funcionamiento en dos modos distintos: conectada a la red principal o en modo isla. Cuando la microrred está conectada a la red principal, se beneficia de la presencia de generadores robustos con una alta inercia, considerables niveles de energía cinética y potencial, lo que resulta en una capacidad significativa de corriente de cortocircuito [21]. No obstante, cuando la microrred opera en modo isla, se presentan diferencias notables. En esta situación, la GD que debe alimentar totalmente la carga carece de muchas de estas características mencionadas anteriormente. Además, la corriente producida por los inversores se encuentra limitada, y en el caso de generadores con turbinas, existe la posibilidad de una pérdida en el campo de excitación debido al colapso de la tensión en las fases conectadas a tierra. Estos factores contribuyen a que la corriente de falla varíe

dependiendo del modo de operación de la microrred, como se explica en [22], los valores de corriente de falla dependen de los elementos de la microrred y de los tipos de generación que forman parte de la misma. En situaciones donde la corriente de falla es reducida, como en modo isla y en microrredes que solo cuenten con conexión de generación por medio de inversores, los esquemas de protección pueden experimentar dificultades para detectarla de manera adecuada y para tomar las medidas necesarias para solucionar la falla de manera efectiva.

Los relés de sobrecorriente son ampliamente utilizados en redes de distribución convencionales dada su simplicidad y economía. El desempeño de estos es bueno en estas redes debido a que el flujo de potencia es radial, poseen alta corriente de falla y una conexión permanente en la red. Sin embargo, en una microrred un esquema de protección usando estos relés es complejo debido a los flujos bidireccionales de potencia, bajos niveles de corriente de cortocircuito, y variaciones en la corriente de falla dependiendo del modo de operación de la microrred [13].

Distintos autores se centran en recopilar información del estado actual de los esquemas de protección para microrredes como [23] y [24], estos presentan los desafíos de estas redes, modos de operación (conectado a la red externa o modo isla) y las ventajas de algunos tipos de microrredes. En [25] comparan las microrredes AC y DC y sus principales desafíos técnicos. La referencia [26] muestra una visión más general entre los esquemas de protección para microrredes AC y DC. Los autores de [27] y [28] centran su atención en estudiar el impacto de la generación distribuida en los esquemas de protección para redes convencionales y microrredes.

Varios autores han implementado esquemas de protección y metodologías para optimizar los tiempos de operación de los relés de sobrecorriente centrándose en el estudio de parámetros específicos de estos relés y usando técnicas metaheurísticas para resolver un problema de programación no lineal. En [29], se tienen en cuenta los cambios en la topología y modos de operación de un sistema con GD y contingencias en una línea, unidad de GD o subestación, y formulan un problema de programación no lineal de enteros mixtos para realizar un estudio de coordinación de protecciones en una red cambiante. En [30], se incorporan simultáneamente una técnica de optimización de enjambre de partículas multiobjetivo (PSO por sus siglas en inglés) y una herramienta de decisión para coordinar relés de sobrecorriente direccionales en microrredes. En [31], se propone un esquema de coordinación de protección eficiente para microrredes utilizando los relés de sobrecorriente direccionales numéricos comúnmente utilizados con configuraciones simples y dobles, considerando cambios en la topología de la red y la protección

contra fallas de baja tensión de la GD, donde el problema de coordinación de protección ha sido formulado como un problema de optimización y resuelto utilizando el método del punto interior. En [32], se presenta un esquema de protección adaptativo basado en una metodología de aprendizaje automático para microrredes, los autores modelaron una red neuronal artificial híbrida y un enfoque de máquina de vectores de soporte para modificar la configuración de protección y garantizar la confiabilidad de la red. En [33], la coordinación de los OCR direccionales en microrredes se realiza para los modos conectado a la red y en isla considerando diferentes curvas características IEC para cada relé. Los autores de [34] proponen combinaciones de ajustes de parámetros de relés y la formulación de un problema de programación no lineal de enteros mixtos que resuelven con algoritmos genéticos (AG) y algoritmo de optimización Gray Wolf (GWO). Los autores de [35] combinan distintos parámetros de los relés, formulan un problema de programación lineal entera mixta y lo resuelven con el algoritmo de enjambre de partículas híbridas (PSO-MILP). En [36], se resuelve el problema de la coordinación de protecciones utilizando el algoritmo bat direccional difuso adaptativo (AFDBA). El autor de [37] usa el algoritmo de búsqueda caótica de cuco (CCS), mientras que los autores de [38] proponen un esquema de protección que usa características de tiempo-corriente no estándar y metaheurísticas (AG y algoritmo híbrido de búsqueda gravitacional-programación cuadrática secuencial (GSA-SQP)). Los autores en [39] estudian las posibles interconexiones entre microrredes y con la red de servicios públicos, luego se categorizan utilizando una técnica de aprendizaje no supervisado llamado *K-means* para resolver el problema de coordinación de protecciones, dependiendo de la categoría, usando un algoritmo basado en programación no lineal.

En la Tabla 1 se realiza un análisis de las ventajas y desventajas de algunos de los esquemas de coordinación de protecciones encontrados en la revisión de la literatura técnica. En dichos trabajos se presentan distintos esquemas de protección utilizados en microrredes, los cuales se basan y utilizan diferentes parámetros eléctricos, inteligencia artificial, protecciones adaptativas y algoritmos para el análisis y cálculo de los ajustes de relés de protección.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de algunos esquemas de protección en microrredes.

Artículo	Esquema	Ventajas	Desventajas
[40]	Esquema de protección para las fallas internas de multi-microrredes, que toma como	La información de cambio de las amplitudes de admitancia medidas antes y después de la falla es	No considera fallas de alta impedancia.

Artículo	Esquema	Ventajas	Desventajas
	<p>criterio el cambio de desfase y amplitud de las admitancias de barra medidas.</p>	<p>significativa y puede definirse como el criterio de protección para los alimentadores de carga. Además, la diferencia de fase de las admitancias medidas se define como otro criterio de protección para los alimentadores de doble terminal. También se introduce una gran redundancia en la derivación del criterio de protección y se pueden distinguir eficazmente las fallas en diferentes alimentadores de la multimicrorred.</p>	
[41]	<p>Esquema de protección adaptable, que requiere un análisis fuera de línea y una reestimación de los valores de configuración para cada topología de operación de la red.</p>	<p>Esquema adaptable a cualquier tipo de microrred y distintos modos de operación.</p>	<p>No se estudiaron fallas múltiples.</p>
[42]	<p>Esquema de protección basado en la coordinación con interruptor de enlace utilizando un nuevo índice que usa una transformada wavelet.</p>	<p>El método distingue con precisión la falla en el alimentador propio del interruptor, la falla en otro alimentador y el suministro de corriente de carga normal a otro alimentador.</p>	<p>No considera la sobretensión debida al apagado del interruptor de alimentación, el tiempo de funcionamiento del interruptor de alimentación, los métodos de eliminación del arco y los cambios en las impedancias de línea.</p>
[43]	<p>Esquema de protección basado en parámetros de línea de corriente y voltaje para la protección de múltiples microrredes en</p>	<p>Al diferenciar dos modos de operación específicos dependiendo del nivel de corriente de falla los relés operan efectivamente y de manera autónoma tanto para el modo</p>	<p>No se consideraron fallas asimétricas en la red de múltiples microrredes con alta penetración de recursos</p>

Artículo	Esquema	Ventajas	Desventajas
	modos operativos conectados a la red y en isla.	isla como para el modo conectado a la red.	de energía distribuida (DER) basados en energías renovables.
[44]	Esquema de protección que cambia activamente la configuración de relés de sobrecorriente (OCR) de acuerdo con el estado de la combinación de fuente del generador.	Método de protección adaptable para resolver problemas de protección para microrredes remotas compuestas por generadores diésel y ESS basados en inversores con diferentes propiedades de respuesta a fallas.	La corriente de falla podría variar si se interconectaran varios tipos de generación distribuida con la microrred remota.
[45]	Estrategia basada en Redes Neuronales Artificiales (ANNs)	La estrategia mejora la precisión del sistema y acelera la respuesta del sistema de protección ante cambios inesperados en la red.	Sensible a fallas de comunicación.
[46]	Esquema de protección basado en características no estándar en relés de sobrecorriente.	Uso de características no estándar considerando tres variables de optimización: ajuste de multiplicación de tiempo (TMS), límite máximo del multiplicador de ajuste de corriente de enchufe (PSM_{max}) y curva característica estándar (SCC). Uso de técnicas de optimización metaheurística.	Requiere un ajuste de protecciones por cada escenario operativo de la microrred.
[47]	Esquema de protección basado en múltiples curvas estándar en relés de sobrecorriente.	Uso de características estándar considerando tres variables de optimización: ajuste de multiplicación de tiempo (TMS), ajuste de corriente de enchufe (PSM) y curva característica (SCC). Uso de técnicas de optimización metaheurística.	Requiere un ajuste de protecciones por cada escenario operativo de la microrred.
[48]	Esquema de protecciones que usa técnicas de aprendizaje automático no supervisado	Usa técnicas de aprendizaje automático no supervisado para clasificar topologías de red y proporciona ajustes a los relés	Utiliza un modelo clásico para formular el problema de optimización para la

Artículo	Esquema	Ventajas	Desventajas
		dependiendo del escenario operativo.	coordinación de protecciones de sobrecorriente direccionales.

A través del análisis de la literatura especializada, se ha identificado que múltiples autores han propuesto diversas estrategias para abordar la coordinación de protecciones. Estas estrategias incluyen el análisis de variables eléctricas específicas, la aplicación de inteligencia artificial, la implementación de esquemas adaptativos, la formulación de problemas de programación lineal y no lineal, así como el empleo de características no estándar en conjunto con métodos metaheurísticos. Paralelamente, otros grupos de investigadores han enfocado sus esfuerzos en emplear técnicas de aprendizaje automático no supervisado utilizando la formulación convencional de coordinación. Basándose en la información recopilada en la literatura, este trabajo propone una metodología general que integra características no estándar, técnicas de aprendizaje automático no supervisado y métodos metaheurísticos con el objetivo de potenciar la fiabilidad y seguridad en los esquemas de coordinación de protecciones direccionales de sobrecorriente.

2.3 Conclusiones

A través del análisis bibliográfico se logró la identificación de los desafíos derivados de la amplia incorporación de GD en las microrredes, especialmente en lo referente a la coordinación de protecciones, así como el reconocimiento de los esquemas de protección comúnmente empleados en este contexto.

Los autores proponen esquemas de protección en microrredes considerando muchas alternativas, como: identificación de variables eléctricas específicas, inteligencia artificial, uso de características no estándar, técnicas metaheurísticas para resolver un problema de programación lineal o no lineal, técnicas de aprendizaje automático, entre otros.

El enfoque de esta revisión literaria se centró en la investigación de métodos que presentan enfoques para abordar la coordinación de protecciones, tratándolo como un problema de programación no lineal, que usan características no estándar, técnicas de optimización metaheurísticas y técnicas de aprendizaje no supervisado. En este contexto, este trabajo propone una metodología general que integra técnicas de aprendizaje automático para la clasificación de escenarios operativos según fallas en puntos específicos, la formulación de un problema de

programación no lineal que considera características no estándar, y la aplicación de técnicas de optimización metaheurística para encontrar la solución del problema de programación. Esto permite determinar los ajustes adecuados para los relés de sobrecorriente según el escenario operativo identificado.

2.4 Bibliografía

- [1] Zeineldin, H.; El-Saadany, E.; Salama, M. Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination 2005. pp. 1101–1106.
- [2] Marnay, C.; Chatzivasileiadis, S.; Abbey, C.; Iravani, R.; Joos, G.; Lombardi, P.; Mancarella, P.; von Appen, J. Microgrid Evolution Roadmap 2015. pp. 139–144. <https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315197>.
- [3] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; Lopez-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Protection coordination in microgrids: current weaknesses, available solutions and future challenges. IEEE Latin America Transactions 2020, 18, 1715–1723.
- [4] Kang, X., Nuworklo, C.E.K., Tekpeti, B.S. and Kheshti, M. (2017), Protection of microgrid systems: a comprehensive survey. The Journal of Engineering, 2017: 1515-1518. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0584>.
- [5] Memon, A. A., & Kauhaniemi, K. (2015). A critical review of AC Microgrid protection issues and available solutions. Electric Power Systems Research, 129, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.07.006>.
- [6] Basak, P., Chowdhury, S., nee Dey, S. H., & Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 5545-5556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.043>.
- [7] S. N. Bhaskara and B. H. Chowdhury, "Microgrids — A review of modeling, control, protection, simulation and future potential," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1-7, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345694.
- [8] Patnaik, B.; Mishra, M.; Bansal, R.C.; Jena, R.K. AC microgrid protection—A review: Current and future prospective. Applied Energy 2020, 271, 115210.
- [9] A. A. Eajal, H. Muda, A. Aderibole, M. A. Hosani, H. Zeineldin and E. F. El-Saadany, "Stability Evaluation of AC/DC Hybrid Microgrids Considering Bidirectional Power Flow

- Through the Interlinking Converters," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43876-43888, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3066519
- [10] Liu Qiang, Zhou Lin and Guo Ke, "Review on the dynamic characteristics of micro-grid system," 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapore, 2012, pp. 2069-2074, doi: 10.1109/ICIEA.2012.6361071.
- [11] U. Maqbool and U. A. Khan, "Fault current analysis for grid-connected and Islanded microgrid modes," 2017 13th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, Pakistan, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICET.2017.8281734.
- [12] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh and S. G. Srivani, "Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 365-379, Dec. 2017, doi: 10.17775/CSEEJPES.2017.00030
- [13] Brearley, B.J.; Prabu, R.R. A review on issues and approaches for microgrid protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017, 67, 988–997.
- [14] Kiliçkiran, H.C.; S, engör, I.; Akdemir, H.; Kekezog̃lu, B.; Erdinç, O.; Paterakis, N.G. Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics. *Electric Power Systems Research* 2018, 164, 89–102.
- [15] Colmenar, A.; Borge, D.; Collado, E.; Castro, A. *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*; Editorial UNED, 2015.
- [16] J. Liu, Y. Miura and T. Ise, "Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3600-3611, May 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2465852.
- [17] Barker, P.; De Mello, R. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems 2000. 3, 1645–1656 vol. 3. <https://doi.org/10.1109/PESS.2000.868775>.
- [18] Davood Fateh, Mojtaba Eldoromi, Ali Akbar Moti Birjandi, 9 - Uncertainty modeling of renewable energy sources, Editor(s): Ali Zangeneh, Moein Moeini-Aghtaie, *Scheduling and Operation of Virtual Power Plants*, Elsevier, 2022, Pages 193-208, ISBN 9780323852678, <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-385267-8.00014-7>.

- [19] Raymond, H. Power Flow Direction Definitions for Metering of Bidirectional Power. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1983, PAS-102, 3018–3022. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.318107>.
- [20] Elsamahy, M. Reducing Microgrids Integration Complexity in Distribution Networks Considering Bidirectional Power Flow in SFCLs. *IEEE Access* 2022, 10, 80365–80378. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3194628>.
- [21] Singh, M.; Basak, P. Behavior of fault current in microgrid systems 2016. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079362>.
- [22] E. Sortomme, G. J. Mapes, B. A. Foster and S. S. Venkata, "Fault analysis and protection of a microgrid," 2008 40th North American Power Symposium, Calgary, AB, Canada, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2008.5307360.
- [23] Baidya, S.; Nandi, C. A comprehensive review on DC Microgrid protection schemes. *Electric Power Systems Research* 2022, 210, 108051.
- [24] Jin, X.; Shen, Y.; Zhou, Q. A systematic review of robust control strategies in DC microgrids. *The Electricity Journal* 2022, 35, 107125.
- [25] Patel, V.; Patel, V. A comprehensive review: AC & DC Microgrid Protection. In *Proceedings of the 2020 21st National Power Systems Conference (NPSC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [26] Shanmugapriya, V.; Vidyasagar, S.; Vijayakumar, K. Recent Developments in AC and DC Microgrids: Systematic Evaluation of Protection Schemes. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 2021, 11, 1850–1870.
- [27] Fernández, A.; Gers, J.; Quintero, J. Challenges in Microgrid Protection. In *Proceedings of the 2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference-Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [28] Jadidi, S.; Badihi, H.; Zhang, Y. A review on operation, control and protection of smart microgrids. In *Proceedings of the 2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. IEEE, 2019, pp. 100–104.
- [29] Saleh, K.A.; Zeineldin, H.H.; El-Saadany, E.F. Optimal protection coordination for microgrids considering N –1 contingency. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2017, 13, 2270–2278.

- [30] Baghaee, H.R.; Mirsalim, M.; Gharehpetian, G.B.; Talebi, H.A. MOPSO/FDMT-based Pareto-optimal solution for coordination of overcurrent relays in interconnected networks and multi-DER microgrids. *IET generation, transmission & distribution* 2018, 12, 2871–2886.
- [31] Alam, M.N.; Gokaraju, R.; Chakrabarti, S. Protection coordination for networked microgrids using single and dual setting overcurrent relays. *IET Generation, Transmission & Distribution* 2020, 14, 2818–2828.
- [32] Lin, H.; Sun, K.; Tan, Z.H.; Liu, C.; Guerrero, J.M.; Vasquez, J.C. Adaptive protection combined with machine learning for microgrids. *IET generation, transmission & distribution* 2019, 13, 770–779.
- [33] Alam, M.N. Overcurrent protection of AC microgrids using mixed characteristic curves of relays. *Computers & Electrical Engineering* 2019, 74, 74–88.
- [34] Tiwari, R.; Singh, R.K.; Choudhary, N.K. Coordination of dual setting overcurrent relays in microgrid with optimally determined relay characteristics for dual operating modes. *Protection and Control of Modern Power Systems* 2022, 7, 1–18.
- [35] Plongkrathok, C.; Chayakulkheeree, K. Optimal Overcurrent Relay Coordination Considering Multiple Characteristic Curve for Microgrid Protection using Hybrid PSO-MILP Technique.
- [36] Sampaio, F.C.; Tofoli, F.L.; Melo, L.S.; Barroso, G.C.; Sampaio, R.F.; Leão, R.P.S. Adaptive fuzzy directional bat algorithm for the optimal coordination of protection systems based on directional overcurrent relays. *Electric Power Systems Research* 2022, 211, 108619.
- [37] Biswal, S.; Sharma, N.K.; Samantaray, S. Optimal overcurrent relay coordination scheme for microgrid. In *Proceedings of the 2020 21st National Power Systems Conference (NPSC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [38] Abeid, S.; Hu, Y.; Alasali, F.; El-Naily, N. Innovative Optimal Nonstandard Tripping Protection Scheme for Radial and Meshed Microgrid Systems. *Energies* 2022, 15, 4980.
- [39] Alam, M.N.; Chakrabarti, S.; Pradhan, A.K. Protection of networked microgrids using relays with multiple setting groups. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2021, 18, 3713–3723.

- [40] Zhang, F.; Mu, L. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid. *Protection and Control of Modern Power Systems* 2019, 4, 1–12.
- [41] Usta, Ö.; Kara, B.; Uzun, M.; Gocer, C. An Adaptive Setting Procedure for Multi-Source Microgrid Protection 2019.
- [42] Seo, H.C. New Protection Scheme Based on Coordination with Tie Switch in an Open-Loop Microgrid. *Energies* 2019, 12, 4756.
- [43] Altaf, M.W.; Arif, M.T.; Saha, S.; Islam, S.; Haque, M.E.; Oo, A. Effective Protection Scheme for Reliable Operation of Multi-microgrid. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [44] Chae, W.; Lee, J.H.; Kim, W.H.; Hwang, S.; Kim, J.O.; Kim, J.E. Adaptive Protection Coordination Method Design of Remote Microgrid for Three-Phase Short Circuit Fault. *Energies* 2021, 14, 7754.
- [45] Bakkar, M.; Bogarra, S.; Córcoles, F.; Aboelhassan, A.; Wang, S.; Iglesias, J. Artificial intelligence-based protection for smart grids. *Energies* 2022, 15, 4933.
- [46] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Microgrids Considering a Non-Standard Characteristic. *Energies* 2020, 13, 922. <https://doi.org/10.3390/en13040922>.
- [47] Saldarriaga, Sergio & López-Lezama, Jesús & Muñoz-Galeano, Nicolas. (2021). Optimal coordination of over-current relays in microgrids considering multiple characteristic curves. *Alexandria Engineering Journal*. 60. 2093-2113. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.012>.
- [48] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Optimal coordination of over-current relays in microgrids using unsupervised learning techniques. *Applied Sciences* 2021, 11, 1241. <https://doi.org/10.3390/app11031241>.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO # 2

Como se mencionó anteriormente, el objetivo específico #2 consiste en:

Valorar el impacto de la GD en los esquemas de protección de sobrecorriente mediante un estudio detallado de coordinación de protecciones utilizando herramientas computacionales que permita identificar las debilidades de dichos esquemas.

Para alcanzar el objetivo #2, se llevó a cabo la revisión exhaustiva de la literatura, detallada en el capítulo 2 para cumplir con el objetivo específico #1. Esta revisión se centró en la recopilación de información acerca de redes de distribución, microrredes y sus respectivos esquemas de protección, así como en la identificación de los desafíos que surgen al integrar la generación distribuida y los posibles modos de operación en una microrred. A partir de este análisis bibliográfico, se propuso una microrred de prueba para evaluar el impacto de la incorporación de la generación distribuida. Además, se detallaron los ajustes del sistema de protección en los escenarios operativos, tanto con generación distribuida como sin ella.

Las simulaciones necesarias para obtener los resultados sobre la coordinación de protecciones de sobrecorriente se llevaron a cabo utilizando el software DigSilent Power Factory.

Los resultados de este objetivo se presentan en el artículo titulado: **A Microgrid Test System for Protection Coordination Studies**; el cual se encuentra en proceso de publicación en la revista Electronics, clasificada en Q2.

El artículo se presenta como el anexo 1 de este documento.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS # 3 Y # 4

Como se mencionó anteriormente, los objetivos específicos #3 y # 4 consisten en:

Implementar al menos dos técnicas de optimización metaheurística para validar la coordinación de protecciones con características no estándar en una microrred de prueba y contrastar con resultados previamente reportados en la literatura especializada.

Implementar al menos dos técnicas de aprendizaje automático para clasificar los estados operativos de una microrred y llevar a cabo su coordinación de protecciones considerando características no estándar.

Para lograr estos objetivos se utilizó la revisión de literatura, elaborada en el capítulo 2. Dentro de esta revisión, se enfocó particularmente en la exploración de artículos que abordan la resolución del desafío de coordinar protecciones en microrredes mediante un problema de programación no lineal, además de analizar otras fuentes relevantes.

También se planteó el problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente como un problema de programación no lineal, con el objetivo de minimizar los tiempos de operación de los relés de sobrecorriente. Posteriormente, utilizando una red de pruebas IEC se implementó una metodología para evaluar las corrientes de falla de distintos escenarios operativos. Luego, se generaron clusters que agruparon escenarios con características de falla con cierta similitud.

Estos clusters se definieron utilizando cuatro técnicas de aprendizaje automático no supervisado, incluyendo variaciones de las mismas: K-Means algorithm, Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies (BIRCH), Gaussian mixtures y Hierarchical clustering algorithms.

Una vez definidos los clusters, se emplearon cuatro técnicas metaheurísticas: Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Invasive Weed Optimization (IWO) y Artificial Bee Colony (ABC), con el propósito de resolver el problema de programación no lineal planteado.

Las técnicas de clustering han sido ampliamente analizadas en la literatura, por lo que su uso está muy extendido, en el campo de la coordinación de protecciones el K-means es uno de los más utilizados, pero se probaron otras técnicas diferentes como BIRCH, mezclas gaussianas y aglomerativo jerárquico. para analizar su desempeño.

En lo que respecta a GA y PSO, estos enfoques metaheurísticos se han utilizado ampliamente en estudios de coordinación de protección. Sin embargo, la efectividad y aplicabilidad de IWO y ABC para resolver el problema de coordinación óptima no habían sido probadas en la literatura especializada.

Los resultados obtenidos se presentan en el artículo titulado: **Microgrid Protection Coordination considering Clustering and Metaheuristic Optimization**; el cual se encuentra en proceso de publicación en la revista Energies, clasificada en Q1.

El artículo se presenta como el anexo 2 de este documento.

CAPÍTULO 5: COMPARATIVA DE RESULTADOS DE METODOLOGÍAS DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRORREDES

Se realizó la comparación entre los resultados que se obtuvieron aplicando la metodología propuesta en este trabajo (Anexo 2) y la referencia [1], debido a que estudian la misma red de prueba y abordan el problema de coordinación de protecciones con un problema de programación no lineal similar, buscando minimizar el tiempo de operación de los relés de sobrecorriente. Las simulaciones y análisis de fallas de la metodología propuesta se realizaron en el software Digsilent Power factory 2020, el análisis de datos y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático no supervisado programadas en la librería [2] y metaheurísticas programadas en [3], [4], [5] y [6] se realizaron en Python 3.9 en una laptop con procesador Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz-2.21 GHz, RAM de 16.0 GB y sistema operativo de 64 bits, procesador x64.

En la siguiente tabla presenta el mejor resultado reportado en [1]:

Tabla 2. Mejor resultado de tiempo de operación de [1].

Método agrupamiento y metaheurística	Clusters	Distribución de escenarios operativos	Tiempo de operación	Violaciones
Ajuste heurístico	1	4 8 12 16	109.1561	0
	2	1 2 3 13 15	82.3264	0
	3	5 6 7 10 11	266.9944	0
	4	9 14	38.93	0
	Total		497.4069	0

Construyendo una tabla similar con los resultados de los mejores tiempos de operación de la metodología propuesta en este trabajo.

Tabla 3. Mejores resultados de tiempo de la metodología propuesta.

Método agrupamiento y metaheurística	Clusters	Distribución de escenarios operativos	Tiempo de operación [s]	Violaciones	Tiempo de Simulación [s]
	1	1 2 3 13 14 15	91.74	0	24.81

Método agrupamiento y metaheurística	Clusters	Distribución de escenarios operativos	Tiempo de operación [s]	Violaciones	Tiempo de Simulación [s]
Variaciones de Aglomeración jerárquica (V.A.J.) y PSO (Grupo 5)	2	5 7 9 11	92.84	0	16.72
	3	6 10	50.49	0	9.15
	4	4 8 12 16	103.32	0	17.26
	Total		338.38	0	67.94
Variaciones de Aglomeración jerárquica (V.A.J.) y GA (Grupo 12)	1	5 6 7 9 10 11	169.05	0	24.44
	2	4 8 12 16	120.38	0	16.71
	3	1 2 3 14	66.17	0	16.80
	4	13 15	19.85	0	10.34
	Total		375.46	0	68.29
Variaciones de Aglomeración jerárquica (V.A.J.) y ABC (Grupo 17)	1	1 2 3 13 14 15	131.91	0	22.73
	2	5 7 9 10 11	92.25	0	25.54
	3	6	25.33	0	6.43
	4	4 8 12 16	105.09	0	17.65
	Total		354.59	0	72.35
Variaciones de Aglomeración jerárquica (V.A.J.) y IWO (Grupo 5)	1	1 2 3 13 14 15	171.26	0	14.69
	2	5 7 9 11	174.95	0	10.76
	3	6 10	86.98	0	6.12
	4	4 8 12 16	133.60	0	11.24
	Total		566.79	0	42.81

Los resultados del tiempo de operación total se muestran en la Figura 1.

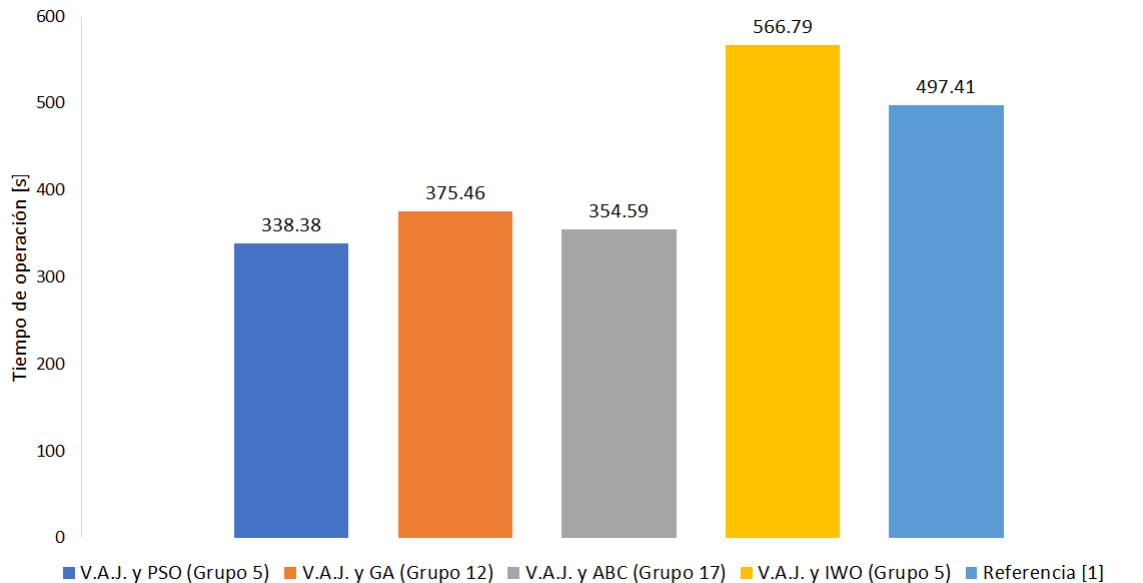


Figura 1. Comparativa de resultados.

La metodología propuesta obtuvo resultados mejores, en comparación con la literatura técnica analizada.

En la metodología propuesta en [1], el algoritmo metaheurístico GA converge a un resultado con violaciones, por consiguiente, con el fin de alcanzar un tiempo de operación óptimo, se implementa un ajuste heurístico. Este ajuste heurístico converge a soluciones que cumplen con las restricciones del problema de programación no lineal, evitando así violaciones a las restricciones. Este contratiempo genera dificultades y extiende el proceso para determinar los ajustes más adecuados para la coordinación de protecciones. Por otro lado, la metodología propuesta ofrece una clasificación exhaustiva de escenarios operativos inicialmente, utilizando diversas técnicas de aprendizaje automático no supervisado y sus variaciones. Posteriormente, resuelve el problema de programación propuesto empleando múltiples técnicas de optimización metaheurística. Esta metodología genera numerosos grupos de escenarios operativos, cuyas soluciones al problema de programación convergen sin violar restricciones, independientemente de la técnica metaheurística utilizada. Esto sugiere una estructura metodológica más sólida y una mayor tasa de convergencia sin violaciones, además de tiempos de operación notablemente inferiores en comparación con la metodología presentada en [1]. En este trabajo de investigación se utiliza una formulación matemática mejorada del problema de coordinación de DOCs, en la cual se utiliza límite máximo del multiplicador de ajuste de enchufe (PSM) como una variable de decisión, así como la selección

entre diversos tipos de curvas de operación de relé. Además, se emplea una amplia variedad de técnicas de aprendizaje automático no supervisado para la clasificación de escenarios, junto con técnicas metaheurísticas para resolver el problema de optimización. Todo lo mencionado anteriormente permite mejorar los resultados que se obtuvieron en la metodología propuesta en [1].

A pesar de que en la metodología propuesta se priorizaron los mejores grupos de clusters según una relación gráfica entre el tiempo de operación y el tiempo de simulación, se destaca que los tiempos de operación en: el grupo 5 de PSO con 338.38 s, el grupo 12 de GA con 375.46 s y el grupo 17 de ABC con 354.59 s, resultaron inferiores al tiempo obtenido con el ajuste heurístico propuesto en [1] con 97.41 s. Sin embargo, el grupo 5 de IWO presentó un tiempo de operación mayor, con 566.79 s, en comparación con estos grupos.

En resumen, la metodología presentada en este estudio supera a la metodología descrita en [1] debido a su enfoque más exhaustivo que incluye una diversidad de grupos de clusters generados por múltiples técnicas de aprendizaje automático.

Las técnicas de clustering dieron como resultado 31 grupos de escenarios operativos, cada grupo se evaluó con cada técnica metaheurística pero no todos los grupos convergieron sin violaciones. Los grupos descritos en la Tabla 3 presentan la mejor relación entre tiempo de operación y tiempo de simulación, y convergencia sin violaciones dada por cada técnica metaheurística evaluada. Este enfoque más amplio y completo asegura una mayor eficacia en la coordinación de protecciones, destacándose por su capacidad para abordar la complejidad del problema y mejorar la eficiencia del sistema de protecciones de la instalación.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y BIBLIOGRAFÍA

Conclusiones

1. Las microrredes ofrecen muchas ventajas dada la versatilidad que tienen, pero presentan dificultades al momento de realizar la coordinación de sus protecciones principalmente por la alta penetración de GD, los flujos de potencia bidireccional y la variación de la corriente de falla con respecto al modo de operación, que hacen que las metodologías de los esquemas de protección tradicionales de las redes de distribución no sean los adecuados para las microrredes.
2. La inclusión de GD en el sistema de prueba de microrred propuesto, aumentó los niveles de cortocircuito, pero no tuvo un efecto significativo en los tiempos de operación de los relés principales y de respaldo, por lo que no se requirió modificación en los ajustes de los relés de sobrecorriente.
3. El análisis examinó la sinergia entre métodos de aprendizaje automático no supervisado y técnicas metaheurísticas para potenciar la efectividad de la coordinación de protecciones en sistemas eléctricos complejos.
4. Se propuso una metodología que aborda la agrupación de escenarios operativos, incorpora características no estándar en ajustes de relés y aborda el problema de coordinación de protecciones como un problema de optimización no lineal.
5. Las técnicas de aprendizaje automático no supervisado estudiadas suministraron 31 grupos de clusters diferentes, de las cuales, al aplicar las distintas técnicas metaheurísticas, no siempre convergieron sin violaciones a las restricciones del problema de programación no lineal.
 - En el GA convergieron 15 grupos de clusters sin violaciones.
 - En el PSO convergieron 14 grupos de clusters sin violaciones.
 - En el IWO convergieron 7 grupos de clusters sin violaciones.
 - En el ABC convergieron 15 grupos de clusters sin violaciones.
6. Las técnicas de aprendizaje automático no supervisado desempeñan un papel fundamental en consolidar diversos escenarios operativos en grupos distintos, cuya cantidad está determinada por la variedad de ajustes disponibles para configurar en los relés de sobrecorriente. Por otro lado, se encontró que las técnicas metaheurísticas ofrecen una resolución ágil al desafiante problema de optimización no lineal. Estas soluciones brindan

flexibilidad al usuario al permitir la elección entre resultados que priorizan el tiempo de operación, el tiempo de simulación o la relación entre ambos, adaptándose así a las necesidades específicas del usuario.

7. Se comparó el rendimiento de cada técnica metaheurística, examinando la relación entre el tiempo de operación y el tiempo de simulación de manera gráfica. El mejor grupo para GA fue el Grupo 12; para PSO e IWO, fue el Grupo 5; y para ABC, fue el Grupo 17. El rendimiento óptimo se observó en el Grupo 5 obtenido por PSO, generado a partir de variantes del algoritmo de agrupamiento jerárquico aglomerativo.
8. La estrategia metodológica planteada en este estudio mejora los resultados presentados en [1], caracterizándose por explorar una amplia variedad de grupos de clusters, obtenidos mediante diversas técnicas de aprendizaje automático. Estos grupos exhiben una convergencia sin violaciones gracias a la aplicación de diversas estrategias metaheurísticas, considerando tanto la eficiencia temporal en simulación como la mejora global en los tiempos de respuesta de los relés. Este enfoque abarcador y holístico asegura una mayor efectividad en la coordinación de protecciones, destacándose por su habilidad para afrontar la complejidad inherente al problema y potenciar la eficiencia del sistema de protección en la instalación eléctrica.

Trabajos futuros

La metodología propuesta fue exitosa al ser aplicada en la red de pruebas IEC, por esa razón, en trabajos futuros se estudiará su aplicación en sistemas eléctricos más complejos. Adicionalmente, se explorarán otras técnicas y modelos para solucionar el tema de coordinación de protecciones. Un trabajo complementario consiste en desarrollar modelos de programación lineal entera mixta para la coordinación de protecciones en microrredes. Este tipo de modelos garantizarían la obtención de soluciones óptimas globales sin recurrir a técnicas metaheurística.

Bibliografía

- [1] Saldarriaga-Zuluaga, S.D.; López-Lezama, J.M.; Muñoz-Galeano, N. Optimal coordination of over-current relays in microgrids using unsupervised learning techniques. *Applied Sciences* 2021, 11, 1241. <https://doi.org/10.3390/app11031241>.
- [2] scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 1.4.1 documentation. (s. f.). <https://scikit-learn.org/stable/>
- [3] Mostapha Kalami Heris, Practical Genetic Algorithms in Python and MATLAB – Video Tutorial (URL: <https://yarpiz.com/632/ypga191215-practical-genetic-algorithms-in-python-and-matlab>), Yarpiz, 2020.
- [4] Mostapha Kalami Heris, Particle Swarm Optimization (PSO) in Python (URL: <https://yarpiz.com/463/ypea127-pso-in-python>), Yarpiz, 2017.
- [5] Ma YiMing, X. (s. f.). Invasive-Weed-Optimization: Invasive weed optimization. GitHub. <https://github.com/Xavier-MaYiMing/Invasive-Weed-Optimization>
- [6] Ma YiMing, X. (s. f.-a). Artificial-Bee-Colony. GitHub. <https://github.com/Xavier-MaYiMing/Artificial-Bee-Colony>