



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**METODOLOGÍAS PARA LA COORDINACIÓN  
DE ESQUEMAS DE PROTECCIONES  
ELÉCTRICAS EN MICRORREDES UTILIZANDO  
TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN**

Autor(es)

**Sergio Danilo Saldarriaga Zuluaga**

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021



Metodologías para la Coordinación de Esquemas de Protecciones Eléctricas en Microrredes  
Utilizando Técnicas de Optimización

**Sergio Danilo Saldarriaga Zuluaga**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Doctor en Ingeniería Electrónica y Computación**

Asesores (a):

Jesús María López Lezama

Phd en Ingeniería Eléctrica

Línea de Investigación:

Micro-redes

Grupo de Investigación:

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía – GIMEL

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellin, Colombia

2021

## **Abstract**

The electric power industry is currently under constant change, seeking a more active role of users and a greater participation of small-scale generation in distribution networks (DNs). This trend has been motivated by different aspects that include a renewed ecological awareness, technological advances that have lowered the costs of small-scale generation, and a desire to reduce the dependence on fossil fuel and greenhouse emissions. In this context, microgrids stand out as an option that allows integrating the new requirements of electrical systems and an alternative that can mitigate the environmental impacts of the electrical industry through the integration of renewable distributed generation (DG) and an efficient management of resources.

Guaranteeing a secure and reliable operation of microgrids requires adequate protection schemes that ensure the safety of people and equipment. The integration of microgrids implies new challenges for the protection coordination in DNs, due to the presence of DG units which introduce bidirectional power flows. The main objective of this work is to propose and validate overcurrent protection coordination models in microgrids that take into account non-standard characteristics of relays and that are solved by metaheuristic techniques. To achieve this aim, the current weaknesses and available solutions presented by overcurrent protection coordination models of microgrids are identified to define future challenges. Then, non-standard characteristics are selected and studied in detail. Subsequently, optimal coordination models are proposed by implementing such non-standard characteristics. Finally, the proposed models are validated using metaheuristic optimization techniques.

This document is structured as a compilation of several scientific papers, which show the results obtained during the development of the doctorate. The structure of the document consists on supporting the fulfillment of the main and specific objectives through publications in high impact international journals.

## **Resumen**

La industria de la energía eléctrica se encuentra en constante cambio, buscando un rol más activo de los usuarios y una mayor participación de la generación a pequeña escala en las redes de distribución (RD). Esta tendencia ha sido motivada por diferentes aspectos entre los que se destacan una renovada conciencia ecológica, avances tecnológicos que han posibilitado la reducción de costos de generación a pequeña escala y el deseo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. En este contexto, las microrredes se destacan como una opción que permite integrar los nuevos requerimientos los sistemas eléctricos y que puede mitigar los impactos ambientales de la industria eléctrica a través de la integración de la generación distribuida (GD) renovable y una gestión eficiente de los recursos.

Garantizar un funcionamiento seguro y confiable de las microrredes requiere esquemas de protección adecuados que garanticen la seguridad de las personas y los equipos. La integración de microrredes implica nuevos desafíos para la coordinación de protección en RD, debido a la presencia de unidades de GD que introducen flujos de potencia bidireccionales. El objetivo principal de este trabajo es proponer y validar modelos de coordinación de protecciones de sobrecorriente en microrredes que tengan en cuenta características no estándar de los relés y que sean resueltos mediante técnicas metaheurísticas. Para lograr este objetivo, se identifican las debilidades actuales y las soluciones disponibles que presentan los modelos de coordinación de protecciones de sobrecorriente de las microrredes para definir los desafíos futuros. Luego, las características no estándar se seleccionan y estudian en detalle. Posteriormente, se proponen modelos de coordinación óptimos mediante la implementación de las características no estándar seleccionadas. Finalmente, los modelos propuestos se validan mediante técnicas de optimización metaheurísticas.

Este documento está estructurado como una recopilación de varios artículos científicos, los cuales muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo del doctorado. La estructura del documento consiste en sustentar el cumplimiento de los objetivos principales y específicos a través de publicaciones en revistas científicas internacionales de alto impacto.

## Tabla de Contenido

<a href="#">Capítulo 1: Introducción</a> .....	5
<a href="#">Capítulo 2: Resultados del objetivo específico # 1</a> .....	12
<a href="#">Capítulo 3: Resultados del objetivo específico #2</a> .....	13
<a href="#">Capítulo 4: Resultados de los objetivos específicos #3 y #4</a> .....	15
<a href="#">Capítulo 5: Resultados Adicionales</a> .....	16
<a href="#">Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros</a> .....	17

## Capítulo 1: Introducción

En la actualidad existe un interés creciente en aumentar el uso de plantas de generación amigables con el medio ambiente. Entre estas se destacan las plantas de generación solares, eólicas, hidráulicas a pequeña escala, geotérmicas y de biomasa. Estas plantas de generación generalmente son a pequeña escala y se conectan al sistema de distribución, lo que se conoce como GD. Las microrredes han venido tomando fuerza debido a que permiten la integración de GD a la red.

Uno de los desafíos que ha traído consigo la incorporación de microrredes es el problema de coordinación de protecciones eléctricas con la presencia de diferentes unidades de GD. La alta participación de GD acoplada a la red por medio de inversores y de GD que usa máquinas rotativas genera corrientes y flujos de potencia bidireccionales [1] [2]. Adicionalmente, dependiendo de la ubicación y el tipo del generador los requisitos de protección son diferentes. En la figura 1 se presenta un ejemplo de una microrred con sus sistemas de comunicación y protección.

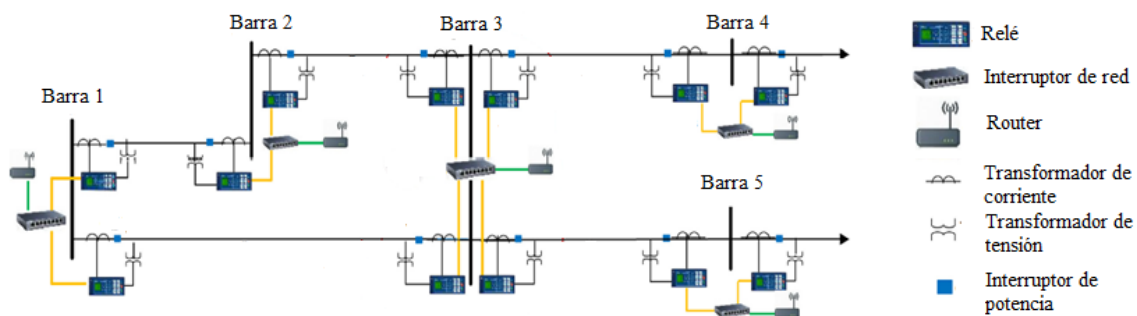


Figura 1. Esquema de comunicación y protección de una microrred

De acuerdo con [3], los sistemas de protección en microrredes deben afrontar dos aspectos importantes. El primero es el comportamiento dinámico que presentan las microrredes. Dicho comportamiento se da por la intermitencia de las cargas y de los generadores. El segundo, es la característica de operación de las microrredes. Puesto que estas pueden operar conectadas o desconectadas de la red de distribución.

Otro desafío se presenta en los esquemas tradicionales de protección basada en relés de sobrecorriente. Estos pueden no ser aplicables en algunos tipos de microrredes, debido a la limitación de la corriente de falla de los generadores que usan inversores. Además, la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico modifica los niveles de cortocircuito en la de red. Por otro lado, los principios de funcionamiento de los sistemas de protección pueden ser diferentes dependiendo de la conexión a tierra de la microrred (aterrizada, multi-aterrizada o aislada) [1] [2]. La integración de las energías renovables en el sistema eléctrico cambia el nivel de falla, además la alimentación es de naturaleza intermitente.

Para garantizar la correcta operación de una microrred y la seguridad de las personas es necesario implementar un esquema de protección adecuado. Es importante recordar que el objetivo principal de un sistema de protección es asegurar la seguridad de las personas y de los equipos durante la operación de un sistema de energía [4]. También debe minimizar las interrupciones del servicio de energía a los usuarios [5]. De acuerdo con [4] y [6], un sistema de protección debe ser diseñado bajo los siguientes principios:

**Confiabilidad:** Un sistema de protección debe operar adecuadamente. La confiabilidad es la habilidad para discriminar entre fallas y eventos que no requieren ninguna acción.

**Selectividad:** Un sistema de protección debe aislar la falla desconectando la menor sección posible de la red.

**Velocidad:** Las fallas deben ser despejadas en el mínimo tiempo posible para evitar situaciones peligrosas para las personas y daños en los equipos.

**Redundancia:** Para mantener la confiabilidad, un sistema de protección necesita tener funciones redundantes en los relés. La redundancia se logra utilizando relés de respaldo. La redundancia se logra combinando protecciones de principio de funcionamiento diferente.

**Seguridad:** Esta es la capacidad de un sistema de protección para garantizar que todos los eventos que no son fallas del sistema de energía se identifiquen para que partes sanas del sistema no se desconecten innecesariamente. Es decir que el relé no operara incorrectamente en ausencia de fallas.

**Sensibilidad:** Son las mínimas cantidades actuantes con las cuales se debe ajustar el relé para que detecte una condición anormal.

Es importante destacar que las microrredes operan en media y baja tensión. En estos niveles de tensión generalmente se emplean como equipos de protección relés de sobrecorriente, relés de falla a tierra, reconectadores, seccionalizadores y fusibles. Estos equipos de protección se coordinan generalmente con análisis del sistema en operación normal y bajo condiciones de falla [5]. La coordinación de equipos de protección basados en corriente es relativamente sencilla cuando se tiene sistemas de protección radiales. Sin embargo, con la conexión de microrredes o de unidades de GD la naturaleza radial desaparece, lo que genera que el flujo de carga sea bidireccional [7].

Para facilitar la incorporación de las microrredes en las redes de distribución es necesario realizar nuevas investigaciones que busquen resolver los desafíos identificados en la coordinación de protecciones eléctricas. La solución de estos desafíos permitirá acelerar la incorporación de las microrredes en los sistemas eléctricos. Para contribuir al desarrollo de metodologías de coordinación de protección en microrredes, se requiere identificar los principales esquemas utilizados en la literatura técnica. Las referencias [1] [3] [8]-[14] son trabajos de revisión donde se muestran los principales aportes de diferentes autores a nivel mundial referente a esquemas de protección utilizados en microrredes.

En la literatura técnica se evidencia que las protecciones de sobrecorriente también pueden ser utilizadas en el campo de las microrredes como se evidencia en [15] y [16]. Para tal fin, se deben proponer algoritmos de coordinación nuevos y/o mejorar los existentes. Estos nuevos algoritmos deben considerar: diferentes tipos de curvas estándar tiempo-corriente, diferentes tipos de curva no estándar, diferentes relaciones en los transformadores de corriente y métodos de polarización para el caso direccional. Además, se debe identificar para que microrredes, de acuerdo con sus características, pueden ser utilizadas. Finalmente, para los sistemas de protecciones de sobrecorriente existentes en las redes de distribución es necesario proponer metodologías que permitan evaluar el impacto en la coordinación con el ingreso de microrredes.

Las protecciones de impedancia o admitancia pueden ser una buena alternativa en microrredes como se indica en [17] y [18]. Para que estas sean utilizadas se deben proponer algoritmos de coordinación. Estos algoritmos deben considerar diferentes configuraciones de microrredes, tipos de generadores instalados, fallas de alta impedancia y evaluar el impacto de líneas que sean consideradas cortas en estos esquemas. Además, se debe identificar para que microrredes, de acuerdo con sus características, pueden ser utilizadas. Es importante destacar que no se han encontrado trabajos que presenten metodologías claras de coordinación en microrredes para el caso de relés de admitancia e impedancia.

En la literatura especializada se proponen diversos artículos que utilizan protecciones diferenciales en microrredes, ejemplos de esto se muestran en [19] y [20]. Sin embargo, no se tiene claridad en las metodologías de coordinación de ajustes para estas protecciones. Se debe evaluar como la saturación de los transformadores de corriente impacta el desempeño de la coordinación. También se debe estudiar como las pérdidas de potencia y la utilización de diferentes tipos de transformadores de corriente en la microrred afectan la precisión y la selectividad. Además, se debe identificar para que tipo de microrredes, de acuerdo con sus características, pueden ser utilizadas.

Como se mencionó anteriormente, los esquemas de protección varían dependiendo de las características de las unidades de generación presentes en la microrred. Las microrredes se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de unidad de generación presente. Existen microrredes con unidades de generación rotativas, acopladas con inversores y que combinan ambas tecnologías. El uso de protecciones de sobrecorriente direccionales utilizando características no estándar abre un nuevo abanico de alternativas para la dinámica que presentan las microrredes. Permitiendo un mayor número de alternativas de ajustes que combinados con técnicas metaheurísticas podrían mejorar la seguridad y la confiabilidad de las microrredes.

Este trabajo se enfoca en mejorar el desempeño de la coordinación de protecciones de sobrecorriente direccionales usando características no estándar. Lo que se busca con la incorporación de las características no estándar es mejorar el desempeño de coordinación



respecto al comportamiento variable del cortocircuito, reducir los falsos disparos, reducir las falsas separaciones y mejorar las zonas desprotegidas.

Las características no estándar son características que no son descritas en los estándares IEC e IEEE actualmente utilizados en la coordinación de protecciones. Los avances tecnológicos en equipos de protección han constituido la base para el surgimiento de relés de sobrecorriente digitales que permiten enfoques alternativos a los esquemas de protección estándar. El continuo crecimiento de los sistemas eléctricos hace que la coordinación de la protección sea un problema cada vez más complejo. Entonces, surgen características no estándar como una alternativa para mejorar la seguridad y confiabilidad de los sistemas de energía eléctrica. En [21] se presenta un ejemplo de una característica no estándar, los autores presentaron un enfoque de coordinación teniendo en cuenta la instalación de futuros sistemas fotovoltaicos con cualquier nivel de penetración y diferentes ubicaciones a lo largo del alimentador de distribución. Básicamente, los autores en [21] modificaron la curva característica existente de la protección contra sobrecorriente. La curva característica se puede modificar variando las constantes de esta mientras se mantiene fijo el dial y la corriente de arranque.

La protección de los sistemas de distribución se ha logrado mediante el uso de características estándar hasta los cambios estructurales recientes. Sin embargo, las características estándar se diseñaron para proteger los sistemas de energía convencionales en los que el flujo de energía es unidireccional y, por lo tanto, son propensos a las amenazas que surgen de nuevos conceptos, como los sistemas de energía que incluyen GD, microrredes o una configuración más dinámica [22]. De acuerdo con lo presentado anteriormente se construyeron los objetivos de este trabajo de doctorado, los cuales se presentan a continuación.

### **Objetivo general**

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

### **Objetivos específicos**

- Identificar las debilidades actuales y las soluciones disponibles que presentan los métodos de coordinación de protecciones de sobrecorriente en microrredes mediante un análisis detallado de la literatura para definir los retos futuros en este campo.
- Seleccionar las características no estándar que se considerarán en el modelo propuesto mediante la comparación de resultados con modelos presentados en la literatura.
- Proponer un modelo de programación no lineal entero mixto mediante la utilización de características no estándar de protecciones de sobrecorriente direccionales para mejorar su desempeño.

- Validar de manera off-line el modelo propuesto mediante la utilización de técnicas de optimización metaheurísticas para resolver el problema de coordinación de protecciones eléctricas en microrredes.

Esta tesis doctoral se ha estructurado como la compilación de los artículos (publicados y en revisión) producto del trabajo de investigación realizado. En el capítulo 1 se ha presentado una breve introducción sobre aspectos relevantes a tener en cuenta en la coordinación de protecciones de microrredes y se indicaron algunos aportes encontrados en la literatura que demuestran la pertinencia de este trabajo. En el Capítulo 2 se describen los resultados del objetivo específico 1, en este capítulo se identificaron las debilidades actuales y las soluciones disponibles que presentan los modelos de coordinación de protecciones de sobrecorriente en microrredes. En el Capítulo 3 se muestran los resultados del objetivo específico 2, donde se seleccionaron algunas características no estándar para ser implementadas en nuevos modelos de coordinación de protecciones. En el Capítulo 4 se describen los resultados de los objetivos específicos 3 y 4, donde se presenta y valida el modelo final que reúne las características no estándar seleccionadas. En el Capítulo 5 se presentan resultados adicionales producto de la realimentación obtenida en las rondas de evaluación de los artículos enviados y de la revisión constante de la literatura técnica. Finalmente, en el Capítulo 6 se recopilan las principales conclusiones del trabajo desarrollado.

## **Bibliografía**

- [1] D. M. Bui y S.-L. Chen, «Fault protection solutions appropriately proposed for ungrounded low-voltage AC microgrids: Review and proposals», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 1156-1174, ago. 2017.
- [2] E. Sortomme, G. J. Mapes, B. A. Foster, y S. S. Venkata, «Fault analysis and protection of a microgrid», en *Power Symposium, 2008. NAPS'08. 40th North American*, 2008, pp. 1–6
- [3] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, y A. Nasiri, «An overview of microgrid protection methods and the factors involved», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 174-186, oct. 2016.
- [4] B. Hussain, «Protection of distribution networks with distributed generation», PhD Thesis, University of Southampton, 2011.
- [5] J. Kennedy, «Distribution protection in a modern grid embedded with renewable energy resources», 2015.
- [6] M. Brucoli, «Fault behaviour and fault detection in islanded inverter-only microgrids», 2009

- [7] J. M. D. Dewadasa, «Protection of distributed generation interfaced networks», PhD Thesis, Queensland University of Technology, 2010.
- [8] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, y S. G. Srivani, «Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review», *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 3, n.o 4, pp. 365–379, 2017
- [9] S. Mirsaedi, X. Dong, y D. M. Said, «Towards hybrid AC/DC microgrids: Critical analysis and classification of protection strategies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 97-103, jul. 2018
- [10] A. A. Memon y K. Kauhaniemi, «A critical review of AC Microgrid protection issues and available solutions», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 129, pp. 23-31, dic. 2015.
- [11] B. J. Brearley y R. R. Prabu, «A review on issues and approaches for microgrid protection», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 988-997, ene. 2017.
- [12] D. M. Bui, S.-L. Chen, K.-Y. Lien, Y.-R. Chang, Y.-D. Lee, y J.-L. Jiang, «Investigation on transient behaviours of a uni-grounded low-voltage AC microgrid and evaluation on its available fault protection methods: Review and proposals», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 1417-1452, ago. 2017
- [13] S. D. Saldarriaga, J. M. López y N. Muñoz, «Protection Coordination in Microgrids: Current Weaknesses, Available Solutions and Future Challenges», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 100, no 1e, 2020.
- [14] M. A. Aminu, «Modeling and Simulation of Protective Relay for Short Circuits in AC Micro-grids using Fuzzy Logic», PhD Thesis, Curtin University, 2016.
- [15] S. D. Saldarriaga, J. M. López y N. Muñoz, «Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Microgrids Considering a Non-Standard Characteristic», *Energies*, vol. 13, no 4, 2020.
- [16] S. D. Saldarriaga, J. M. López y N. Muñoz, «An Approach for Optimal Coordination of Over-Current Relays in Microgrids with Distributed Generation», *Electronics*, vol. 9, no 10, 2020.
- [17] M. Dewadasa, A. Ghosh, y G. Ledwich, «Fold back current control and admittance protection scheme for a distribution network containing distributed generators», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, n.o 8, pp. 952–962, 2010.
- [18] M. Dewadasa, A. Ghosh, G. Ledwich, y M. Wishart, «Fault isolation in distributed generation connected distribution networks», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, n.o 10, pp. 1053–1061, 2011
- [19] E. Sortomme, S. S. Venkata, y J. Mitra, «Microgrid protection using communication-assisted digital relays», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, n.o 4, pp. 2789–2796, 2010.

- [20] S. R. Samantaray, G. Joos, y I. Kamwa, «Differential energy based microgrid protection against fault conditions», en 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012, pp. 1–7
- [21] Fani, Bahador, Hadi Bisheh, and Iman Sadeghkhan, «Protection coordination scheme for distribution networks with high penetration of photovoltaic generators», IET Generation, Transmission & Distribution., vol. 12, pp. 1802–1814, 2017
- [22] H. C. Kiliçkiran, İ. Şengör, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinç, y N. G. Paterakis, «Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics», Electr. Power Syst. Res., vol. 164, pp. 89–102, 2018

## Capítulo 2: Resultados del objetivo específico # 1

Como se mencionó anteriormente, el objetivo específico # 1 consiste en: *Identificar las debilidades actuales y las soluciones disponibles que presentan los métodos de coordinación de protecciones de sobrecorriente en microrredes mediante un análisis detallado de la literatura para definir los retos futuros en este campo.*

Para lograr este objetivo se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva en diferentes bases de datos sobre protecciones de sobrecorriente en microrredes. Se definió como criterio de búsqueda que los artículos fueran de los últimos 5 años y que las revistas fueran homologadas en la categoría A1 por Colciencias en 2020. La información obtenida fue analizada y clasificada. De esta manera se identificaron las debilidades actuales y las soluciones disponibles que presentan los modelos de coordinación de protecciones de sobrecorriente en microrredes y se identificaron los retos futuros.

Los resultados de este objetivo se presentaron en el artículo de revisión titulado: **Protection Coordination in Microgrids: Current Weaknesses, Available Solutions and Future Challenges**; el cual se encuentra publicado en *Early Access* en la revista **IEEE Latin America Transactions**. Esta revista fue homologada en la categoría A2 por Colciencias en 2020. El artículo se presenta a continuación.

### Capítulo 3: Resultados del objetivo específico #2

Como se mencionó anteriormente, el objetivo específico # 2 consiste en: *Seleccionar las características no estándar que se considerarán en el modelo propuesto mediante la comparación de resultados con modelos presentados en la literatura.*

Para lograr este objetivo se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva en diferentes bases de datos sobre modelos de coordinación de protecciones sobrecorriente en microrredes. Los modelos fueron analizados en detalle, a partir de los modelos analizados se propusieron las características no estándar a implementar. Mediante la comparación de resultados con los modelos encontrados en la literatura se seleccionaron las características no estándar que se consideraron en el modelo propuesto. Se propuso un modelo de programación no lineal entero mixto para cada característica no estándar seleccionada.

Los resultados de este objetivo se presentaron en tres artículos los cuales se describen a continuación:

El primer artículo se titula: **Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Microgrids Considering a Non-Standard Characteristic** el cual se encuentra publicado en la revista **MDPI Energies**, Volumen 13, Número 4, doi.org/10.3390/en13040922, año de publicación 2020. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020. En este artículo se utiliza una nueva variable de decisión que modifica la curva característica de los relés de sobrecorriente. Dicha modificación de la característica de la curva se puede definir como una característica no estándar.

El segundo artículo se titula: **An Approach for Optimal Coordination of Over-Current Relays in Microgrids with Distributed Generation** el cual se encuentra publicado en la revista **MDPI Electronics**, Volumen 9, Número 10, doi.org/10.3390/electronics9101740, año de publicación 2020. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020. Este artículo utiliza como variable de decisión en el problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente el dial, y la curva característica. Entre las posibles curvas característica candidatas se consideran los diferentes tipos de curva IEC e IEEE lo que se puede considerar como una característica no estándar del modelo de coordinación. Se define que es una característica no estándar debido a que en los modelos clásicos de coordinación con optimización solo se utiliza un tipo de curva y un tipo de estándar.

El tercer artículo se titula: **Optimal Coordination of Over-current Relays in Microgrids Considering Multiple Characteristic Curves** el cual se encuentra publicado en la revista **Elsevier AEJ - Alexandria**, Volumen 60, Número 2, doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.012, año de publicación 2021. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020. Este artículo utiliza como variable de decisión en el problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente el dial, la corriente de arranque y la curva característica. Entre las posibles curvas características candidatas se consideran los diferentes tipos de curva IEC e IEEE, lo que se puede considerar como una característica no estándar del modelo de

coordinación. Se define que es una característica no estándar debido a que en los modelos clásicos de coordinación con optimización solo se utiliza un tipo de curva y un tipo de estándar.

Los artículos se presentan a continuación.

#### Capítulo 4: Resultados de los objetivos específicos #3 y #4

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

*Proponer un modelo de programación no lineal entero mixto mediante la utilización de características no estándar de protecciones de sobrecorriente direccionales para mejorar su desempeño.*

*Validar de manera off-line el modelo propuesto mediante la utilización de técnicas de optimización metaheurísticas para resolver el problema de coordinación de protecciones eléctricas en microrredes.*

Para lograr estos objetivos se integraron las características no estándar de los modelos propuestos en el objetivo #2 en un solo modelo de programación no lineal entero mixto. El modelo final propuesto se analizó en detalle mediante la comparación de resultados con los modelos encontrados en la literatura y con los modelos construidos en el objetivo #2. Finalmente se validó la calidad del modelo propuesto en una microrred de prueba ampliamente utilizada en la literatura para fines de comparación. El problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente se resolvió utilizando técnicas de optimización metaheurísticas.

Los resultados de este objetivo se presentaron en el artículo titulado: **Adaptive Protection Coordination Scheme in Microgrids using Directional Over-current Relays with Non-standard Characteristics**, el cual se encuentra sometido en la revista **Elsevier Heliyon**, se encuentra en la segunda ronda de evaluación. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020. En este artículo se implementan las características no estándar implementadas en el Capítulo 2 en un solo modelo. Se utiliza una nueva variable de decisión que modifica la curva característica de los relés de sobrecorriente. Además, entre las posibles curvas características candidatas se consideran los diferentes tipos de curva IEC e IEEE. El artículo se presenta a continuación.



## Capítulo 5: Resultados adicionales

Como se mencionó anteriormente se presentan resultados adicionales producto de la realimentación obtenida en las rondas de evaluación de los artículos enviados y de la revisión constante de la literatura técnica

Los modelos y las metodologías propuestas en este trabajo pueden ser implementados en esquemas de protección de relés de sobrecorriente tradicionales o adaptativos. En los esquemas de protección tradicionales se tiene un grupo de ajustes para todos los escenarios de operación posibles de la red. Por otro lado, en los esquemas de protección adaptativos se tiene un grupo de ajuste para cada escenario de operación posible de la red. Debido al comportamiento variable de las microrredes los esquemas tradicionales y adaptativos presentan ciertas dificultades por el gran número de escenarios de operación que se puede presentar. En los esquemas tradicionales un gran número de escenarios de operación genera mayores dificultades para garantizar selectividad. Por otro lado, los esquemas adaptativos se ven afectados por el límite de grupos de ajustes disponibles en los relés comerciales.

Para dar solución al problema mencionado anteriormente en este trabajo se proponen modelos de coordinación de protección de relés de sobrecorriente para esquemas adaptativos basado en los grupos de ajustes disponibles en los relés. En este trabajo se busca tener diferentes grupos de ajustes limitando el número de grupo de ajustes de acuerdo con las capacidades de los relés comerciales utilizando técnicas de aprendizaje automático no supervisado. Los modelos de coordinación propuestos son aplicables a esquemas adaptativos que utilicen diferentes grupos de ajustes considerando las capacidades y limitaciones actuales de los relés comerciales.

Los resultados de este objetivo se presentaron en dos artículos los cuales se describen a continuación:

El primer artículo se titula: **Optimal Coordination of Over-current Relays in Microgrids using Unsupervised Learning Techniques**, el cual se encuentra publicado en la revista **MDPI Applied Sciences**, Volumen 11, Número 3, doi.org/10.3390/app11031241, año de publicación 2021. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020.

El segundo artículo se titula: **Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Microgrids using Principal Component Analysis and K-means**, el cual se encuentra sometido en la revista **MDPI Applied Sciences**, se encuentra en la primera ronda de evaluación. Esta revista fue homologada en la categoría A1 por Colciencias en 2020.

Los artículos en mención se presentan a continuación.

## Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros

### Conclusiones

1) Las características propias de las microrredes han traído consigo una serie de retos en el campo de la coordinación de protecciones eléctricas, que no se presentaban en las redes eléctricas tradicionales. Este trabajo analiza los desafíos identificados y las soluciones que se han venido dando en otros trabajos de investigación. Es importante destacar que los trabajos que se han elaborado son un punto de partida importante pero aún se requieren más y nuevos trabajos. Buscando contribuir en este aspecto se realizó una revisión crítica del estado del arte de metodologías para la coordinación de protecciones eléctricas en microrredes. Esta revisión buscaba identificar las contribuciones más importantes y los retos futuros de cada trabajo.

2) La naturaleza compleja de las redes de distribución actuales y la presencia cada vez mayor de GD de origen renovable en las microrredes requieren esquemas de protección más inteligentes y adaptables. En un contexto en el que se espera que las microrredes funcionen en varios modos operativos, los enfoques tradicionales para la coordinación de protecciones de sobrecorriente pueden no ser confiables para ciertas topologías de la microrred. En este trabajo, se propusieron diferentes modelos para la coordinación óptima de protecciones sobrecorriente en microrredes considerando características no estándar. Con los diferentes modelos propuestos, se logró disminuir los tiempos de operación de las protecciones y garantizar selectividad en los sistemas de prueba analizados, como se puede evidenciar en los capítulos 3 y 4 del presente trabajo. Los modelos propuestos presentaron diferentes características no estándar que permiten ampliar las alternativas de los esquemas.

- El modelo propuesto en el primer artículo del Capítulo 3 considera una nueva variable de decisión en la formulación del problema de coordinación de protecciones sobrecorriente. En este enfoque se incorpora una restricción para limitar el PSM (Plug Setting Multiplier por sus siglas en inglés) del relé y de manera novedosa considera que el límite superior de la restricción PSM es una variable de decisión del problema. La incorporación de dicha restricción permite una aproximación más acertada del modelo respecto a los relés comerciales. Definir el límite máximo de la restricción del PSM como una variable de decisión resulta en un enfoque más flexible para la coordinación de protecciones. Se llevaron a cabo diferentes pruebas con una microrred de prueba IEC considerando diferentes modos operativos. Los resultados obtenidos con el modelo propuesto evidenciaron que considerar esta nueva variable de decisión resulta en menores tiempos de operación en la coordinación de protecciones. En todos los modos operativos, el enfoque propuesto presentó mejores tiempos de operación. También se logró demostrar que el modelo propuesto es utilizable tanto en esquemas de protección tradicionales y como adaptativos

- La principal característica del modelo propuesto en el segundo artículo del Capítulo 3 radica en que permite elegir la curva característica utilizada por los relés principales y de respaldo entre múltiples opciones, lo que resulta en un enfoque más flexible para la coordinación de protecciones. Se llevaron a cabo varias pruebas con una microrred de prueba IEC considerando diferentes modos operativos. Los resultados obtenidos con el enfoque propuesto evidenciaron que considerar diferentes curvas características resulta en menores tiempos de operación de la coordinación de protecciones. En todos los modos operativos el enfoque propuesto presentó mejores tiempos de operación cuando se compararon con otros reportados en la literatura técnica. También se logró demostrar que el modelo propuesto es utilizable tanto en esquemas de protección tradicionales y como adaptativos.
- La variante del modelo presentado en el tercer artículo del Capítulo 3 consideró de manera simultáneamente tres variables de decisión para cada relé: corriente de arranque, dial y curva característica. La principal característica que diferencia el enfoque propuesto con otras metodologías reportadas en la literatura especializada radica en el hecho de que permite elegir la curva característica (curvas estándar IEC e IEEE) utilizada por los relés principal y de respaldo entre múltiples opciones, lo que resulta en un enfoque más flexible para la coordinación de la protección. Se llevaron a cabo varias pruebas en una microrred de prueba IEC y en el sistema de distribución de la red de prueba IEEE de 30 barras y se comparó con resultados previamente reportados en la literatura técnica. Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo propuesto reduce los tiempos de operación de la coordinación de protecciones en el sistema de prueba IEC en todos los modos operativos. También se puede concluir que el modelo propuesto es aplicable a sistemas de mayor tamaño, como se demostró en el sistema IEEE de 30 barras modificado, ya que se lograron buenos tiempos de operación y se garantizó selectividad entre las protecciones principales y de respaldo.
- Entre los modelos propuestos en el Capítulo 4 se construyó uno que combina las características de los modelos propuestos en el Capítulo 3. Permite elegir la curva característica utilizada por los relés principales y de respaldo entre múltiples opciones y considera una nueva variable de decisión en la formulación del problema de coordinación de protecciones sobrecorriente. Este modelo se validó en la microrred IEC de prueba considerando diferentes modos de operación. Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo propuesto permite reducir los tiempos de operación de la coordinación de protección comparado con los modelos propuestos en la literatura y con los modelos previamente propuestos en este trabajo.

3) Este trabajo también muestra que emplear dispositivos de protección numéricos junto con técnicas metaheurísticas permite explorar características no estándar, las cuales pueden ser definidas por el usuario de las protecciones de sobrecorriente direccionales para lograr una coordinación de protecciones más adecuada en las microrredes. Utilizar relés de protección

numéricos permitió implementar las características no estándar descritas en este trabajo y combinado estos con técnicas de optimización metaheurísticas se puede mejorar los tiempos de operación y la selectividad de las protecciones sobrecorriente en microrredes, como se demuestra en los artículos presentados en los Capítulos 3 y 4.

4) Aunque una comparación exhaustiva del desempeño de las técnicas metaheurísticas no es el enfoque principal de la investigación, este trabajo implementó técnicas de algoritmos genéticos (GA por sus siglas en inglés), optimización por enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés), algoritmo de optimización basado en enseñanza-aprendizaje (TLBO por sus siglas en inglés) y el algoritmo de salto de rana (SFLA por sus siglas en inglés) para resolver el problema de coordinación de relés de sobrecorriente. Las cuatro metaheurísticas demostraron ser efectivas para solucionar el problema de coordinación, presentando tiempos computacionales reducidos y alcanzando rápidamente la convergencia; no obstante, el GA fue la metaheurística con mejor desempeño seguida por TLBO. En términos generales, el GA mostró el mejor compromiso entre tiempo computacional y calidad de la función objetivo; por este motivo, se eligió para realizar análisis comparativos con otros enfoques reportados en la literatura especializada..

5) Como complemento a los enfoques desarrollados se construyó un modelo aplicable a esquemas adaptativos de protecciones de sobrecorriente que utilicen diferentes grupos de ajustes considerando las capacidades y limitaciones actuales de los relés comerciales. Para tal fin se limita el número de grupos de ajustes de acuerdo con las capacidades de los relés comerciales. Por lo cual, el modelo que se describe en el capítulo 5 considera técnicas de aprendizaje automático para agrupar de manera inteligente los escenarios de operación de acuerdo al número de grupos de ajustes disponibles en el relé. Entre otras de las novedades de este trabajo se tiene la comparación del desempeño de diferentes técnicas de aprendizaje automático. También se propone una metodología nueva que combina las características de diferentes algoritmos de aprendizaje automático por medio de un ajuste heurístico que permite mejorar el desempeño de los esquemas de relés de sobrecorriente. Se utilizó un GA para resolver el modelo de coordinación propuesto y se realizaron varias pruebas en microrredes de referencia que presenta diferentes modos operativos. El enfoque propuesto se validó en la microrred IEC de prueba considerando diferentes modos de operación y diferentes variaciones topológicas de la red. Con la metodología propuesta se logró reducir el número de grupos de ajustes garantizando la selectividad del esquema de protección.

### **Trabajos futuros**

1) Incorporar las relaciones de transformación de los transformadores de corriente (CTs por sus siglas en inglés) como criterio de decisión en el cálculo de los esquemas de protección. La sensibilidad de la protección cambia sustancialmente cuando cambia la relación de transformación. El reto consiste en encontrar entre diferentes valores de relación de transformación de los CTs, aquella que permita mejorar los tiempos de disparo de las protecciones sin dañar el esquema de protección. La selección puede llevarse a cabo mediante

alguna técnica de optimización metaheurística o de inteligencia artificial. También en la selección de los CTs se debe garantizar que estos no presenten saturación ante las diferentes fallas que se pueden presentar en una microrred, Un CT puede llevar a una mala operación de las protecciones.

2) Mejorar los modelos de los esquemas de protección considerando impedancias de falla y diferentes tipos de métodos para aterrizar las microrredes que permiten obtener de forma más realista las corrientes de cortocircuito en cada punto del sistema. El reto consiste en evaluar como los diferentes esquemas de conexión a tierra afectan la coordinación de protecciones en las microrredes. Para lograr lo anterior, se deben evaluar diferentes tipos de falla, en especial fallas monofásicas y bifásicas a tierra (en la mayoría de los trabajos solo se evalúan fallas trifásicas). También es necesario evaluar las fallas con impedancia, debido a que la mayoría de las fallas que se presentan en los sistemas eléctricos reales presentan impedancia de falla; en la mayoría de los trabajos solo se evalúan fallas sin impedancia. Lo anterior conlleva a que la solución del problema sea más compleja, debido a que se debe evaluar un mayor número de casos de falla. En este caso, se podría plantear una metodología que permita simplificar el modelo sin que se pierda información relevante que permita obtener una aproximación más realista de la microrred a proteger.

3) Incorporar metodologías para polarizar correctamente la protección con la intención de mejorar su desempeño y determinar la ubicación de las fallas. En sistemas radiales la ubicación de fallas es un tema ampliamente estudiado; sin embargo, en sistemas enmallados, la ubicación de fallas es una tarea mucho más compleja. Determinar la ubicación de la falla permite reducir los tiempos de mantenimiento en que la microrred o parte de esta deja de operar. El reto consiste en encontrar una metodología que permita determinar rápidamente la ubicación de la falla para sistemas microrredes enmalladas de gran complejidad.

4) Evaluar el desempeño de las protecciones para microrredes en modo isla y con la incorporación de generación distribuida. Cuando las microrredes trabajan en modo isla pierden la referencia de tensión y también la inercia dinámica que proporcionan los nodos de generación. La microrred en modo isla debe generar la referencia de tensión y también garantizar que la frecuencia del sistema no cambie sustancialmente por las variaciones intermitentes de la generación y la carga. El reto consiste en mantener, con altos estándares, la estabilidad dinámica de la microrred y garantizar al mismo tiempo la coordinación del esquema de protección ante fallas o eventos.

5) Utilizar otras curvas no estándar que permitan darle flexibilidad al esquema de protección y la posibilidad de mejorar los tiempos de respuesta de la protección. Actualmente, se están empezando a utilizar curvas no estándar; sin embargo, todavía es un tema emergente de investigación. El reto consiste en aplicar metodologías usando curvas no estándar que permitan mejorar el esquema de protección, también en emplear técnicas de optimización para mejorar en términos generales el desempeño de los esquemas de protección reduciendo tiempos y garantizando la correcta coordinación.

6) Proponer nuevas metodologías de coordinación de protecciones para microrredes o para redes de distribución con presencia de GD que combinen características no estándar con técnicas de aprendizaje automático. Lo anterior para darle flexibilidad al esquema de protección y la posibilidad de mejorar los tiempos de respuesta de las protecciones.

7) Validar los ajustes encontrados en este trabajo por medio de simuladores en tiempo real, lo cual podría ayudar a tener una mejor sensibilidad de la operación de los relés de sobrecorriente direccionales con los ajustes encontrados