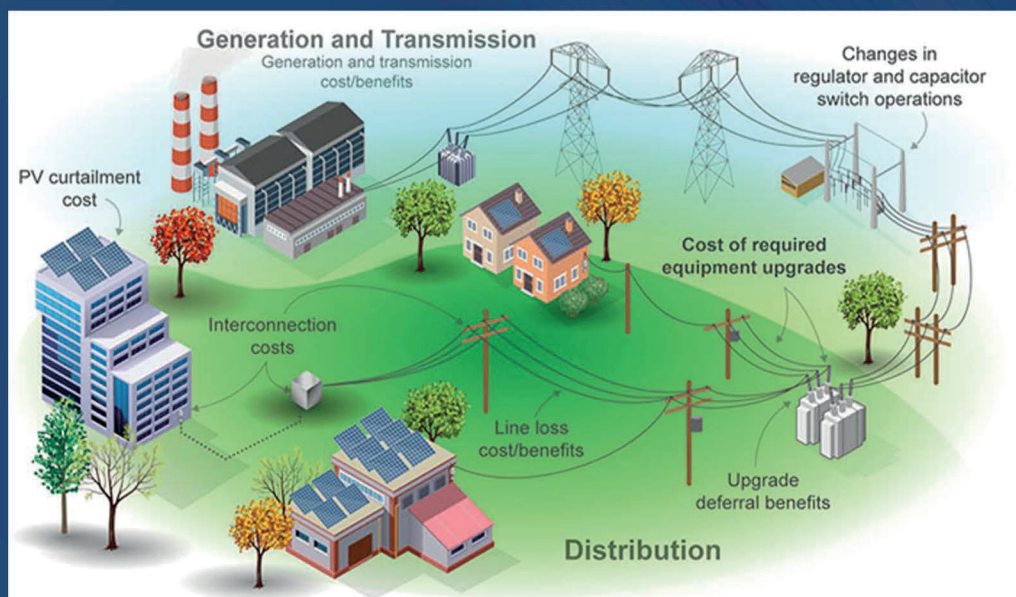


Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt
María Rodríguez-Gámez
(ORGANIZADORES)

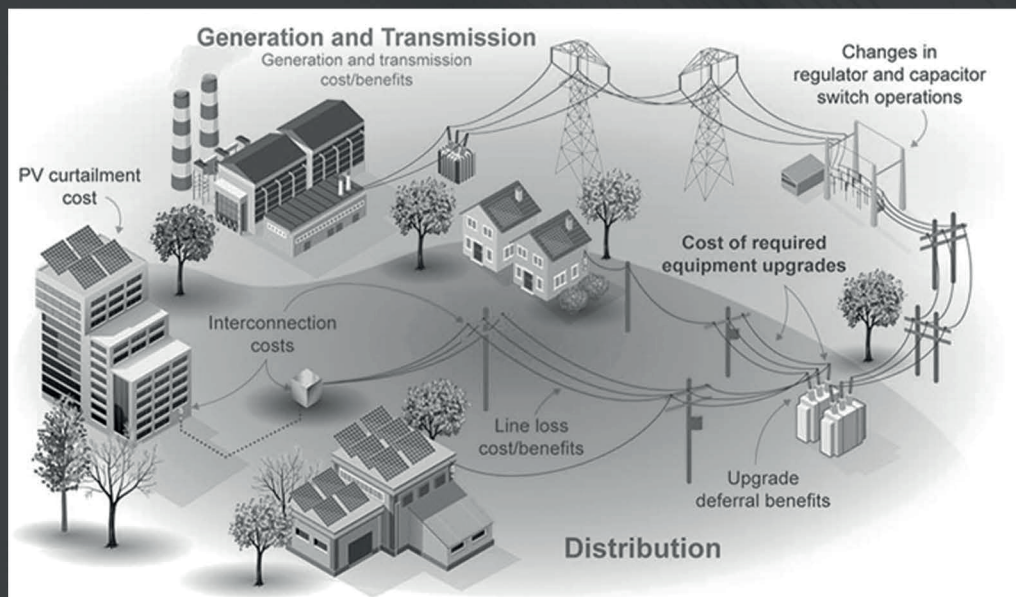
ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MODO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMO SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN EL ALIMENTADOR CORDÓN FRONTERIZO DE LA UNIDAD DE NEGOCIO EL ORO



Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt | María Rodríguez-Gámez
Jessenia Isabel Betancourt Pereira | Isaac David Ortega Romero
Lenin Agustín Cuenca Álava | Wilber Manuel Saltos Arauz
Guillermo Antonio Looz Castillo | Ítalo Humberto Navarrete García
Gilberto Ramiro Holguín Intriago | Joan Manuel Saltos González
Julio Cesar Mera Macías | Saskia Gabriela Peñaherreta Betancourt
Antonio Vázquez Pérez

Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt
María Rodríguez-Gámez
(ORGANIZADORES)

ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MODO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMO SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN EL ALIMENTADOR CORDÓN FRONTERIZO DE LA UNIDAD DE NEGOCIO EL ORO



Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt | María Rodríguez-Gámez
Jessenia Isabel Betancourt Pereira | Isaac David Ortega Romero
Lenin Agustín Cuenca Álava | Wilber Manuel Saltos Arauz
Guillermo Antonio Looz Castillo | Ítalo Humberto Navarrete García
Gilberto Ramiro Holguín Intriago | Joan Manuel Saltos González
Julio Cesar Mera Macías | Saskia Gabriela Peñaherreta Betancourt
Antonio Vázquez Pérez

2025 por Atena Editora

Copyright© 2025 Atena Editora

Copyright del texto © 2025, el autor Copyright
de la edición© 2025, Atena Editora

Los derechos de esta edición han sido cedidos a Atena Editora por el autor.

Publicación de acceso abierto por Atena Editora

Editora jefe

Prof. Dr. Antonella Carvalho de Oliveira

Editora ejecutiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imágenes de la portada

iStock

Edición artística

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo el contenido de este libro está licenciado bajo la licencia
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

El contenido de esta obra, en cuanto a su forma, corrección y fiabilidad, es responsabilidad exclusiva de los autores. Las opiniones e ideas aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición de Atena Editora, que actúa únicamente como mediadora en el proceso de publicación. Por lo tanto, la responsabilidad por la información presentada y las interpretaciones derivadas de su lectura recae íntegramente en los autores.

Atena Editora actúa con transparencia, ética y responsabilidad en todas las etapas del proceso editorial. Nuestro objetivo es garantizar la calidad de la producción y el respeto a la autoría, asegurando que cada obra se entregue al público con cuidado y profesionalidad.

Para cumplir con esta función, adoptamos prácticas editoriales que tienen como objetivo garantizar la integridad de las obras, previniendo irregularidades y conduciendo el proceso de manera justa y transparente. Nuestro compromiso va más allá de la publicación, buscamos apoyar la difusión del conocimiento, la literatura y la cultura en sus diversas expresiones, preservando siempre la autonomía intelectual de los autores y promoviendo el acceso a diferentes formas de pensamiento y creación.

Energía fotovoltaica en el modo de generación distribuida como solución sostenible en el alimentador cordón fronterizo de la unidad de negocio el oro

| Autores:

Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt
María Rodríguez-Gámez
Jessenia Isabel Betancourt Pereira
Isaac David Ortega Romero
Lenin Agustín Cuenca Álava
Wilber Manuel Saltos Arauz
Guillermo Antonio Loor Castillo

Ítalo Humberto Navarrete García
Gilberto Ramiro Holguín Intriago
Joan Manuel Saltos González
Julio Cesar Mera Macias
Saskia Gabriela Peñaherreta Betancourt
Antonio Vázquez Pérez

| Revisión:

Los autores

| Diseño:

Thamires Gayde

Datos de catalogación en publicación internacional (CIP)

E56 Energía fotovoltaica en el modo de generación distribuida como solución sostenible en el alimentador cordón fronterizo de la unidad de negocio el oro / Cristian Jorge Peñaherreta Betancourt, María Rodríguez-Gámez, Jessenia Isabel Betancourt Pereira, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Otros autores

Isaac David Ortega Romero
Lenin Agustín Cuenca Álava
Wilber Manuel Saltos Arauz
Guillermo Antonio Loor Castillo
Ítalo Humberto Navarrete García
Gilberto Ramiro Holguín Intriago
Joan Manuel Saltos González
Julio Cesar Mera Macias
Saskia Gabriela Peñaherreta Betancourt
Antonio Vázquez Pérez

Formato: PDF

Requisitos del sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acceso: World Wide Web

Incluye bibliografía

ISBN 978-65-258-3841-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.410251811>

1. Energía solar. I. Peñaherreta Betancourt, Cristian Jorge. II. Rodríguez-Gámez, María. III. Betancourt Pereira, Jessenia Isabel. IV. Título.

CDD 621.47

Preparado por Bibliotecario Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

+55 (42) 3323-5493

+55 (42) 99955-2866

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

CONSEJO EDITORIAL

CONSEJO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dra. Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidad Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontificia Universidad Católica de Goiás
Prof. Dra. Ariadna Faria Vieira – Universidad Estatal de Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidad Federal del Sur y Sudeste de Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidad Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidad Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidad Federal Fluminense
Prof. Dra. Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidad Federal de Piauí
Prof. Dra. Dayane de Melo Barros – Universidad Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidad Tecnológica Federal de Paraná
Prof. Dra. Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal de Río de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal de Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidad Federal de Rondônia
Prof. Dra. Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidad Estatal de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidad Federal de Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidad de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidad Federal de Santa Catarina
Prof. Dra. Juliana Abonizio – Universidad Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidad Federal Fluminense
Prof. Dra. Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Paraná
Prof. Dra. Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educación, Ciencia y Tecnología de Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología
Prof. Dra. Talita de Santos Matos – Universidad Federal Rural de Río de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidad Federal Rural del Semiárido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidad Federal de Alfenas

PRÓLOGO

PRÓLOGO

En un mundo marcado por la urgencia de transitar hacia modelos energéticos sostenibles, la generación distribuida emerge como una estrategia necesaria para democratizar el acceso a la energía, reducir pérdidas en la transmisión y mitigar los impactos ambientales derivados del uso de fuentes fósiles. En este contexto, la energía fotovoltaica ha dejado de ser una alternativa lejana para convertirse en una realidad técnica y económicamente viable, capaz de transformar las redes eléctricas tradicionales en sistemas inteligentes, resilientes y adaptados a las necesidades locales.

El presente libro, titulado *Energía Fotovoltaica en el Modo de Generación Distribuida como Solución Sostenible en el Alimentador Cordón Fronterizo de la Unidad de Negocio El Oro*, representa un aporte significativo al conocimiento y a la práctica de la ingeniería eléctrica en el Ecuador. A través de un análisis riguroso, el texto aborda las particularidades del alimentador Cordón Fronterizo, una zona con retos energéticos específicos debido a su ubicación geográfica, demanda creciente y necesidad de estabilidad en el suministro.

La obra combina fundamentos técnicos, estudios de caso y propuestas de implementación, integrando criterios de sostenibilidad ambiental, eficiencia operativa y viabilidad económica.

Este libro constituye una ayuda metodológica para profesionales y estudiantes del sector eléctrico, es una referencia para planificadores energéticos y tomadores de decisiones que buscan soluciones escalables y adaptadas al territorio.

El documento recuerda que la transición energética no es un objetivo distante, sino una meta alcanzable cuando la ciencia, la tecnología y la voluntad de cambio se integran en proyectos concretos.

La implementación de sistemas fotovoltaicos bajo el esquema de generación distribuida en el alimentador Cordón Fronterizo puede ser un ejemplo tangible de cómo la innovación puede traducirse en beneficios sociales, económicos y ambientales para toda una comunidad.

Se invita al lector a adentrarse en estas páginas con la certeza de que el conocimiento aquí compartido será un catalizador para nuevos proyectos, investigaciones y políticas que impulsen un futuro energético más limpio y justo para el Ecuador y la región.

Lic. María Rodríguez Gámez, PhD.

RESUMEN

RESUMEN

En el contexto de la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible y resiliente, la Generación Distribuida emerge como una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia y la confiabilidad del suministro eléctrico. Sin embargo, la implementación efectiva de esta en alimentadores eléctricos de gran longitud plantea desafíos significativos debido a la complejidad de los sistemas de distribución, la variabilidad en la demanda y la generación de energía, así como las limitaciones técnicas y económicas. El objetivo de la investigación fue dimensionar la ubicación óptima de sistemas fotovoltaicos en forma de generación distribuida en el alimentador “Cordón fronterizo” de la unidad de negocio El Oro para la mejora de la estabilidad del voltaje. Se utilizó como metodología el algoritmo de optimización del Lobo Gris, donde se consideran variables meteorológicas como la irradiación solar y la susceptibilidad a inundaciones y movimientos de tierras para una adecuada planificación. La metodología se basa en un enfoque cuantitativo, utilizando técnicas de simulación y optimización. El software CYME se empleó para simular el comportamiento del sistema eléctrico de distribución, con o sin generación distribuida. Para la optimización, se utilizó el algoritmo metaheurístico GWO, que ayudó a determinar la ubicación y el tamaño adecuado de las unidades de GD. Los principales instrumentos de investigación incluyen el software CYME para simulaciones eléctricas y MATLAB para la implementación del algoritmo GWO. Se tuvo como resultado que la generación distribuida desempeña un papel decisivo en la modernización y optimización de los sistemas eléctricos de distribución, especialmente en alimentadores de gran longitud. Su integración permite acercar la generación al punto de consumo, lo que reduce significativamente las pérdidas de potencia activa y reactiva, mejora el perfil de voltaje y aumenta la resiliencia de la red frente a fluctuaciones de demanda e interrupciones del servicio.

SUMARIO

SUMARIO

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	1
Análisis y Formulación del Problema Científico.....	6
Simulación del Sistema Eléctrico de Distribución sin GD.....	6
Dimensionamiento y Ubicación de Unidades de GD en el Sistema Eléctrico de Distribución	6
Simulación del Sistema Eléctrico de Distribución con GD.....	6
Análisis del Impacto de la GD en el Sistema Eléctrico de Distribución.....	7
 CAPITULO 2 - GENERACIÓN DISTRIBUIDA	8
Operación de la Generación Distribuida.....	9
Tecnologías Basadas en Combustibles	9
Tecnologías Basadas en Fuentes Renovables de Energías	10
Ventajas y desventajas de la GD	11
Estimación de Variables Meteorológicas con ArcGIS.....	12
Métodos de Estimación.....	12
Herramientas y Funcionalidades de ArcGIS.....	12
Aplicaciones	13
 CAPITULO 3 - ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE UNIDADES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	14
Evaluación y Comparación de Algoritmos.....	15
Optimización Metaheurística	15
Grey Wolf Optimizer (GWO).....	16
Modelo matemático y algoritmo	17
Ataque a la presa (explotación)	20
Búsqueda de presas (exploración).....	20
Conclusiones del CAPITULO III.....	21

SUMARIO

SUMARIO

CAPITULO 4 - MARCO METODOLÓGICO	23
Tipo de investigación	23
Método de investigación	23
Técnicas de investigación	24
Instrumentos de investigación	25
Software CYME.....	25
MATLAB y Algoritmo GWO	27
Síntesis del CAPITULO IV	27
 CAPITULO 5 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 28
Alimentador Cordón Fronterizo.....	28
Estimación de la irradiación solar	29
Susceptibilidad a movimiento de masas	30
Susceptibilidad a inundaciones	31
Función objetivo y restricciones	32
Caso de estudio	35
Caso Base.....	35
Caso 1	39
Caso 2	44
Caso 3	48
Convergencia del algoritmo GWO	53
Análisis de resultados	55
Síntesis del CAPITULO V.....	58
 CONCLUSIONES	 59
 REFERENCIAS	 61
 AUTORES.....	 65



C A P Í T U L O 1

INTRODUCCIÓN

La demanda energética está creciendo rápidamente mientras que las fuentes de energía convencionales se están agotando, ante ello, el mundo está buscando alternativas de generación de energía eléctrica (Monteiro et al., 2020). El principal desafío actual para el sistema Eléctrico de distribución (SED) es abordar problemas relacionados con la eficiencia energética, los perfiles de baja tensión, las pérdidas de potencia y cumplir con los requisitos de los organismos reguladores. Es crucial tener en cuenta que el 90% de los problemas de confiabilidad están relacionados con el SED, dada su configuración compleja (Ortega-Romero et al., 2023).

En la última década, las fuentes renovables energía (FRE) de pequeña escala han experimentado un crecimiento significativo, impulsado por avances tecnológicos que las hacen más adecuadas para integrarse en los SED (Ortega-Romero et al., 2023).

La generación distribuida (GD) representa una perspectiva innovadora que se basa en las contribuciones de los recursos convencionales y renovables como entidades importantes en los sistemas de energía eléctrica, las mismas que se han incrementado considerablemente a lo largo del mundo por sus múltiples beneficios como mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia, siendo la energía solar fotovoltaica y la energía eólica las más adoptadas dentro de este contexto (IEEE Power & Energy Society et al., 2024.; Leonowicz et al.; 2007, Monteiro et al., 2020).

La mayoría de las pérdidas en todos los sistemas eléctricos normalmente se disipan en SED, por lo que las pérdidas de potencia se ven significativamente afectadas por la GD, las cuales pueden disminuir o aumentar según su asignación (Mahmoud & Naoto, 2018).

El SED, funciona con componentes pasivos y mediante un flujo de energía unidireccional, por lo cual, no ha sido adaptado para integrar GD. La incorporación de unidades de GD al SED no responde adecuadamente ante ciertas condiciones como en el caso del decremento de la inercia o la variación de voltaje de un generador sincrónico, lo que puede afectar la operación, estabilidad y protección de los sistemas. Estos efectos pueden variar según la ubicación, tamaño y tipo de las unidades de GD (Mahmoud & Naoto, 2018; Ortega-Romero et al., 2023).

Por otro lado, el aumento del voltaje y el flujo inverso son desafíos técnicos comunes asociados con la integración de GD en los SED, estos restringen la cantidad de GD que se puede integrar, por lo tanto, se necesita una planificación adecuada para la asignación de la GD de manera óptima, considerando las limitaciones del SED en conjunto con la finalidad extender beneficios técnico-económicos tanto para las generadoras como para los consumidores.

Una planificación deficiente en el dimensionamiento y ubicación de unidades de GD en el SED ocasiona problemas de fluctuaciones de tensión, genera armónicos y probablemente representará gastos innecesarios para la empresa distribuidora. Por el contrario, una adecuada planificación permite incrementar el rendimiento de la red de distribución, mejora la calidad de energía y reduce las emisiones de (Ortega-Romero et al., 2023).

En Monteiro et al. (2020), se usa el algoritmo de optimización de partículas (PSO) y sistemas de almacenamiento de energía para optimizar la distribución de energía con la incorporación de GD. Por otra parte, en Al Qaisi et al. (2018) se analiza en el comportamiento dinámico de una microrred híbrida frente diferentes condiciones de operación considerando la irradiación solar, la velocidad del viento y las cargas proponiendo un método de linearización para la ubicación óptima de GD utilizando sistemas computacionales e IA considerando la capacidad de la unidad y otras restricciones basadas en el funcionamiento del SED.

En trabajos realizados por Wu et al. (2020) y Leonowicz et al. se propone el uso de un optimizador multiverso multiobjetivo basado en Pareto (MOMVO) y un algoritmo óptimo de potencia (OPF) con el objetivo de para dimensionar y ubicar las unidades de GD para minimizar las pérdidas de potencia y mejorar el voltaje en el SED.

De manera similar, en IEEE Power & Energy Society et al. y Ahmad & Asar (2021) se propone una optimización multiobjetivo no lineal (MINLP) y un algoritmo de optimización basado en una nueva partícula modificada enjambre (MPSO), respectivamente, con el objetivo de lograr una alta penetración de las unidades de GD en el SED.

El presente libro tiene como objetivo el dimensionamiento y ubicación de unidades de GD en el alimentador “Cordón fronterizo” de la unidad de negocio El Oro, perteneciente a la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP) a través del algoritmo de optimización del Lobo Gris (GWO). Es importante considerar variables meteorológicas como la irradiación solar y la susceptibilidad a inundaciones y movimientos de tierras para una adecuada planificación.

En el contexto de la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible y resiliente, la GD emerge como una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia y la confiabilidad del suministro eléctrico. Sin embargo, la implementación efectiva de la GD en alimentadores eléctricos de gran longitud plantea desafíos significativos debido a la complejidad de los sistemas de distribución, la variabilidad en la demanda y la generación de energía, así como las limitaciones técnicas y económicas.

La ubicación óptima de las unidades de GD requiere considerar múltiples factores interrelacionados, como la capacidad de carga de las líneas, la ubicación de cargas críticas, la penetración de las FRE, la congestión del sistema, entre otros. Su objetivo fue mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia activa y reactiva.

Para abordar este desafío, se desarrolló un modelo de optimización multiobjetivo que integro variables técnicas y ambientales, considerando la topología del sistema eléctrico, las características de carga y generación, las restricciones de operación y los objetivos de política energética. Se utilizaron técnicas avanzadas de optimización metaheurística para explorar el espacio de soluciones y encontrar un conjunto de soluciones adecuadas.

La investigación sobre la ubicación óptima de unidades de generación distribuida en un alimentador de gran longitud utilizando optimización metaheurística requiere un análisis exhaustivo del árbol del problema. Este enfoque sistemático es esencial para comprender las complejas interacciones entre diversos factores que influyen en la ubicación no óptima de las unidades de GD en el sistema eléctrico, además, este análisis proporciona una base sólida para el diseño de estrategias de optimización que maximicen la eficiencia del sistema. En la Figura 1 se presente el árbol del problema.

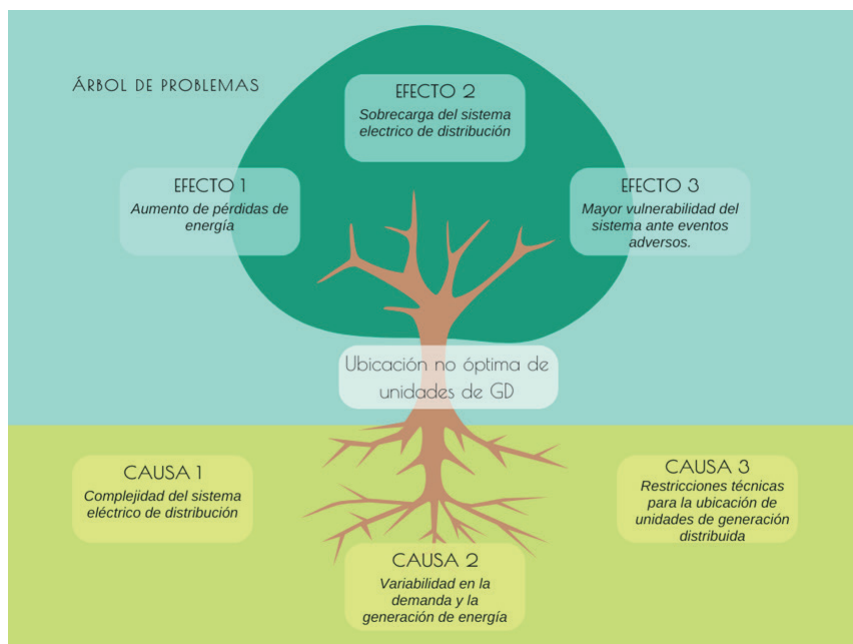


Figura 1. Árbol del problema.

La ubicación óptima y el dimensionamiento adecuado de unidades de GD en alimentadores eléctricos de gran longitud son elementos críticos para mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico.

La implementación estratégica de GD puede reducir las pérdidas de energía que se producen durante la transmisión y distribución de electricidad. Al distribuir la generación de energía más cerca de los puntos de consumo, se minimiza la distancia que la electricidad debe viajar a través de las líneas de transmisión, lo que resulta en menores pérdidas y, por ende, una mayor eficiencia energética global.

Además, la distribución geográfica de las unidades de GD puede aumentar la resiliencia del sistema eléctrico ante eventos adversos. La presencia de fuentes descentralizadas y redundantes de energía puede mitigar el impacto de interrupciones en la red de transmisión, proporcionando una fuente de energía alternativa durante situaciones de emergencia o fallos en la infraestructura principal.

Otro aspecto esencial es la contribución potencial de la GD a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Al fomentar el uso de fuentes renovables como la energía solar y eólica, se puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y con ello disminuir las emisiones asociadas, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del aire.

Desde una perspectiva económica, la optimización de la ubicación y el dimensionamiento de las unidades de GD puede resultar en ahorros significativos en los costos operativos y de inversión para las empresas de servicios públicos y los consumidores. Al reducir la necesidad de invertir en infraestructura de transmisión y distribución costosa, se puede mejorar la competitividad económica y el acceso a la energía a precios más bajos para los usuarios finales.

Esta investigación busca fomentar la participación comunitaria en la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible al involucrar a la comunidad en la planificación y ejecución de proyectos de GD, se promueve la aceptación social de estas tecnologías y se fortalece la gobernanza energética, garantizando así una transición equitativa y justa hacia un futuro energético más limpio y sostenible.

La investigación representa un avance significativo en el campo de la planificación y optimización de sistemas de energía eléctrica, centrándose específicamente en la ubicación adecuada de unidades de GD en alimentadores de gran longitud mediante el uso de técnicas avanzadas de optimización metaheurística. A diferencia de los enfoques convencionales que a menudo pasan por alto la complejidad del sistema eléctrico y la variabilidad en la demanda y la generación de energía, este estudio adopta un enfoque integral que considera múltiples factores interrelacionados para determinar la ubicación más eficiente y efectiva de las unidades de GD.

Los resultados de la investigación residen en su capacidad para proporcionar a los planificadores y operadores del sistema eléctrico herramientas y conocimientos prácticos para tomar decisiones informadas sobre la ubicación y dimensionamiento de unidades de GD en alimentadores de gran longitud. Al ofrecer soluciones eficientes y sostenibles que mejoran la confiabilidad y la resiliencia del sistema eléctrico, este trabajo tiene el potencial de catalizar la adopción generalizada de tecnologías de generación distribuida y avanzar hacia un futuro energético más limpio, seguro y sostenible.

La investigación propuesta tiene el potencial de tener un impacto significativo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la mejora de la calidad del aire mediante la promoción de tecnologías de GD basadas en fuentes renovables dado que puede facilitar una mayor penetración de energías limpias, en el sistema eléctrico, reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones asociadas. Además, al minimizar las pérdidas de energía durante la transmisión y distribución de electricidad y al evitar la sobrecarga de la red, las soluciones propuestas por este estudio pueden mejorar la eficiencia general del sistema eléctrico y reducir el desperdicio de recursos naturales. Esto puede tener un impacto positivo en la conservación de los recursos energéticos y en la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono y otros impactos ambientales negativos asociados con la generación de energía convencional.

Análisis y Formulación del Problema Científico

Se enfoca en la identificación y resolución de problemas asociados con la ubicación y dimensionamiento de unidades de GD en el alimentador de gran longitud Cordón Fronterizo. Este alimentador presenta desafíos específicos como la variabilidad en el perfil de voltaje a lo largo de su extensión y las pérdidas significativas de potencia activa y reactiva. La formulación del problema se centra en cómo optimizar la distribución y capacidad de unidades de GD para mejorar la estabilidad del voltaje y reducir las pérdidas de energía.

Se fundamenta en varias teorías y conceptos clave. Primero, se explorará la teoría de la GD, destacando sus beneficios, desafíos y su impacto en la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos de distribución. Luego, a través del algoritmo de optimización metaheurística Grey Wolf Optimizer (GWO), se utilizará para determinar la ubicación y dimensionamiento óptimo de las unidades de GD. Finalmente, se analizarán los principios que rigen el comportamiento de los sistemas eléctricos de distribución, con énfasis en el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia.

Simulación del Sistema Eléctrico de Distribución sin GD

Se realizó una simulación del alimentador Cordón Fronterizo utilizando el software CYME, sin la presencia de unidades de GD. Esta simulación inicial permitió obtener el perfil de voltaje actual a lo largo del alimentador, así como cuantificar las pérdidas de potencia activa y reactiva. Estos resultados servirán como línea base para evaluar el impacto de la incorporación de GD.

Dimensionamiento y Ubicación de Unidades de GD en el Sistema Eléctrico de Distribución

Utilizando el algoritmo GWO, se determinarán las ubicaciones y capacidades óptimas de las unidades de GD en el alimentador. Mediante la aplicación del algoritmo GWO, se llevó a cabo el proceso de dimensionamiento y ubicación de las unidades de GD en el alimentador Cordón Fronterizo. El objetivo fue identificar las ubicaciones óptimas y las capacidades adecuadas de las unidades de GD que maximicen la eficiencia del sistema y mejoren el perfil de voltaje. El algoritmo GWO fue implementado en MATLAB, y los resultados serán analizados para seleccionar las mejores configuraciones de GD.

Simulación del Sistema Eléctrico de Distribución con GD

Se simuló nuevamente el sistema eléctrico, esta vez incorporando las unidades de GD según las configuraciones obtenidas en el paso anterior. Una vez determinadas

las ubicaciones y capacidades óptimas de las unidades de GD, se procedió a simular nuevamente el alimentador Cordón Fronterizo utilizando el software CYME, esta vez con las unidades de GD incorporadas. Esta simulación permitió evaluar los cambios en el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia activa y reactiva en comparación con la simulación inicial sin GD.

Análisis del Impacto de la GD en el Sistema Eléctrico de Distribución

Se analizaron los resultados de las simulaciones para evaluar el impacto de la GD en el sistema eléctrico, comparando los perfiles de voltaje y las pérdidas de potencia antes y después de la implementación de GD.

El análisis del impacto de la GD en el sistema eléctrico de distribución se basó en la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones con y sin GD. Se evaluarán las mejoras en el perfil de voltaje y las reducciones en las pérdidas de potencia activa y reactiva. Este análisis permitió determinar la eficacia de la ubicación y dimensionamiento de las unidades de GD y proporcionar recomendaciones para futuras implementaciones en sistemas eléctricos de distribución similares.



C A P Í T U L O 2

GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Se define como un sistema de generación de energía eléctrica compuesto por múltiples fuentes pequeñas y descentralizadas, ubicadas cerca de los puntos de consumo. Estas fuentes pueden incluir tecnologías como paneles solares, turbinas eólicas, microturbinas de gas, sistemas de cogeneración, entre otros. La GD se integra en la red eléctrica existente y puede operar en conjunto con la generación centralizada para mejorar la confiabilidad del suministro, reducir pérdidas de transmisión y contribuir a la sostenibilidad ambiental al aprovechar recursos locales y renovables. En la Figura 2 se muestra la incorporación de GD en un SED (Brevault et al., 2021).

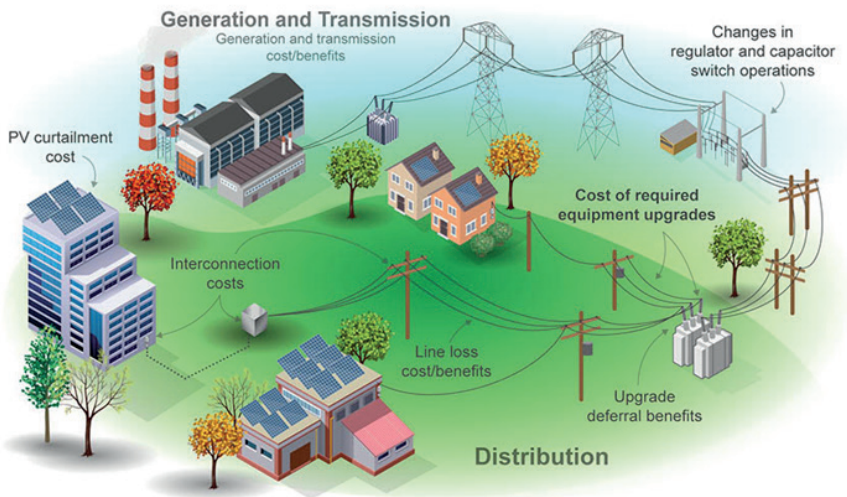


Figura 2. Generación Distribuida en un SED.

La GD se profundiza a través de dos criterios: el nivel de voltaje y la capacidad de producción, donde se establece la capacidad de esta, para conectarse tanto a la red de distribución como directamente al consumidor.

La GD se clasifica en cuatro categorías según su capacidad de producción: micro (de 1 W a 50 kW), pequeño (de 5 kW a 5 MW), medio (de 5 a 50 MW) y grande (más de 50 MW), es esencial considerar que, sin importar el rango de capacidad de producción, la inyección de corriente de la GD a la red no debe exceder el límite tolerable de corriente (Brevault et al., 2021).

Operación de la Generación Distribuida

Es esencial comprender el funcionamiento de la GD, ya que algunas de sus instalaciones pueden ser controladas de forma remota, mientras que otras no tienen esta capacidad. Por lo tanto, se clasifican en dos categorías: despachables y no despachables, según su capacidad de programación. Las instalaciones despachables pueden ajustarse para aumentar la producción en momentos específicos del día, lo que se conoce como fuentes programables, mientras que otras simplemente generan energía sin la posibilidad de programación (Mokhtari et al., 2022).

En términos de rendimiento, los recursos de GD se dividen en dos grupos: aquellos que pueden operar de manera independiente como islas y aquellos que no pueden. Algunas instalaciones solo pueden suministrar energía cuando están conectadas a la red, mientras que otras pueden hacerlo incluso cuando están desconectadas, lo que se conoce como capacidad de operar como isla (Ullah et al., 2020).

Además de su función principal de generar energía, las unidades de GD pueden desempeñar un papel importante en la gestión de la carga y como reserva en la red, así como contribuir a estabilizar el voltaje y mejorar la calidad de la energía. La propiedad de las instalaciones de GD puede ser tanto pública como privada, y las instalaciones no públicas se denominan productores de energía independientes, quienes pueden vender su producción a empresas públicas (Mokhtari et al., 2022).

Tecnologías Basadas en Combustibles

Las tecnologías basadas en combustibles se refieren a cualquier método o proceso que utilice combustibles, como carbón, gas natural, petróleo u otros materiales orgánicos, para generar energía eléctrica. Algunos de ellos son según (Ullah et al., 2020):

- I Motores de Combustión:** Estos motores operan mediante la reacción y combustión del combustible y el oxidante, generalmente aire u oxígeno, dentro de una cámara cerrada. Esta combustión produce gases calientes a alta temperatura y presión, los cuales impulsan las partes móviles del motor para realizar trabajo mecánico. Aunque inicialmente diseñados para vehículos automotores, estos motores también se emplean en la Generación Distribuida (GD) para la producción de electricidad.

- I **Microturbinas:** Son versiones compactas de turbinas de gas, conectadas con sus propios generadores y que operan a altas velocidades. Utilizan una variedad de combustibles para generar electricidad.
- I **Células de Combustible:** Estas células transforman directamente la energía química en eléctrica. Utilizan gas de hidrógeno como combustible, ofreciendo ventajas como alta eficiencia y respeto al medio ambiente al producir agua como subproducto.

Tecnologías Basadas en Fuentes Renovables de Energías

Las tecnologías Basadas en Energías Renovables representan un conjunto diverso de enfoques para la generación de energía que aprovechan fuentes naturales y renovables, como la luz solar, el viento, el agua, el calor geotérmico, la hidroenergía y la biomasa. Estas tecnologías están ganando cada vez más atención y adopción debido a su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la sostenibilidad energética (Ullah et al., 2020).

Una de las características principales de estas tecnologías es su capacidad para aprovechar recursos naturales que son abundantemente disponibles y que se regeneran de forma continua en la naturaleza. Esto contrasta con los combustibles fósiles, que son recursos finitos y cuya extracción y combustión tienen impactos significativos en el medio ambiente, algunas de ellas son según (Liao et al., 2021):

- I **Turbinas Eólicas:** Convierten la energía del viento en electricidad mediante el movimiento de sus palas, conectadas a un generador. Se instalan en torres altas para aprovechar mejor el viento y pueden utilizarse en hogares para generar electricidad.
- I **Células Solares:** Convierten la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Tienen diversas aplicaciones, desde calculadoras hasta paneles solares para generación de electricidad en GD.
- I **Plantas Hidroeléctricas:** Estas plantas aprovechan el flujo de agua para generar electricidad y pueden instalarse en diversos entornos, desde corrientes de agua hasta tuberías de salida de aguas residuales.

En la Figura 3 se muestra las principales fuentes de energía convencionales y no convencionales.



La GD presenta una serie de ventajas significativas que contribuyen a la eficiencia y la estabilidad de la red eléctrica. Por un lado, su capacidad de funcionar como respaldo de la red y suministrar energía directamente en los puntos de consumo reduce la carga en las líneas de transmisión, aliviando así la presión sobre la red en general. Además, durante situaciones de emergencia, como apagones parciales, la GD puede ofrecer una fuente inmediata de energía, mitigando la duración y el impacto de los cortes de energía (Liao et al., 2021).

Otras ventajas incluyen la capacidad de balancear la carga y controlar el voltaje y la potencia reactiva, así como el retraso en la inversión en infraestructura de transmisión. La instalación y operación eficientes de la GD resultan prácticas en áreas con un alto crecimiento de la carga, ofreciendo una alternativa más ágil y menos contaminante en comparación con las plantas de energía térmica convencionales (Ullah et al., 2020).

Sin embargo, la GD también presenta desafíos que deben abordarse para maximizar su efectividad y seguridad. La dificultad de controlar las fuentes de GD, especialmente en modo de isla, junto con la alteración de la configuración de los equipos de protección y el aumento de la corriente de cortocircuito, pueden dificultar su integración con la red eléctrica existente. La sincronización adecuada con la red, la selección cuidadosa del lugar de instalación y la complejidad operativa en áreas urbanas también plantean desafíos adicionales. El aumento del costo del despacho, debido a la implementación de sistemas de control remoto y supervisión a nivel de distribución, también puede representar un obstáculo económico significativo (Mokhtari et al., 2022).

Estimación de Variables Meteorológicas con ArcGIS

La estimación de variables meteorológicas a través de sistemas de información geográfica (SIG), como ArcGIS, ha ganado considerable importancia en los últimos años debido a su capacidad para integrar datos espaciales y realizar análisis espaciales complejos. En esta sección, se discuten los métodos y técnicas utilizados en la estimación de variables meteorológicas utilizando ArcGIS, así como algunas aplicaciones destacadas (Li et al., 2018).

Métodos de Estimación

La estimación de variables meteorológicas a través de ArcGIS implica el uso de diversas técnicas de interpolación espacial para generar superficies continuas de datos climáticos. Entre los métodos más comunes se encuentran (Oliver & Webster, 2014):

- I **Kriging:** Una técnica de interpolación geoestadística que considera la autocorrelación espacial de los datos para generar estimaciones más precisas.
- I **Inverse Distance Weighted (IDW):** Este método asigna ponderaciones a los puntos de datos circundantes en función de su distancia al punto de interés, generando una superficie de datos interpolada.
- I **Splines Espaciales:** Utiliza funciones de interpolación suaves para generar superficies continuas a partir de datos dispersos.

Herramientas y Funcionalidades de ArcGIS

ArcGIS proporciona una variedad de herramientas y funcionalidades específicamente diseñadas para la estimación de variables meteorológicas, incluyendo (Oliver & Webster, 2014):

- I **ArcGIS Spatial Analyst:** Un conjunto de herramientas especializadas para análisis espacial que incluye funciones para la interpolación de datos climáticos.

- I **ArcGIS Geostatistical Analyst:** Proporciona herramientas avanzadas para el análisis geoestadístico, incluyendo métodos de kriging.
- I **ArcGIS Online:** Permite acceder a datos meteorológicos en tiempo real y utilizarlos en análisis espaciales.

Aplicaciones

La estimación de variables meteorológicas con ArcGIS se ha aplicado en una variedad de campos, incluyendo la agricultura, la gestión de recursos hídricos, la planificación urbana y la mitigación de desastres naturales. Algunos ejemplos destacados incluyen (Zaitchik & Rodell, 2008):

- I **Estimación de Precipitación:** Utiliza datos de estaciones meteorológicas y técnicas de interpolación espacial para generar mapas de precipitación a nivel regional.
- I **Modelado de Temperatura:** Emplea datos satelitales y estaciones meteorológicas para estimar patrones de temperatura y identificar zonas de calor urbano.
- I **Predicción de Eventos Extremos:** Utiliza modelos climáticos y datos históricos para predecir la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, como tormentas o sequías.

En la Figura 4 se muestra la estimación de variables meteorológicas utilizando el software ArcGIS.

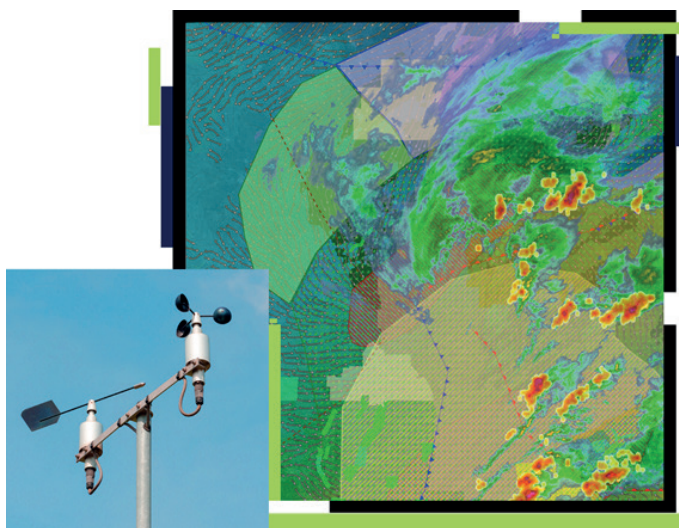


Figura 4. Estimación de variables meteorológicas utilizando el Software ArcGIS.



C A P Í T U L O 3

ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE UNIDADES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

La ubicación y el dimensionamiento de unidades de GD son aspectos críticos en el diseño de sistemas de energía renovable eficientes y rentables. Los algoritmos de optimización juegan un papel fundamental en este proceso al permitir encontrar soluciones óptimas que maximicen la producción de energía y minimicen los costos asociados (Iam et al., 2018).

Los algoritmos de optimización utilizados para ubicar y dimensionar unidades de GD se basan en diferentes enfoques computacionales que buscan explorar y explotar el espacio de soluciones de manera eficiente. Estos algoritmos pueden clasificarse en dos categorías principales: algoritmos metaheurísticos y algoritmos deterministas.

- I **Algoritmos Metaheurísticos:** Estos métodos de búsqueda inspirados en la naturaleza, como algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas (PSO), colonias de abejas y búsqueda de lobos, son capaces de encontrar soluciones cercanas al óptimo global en problemas complejos y multidimensionales.
- I **Algoritmos Deterministas:** A diferencia de los metaheurísticos, los algoritmos deterministas, como la programación lineal y la programación no lineal, buscan encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización a través de un conjunto de ecuaciones y restricciones definidas.

Los algoritmos de optimización se utilizan para abordar diferentes aspectos relacionados con la ubicación y el dimensionamiento de unidades de GD, incluyendo (Khatib et al., 2019):

- I **Selección de Ubicación:** Determina los sitios óptimos para la instalación de unidades de GD, teniendo en cuenta factores como la disponibilidad de recursos naturales (por ejemplo, radiación solar para paneles fotovoltaicos), la proximidad a la red eléctrica y las restricciones ambientales.
- I **Dimensionamiento del Sistema:** Establece el tamaño adecuado de las unidades de GD, considerando la demanda de energía, la capacidad de generación y los costos asociados, con el objetivo de maximizar la eficiencia energética y minimizar los gastos operativos y de mantenimiento.

Evaluación y Comparación de Algoritmos

La selección del algoritmo de optimización más adecuado depende de varios factores, como la complejidad del problema, la dimensionalidad del espacio de soluciones y la disponibilidad de datos. Es importante realizar evaluaciones comparativas de diferentes algoritmos para determinar cuál proporciona los resultados óptimos y eficientes en un contexto específico (Khatib et al., 2019).

A pesar de los avances en el desarrollo de algoritmos de optimización para la ubicación y dimensionamiento de unidades de GD, aún existen desafíos por abordar, como la integración de la incertidumbre y la variabilidad climática en los modelos de optimización. Además, se requiere investigación adicional para mejorar la eficiencia y escalabilidad de los algoritmos existentes, así como para explorar nuevas técnicas de optimización emergentes (Bonyadi, Michalewicz, & Siebert, 2021).

Optimización Metaheurística

Parpinelli y Lopes (2021) resaltan que las técnicas de optimización metaheurística han experimentado un notable aumento en su popularidad. Estas técnicas, además de ser objeto de numerosos trabajos teóricos, se han aplicado exitosamente en una amplia gama de campos de estudio. La simplicidad, flexibilidad, la ausencia de necesidad de derivadas y la capacidad de evitar óptimos locales son características distintivas de estas técnicas.

La simplicidad inherente de las metaheurísticas radica en su inspiración en conceptos naturales simples, como fenómenos físicos, comportamientos animales o principios evolutivos. Esta simplicidad permite a los científicos de la computación simular diferentes conceptos naturales, proponer nuevas metaheurísticas o mejorar las existentes, facilitando así su comprensión y aplicación en diversos problemas.

La flexibilidad de las metaheurísticas se refleja en su capacidad para adaptarse a una amplia variedad de problemas sin necesidad de modificar su estructura básica. Esto se traduce en la capacidad de aplicarlas directamente a diferentes contextos, donde solo importan las entradas y salidas del sistema para su funcionamiento eficiente.

La mayoría de las metaheurísticas operan sin necesidad de derivadas, lo que las diferencia de los enfoques de optimización basados en gradientes. Al trabajar de manera estocástica, estas técnicas comienzan con soluciones aleatorias, lo que las hace adecuadas para problemas reales donde la información sobre derivadas es costosa o inexistente.

Por último, las metaheurísticas destacan por su habilidad para evitar óptimos locales gracias a su naturaleza estocástica, lo que les permite explorar ampliamente el espacio de búsqueda y encontrar soluciones óptimas en problemas complejos y desconocidos.

Según Jordehi y Ngo (2022), aunque las metaheurísticas pueden mostrar resultados prometedores en ciertos conjuntos de problemas, su desempeño puede variar en otros conjuntos. Estas técnicas pueden clasificarse en dos categorías principales: basadas en soluciones individuales y basadas en poblaciones. Las últimas, al trabajar con múltiples soluciones candidatas, presentan ventajas como la exploración más amplia del espacio de búsqueda y la colaboración entre soluciones para evitar óptimos locales.

Según Gandomi, Alavi y Mirjalili (2020), independientemente de sus diferencias, todas las metaheurísticas comparten la división del proceso de búsqueda en exploración y explotación, buscando encontrar un equilibrio óptimo entre estas fases para lograr una optimización eficiente y efectiva. En la Figura 5 se muestra el proceso de optimización de un algoritmo metaheurístico.

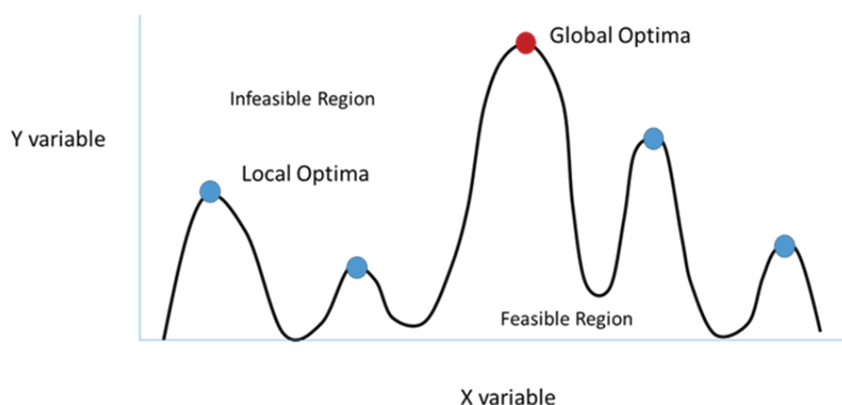


Figura 5. Proceso de optimización de un algoritmo metaheurístico

Grey Wolf Optimizer (GWO)

Los lobos grises se sitúan en la cúspide de la cadena alimentaria, considerados depredadores de primer orden. Prefieren vivir en manadas, cuyo tamaño promedio oscila entre 5 y 12 individuos. Destaca su estricta jerarquía social, donde un macho y una hembra, conocidos como alfas, ocupan el puesto de líderes.

Las alfas son responsables de tomar decisiones cruciales para la manada, como la caza, el lugar de descanso y el horario diario. Su autoridad es incuestionable, y las directrices que emiten deben ser seguidas por el resto del grupo. Por otro lado, los lobos beta, ubicados en el segundo nivel jerárquico, asisten a las alfas en la toma de decisiones y en otras actividades grupales.

En el escalafón más bajo se encuentran los lobos omegas, considerados los individuos más subordinados de la manada. Son relegados al último lugar en el acceso a los recursos, y frecuentemente son objeto de conflictos internos. A pesar de su aparente insignificancia, la ausencia de un omega puede desencadenar disputas y problemas dentro de la manada, subrayando su importancia en el equilibrio social. La jerarquía de los lobos se muestra en la Figura 6 (Mirjalili, Mirjalili & Lewis, 2014).

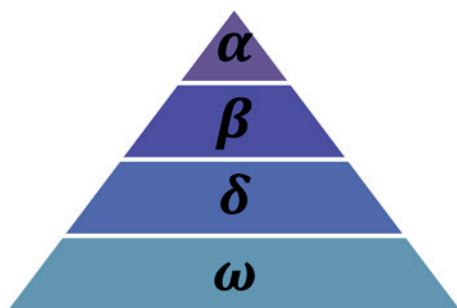


Figura 6. Jerarquía del lobo gris (la dominancia disminuye de arriba hacia abajo).

En cuanto a la caza, los lobos grises siguen un proceso meticuloso que incluye el rastreo, persecución y aproximación a la presa, seguido por la persecución, cerco y hostigamiento hasta que la presa se detenga, culminando con el ataque. Estas etapas son esenciales para el éxito en la obtención de alimento y son reflejo de la adaptación y eficiencia de esta especie en su entorno natural. Las principales fases de la caza de lobos grises son las siguientes:

- Rastreo, persecución y aproximación a la presa.
- Perseguir, cercar y hostigar a la presa hasta que deje de moverse.
- Ataque hacia la presa.

Modelo matemático y algoritmo

Para modelar matemáticamente la jerarquía social de los lobos al diseñar GWO, se considera la solución más apta como el alfa (a). En consecuencia, las soluciones segunda y tercera mejores se denominan beta (b) y delta (d) respectivamente. Se asume que el resto de las soluciones candidatas son omega (x). En el algoritmo GWO, la caza (optimización) está guiada por (Mirjalili, Mirjalili & Lewis, 2014). Ecuación 1y 2

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Donde:

$t \rightarrow$ Indica la iteración actual

$\vec{A}$ y $\vec{C} \rightarrow$ son los coeficientes de los vectores,

$\vec{X}_p \rightarrow$ Vector de posición de la presa

$\vec{X} \rightarrow$ Vector de posición de un lobo gris.

Los vectores $\vec{A}$ y $\vec{C}$ se calculan a través de las ecuaciones 3 y 4

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

Donde:

Los componentes de $\vec{a}$ se reducen linealmente de 2 a 0 en el transcurso de las iteraciones y r_1, r_2 son vectores aleatorios en $[0,1]$.

En la Figura 7, se muestra un vector de posición bidimensional, un lobo gris en la posición (X, Y) puede actualizar su posición de acuerdo con la posición de la presa (X^*, Y^*) . Diferentes lugares alrededor del mejor agente pueden alcanzarse con respecto a la posición actual ajustando el valor de los vectores.

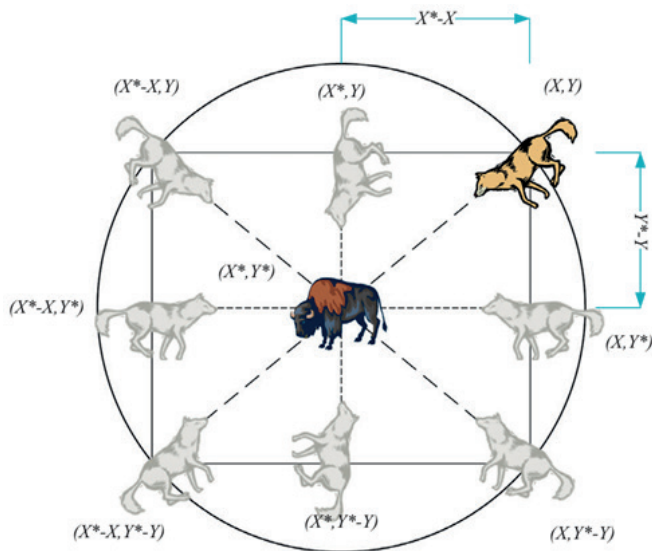


Figura 7. Vectores de posición en 2D y sus posibles ubicaciones siguientes.

Los lobos grises tienen la capacidad de reconocer la ubicación de la presa y rodearla. La caza suele estar guiada por el alfa. El beta y el delta también pueden participar ocasionalmente en la caza. Sin embargo, en un espacio de búsqueda abstracto no tenemos idea acerca de la ubicación del óptimo (presa).

Para simular matemáticamente el comportamiento de caza de los lobos grises, se supone que el alfa (mejor solución candidata), beta y delta tienen un mejor conocimiento sobre la ubicación potencial de la presa. Por lo tanto, se guardan las tres mejores soluciones obtenidas hasta ahora y obligamos a los demás agentes de búsqueda (incluidos los omegas) a actualizar sus posiciones de acuerdo con la posición de los mejores agentes de búsqueda. Para ello se proponen las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{D}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

La Figura 8 muestra cómo un agente de búsqueda actualiza su posición según el alfa, beta y delta en un espacio de búsqueda D . Se puede observar que la posición final estaría en un lugar aleatorio dentro de un círculo definido por las posiciones de alfa, beta y delta en el espacio de búsqueda. En otras palabras, alfa, beta y delta estiman la posición de la presa, y los otros lobos actualizan sus posiciones aleatoriamente alrededor de la presa.

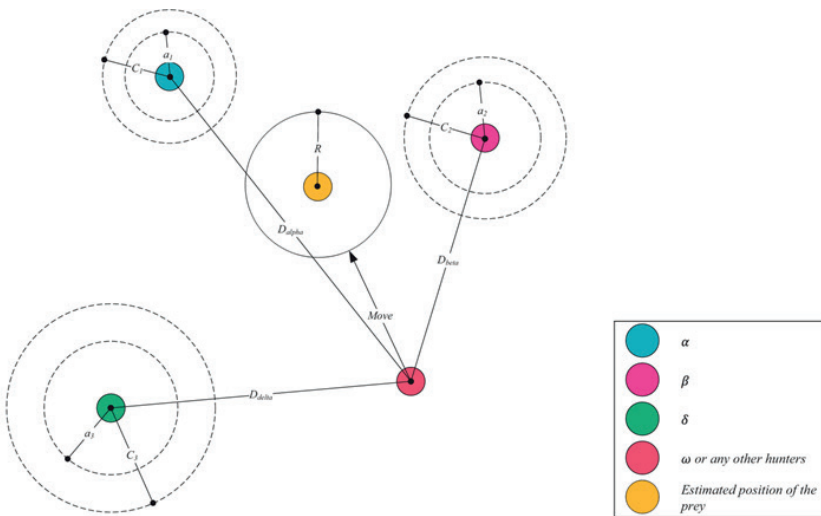


Figura 8. Actualización de la posición en GWO.

Ataque a la presa (explotación)

Los lobos grises finalizan la caza atacando a la presa cuando esta deja de moverse, para modelar matemáticamente el acercamiento a la presa, se disminuye el valor de $\vec{a}$. Cabe destacar que el rango de fluctuación de $\vec{A}$ también se reduce por $\vec{a}$. En otras palabras, $\vec{A}$ es un valor aleatorio en el intervalo $[2\vec{a}, 2\vec{a}]$, donde $\vec{a}$ se reduce de 2 a 0 a lo largo de las iteraciones. Cuando los valores aleatorios de $\vec{A}$ están en $[1,1]$, la siguiente posición de un agente de búsqueda puede estar entre su posición actual y la posición de la presa

La Figura 9 muestra que $|A| < 1$ obliga a los lobos a atacar hacia la presa. Con los operadores propuestos hasta ahora, el algoritmo GWO permite que sus agentes de búsqueda actualicen su posición basándose en la ubicación del alfa, beta y delta; y atacan hacia la presa. Sin embargo, el algoritmo GWO es propenso a estancarse en soluciones locales con estos operadores.

El mecanismo de cerco propuesto muestra exploración hasta cierto punto, pero GWO necesita más operadores para enfatizar la exploración (Mirjalili, Mirjalili & Lewis, 2014).

Búsqueda de presas (exploración)

Los lobos grises mayormente buscan según la posición del alfa, beta y delta. Se distancian entre sí para buscar presas y convergen para atacar a las presas. Para modelar matemáticamente la divergencia, utilizamos $\vec{A}$ con valores aleatorios mayores que 1 o menores que -1 para obligar al agente de búsqueda a divergir de la presa. Esto enfatiza la exploración y permite que el algoritmo GWO busque globalmente, también muestra que $|A| > 1$ obliga a los lobos grises a divergir de la presa con la esperanza de encontrar una presa más adecuada (Mirjalili, Mirjalili & Lewis, 2014).

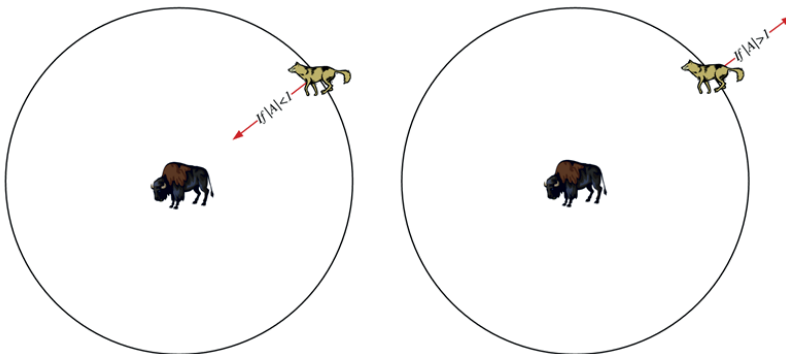


Figura 9. Atacar a la presa frente a buscarla.

Otro componente de GWO que favorece la exploración es $\vec{C}$. Como se puede ver en la Ecuación (4), el vector $\vec{C}$ contiene valores aleatorios en $[0,2]$. Este componente proporciona pesos aleatorios para la presa con el fin de enfatizar estocásticamente ($C > 1$) o desenfatizar ($C < 1$) el efecto de la presa en la definición de la distancia en la Ecuación (1). Esto ayuda a GWO a mostrar un comportamiento más aleatorio durante la optimización, favoreciendo la exploración y evitando los óptimos locales.

Se debe mencionar aquí, que C no disminuye linealmente en contraste con A . Requerimos deliberadamente que C proporcione valores aleatorios en todo momento para enfatizar la exploración no solo durante las iteraciones iniciales sino también en las iteraciones finales.

Este componente es muy útil en caso de estancamiento en óptimos locales, especialmente en las iteraciones finales.

El vector $\vec{C}$ también puede considerarse como el efecto de los obstáculos para acercarse a la presa en la naturaleza. En general, los obstáculos en la naturaleza aparecen en los caminos de caza de los lobos y de hecho les impiden acercarse rápida y convenientemente a la presa. Esto es exactamente lo que hace el vector $\vec{C}$. Dependiendo de la posición de un lobo, puede dar aleatoriamente un peso a la presa y hacer que sea más difícil y lejana de alcanzar para los lobos, o viceversa.

Conclusiones del CAPÍTULO III

En este CAPÍTULO se presentó el marco teórico fundamental para el estudio de la GD y su optimización en sistemas de distribución eléctrica. Se abordan varios temas clave que proporcionan una base sólida para comprender los conceptos y metodologías aplicados en el análisis y la implementación de unidades de GD.

Primero, se definió y describió la GD, destacando las diversas tecnologías que se utilizan, tanto las basadas en combustibles como las energías renovables. Se discuten las ventajas y desventajas de la GD, considerando su impacto en la eficiencia energética, la estabilidad del sistema y los beneficios ambientales.

A continuación, se exploraron los métodos de estimación de variables meteorológicas utilizando herramientas como ArcGIS. Esta sección incluyó una descripción de las técnicas y aplicaciones empleadas para obtener datos precisos que son cruciales para la planificación y operación de unidades de GD, especialmente aquellas que dependen de fuentes de energía renovable.

Se detallaron las herramientas y métodos de estimación de variables, proporcionando una visión general de las aplicaciones prácticas en la evaluación de recursos energéticos y la planificación de sistemas de distribución.

El CAPITULO también cubrió los algoritmos utilizados para la optimización del dimensionamiento y la ubicación de unidades de GD. Se evalúan y comparan diferentes algoritmos, destacando sus fortalezas y debilidades en el contexto de la optimización de sistemas eléctricos.

Se introdujo el concepto de optimización metaheurística, explicando su relevancia y aplicaciones en la resolución de problemas complejos de optimización. En particular, se describe el algoritmo GWO, un enfoque metaheurístico empleado para determinar la ubicación y el dimensionamiento óptimos de unidades de GD en sistemas de distribución.



C A P Í T U L O 4

MARCO METODOLÓGICO

En este CAPITULO se presenta la metodología elaborada para llevar a cabo la investigación. Se detallan el tipo de investigación, el enfoque adoptado, los métodos utilizados en el proceso investigativo, así como las técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos y la realización de simulaciones.

Tipo de investigación

La investigación desarrollada se enmarca en un enfoque cuantitativo y experimental. Este tipo de investigación es adecuado debido a su capacidad para manejar datos numéricos y aplicar métodos estadísticos para obtener resultados generalizables. En el ámbito de la ingeniería eléctrica, el uso de métodos cuantitativos permite medir y analizar variables específicas del sistema eléctrico, como los perfiles de voltaje y las pérdidas de potencia, de manera precisa y objetiva (Bhandari, 2020; Sutton & Austin, 2020).

La investigación experimental es esencial en este contexto, ya que implica la manipulación controlada de variables, como la ubicación y el dimensionamiento de las unidades de GD, para observar sus efectos en el sistema eléctrico del alimentador Cordón Fronterizo. Este enfoque permitirá establecer relaciones de causa y efecto entre la implementación de GD y las mejoras en los índices de calidad de energía. La combinación de simulaciones mediante el software CYME y la optimización a través del algoritmo GWO proporciona una base sólida para realizar estos experimentos bajo condiciones controladas (Scribbr, 2020).

Método de investigación

La metodología de investigación utilizada para este proyecto se basa en un enfoque cuantitativo y experimental, comúnmente empleado en la ingeniería eléctrica para estudiar y optimizar sistemas complejos. Este enfoque es adecuado para la investigación sobre la ubicación y dimensionamiento de unidades de GD en un alimentador de gran longitud, como el alimentador Cordón Fronterizo.

El enfoque cuantitativo implica la recopilación y el análisis de datos numéricos para identificar patrones y relaciones, y en este caso, se usa para simular y evaluar el comportamiento del sistema eléctrico antes y después de la integración de GD. Según Bhandari (2020), los métodos cuantitativos son esenciales para encontrar promedios, realizar predicciones, y probar relaciones causales mediante el uso de estadísticas.

El diseño experimental en esta investigación involucra varias etapas clave. Inicialmente, se simula el sistema eléctrico de distribución sin GD utilizando el software CYME, lo que proporciona una línea base para el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia activa y reactiva del alimentador. Luego, se aplica el algoritmo de optimización metaheurística GWO para determinar la ubicación y el dimensionamiento óptimos de las unidades de GD. Posteriormente, se realizan nuevas simulaciones del sistema con GD para comparar y analizar el impacto de estas unidades en el alimentador.

Este método es especialmente efectivo para estudios en ingeniería, donde la manipulación controlada de variables y la evaluación sistemática de resultados permiten la validación de hipótesis y la generalización de conclusiones, como lo indica la Cambridge Handbook of Engineering Education Research (Kowalski & Kowalski, 2020).

La combinación de simulaciones detalladas y algoritmos de optimización avanzados proporciona una visión integral del desempeño del sistema, lo que facilita la toma de decisiones informadas sobre la implementación de GD. Esta metodología también permite evaluar mejoras en los índices de calidad de energía, como la reducción de pérdidas y la mejora del perfil de voltaje, que son cruciales para la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico (Swanson et al., 2021).

Técnicas de investigación

Se implementan varias técnicas de investigación cuantitativa y experimental, esenciales para obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento del sistema eléctrico.

Una de las técnicas principales utilizadas es la simulación computacional a través del software CYME. Esta herramienta permite modelar el sistema eléctrico de distribución sin GD para obtener un perfil base de voltaje y pérdidas de potencia activa y reactiva. Las simulaciones ofrecen datos cuantitativos críticos que son fundamentales para evaluar el impacto de la integración de GD en el sistema (Swanson et al., 2021).

Otra técnica clave es la aplicación de algoritmos de optimización, específicamente el algoritmo metaheurístico GWO. Este algoritmo se utiliza para determinar la ubicación y el dimensionamiento óptimos de las unidades de GD. Los algoritmos de optimización como el GWO son altamente efectivos para resolver problemas complejos de ingeniería y proporcionar soluciones eficientes que son prácticas y aplicables en el mundo real (Rong, Zhou, Shi, & Huang, 2022).

El análisis de datos es una parte crucial de esta investigación. Involucra la recopilación y el análisis de datos obtenidos de las simulaciones para comparar diferentes escenarios de ubicación de GD. Técnicas estadísticas avanzadas, como el análisis de regresión y la prueba de hipótesis, son empleadas para validar los resultados y establecer conclusiones significativas y confiables (van Gerwen, Buskens, & van der Lippe, 2018).

Además, los experimentos controlados son esenciales para esta investigación. Permiten manipular variables específicas del sistema eléctrico y observar sus efectos directos e indirectos en condiciones controladas. Este enfoque experimental es crucial para establecer relaciones de causa y efecto y probar la eficacia de las soluciones propuestas (Bhandari, 2020).

Finalmente, se utilizan técnicas de modelado matemático y análisis numérico para representar y analizar el comportamiento del sistema eléctrico. Estas técnicas permiten una comprensión más profunda de las dinámicas del sistema y ayudan a predecir el impacto de diferentes configuraciones de GD, proporcionando una base teórica sólida para la investigación (Kowalski & Kowalski, 2020).

En conjunto, estas técnicas de investigación cuantitativa y experimental aseguran un enfoque riguroso y exhaustivo para el estudio y optimización del sistema de distribución eléctrico con la integración de GD. Proporcionan resultados prácticos y teóricamente sólidos que contribuyen significativamente al avance del conocimiento en la ingeniería eléctrica.

Instrumentos de investigación

Software CYME

Se utilizó la herramienta CYME será utilizada para llevar a cabo el análisis de flujo de carga en una red de distribución eléctrica. Este análisis se realizará en dos escenarios diferentes: con unidades de GD y sin ellas. En la figura 10 se muestra el procedimiento.

Distribución de carga: Inicialmente, se procedió a distribuir las cargas a lo largo de la red de distribución, asignando la demanda a los diferentes nodos según su ubicación geográfica y características de consumo.



Ejecución del flujo de carga: Una vez distribuidas las cargas, se realizó el análisis de flujo de carga utilizando CYME. Este análisis permitió observar el comportamiento de la red, identificando parámetros clave como tensiones, corrientes y pérdidas en las líneas, tanto en condiciones normales, como con la inclusión de unidades de GD.

Figura 10. Procedimiento

En la figura 11 se muestra el alimentador sobre el ArGIS en el software CYME, para realizar el análisis de flujo de carga del alimentador “Cordón Fronterizo”.

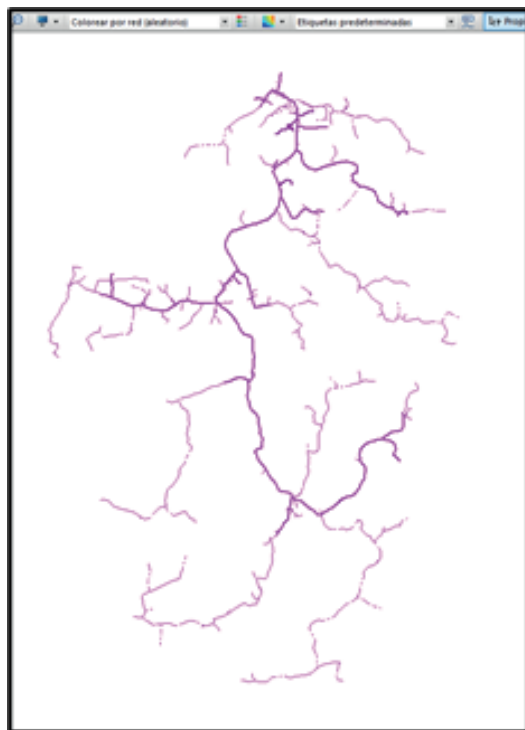


Figura 11. Software CYME para el análisis de flujo de carga del SED.

MATLAB y Algoritmo GWO

MATLAB será empleado para implementar el algoritmo de optimización conocido como GWO. Este algoritmo se utilizará para determinar las ubicaciones óptimas y la potencia específica de las unidades de GD en el alimentador de la red de distribución.

Primero se realizará el **Modelado del algoritmo GWO** aquí se desarrolló un modelo del algoritmo GWO en MATLAB, ajustando los parámetros de este para adaptarlo a las características específicas del problema de ubicación y dimensionamiento de GD.

Luego se del modelado, se ejecutó el algoritmo GWO para buscar las soluciones óptimas que minimicen las pérdidas y mejoren la estabilidad y eficiencia de la red. El algoritmo evalúa diferentes configuraciones de ubicación y potencia de las unidades de GD, Por ultimo se realiza el análisis de resultados que se comparan con los escenarios sin GD y con una distribución aleatoria de GD, para evaluar las mejoras obtenidas en términos de eficiencia energética y reducción de pérdidas.

Síntesis del CAPITULO IV

Se describió el enfoque metodológico empleado para llevar a cabo el estudio de la GD en el sistema de distribución eléctrica. Se detallan los aspectos clave de la investigación, incluyendo el tipo, el método, las técnicas y los instrumentos utilizados.

Se presentó el tipo de investigación, que define el alcance y la naturaleza del estudio. Se explicó cómo este enfoque permitió abordar los objetivos planteados y responder a las preguntas de investigación, además, se describió el método de investigación, proporcionando una visión general del proceso seguido para recopilar y analizar los datos. Este método asegura que el estudio se realice de manera sistemática y rigurosa.

Se presentaron los instrumentos de investigación, que incluyen el software CYME, utilizado para el análisis de flujo de carga en la red de distribución; Matlab, empleado para implementar el algoritmo de optimización GWO, el cual permite determinar las ubicaciones y dimensionamientos óptimos de las unidades de GD.



C A P Í T U L O 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó la integración de unidades de GD en el alimentador “Cordón Fronterizo” y se exploraron diversos aspectos fundamentales para la ubicación óptima de estas unidades, considerando factores y restricciones que afectan el rendimiento y la estabilidad del sistema de distribución.

Se inicia con una descripción general del alimentador “Cordón Fronterizo”, destacando sus características principales, se aborda la estimación de la irradiación solar, decisiva para la generación de energía a partir de fuentes renovables, y se evalúan las susceptibilidades del terreno a movimientos de masas e inundaciones, factores que influyen en la viabilidad y seguridad de la instalación de unidades de GD.

Se define la función objetivo y las restricciones del problema de optimización, las cuales guían la búsqueda de soluciones adecuadas para la ubicación y dimensionamiento de las unidades de GD. Se incluye también el análisis de tres casos de estudio, cada uno con un número creciente de unidades de GD, luego se examinan los resultados en términos de pérdidas de potencia y perfil de voltaje, comparando las mejoras logradas en cada caso.

Alimentador Cordón Fronterizo

La unidad de negocio El Oro, es responsable de la distribución de energía eléctrica a una variedad de clientes, incluyendo hogares, negocios e industrias dentro de su área de concesión. Entre los servicios que ofrece se encuentran la instalación y el mantenimiento de líneas de distribución eléctrica, atención al cliente, facturación y gestión de pagos. Es importante destacar que cuenta con aproximadamente 277.730 clientes.

El alimentador “Cordón Fronterizo” fue seleccionado como estudio de caso para evaluar el impacto de la GD, este tiene una longitud aproximada de 310 km y opera a 13.8 kV. En la Figura 12 se presenta la topología del alimentador, donde la numeración identifica la fase de conexión de cada ramal. Los ramales 1, 4 y 7 están conectados a la fase C, el ramal 2 a la fase B, y los ramales 3, 5, 6, 8 y 9 a la fase A. Es importante destacar que estos ramales fueron seleccionados debido a sus respectivas distancias, lo que permite un análisis más detallado del impacto de la GD.

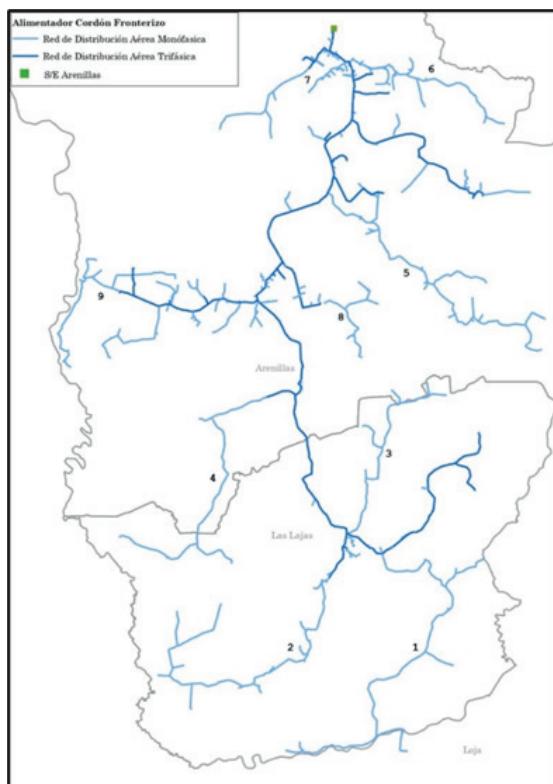


Figura 12. Alimentador Cordon Fronterizo

Estimación de la irradiación solar

La estimación de la irradiación solar se realiza utilizando ArcGIS, una herramienta de sistemas de información geográfica que permite integrar y analizar datos espaciales. Este análisis es crucial para la ubicación de unidades de GD, especialmente en el caso de sistemas fotovoltaicos. La irradiación solar es uno de los factores determinantes en la eficiencia y productividad de las unidades de GD solares. Al estimar con precisión la cantidad de irradiación solar que recibe una región específica, se pueden identificar las áreas más adecuadas para la instalación de paneles solares, optimizando así la generación de energía.

Optimizar la producción de energía garantiza que las unidades de GD se ubiquen en áreas con la mayor irradiación solar posible, maximizando la producción de energía. Esto reduce costos operativos, mejora el retorno de inversión y promueve el uso de energías limpias, reduciendo la dependencia de fuentes no renovables. En la Figura 13 se presenta la irradiación solar en la zona de la zona.

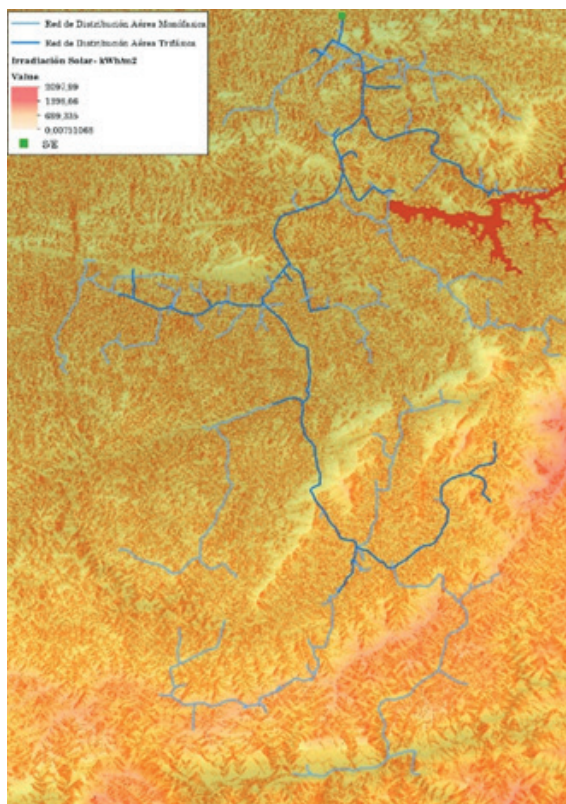


Figura 13. Irradiación solar de la zona

Susceptibilidad a movimiento de masas

El análisis de la susceptibilidad a movimiento de masas también se lleva a cabo utilizando ArcGIS. Este análisis es esencial para evaluar los riesgos geológicos en la ubicación de unidades de GD. Los movimientos de masas, como deslizamientos de tierra, pueden tener un impacto significativo en la infraestructura eléctrica, poniendo en riesgo la integridad y operación de las unidades de GD.

Identificar áreas de alto riesgo evita la instalación de unidades de GD en zonas susceptibles a movimientos de masas, protegiendo la infraestructura y la inversión. Además, asegura que las unidades de GD se coloquen en ubicaciones geológicamente estables, mejorando su vida útil y rendimiento, y minimiza el potencial de interrupciones en el servicio eléctrico y daños a la infraestructura debido a fenómenos geológicos. En la Figura 14 se muestra la susceptibilidad de la zona a movimiento de masas.

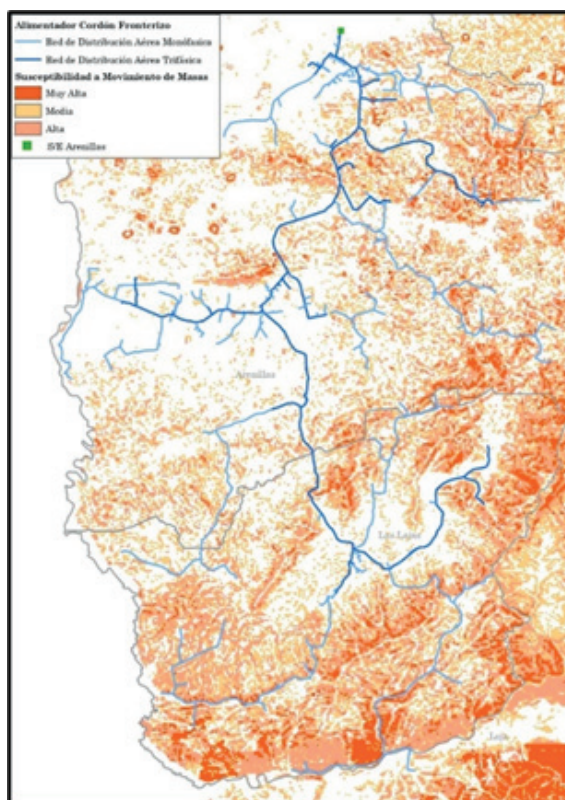


Figura 14. Susceptibilidad a movimiento de masas

Susceptibilidad a inundaciones

La susceptibilidad a inundaciones es otro factor crítico evaluado mediante ArcGIS. Este análisis permite identificar áreas propensas a inundaciones, las cuales pueden afectar severamente la instalación y operación de las unidades de GD. Las inundaciones pueden causar daños directos a la infraestructura y suponer riesgos significativos para la operación continua de las unidades de GD.

Evitar la instalación de unidades de GD en zonas con alta susceptibilidad a inundaciones preserva la integridad de la infraestructura, asegura una operación ininterrumpida al reducir el riesgo de daños causados por inundaciones, y facilita la planificación y diseño de sistemas de GD más resilientes y adaptados a condiciones climáticas adversas. En la figura 15 se muestra la susceptibilidad de las zonas a inundaciones.

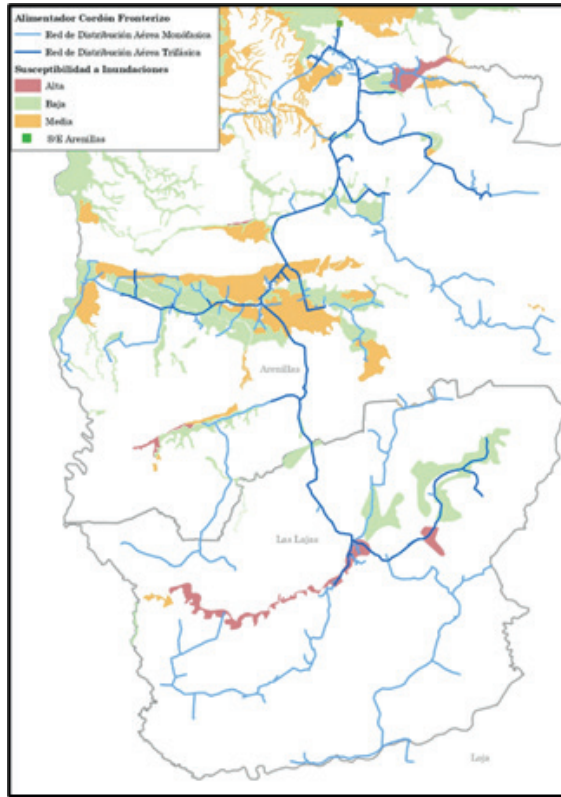


Figura 15. Susceptibilidad a inundaciones

Se muestran las zonas que con susceptibilidad de inundaciones, altas, bajas y medias.

Función objetivo y restricciones

Las pérdidas en el sistema de distribución se representan como se muestran en las ecuaciones siguientes:

$$FO = \min \left(\sqrt{P_{loss}^2 + Q_{loss}^2} \right) \quad (1)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (2)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 X_i \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[a_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + b_{ij} (Q_i P_j + P_i Q_j) \right] \quad (4)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[c_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + d_{ij} (Q_i P_j + P_i Q_j) \right] \quad (5)$$

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (6)$$

$$b_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

$$c_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (8)$$

$$d_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (9)$$

En donde,

$I_i \rightarrow$ Corriente en el nodo i ,

$R_{ij} \rightarrow$ Resistencia de la línea entre en el nodo i y nodo j ,

$X_{ij} \rightarrow$ Reactancia de la línea entre en el nodo i y nodo j ,

$P_i \rightarrow$ Potencia activa en el nodo i en kW,

$Q_i \rightarrow$ Potencia reactiva en el nodo i en kVAR,

$P_j \rightarrow$ Potencia activa en el nodo j en kW,

$Q_j \rightarrow$ potencia reactiva en el nodo j en kVAR,

$V_i, V_j \rightarrow$ Voltaje en el nodo i y nodo j respectivamente,

$\delta_i, \delta_j \rightarrow$ Angulo de voltaje en el nodo i y nodo j respectivamente

$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij} \rightarrow$ Coeficientes de pérdidas respectivamente

$n \rightarrow$ el número de nodos.

La restricción de Voltaje se muestra en la ecuación 17

$$0.9 \leq V_i \leq 1.0 \quad (17)$$

La Restricciones de potencia se muestra en la ecuación 18 y 19

$$P_i + \sum_{k=1}^N P_{DG_i} = P_{Di} + P_{loss} \quad (18)$$

$$Q_i + \sum_{k=1}^N Q_{DG_i} = Q_{Di} + Q_{loss} \quad (19)$$

Donde,

$PDG_i, QDG_i \rightarrow$ Potencia activa y reactiva inyectada por las unidades de GD en el nodo i respectivamente

$PDG_i, QD_i \rightarrow$ Potencia activa y reactiva de la carga en el nodo i , respectivamente.

El Límite superior y límite inferior de potencia de las unidades de GD se muestra en la ecuación 20

$$100 \text{ kW} \leq P_{DG} \leq 1000 \text{ kW} \quad (20)$$

Se propone una irradiancia mínima mostrada en la ecuación 21

$$Isolar \geq 850 \text{ kWh} / m^2 \quad (21)$$

En donde:

$\rightarrow$ irradianción solar mínima

Otro factor con restricción de susceptibilidad a movimiento de masas como se muestra en la ecuación 22.

$$Sterreno < Sumbral \quad (22)$$

En donde,

$Sterreno$ Índice de susceptibilidad del terreno

$Sumbral \rightarrow$ Valor máximo aceptable para considerar una zona como de baja susceptibilidad

Caso de estudio

En este estudio, se utiliza el algoritmo de optimización metaheurística GWO para determinar la ubicación y la potencia óptima de las unidades de GD a lo largo del alimentador denominado "Cordón Fronterizo". El análisis se realiza en tres etapas distintas para evaluar el impacto de la integración de unidades de GD en el sistema de distribución.

Caso Base

Se presenta el caso base del sistema, es decir, el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia sin la presencia de unidades de GD. Este análisis inicial sirve como referencia para comparar los efectos de la incorporación de las unidades de GD. En las figuras 16 y 17 se muestra el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia de la red trifásica, respectivamente. Por otro lado, en las figuras 18 y 19 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase C, respectivamente. Por otra parte, en las figuras 20 y 21 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de la red monofásicas de la fase B, respectivamente. Finalmente, en las figuras 22 y 23 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase A, respectivamente.

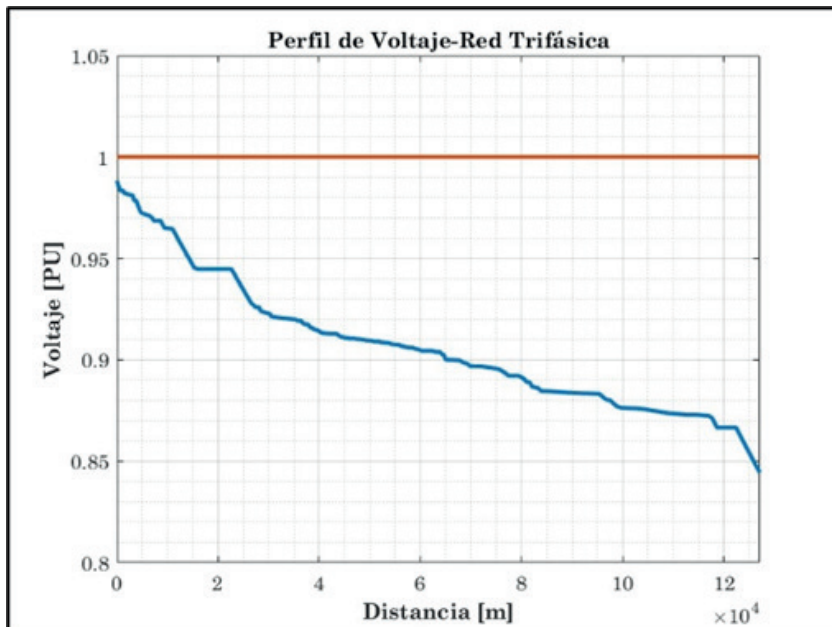


Figura 16. Perfil de voltaje, red trifásica.

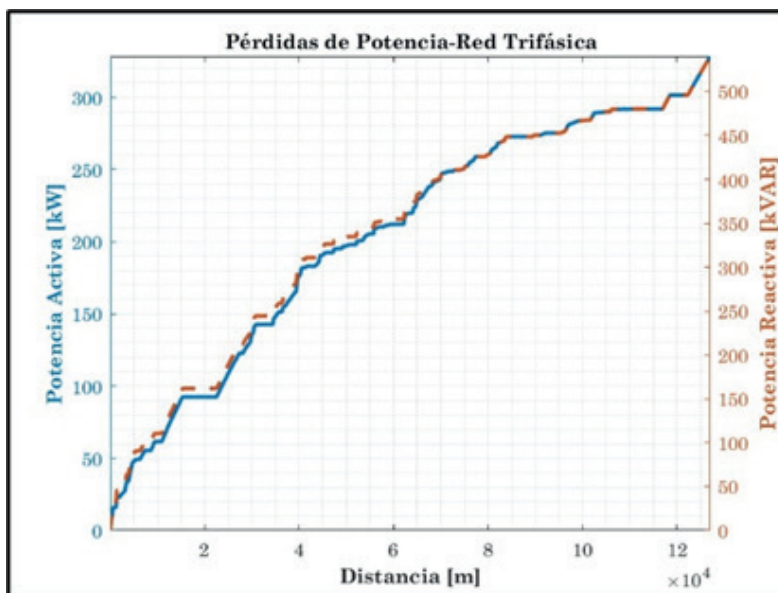


Figura 17. Pérdidas de potencia, red trifásica.

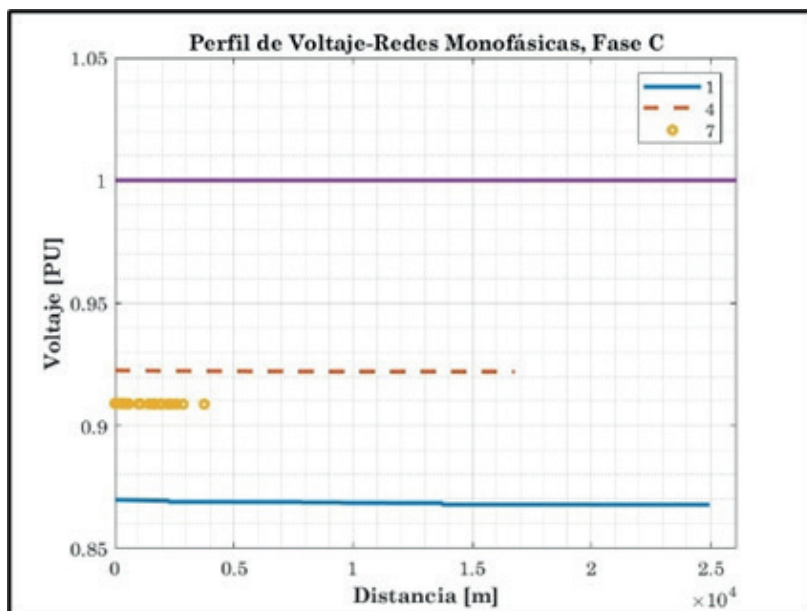


Figura 18. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase C.

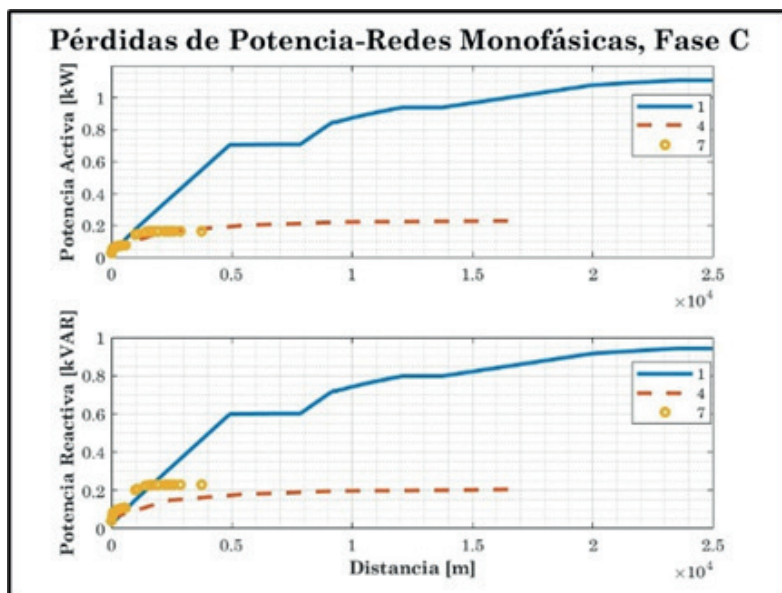


Figura 19. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase C.

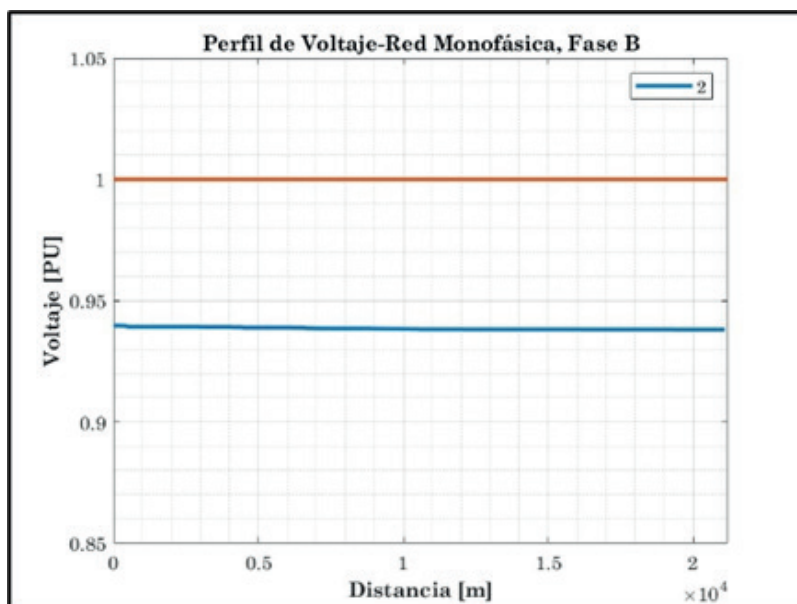


Figura 20. Perfil de voltaje, red monofásica conectada a la fase B.

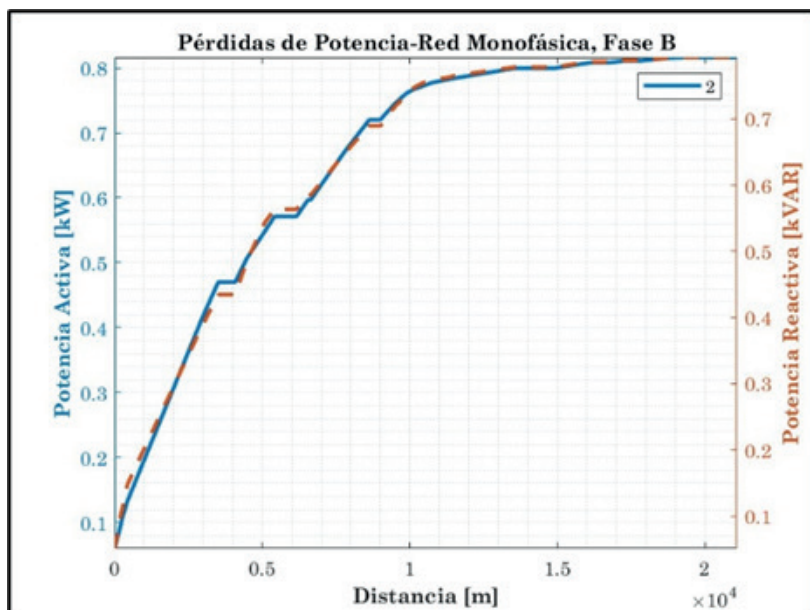


Figura 21. Pérdidas de potencia, red monofásica conectada a la fase B.

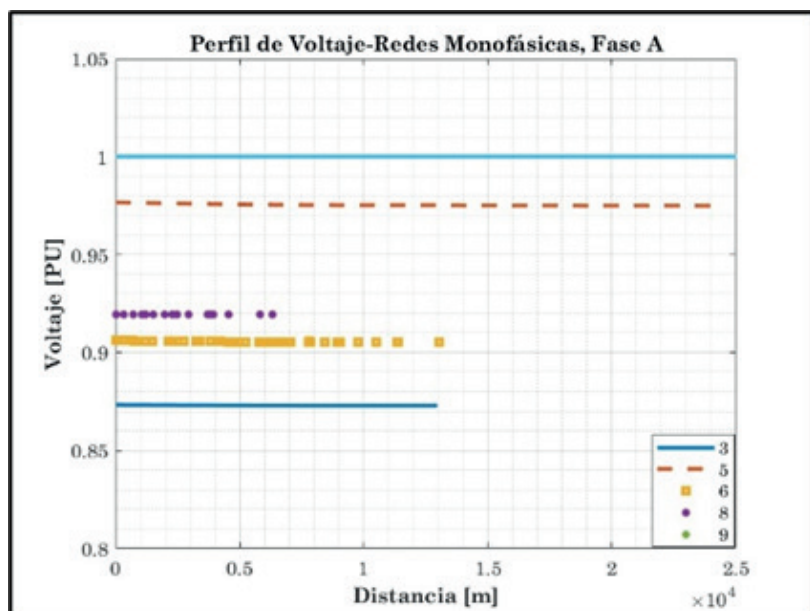


Figura 22. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase A.

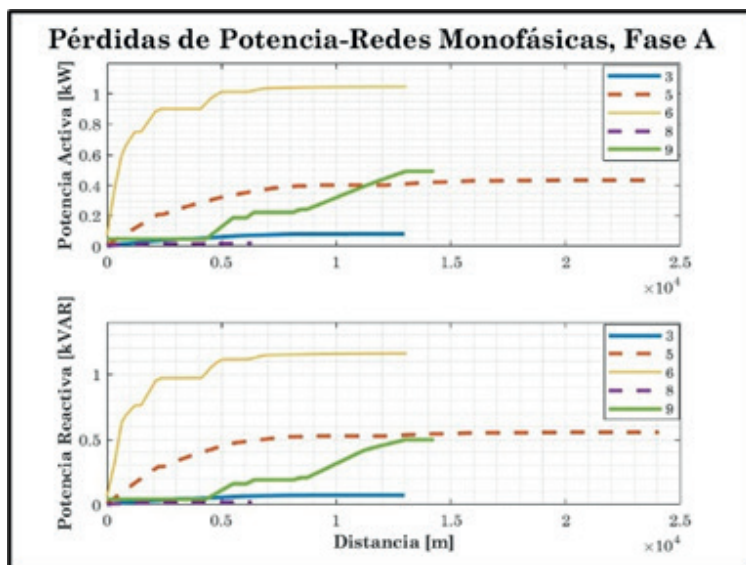


Figura 23. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase A.

Caso 1

Se configura el algoritmo GWO para determinar la ubicación y la potencia óptima de una única unidad de GD en el alimentador. Este caso permite evaluar el impacto directo de la instalación de una sola unidad de GD en el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia del sistema. En las figuras 24 y 25 se muestra el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia de la red trifásica, respectivamente. Por otro lado, en las figuras 26 y 27 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase C, respectivamente. Por otra parte, en las figuras 28 y 29 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de la red monofásica de la fase B, respectivamente. Finalmente, en las figuras 30 y 31 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase A, respectivamente. La ubicación y la potencia de la unidad de GD se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación y potencia de la unidad de GD

Coordenadas	Potencia (kW)
X:600323 Y:9596455	925

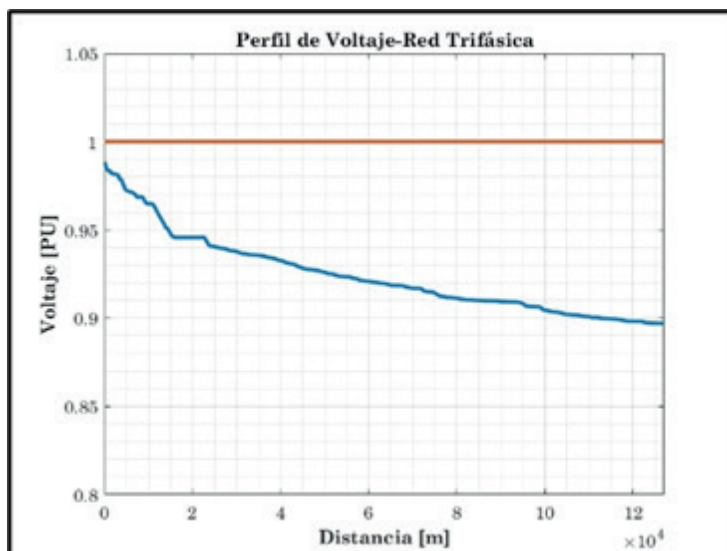


Figura 24. Perfil de voltaje, red trifásica.

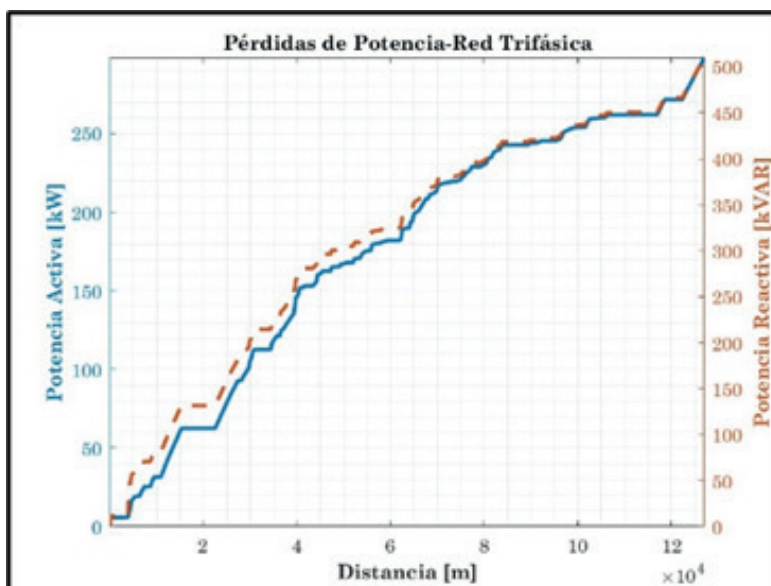


Figura 25. Pérdidas de potencia, red trifásica.

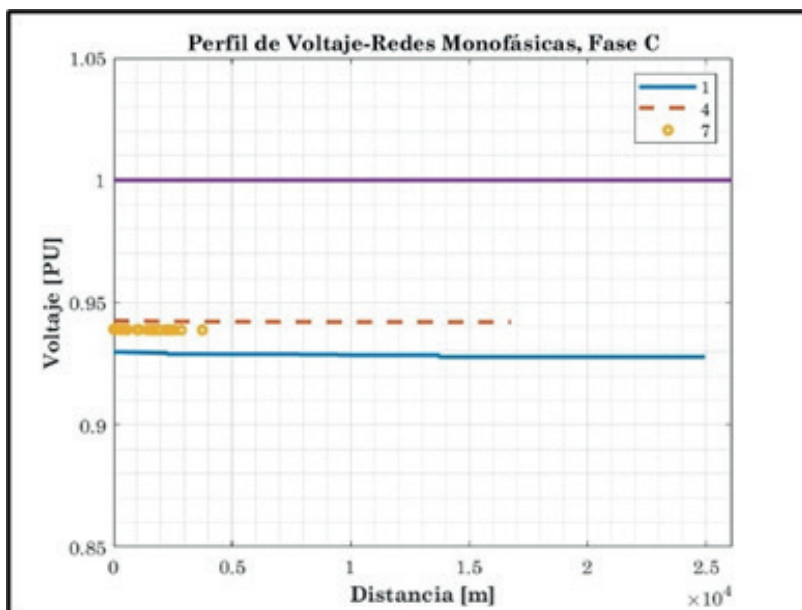


Figura 26. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase C.

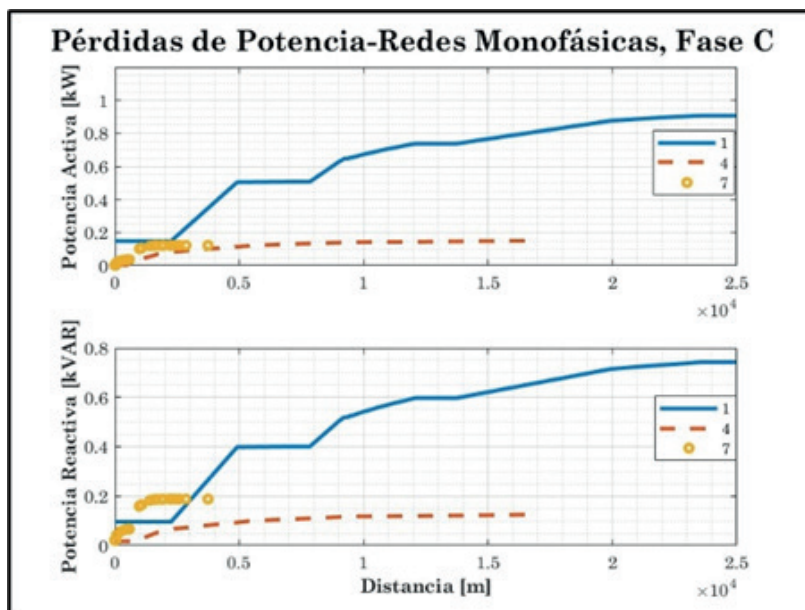


Figura 27. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase C.

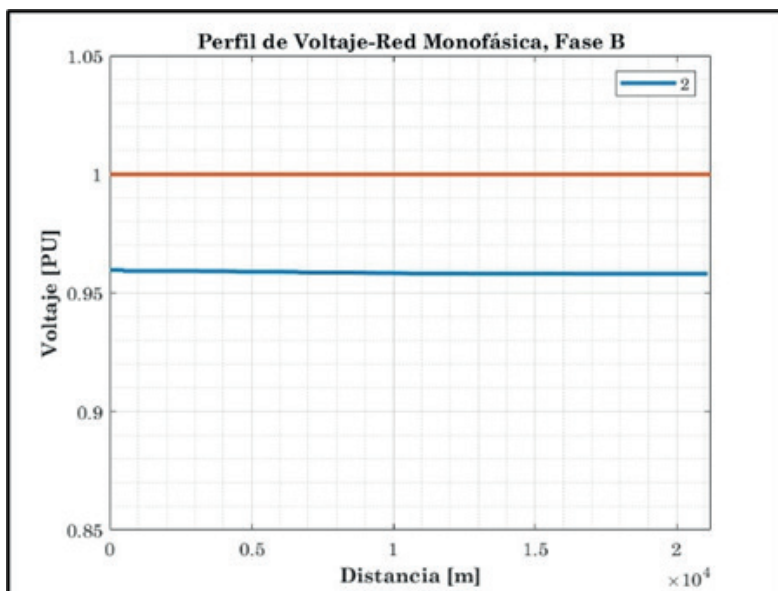


Figura 28. Perfil de voltaje, red monofásica conectada a la fase B.

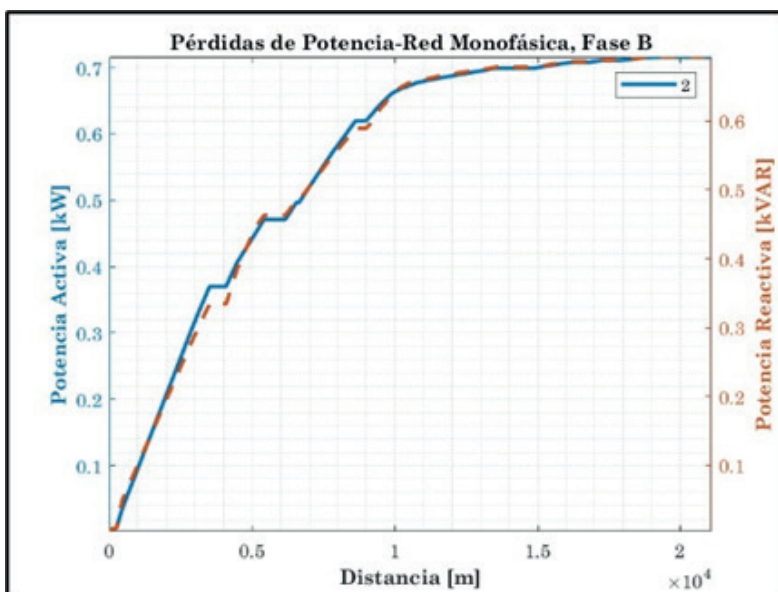


Figura 29. Pérdidas de potencia, red monofásica conectada a la fase B.

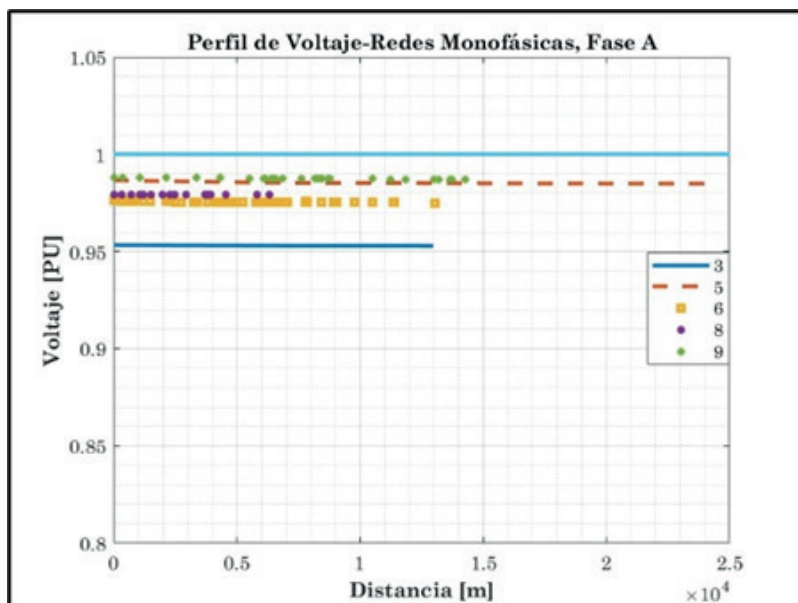


Figura 30. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase A.

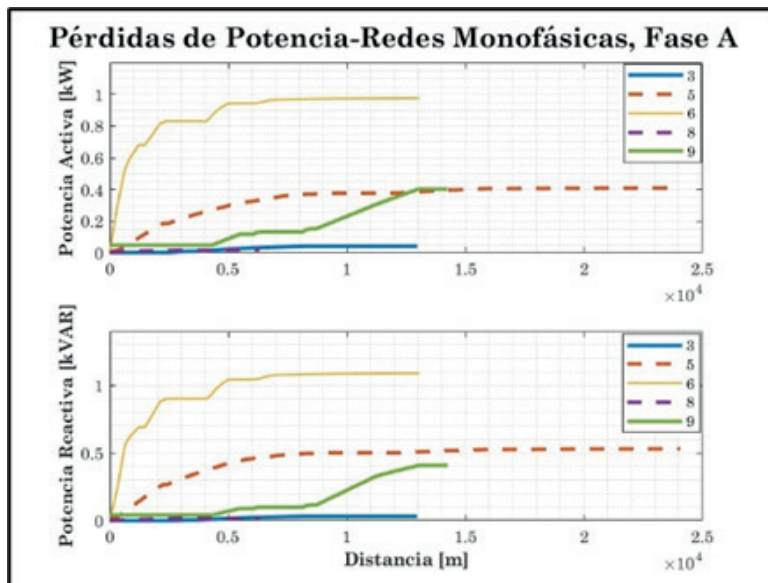


Figura 31. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase A.

Caso 2

Se configura el algoritmo GWO para dimensionar y ubicar entre dos y cinco unidades de GD en el alimentador. Este análisis busca optimizar el número y la distribución de las unidades de GD para mejorar aún más el perfil de tensión y reducir las pérdidas de potencia. Se evalúan diferentes configuraciones dentro de este rango para determinar la solución más eficiente.

En las figuras 32 y 33 se muestra el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia de la red trifásica, respectivamente. Por otro lado, en las figuras 34 y 35 se muestra el perfil de voltaje y perdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase C, respectivamente. Por otra parte, en las figuras 36 y 37 se muestra el perfil de voltaje y perdidas de potencia de la red monofásicas de la fase B, respectivamente. Finalmente, en las figuras 38 y 39 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase A, respectivamente. La ubicación y la potencia de la unidad de GD se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Ubicación y potencia de la unidad de GD

Coordenadas	Potencia (kW)
X:606410 Y:9581302	195
X:601751 Y:9584692	200
X:601628 Y:9589161	205
X:604193 Y:9602824	225

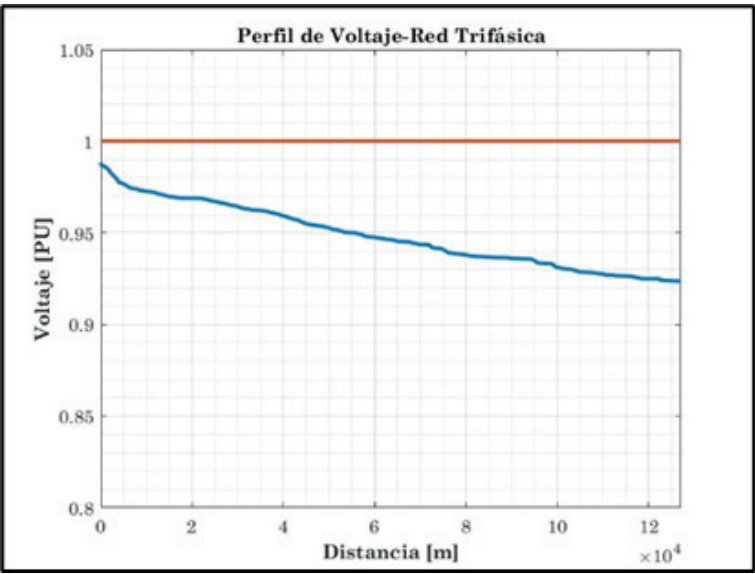


Figura 32. Perfil de voltaje, red trifásica.

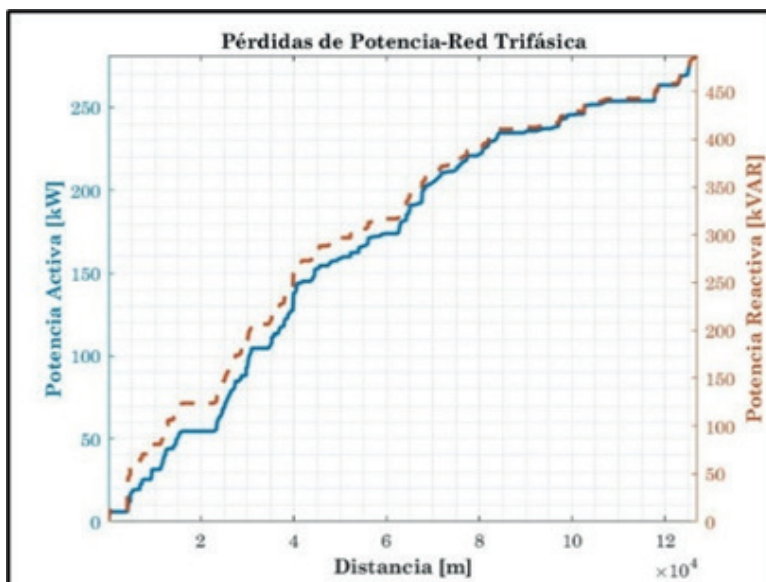


Figura 33. Pérdidas de potencia, red trifásica.

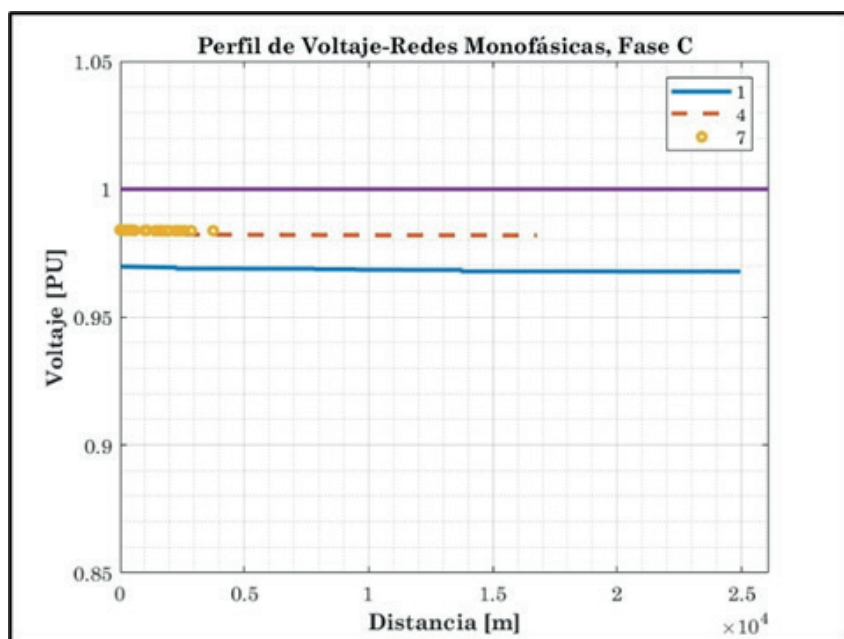


Figura 34. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase C.

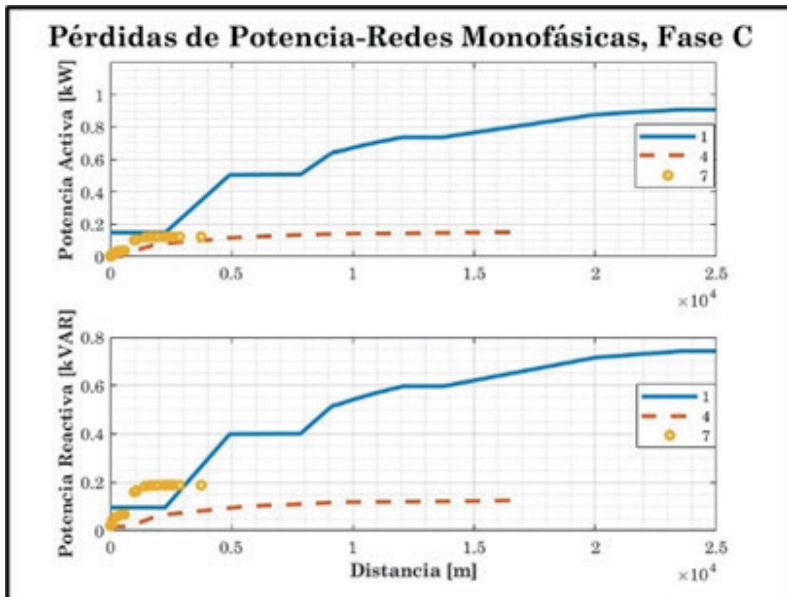


Figura 35. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase C.

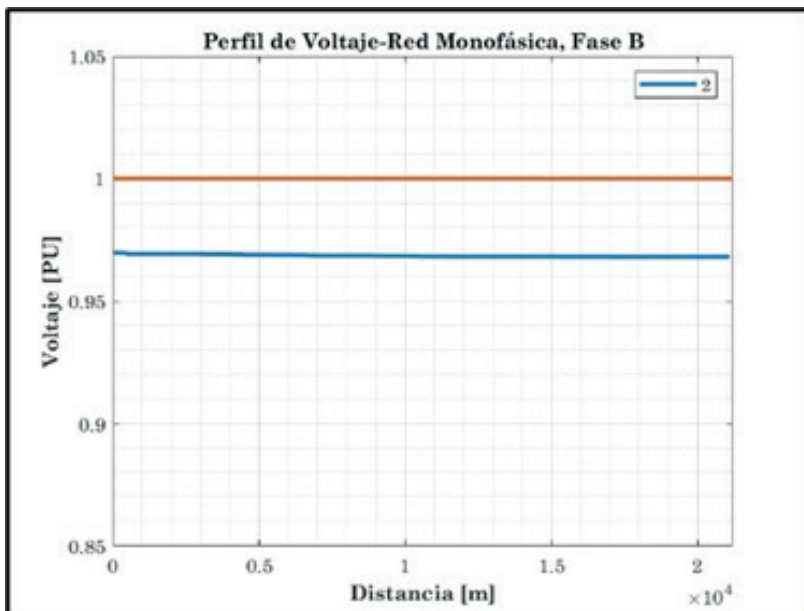


Figura 36. Perfil de voltaje, red monofásica conectada a la fase B.

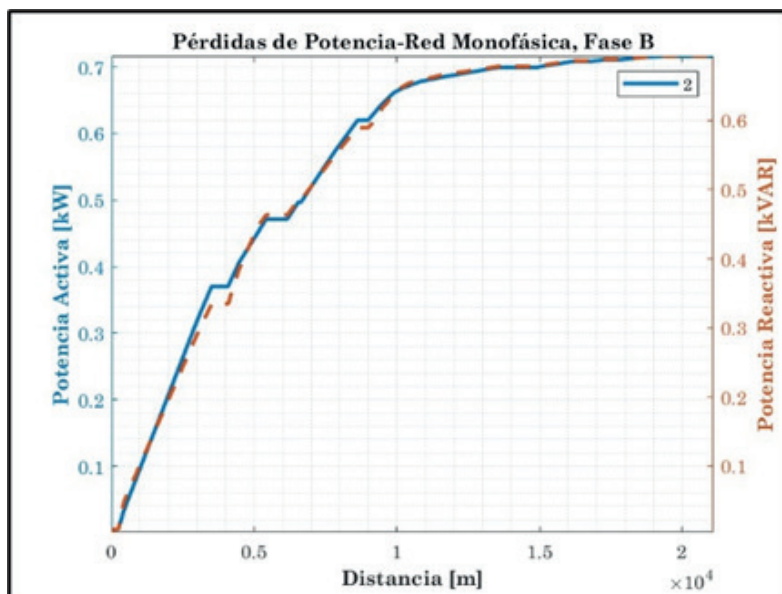


Figura 37. Pérdidas de potencia, red monofásica conectada a la fase B.

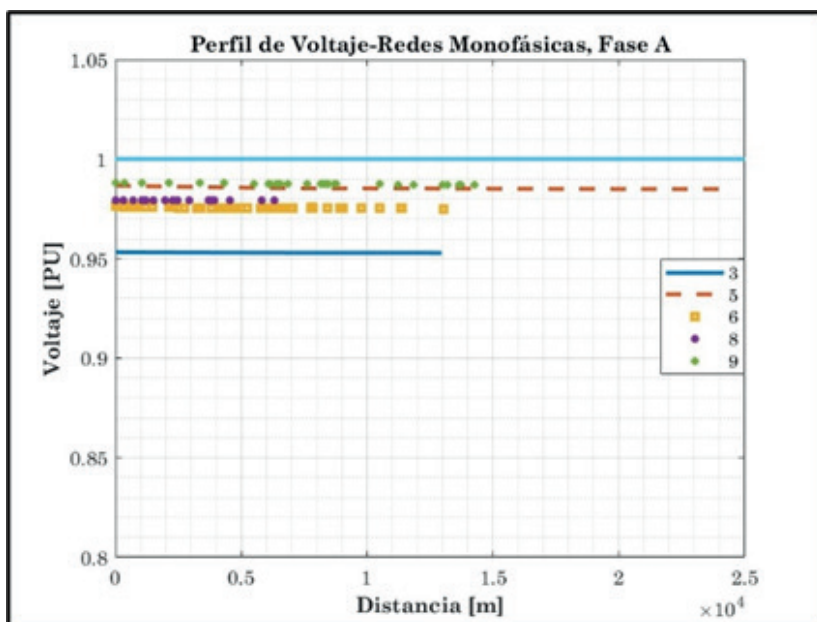


Figura 38. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase A.

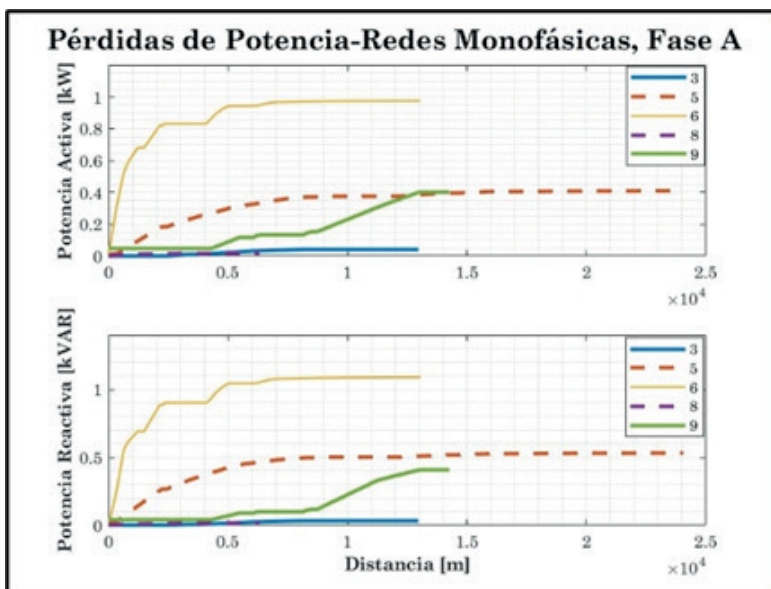


Figura 39. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase A.

Caso 3

El algoritmo GWO se configura para considerar entre seis y diez unidades de GD. Al igual que en los casos anteriores, se optimizan tanto la ubicación como la potencia de las unidades de GD. En las figuras 40 y 41 se muestra el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia de la red trifásica, respectivamente. Por otro lado, en las figuras 42 y 43 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase C, respectivamente.

En las figuras 44 y 45 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de la red monofásica de la fase B, respectivamente. Finalmente, en las figuras 46 y 47 se muestra el perfil de voltaje y pérdidas de potencia de las redes monofásicas de la fase A, respectivamente. La ubicación y la potencia de la unidad de GD se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Ubicación y potencia de la unidad de GD.

Coordenadas	Potencia (kW)
X:604282 Y:9603827	175
X:604285 Y:9603063	150
X:602866 Y:9601658	200
X:600142 Y:9597619	175
X:601624 Y:9591533	225
X:601412 Y:9587564	235
X:603899 Y:9582.273	215
X:607021 Y:9581796	205
X:609614 Y:9585554	185

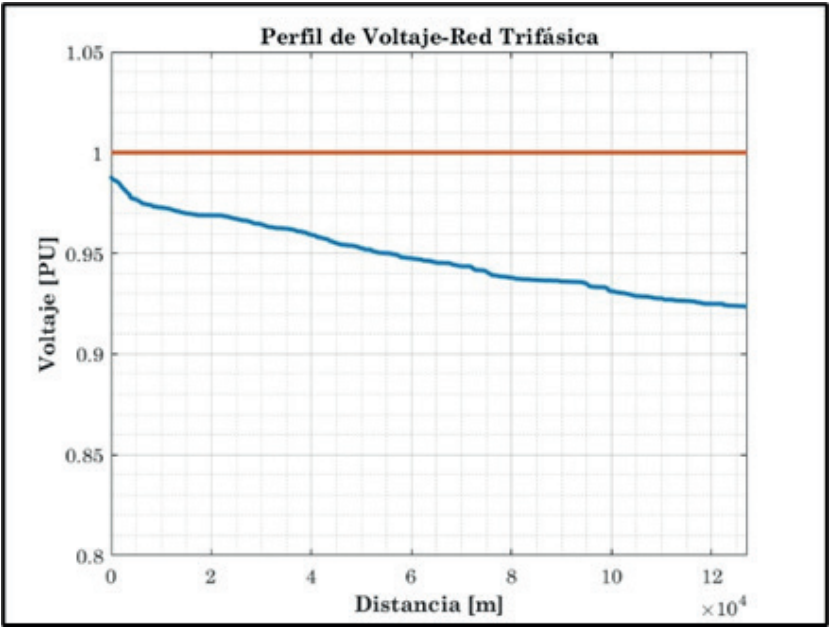


Figura 40. Perfil de voltaje, red trifásica.

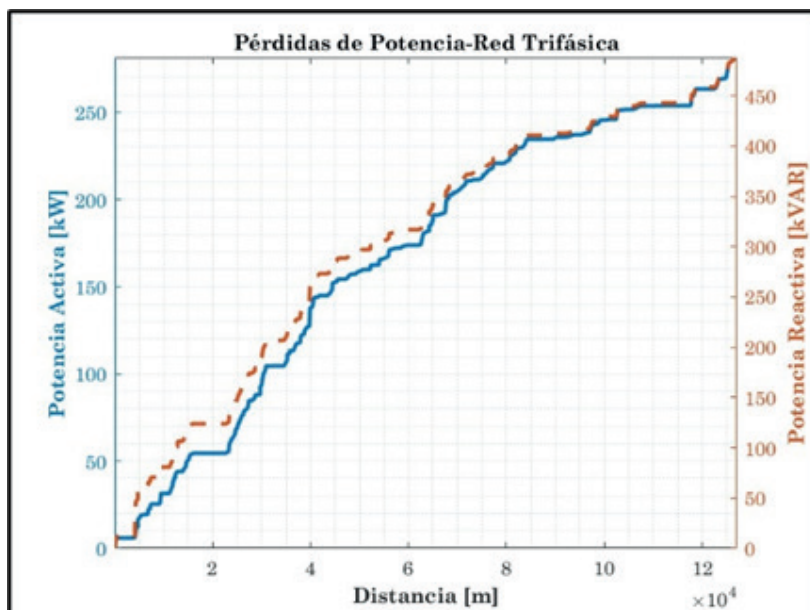


Figura 41. Pérdidas de potencia, red trifásica.

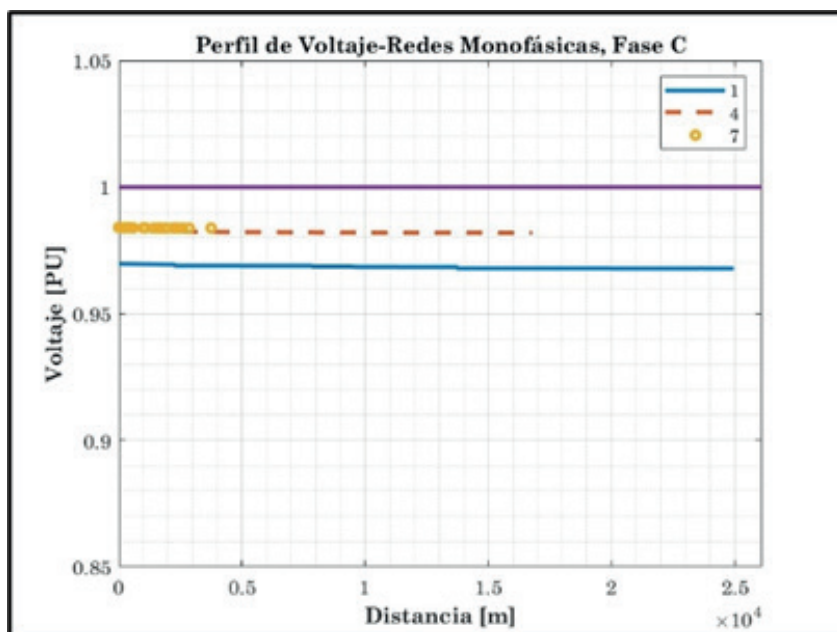


Figura 42. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase C.

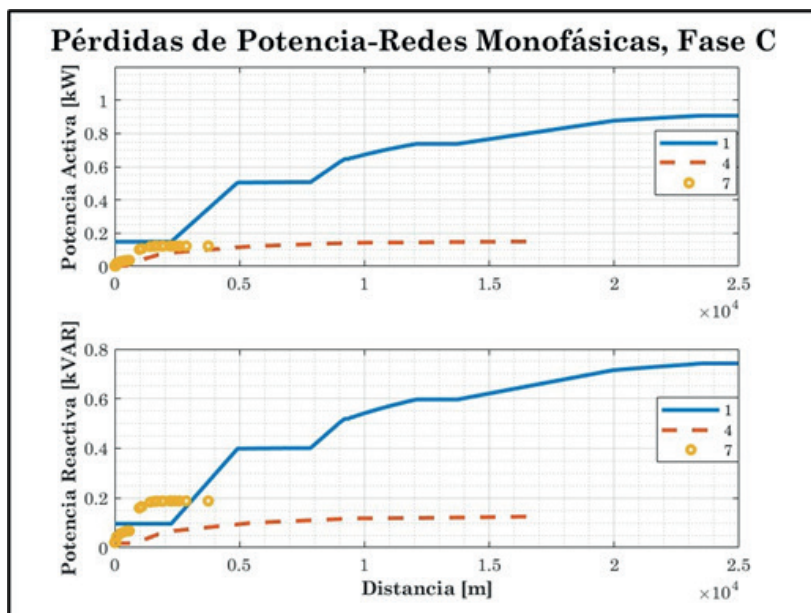


Figura 43. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase C.

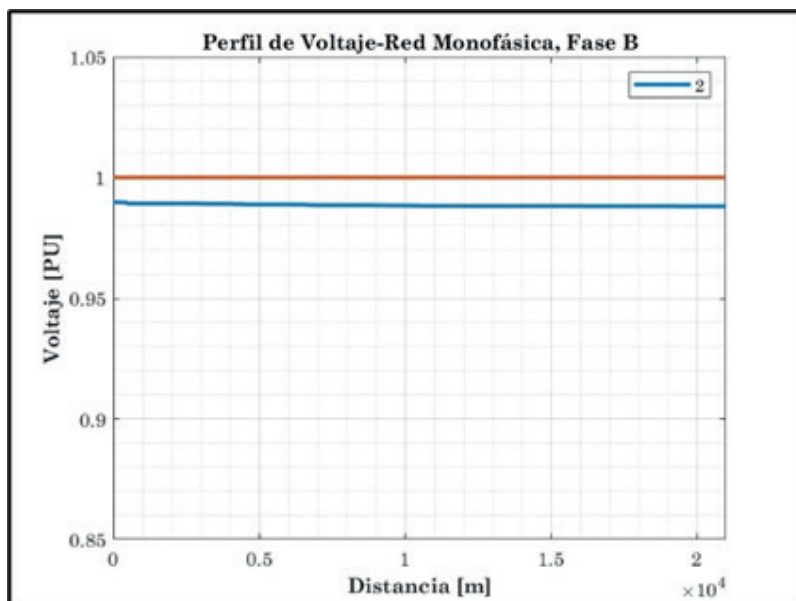


Figura 44. Perfil de voltaje, red monofásica conectada a la fase B.

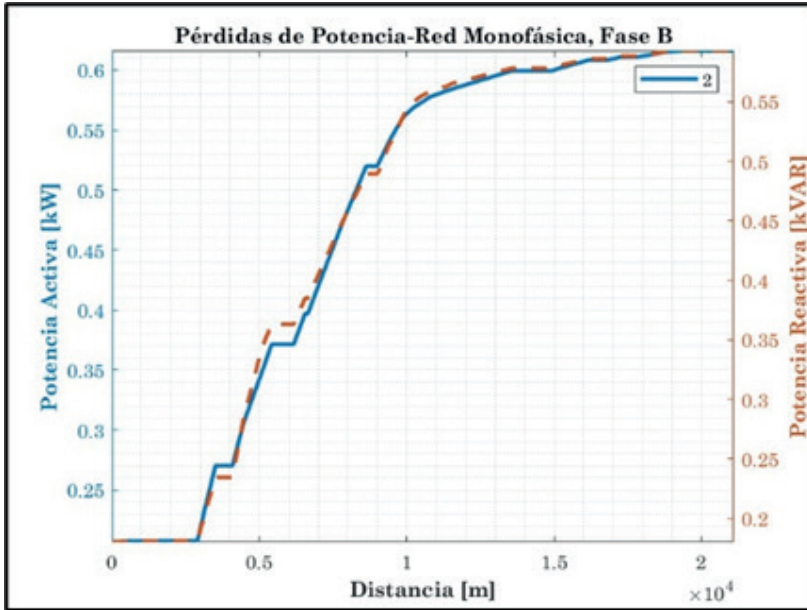


Figura 45. Pérdidas de potencia, red monofásica conectada a la fase B.

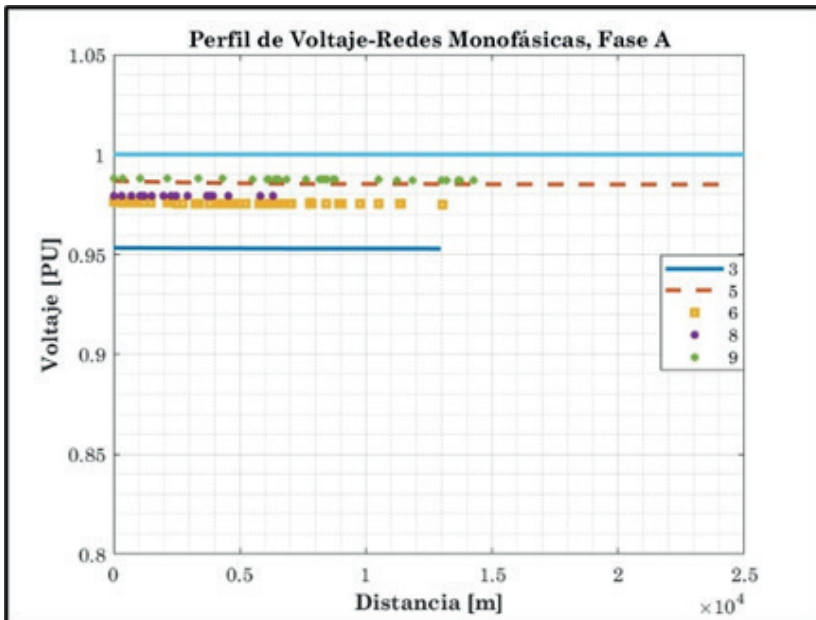


Figura 46. Perfil de voltaje, redes monofásicas conectadas a la fase A.

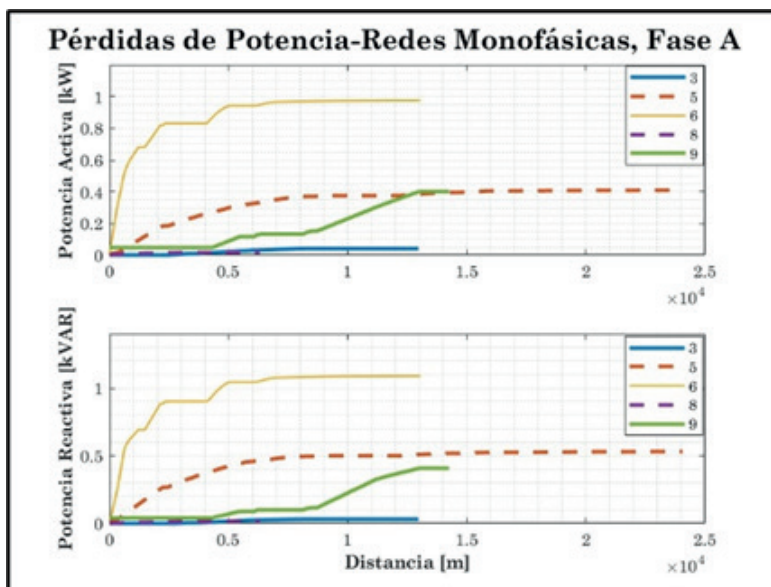


Figura 47. Pérdidas de potencia, redes monofásicas conectadas a la fase A.

Convergencia del algoritmo GWO

Para ubicar y dimensionar las unidades de Generación Distribuida (GD) en el alimentador “Cordón Fronterizo”, se empleó el algoritmo de optimización metaheurística conocido como Grey Wolf Optimizer (GWO), este se utilizó en los tres casos mencionados anteriormente, con diferentes cantidades de unidades de GD. Cabe destacar que el número de iteraciones necesarias para que el algoritmo convergiera y proporcionara las ubicaciones y potencias óptimas de cada unidad de GD varió entre los casos.

En el primer caso, con una sola unidad de GD, el algoritmo GWO requirió un número relativamente menor de iteraciones para converger. Esto se debe a la simplicidad del problema, ya que la búsqueda de una ubicación óptima y el dimensionamiento de una sola unidad implican un espacio de solución más reducido y menos complejo, como resultado, el algoritmo pudo encontrar una solución óptima más rápidamente.

En el segundo caso, con cuatro unidades de GD, el número de iteraciones aumentó en comparación con el primer caso. Este incremento se debe a que la adición de más unidades de GD introduce una mayor cantidad de variables en el problema de optimización, ampliando el espacio de búsqueda. El algoritmo GWO necesita explorar más combinaciones posibles de ubicaciones y potencias para encontrar la configuración óptima, lo que implica un proceso de convergencia más prolongado.

En el tercer caso, con nueve unidades de GD, el número de iteraciones fue aún mayor que en los casos anteriores, la complejidad del problema de optimización aumenta significativamente con la adición de cada unidad de GD, ya que el espacio de solución se expande de manera exponencial.

El algoritmo GWO debe evaluar una cantidad considerablemente mayor de combinaciones posibles para determinar las ubicaciones y potencias óptimas de las nueve unidades. Por lo tanto, se requiere un mayor número de iteraciones para asegurar que el algoritmo converja a la solución más adecuada.

El aumento en el número de iteraciones del algoritmo GWO a medida que se incrementa la cantidad de unidades de GD se explica por la necesidad de explorar un espacio de búsqueda más amplio y complejo. Con cada unidad adicional de GD, el algoritmo debe considerar más variables y combinaciones posibles, lo que requiere un mayor esfuerzo computacional para identificar la solución óptima. Además, el proceso de convergencia del algoritmo implica ajustar las posiciones y potencias de las unidades de GD de manera iterativa, refinando progresivamente la solución hasta alcanzar un equilibrio que minimice las pérdidas de potencia y optimice el perfil de voltaje en el sistema de distribución. En la figura 48 se muestra la convergencia de los casos de estudio.

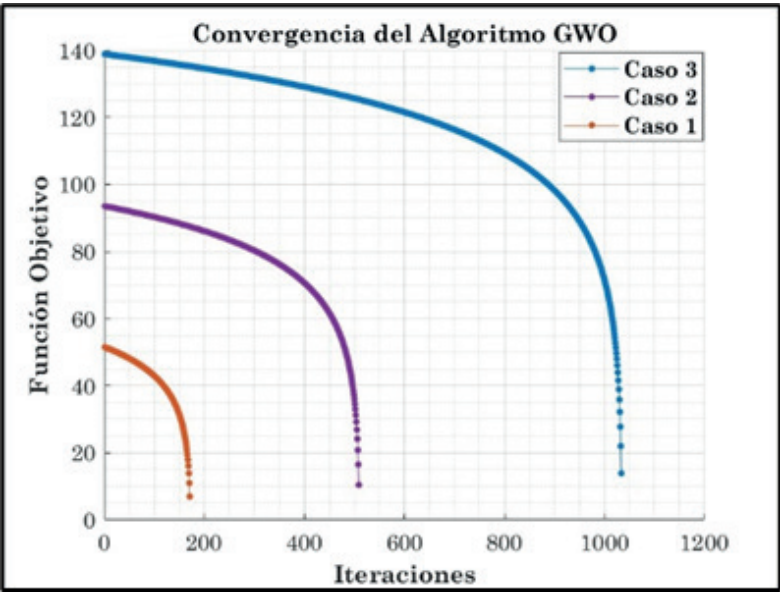


Figura 48. Convergencia de los casos de estudio.

Análisis de resultados

En el primer caso, se considera la instalación de una única unidad de GD en el alimentador. Los resultados muestran que la integración de esta unidad de GD mejora ligeramente el perfil de voltaje en comparación con el caso base, donde no se cuenta con GD. Sin embargo, la reducción en las pérdidas de potencia es limitada debido a que la generación distribuida no está suficientemente extendida a lo largo del alimentador. La ubicación centralizada de una sola unidad no permite un aprovechamiento óptimo de la energía generada, ya que las cargas alejadas de la unidad de GD aún dependen principalmente de la fuente de generación centralizada, lo que resulta en mayores pérdidas por transmisión.

En el segundo caso, se aumenta la cantidad de unidades de GD a cuatro, distribuidas estratégicamente a lo largo del alimentador. Este escenario muestra una mejora significativa tanto en el perfil de voltaje como en la reducción de pérdidas de potencia. Al distribuir las unidades de GD, se logra un suministro más equilibrado y cercano a las cargas, lo que disminuye las pérdidas por transmisión y mejora la estabilidad del voltaje en todo el sistema. Las cargas ubicadas cerca de las unidades de GD se benefician directamente, reduciendo su dependencia de la generación centralizada y aprovechando la energía generada localmente.

En el tercer y último caso, se considera la instalación de nueve unidades de GD distribuidas por todo el alimentador. Los resultados indican una mejora aún mayor en el perfil de voltaje y una reducción significativa de las pérdidas de potencia en comparación con los casos anteriores. La mayor cantidad de unidades de GD permite una cobertura más amplia y eficiente del alimentador, asegurando que las cargas en todas las secciones del sistema estén cerca de una fuente de generación distribuida. Esto minimiza las pérdidas de transmisión al máximo y mejora sustancialmente la calidad del suministro eléctrico. Las cargas reciben un suministro de energía más constante y confiable, lo que contribuye a una mayor eficiencia y estabilidad operativa del sistema.

Al comparar los tres casos, se observa una tendencia clara: a medida que aumenta el número de unidades de GD distribuidas por el alimentador, las pérdidas de potencia disminuyen y el perfil de voltaje mejora. Esto se debe a la reducción de las distancias que la energía debe recorrer desde la fuente de generación hasta las cargas, lo cual minimiza las pérdidas por resistencia en las líneas de transmisión. Además, la distribución más uniforme de las unidades de GD contribuye a una mayor estabilidad del voltaje, evitando caídas significativas que pueden ocurrir cuando la generación está centralizada o insuficientemente distribuida.

Por otra parte, Cuando las cargas están más cerca de las unidades de GD, se produce una serie de beneficios importantes como son:

- I **Reducción de Pérdidas de Potencia:** La proximidad de las cargas a las fuentes de generación disminuye la cantidad de energía perdida en forma de calor debido a la resistencia de las líneas de transmisión. Esto es especialmente notable en los casos con cuatro y nueve unidades de GD, donde la energía generada es consumida más cerca del punto de generación.
- I **Mejora del Perfil de Voltaje:** Un perfil de voltaje más estable y elevado se logra cuando las cargas reciben energía directamente de las unidades de GD cercanas. Esto evita las caídas de voltaje que pueden ocurrir en tramos largos de transmisión desde una fuente centralizada.
- I **Eficiencia Operativa:** La cercanía de las unidades de GD a las cargas permiten una operación más eficiente del sistema de distribución. La energía generada localmente se utiliza de manera más efectiva, lo que reduce la carga sobre la red de transmisión y mejora la confiabilidad del suministro eléctrico.

En la tabla 4, se muestra la comparación de cada caso con el caso base del porcentaje de mejora del perfil de voltaje y del porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, respectivamente. Por otra parte, en la tabla 5 se muestra la comparación de las redes monofásicas conectadas a la fase C con el caso base, detallando el porcentaje de mejora del perfil de voltaje y el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, respectivamente

En la tabla 6 se muestra la comparación de la red monofásica conectada a la fase B con el caso base, detallando el porcentaje de mejora del perfil de voltaje y el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, respectivamente. Finalmente, en la tabla 7 se muestra la comparación de las redes monofásicas conectadas a la fase A con el caso base, detallando el porcentaje de mejora del perfil de voltaje y el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, respectivamente

Tabla 4. Porcentaje de cada caso-red trifásica.

Variables/Casos Red trifásica	Caso 1 (%)	Caso 2 (%)	Caso 3 (%)
Perfil de voltaje	5.61	6.31	7.61
Pérdidas de potencia activa red trifásica	8.43	9.23	10.13
Pérdidas de potencia reactiva red trifásica	6.48	7.28	8.32

Tabla 5. Porcentaje de cada caso-redes monofásicas-Fase C.

Variables/Casos Redes Monofásicas – Fase C		Caso 1 (%)	Caso 2 (%)	Caso 3 (%)
Ramal 1	Perfil de voltaje	8.69	9.19	9.76
	Perdidas de potencia activa	9.09	9.25	9.62
	Perdidas de potencia reactiva	5.26	5.66	5.92
Ramal 4	Perfil de voltaje	1.07	1.2	1.28
	Perdidas de potencia activa	1.45	1.62	1.86
	Perdidas de potencia reactiva	1.67	1.73	1.86
Ramal 7	Perfil de voltaje	3.54	3.76	3.92
	Perdidas de potencia activa	2.65	2.86	3.04
	Perdidas de potencia reactiva	3.31	3.71	3.92

Tabla 6. Porcentaje de cada caso-red monofásica-Fase B.

Variables/Casos Red Monofásica – Fase B		Caso 1 (%)	Caso 2 (%)	Caso 3 (%)
Perfil de voltaje		2.03	2.10	2.22
Pérdidas de potencia activa		3.14	3.21	3.36
Pérdidas de potencia reactiva		2.94	3.10	3.25

Tabla 7. Porcentaje de cada caso-redes monofásicas-Fase A.

Variables/Casos Redes Monofásicas – Fase A		Caso 1 (%)	Caso 2 (%)	Caso 3 (%)
Ramal 3	Perfil de voltaje	1.04	1.10	1.25
	Pérdidas de potencia activa	2.15	2.24	2.34
	Pérdidas de potencia reactiva	2.24	2.31	2.42
Ramal 5	Perfil de voltaje	1.14	1.21	1.29
	Pérdidas de potencia activa	1.77	1.84	1.97
	Pérdidas de potencia reactiva	1.86	1.92	2.01
Ramal 6	Perfil de voltaje	1.07	1.16	1.24
	Pérdidas de potencia activa	1.42	1.51	1.75
	Pérdidas de potencia reactiva	1.39	1.46	1.64
Ramal 8	Perfil de voltaje	1.16	1.24	1.28
	Pérdidas de potencia activa	1.81	1.96	2.12
	Pérdidas de potencia reactiva	1.86	1.95	2.06
Ramal 9	Perfil de voltaje	1.09	1.17	1.31
	Pérdidas de potencia activa	2.04	2.17	2.31
	Pérdidas de potencia reactiva	2.12	2.21	2.36

Síntesis del CAPÍTULO V

Se analizó la integración de unidades de GD en el alimentador “Cordón Fronterizo”. Se exploraron diversos aspectos fundamentales para la ubicación óptima de estas unidades, considerando ciertas restricciones

Se realizó una descripción general del alimentador “Cordón Fronterizo”, destacando sus características principales. A continuación, se abordaron la estimación de la irradiación solar, crucial para la generación de energía a partir de fuentes renovables, y se evalúan las susceptibilidades del terreno a movimientos de masas e inundaciones, factores que influyen en la viabilidad y seguridad de la instalación de unidades de GD.

Se definió la función objetivo y las restricciones del problema de optimización, las cuales guían la búsqueda de soluciones óptimas para la ubicación y dimensionamiento de las unidades de GD.

El CAPÍTULO incluyó también el análisis de tres casos de estudio, cada uno con un número creciente de unidades de GD. Se examinan los resultados obtenidos en términos de pérdidas de potencia y perfil de voltaje, comparando las mejoras logradas en cada caso. Finalmente, se realizó un análisis cuantitativo de los resultados, evaluando el impacto de la integración de las unidades de GD en el sistema de distribución.



CONCLUSIONES

La GD desempeña un papel decisivo en la modernización y optimización de los sistemas eléctricos de distribución, especialmente en alimentadores de gran longitud. Su integración permite acercar la generación al punto de consumo, lo que reduce significativamente las pérdidas de potencia activa y reactiva, mejora el perfil de voltaje y aumenta la resiliencia de la red frente a fluctuaciones de demanda e interrupciones del servicio.

El análisis de tres escenarios con distinta cantidad de unidades de GD —una, cuatro y nueve— evidenció que un mayor número de unidades, correctamente ubicadas y dimensionadas, contribuye de manera más eficaz a la mejora del sistema. El caso con una unidad mostró beneficios limitados, mientras que los escenarios con cuatro y especialmente con nueve unidades presentaron mejoras notables tanto en la reducción de pérdidas como en la estabilidad del perfil de voltaje a lo largo del alimentador Cordón Fronterizo.

El algoritmo GWO demostró ser una herramienta eficaz para abordar el problema de optimización de ubicación y tamaño de unidades de GD en sistemas eléctricos complejos y no lineales. Su capacidad de converger rápidamente hacia soluciones óptimas, manteniendo un equilibrio entre exploración y explotación del espacio de búsqueda, lo convierte en una técnica adecuada para problemas multiobjetivo con múltiples restricciones técnicas y operativas.

El uso de ArcGIS fue clave para incorporar criterios ambientales en la planificación de la GD, permitiendo estimar con precisión la irradiación solar y evaluar la susceptibilidad del terreno a movimientos de masa e inundaciones. Esta integración de variables geoespaciales fortaleció el proceso de toma de decisiones, asegurando que las soluciones propuestas sean técnicamente viables y ambientalmente sostenibles.

En conjunto, esta investigación cumplió con el objetivo general propuesto, al desarrollar una metodología integral para la ubicación óptima de unidades de GD que mejora la eficiencia energética, la calidad del suministro y la sostenibilidad del sistema, utilizando herramientas avanzadas de simulación, optimización y análisis espacial. La energía solar fotovoltaica reduce la huella de carbono al desplazar

la generación de electricidad a base de combustibles fósiles, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Disminuye la contaminación del aire al no emitir gases contaminantes durante su funcionamiento, conserva recursos naturales como el agua y los combustibles fósiles y promueve el desarrollo sostenible al generar energía limpia y eficiente.

La instalación de un sistema fotovoltaico permite reducir significativamente el consumo de energía proveniente de la red eléctrica, generando ahorros en la factura mensual, la inversión inicial se recupera en un período relativamente corto, gracias a los ahorros en el consumo de energía.

El sistema fotovoltaico tiene una vida útil de aproximadamente 10 años, lo que garantiza un retorno de la inversión a largo plazo, la planificación y el diseño adecuado del sistema fotovoltaico son fundamentales para garantizar su correcto funcionamiento y optimización del rendimiento.

REFERENCIAS

Ahmad, S., & Asar, A. U. (2021). Reliability enhancement of electric distribution network using optimal placement of distributed generation. *Sustainability* (Switzerland), 13(20). <https://doi.org/10.3390/su132011407>

Al Qaisi, Z., Alsafasfeh, Q., & Harb, A. (2018). Stability impact of integrated small scale hybrid (PV/Wind) system with electric distribution network. *AIMS Energy*, 6(5), 832–845. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.5.832>

IEEE Power & Energy Society, Zhongguo dian ji gong cheng xue hui (Beijing, C., & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). The 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration : IEEE EI2 2018 : proceedings : Oct. 20-22, 2018, Beijing, China.

Leonowicz, Z., Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Power & Energy Society, IEEE Industry Applications Society, & Industrial and Commercial Power Systems Europe (4th : 2020 : Online). (n.d.). Conference proceedings: 2020 IEEE International Conference Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I & CPS Europe) : 9-12 June, 2020, Madrid, Spain.

Mahmoud, K., & Naoto, Y. (2018). Optimal siting and sizing of distributed generations. In *Power Systems* (Issue 9789811070556, pp. 167–184). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7056-3_6

Monteiro, R. V. A., Bonaldo, J. P., da Silva, R. F., & Bretas, A. S. (2020). Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage. *Electric Power Systems Research*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106319>

Ortega-Romero, I., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., & Ochoa-Malhaber, C. (2023). Optimal Integration of Distributed Generation in Long Medium-Voltage Electrical Networks. In *Energy Reports* (Vol. 10, pp. 2865–2879). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.057>

Wu, X., Shi, Z., Feng, G., & Wang, Q. (2020). Overview of distributed generation planning in electric distribution networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1634(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1634/1/012114>

Kim, J., Kim, T., & Cho, G. (2020). Review and outlook of distributed generation: Technologies, applications, and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109764.

Brevault, L., Dominguez, J., & Chiodo, J. D. (2021). A comprehensive review on distributed generation and its integration challenges in low-voltage distribution networks. *IEEE Access*, 9, 85569-85590.

Mokhtari, M., Abusorrah, A., & Ismail, A. M. (2022). Techno-economic assessment of distributed generation technologies: A review. *Renewable Energy*, 185, 1613-1636.

Ullah, A., Khalid, M., Shahzad, A., & Anwer, A. G. (2020). A comprehensive review on the classification, characteristics, and challenges of distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110022.

Liao, K., Chen, Z., Wang, B., & Cao, Y. (2021). Advances in distributed generation planning: A review of optimization models and algorithms. *Applied Energy*, 293, 116926.

Li, Z., Zhu, Z., & Li, Z. (2018). Interpolation methods comparison for estimating meteorological elements based on GIS spatial analysis technology. In *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*.

Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69.

Zaitchik, B. F., & Rodell, M. (2008). Spatial interpolation of NASA MODIS land surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 35(4).

Iam, M. M., Hasanuzzaman, M., & Islam, S. M. (2018). Optimization techniques for the sizing and siting of distributed generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2990-3009.

Khatib, T., Fekih, A., & Ben Salah, M. (2019). A survey of optimization techniques used in distributed generation systems: Models and algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 301-316.

IPCC. (2018). Special Report on Global Warming of 1.5°C.

Nelson, J. (2019). *The Physics of Solar Cells*.

NASA. (2019). Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE).

World Health Organization. (2019). Effects of UV Radiation on Humans

Parpinelli, R. S., & Lopes, H. S. (2021). A hybrid metaheuristic based on gravitational search algorithm and artificial bee colony for numerical optimization problems. *Applied Soft Computing*, 108, 107636. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107636>

Jordehi, A. R., & Ngo, H. H. (2022). A comprehensive review on optimization algorithms and their applications in sustainable water resources management. *Journal of Environmental Management*, 304, 114032. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114032>

Bonyadi, M. R., Michalewicz, Z., & Siebert, J. P. (2021). An analysis of particle swarm optimization and its variants on 23 benchmark functions from a practical perspective. *Information Sciences*, 554, 156-200. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.10.006>
lam, M. M., Hasanuzzaman, M., & Islam, S. M. (2018). Optimization techniques for the sizing and siting of distributed generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2990-3009.

Gandomi, A. H., Alavi, A. H., & Mirjalili, S. (2020). Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 32(5), 13131-13149. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04328-z>.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

Bhandari, P. (2020, June 12). What is quantitative research? Definition, uses and methods. Scribbr. Retrieved from <https://www.scribbr.com/methodology/quantitative-research/>

Sutton, J., & Austin, Z. (2020). Qualitative research: Data collection, analysis, and management. *Canadian Journal of Hospital Pharmacy*, 68(3), 226-231.

Bhandari, P. (2020). What Is Quantitative Research? | Definition, Uses & Methods. Scribbr. Recuperado de <https://www.scribbr.com/methodology/quantitative-research/>

Kowalski, F., & Kowalski, S. (2020). Exploring the role of tablet PCs in promoting active learning and real-time communication to enhance learning in the university setting. En *Cambridge Handbook of Engineering Education Research*. Cambridge University Press.

Swanson, E., Kopotic, K., Zamarro, G., Mills, J. N., Greene, J. P., & Ritter, G. W. (2021). An Evaluation of the Educational Impact of College Campus Visits: A Randomized Experiment. *AERA Open*. <https://doi.org/10.1177/2332858421989707>

Bhandari, P. (2020). What Is Quantitative Research? | Definition, Uses & Methods. Scribbr. Recuperado de <https://www.scribbr.com/methodology/quantitative-research/>

Kowalski, F., & Kowalski, S. (2020). Exploring the role of tablet PCs in promoting active learning and real-time communication to enhance learning in the university setting. En *Cambridge Handbook of Engineering Education Research*. Cambridge University Press.

Rong, K., Zhou, D., Shi, X., & Huang, W. (2022). Social Information Disclosure of Friends in Common in an E-commerce Platform Ecosystem: An Online Experiment. *Production and Operations Management*, 31(3), 984-1005. <https://doi.org/10.1111/poms.13591>

Swanson, E., Kopotic, K., Zamarro, G., Mills, J. N., Greene, J. P., & Ritter, G. W. (2021). An Evaluation of the Educational Impact of College Campus Visits: A Randomized Experiment. *AERA Open*. <https://doi.org/10.1177/2332858421989707>

Van Gerwen, N., Buskens, V., & van der Lippe, T. (2018). Individual training and employees' cooperative behavior: Evidence from a contextualized laboratory experiment. *Rationality and Society*, 30(4), 432–462. <https://doi.org/10.1177/1043463118771428>

AUTORES

CRISTIAN JORGE PEÑAHERRETA BETANCOURT:

Corporación Nacional de Electricidad, Guayas, Guayaquil
<https://orcid.org/0009-0003-8536-5227>

MARÍA RODRÍGUEZ-GÁMEZ:

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-3178-0946>

JESSENIA ISABEL BETANCOURT PEREIRA:

Unidad Educativa Principito y Marcel Laniado de Wind, cantón Machala, provincia de El Oro,
Provincia El Oro, Machala
<https://orcid.org/0000-0001-9821-8048>

ISAAC DAVID ORTEGA ROMERO:

Filiación: Universidad Politécnica Salesiana, Azuay, Cuenca
<https://orcid.org/0009-0000-6627-6649>

LENIN AGUSTÍN CUENCA ÁLAVA:

<https://orcid.org/0000-0002-5079-9469>
Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

WILBER MANUEL SALTOS ARAUZ:

<https://orcid.org/0009-0008-7925-317X>
Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

GUILLERMO ANTONIO LOOR CASTILLO:

<https://orcid.org/0000-0002-4986-7524>
Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

ÍTALO HUMBERTO NAVARRETE GARCÍA:

<https://orcid.org/0000-0003-0798-3321>

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

GILBERTO RAMIRO HOLGUÍN INTRIAGO:

<https://orcid.org/0000-0002-8263-6218>

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

JOAN MANUEL SALTOS GONZÁLEZ:

<https://orcid.org/0000-0001-5600-3479>

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

JULIO CESAR MERA MACIAS:

<https://orcid.org/0000-0002-4035-4159>

Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Automatización, Portoviejo, Manabí, Ecuador

SASKIA GABRIELA PEÑAHERRERA BETANCOURT:

<https://orcid.org/0009-0002-0229-0737>

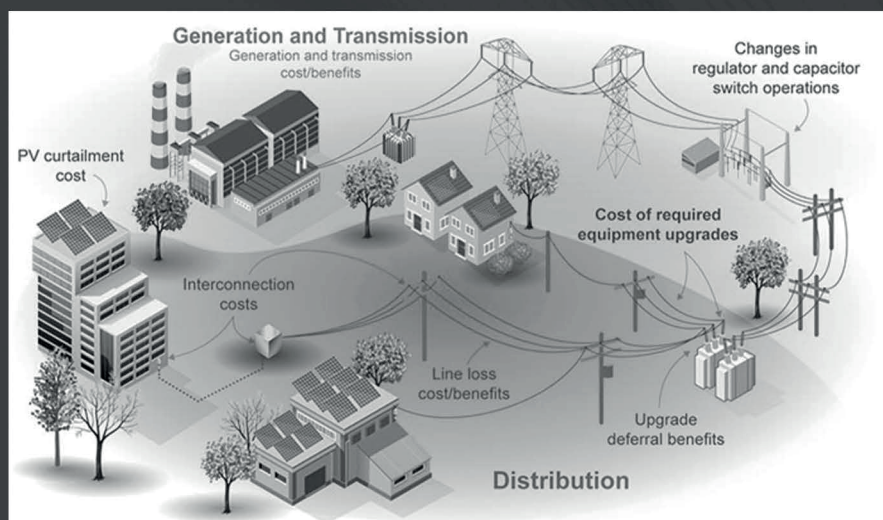
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador

ANTONIO VÁZQUEZ PÉREZ:

<https://orcid.org/0000-0002-2994-8626>

Universidad de Alicante, Alicante, España

ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MODO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMO SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN EL ALIMENTADOR CORDÓN FRONTERIZO DE LA UNIDAD DE NEGOCIO EL ORO



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br

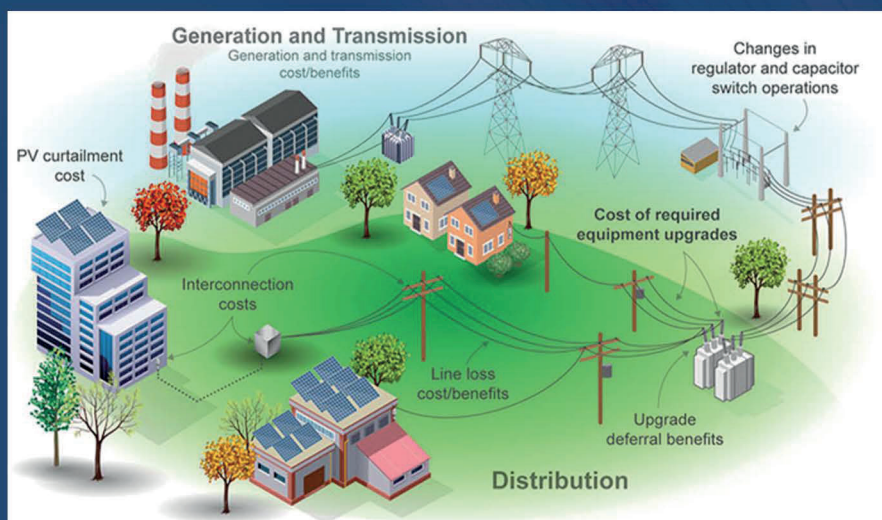


[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL MODO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMO SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN EL ALIMENTADOR CORDÓN FRONTERIZO DE LA UNIDAD DE NEGOCIO EL ORO



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br