

Aplicación del algoritmo de caza de ballenas al problema de balance de fases en sistemas de distribución desbalanceados

**Gina Alejandra Sarmiento Vargas
Elkin Julian Avila Furque**

**Proyecto sometido como requisito parcial
para optar por el título de
Ingenieros Eléctricos**

Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD.

**8 de abril de 2022
Área de Sistemas Eléctricos de Potencia
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Documento final

Monografía presentada como requisito parcial de grado a la dirección del proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Gina Alejandra Sarmiento Vargas, Estudiante.
Elkin Julian Avila Furque, Estudiante.
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica.

Aprobado por:
Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD. Director.
Facultad de Ingeniería,
Universidad Distrital Francisco José de Caldas,

Bogotá D.C., 8 de abril de 2022

Dedicatoria

Dedicada a nuestros familiares, especialmente a nuestros padres, ya que sin su apoyo incondicional y comprensión esto no hubiera sido posible, y aquellos familiares que ya no nos acompañan, pero que nos dieron todo su amor y apoyo cuando estuvieron con vida; también a nuestros amigos que siempre estuvieron en esta etapa de la vida. A todas las personas que nos han ayudado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

A la querida Universidad Distrital...

Agradecimientos

A Dios por hacer esto posible y darnos fortaleza en los días difíciles, a nuestros familiares por su incondicional apoyo, a nuestros compañeros y amigos que nos brindaron ayuda y apoyo durante todo el proceso, a los profesores que nos compartieron su conocimiento para formarnos como profesionales y como personas, y a todas aquellas personas que nos acompañaron en este proceso formativo para poder cumplir la anhelada meta de ser ingenieros eléctricos.

A mis padres por darme la oportunidad de estudiar, por la entera confianza, los consejos y paciencia que me brindan mi mamá Martha y mi papá José, porque el amor de ellos ha sido un impulso para salir adelante ante diferentes adversidades

Un agradecimiento especial a nuestro director, el profesor Oscar Danilo Montoya, por guiarnos en esta monografía, por estar pendiente y darnos apoyo en cada momento de este proceso, quedamos infinitamente agradecidos por depositar su confianza en nosotros para este trabajo de grado.

ATT: Gina Sarmiento

Quiero agradecerle a Dios por hacer esto posible y darnos fortaleza en los días difíciles. Quiero dedicar este trabajo de grado a mi mamá, quien nunca perdió su fe en mí y que siempre me dio ánimo para luchar cada día por mis sueños, por ser el ejemplo de alguien tan perseverante para alcanzar sus metas, hoy te agradezco todo lo que hiciste por mí, mamá. Agradezco a mis hermanos por ser ese ejemplo de vida que me guió para ser quien soy hoy, gracias por darme su apoyo incondicional. A mis abuelitos quienes desde la sencillez de su vida me enseñaron valores que jamás olvidaré y los cuales agradezco porque sé que siempre me dieron lo mejor, a mis compañeros de la universidad que me brindaron su amistad y apoyo, al profesor Danilo quien nos apoyó, nos tuvo paciencia y creyó en nosotros. Quiero agradecer a todas las personas que en este proceso de formación me han brindado su cariño y apoyo, el cual hoy ha dado frutos. Gracias a las personas que hoy forman parte de mi vida, gracias a todos ustedes por ser parte de este logro y el cual quiero compartir con ustedes.

ATT: Julian Avila

Resumen

En este documento se describe el problema de balance de fases en sistemas de distribución, empleando optimización matemática, mediante la presentación se emplea el método de flujo de potencia basado en la matriz triangular superior en su versión trifásica y de optimización llamado caza de ballenas (WOA). Para resolver dicho modelo, se emplea el software Digsilent en conjunto con la herramienta MATLAB como el compilador del programa, presentando la implementación del modelo de distribución radial de 8, 25 y 37 nodos. Además, se realiza una explicación del proceso para obtener la mejor solución al desbalance de fases en los diferentes sistemas radiales implementados y como es el proceso para llegar a dicha solución.

Se emplean los sistemas de prueba IEEE 8, 25 y 37 nodos para validar la metodología de solución propuesta; los resultados que se obtuvieron mediante el método de optimización caza de ballenas WOA se compararon con otros métodos de optimización aplicados al problema de balance de fases como es el caso del método referencia, CBGA y DVSA, adicionalmente con los resultados obtenidos con el software Digsilent para cada caso se realizó un análisis de los resultados obtenidos y de dicho proceso se pudo obtener las gráficas comparativas de resultados que nos permiten observar con más detalle el comportamiento de cada uno de los métodos y la diferencia entre ellos.

Abstract

This document describes the phase balance problem in distribution systems, using mathematical optimization through the presentation of the power flow method based on the upper triangular matrix in its three-phase version and optimization called whaling (WOA). To solve this model, the Digsilent software is used in conjunction with the MATLAB tool as the program compiler, presenting the implementation of the radial distribution model of 8, 25 and 37 nodes. In addition, an explanation of the process is made to obtain the best solution to the phase imbalance in the different radial systems implemented and how is the process to reach said solution.

IEEE 8, 25 and 37 node test systems are used to validate the proposed solution methodology; The results obtained by the WOA whaling optimization method were compared with other optimization methods applied to the phase balance problem, such as the reference method, CBGA and DVSA, in addition to the results obtained with the Digsilent software for In each case, an analysis of the results obtained was carried out and from this process it was possible to obtain the comparative graphs of results that allow us to observe in more detail the behavior of each of the methods and the difference between them.

Índice general

1. Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Conceptualización	2
1.4. Revisión de la literatura	5
1.5. Justificación	6
1.6. Objetivos	7
1.6.1. Objetivo General	7
1.6.2. Objetivos Específicos	7
1.7. Contribuciones del proyecto de grado	7
1.8. Organización del documento	8
2. Formulación matemática	9
2.1. Función objetivo	9
2.2. Restricciones	9
3. Metodología propuesta	12
3.1. Etapa esclava: Flujo de potencia	12
3.1.1. Formulación del flujo de potencia monofásico	12
3.1.2. Equivalente trifásico para flujo de potencia	14
3.2. Etapa maestra: Algoritmo de caza de ballenas	17
4. Sistema de prueba y escenarios de simulación	20
4.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos	20
4.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos	21
4.3. Sistema de prueba IEEE 37 nodos	22
5. Validación del flujo de potencia DIGSILENT y MATLAB	26
5.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos	26
5.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos	27
5.3. Sistema de prueba IEEE 37 nodos	29
6. Balance óptimo de fases	31
6.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos	31
6.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos	33
6.3. Sistema de prueba IEEE 37 nodos	34
7. Conclusiones y trabajos futuros	36
8. Bibliografía	38
Anexos	42

Índice de tablas

2.1. Seis posibles conexiones de una demanda trifásica en un nodo arbitrario del sistema de distribución.	10
4.1. Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 8 nodos.	20
4.2. Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 8 nodos.	21
4.3. Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 25 nodos.	22
4.4. Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 25 nodos.	22
4.5. Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 37 nodos.	24
4.6. Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 37 nodos.	25
5.1. Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 8 nodos.	26
5.2. Comparación de pérdidas entre DIgSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 8 nodos.	27
5.3. Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 25 nodos.	28
5.4. Comparación de pérdidas entre DIgSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 25 nodos.	28
5.5. Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 37 nodos.	29
5.6. Comparación de pérdidas entre DIgSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 37 nodos.	30
6.1. Parámetros usados en la implementación del WOA.	31
6.2. Resultados balance de fases sistema de 8 Nodos	32
6.3. Resultados balance de fases sistema de 25 nodos	33
6.4. Resultados balance de fases sistema de 37 Nodos	34

Índice de figuras

2.1. Ejemplo de cambio de conexión en las cargas de un nodo desde la conexión ABC hacia la conexión BAC.	10
3.1. Equivalente monofásico de un sistema radial de 7 nodos.	12
3.2. Carga trifásica conectada en estrella.	15
3.3. Carga conectada en triángulo.	15
4.1. Equivalente monofásico para el sistema IEEE 8 nodos.	20
4.2. Equivalente monofásico para el sistema IEEE 25 nodos.	21
4.3. Equivalente monofásico para el sistema IEEE 37 nodos.	23
6.1. Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 8 nodos.	32
6.2. Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 25 nodos.	33
6.3. Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 37 nodos.	35

1. Capítulo 1

1.1. Introducción

Las redes de distribución ocupan un lugar importante en el sistema eléctrico, siendo su función tomar la energía eléctrica de la fuente y distribuirlas o entregarlas a los consumidores [1]. La efectividad con que las redes de distribución realizan esta función se mide en términos de regulación de voltaje, continuidad del servicio, flexibilidad, eficiencia y costo operativo [2]. Las tareas de la distribución son el diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema para poder brindar, al menor costo posible, un servicio eléctrico adecuado, el área bajo consideración, en la actualidad y en un futuro próximo [3]. Las redes de distribución toman diferentes formas dependiendo de las características de la carga a servir, existiendo, sin embargo, varios principios comunes que estas deben cumplir. Así, las redes de distribución están en la obligación de suministrar un servicio eléctrico confiable, seguro y eficiente a todos los usuarios finales [4].

Una característica importante de los sistemas de distribución es los niveles de pérdidas de energía que presentan en comparación con los sistemas de transmisión [5]. Sin embargo, como cualquier sistema físico, las pérdidas en distribución no se pueden eliminar, aunque si se pueden minimizar mediante la planificación adecuada del sistema de distribución [6].

Para reducir pérdidas de energía en sistemas de distribución se pueden emplear diversas herramientas y metodologías, entre las cuales se destacan, el uso de compensación activa y reactiva de tipo paralela [7], así como, la reconfiguración de la red [8], y el balance óptimo de fases [5], entre otras. De las anteriores, el balanceo de fases es la estrategia más económica para reducir pérdidas en sistemas de distribución trifásicos desbalanceados, esto debido a que no requiere de la instalación de nuevos elementos en el sistema. Por lo anterior, en este proyecto de investigación se abordará el tema de balance de fases, tal como se plantea en la siguiente sección.

1.2. Planteamiento del problema

El problema actual en los sistemas eléctricos de distribución es que su operación es de forma desbalanceada, esto se debe a la naturaleza de las cargas y a la configuración de la red. Un claro ejemplo es el uso de los transformadores de distribución monofásicos, los cuales se conectan de manera aleatoria en las fases del sistema de potencia, ya que es más económico tener derivaciones de una o dos fases del circuito principal trifásico que construir un sistema completamente trifásico para alimentar a los usuarios finales [9]. El desbalance de las cargas en los sistemas eléctricos de distribución provoca escenarios no deseados como: la aparición de corriente por el neutro del sistema, el aumento de corriente en alguna de las fases del sistema y sobretensiones en

las fases que tienen menos cargadas conectadas [10]. Como consecuencia se va a tener un aumento en las pérdidas de potencia, una inadecuada operación de las protecciones y efectos negativos sobre la calidad de potencia [10]. Ante los problemas mencionados anteriormente, se propone realizar un balance de fases en los sistemas de distribución mediante un algoritmo de optimización que permita obtener un adecuado ordenamiento de las cargas por fase, para minimizar las pérdidas de potencia en el sistema de distribución. Del mismo modo, se busca reducir la corriente a neutro y mejorar los perfiles de tensión, permitiendo una adecuada operación del sistema, cumpliendo con parámetros de calidad de energía, calidad de potencia y calidad de servicio, siguiendo la normatividad impuesta por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) [11]. De igual forma, las empresas distribuidoras reducirán los costos operativos, ya que las pérdidas de potencia serán menores y podrán abastecer la demanda de energía de los usuarios con una menor inversión [11].

Por consiguiente, en este trabajo se busca dar respuesta a la siguiente pregunta: *¿Cuánto se pueden reducir las pérdidas de potencia en sistemas de distribución trifásicos desbalanceados mediante la aplicación del algoritmo de optimización de búsqueda por caza de ballenas al problema de balance óptimo de fases?*

Es importante mencionar que el algoritmo de optimización por caza de ballenas ha sido empleado en la literatura especializada para resolver problemas de optimización matemática en sistemas eléctricos como ubicación y dimensionamiento de generadores distribuidos y selección óptima de generadores distribuidos [12]; sin embargo, este no ha sido aplicado al problema de balance de fases, con lo cual es una oportunidad de investigación en la que este proyecto de investigación pretende aportar.

La principal herramienta para analizar las redes de distribución es el flujo de potencia y su principal problema es la conformación no lineal de ecuaciones como un resultado de la presencia de productos de variables y funciones trigonométricas, que demanda el uso de métodos numéricos para encontrar una solución [13]. Sin embargo, cuando se trata del problema de balance óptimo de fases, se debe tener en cuenta que aparecen variables binarias en su formulación, las cuales deben considerarse de manera especial mediante algoritmos de optimización combinatoria [5]. Por lo cual, esta investigación propone la aplicación del método de optimización de caza de ballenas (WOA, por sus siglas en inglés) para el problema de flujo de potencia en sistemas de distribución desbalanceados, permitiendo hallar el balance óptimo con dicho método y a partir de dichos resultados realizar una comparación con otros métodos de optimización y adicionalmente con simulaciones realizadas en el software DigSILENT lo cual permite corroborar los resultados obtenidos en el método WOA.

1.3. Conceptualización

En esta sección se abordan algunos conceptos fundamentales relacionados con la planeación y operación de sistemas eléctricos de distribución, los cuales se definen en aras de claridad.

- a) **Sistemas eléctricos de distribución:** Los sistemas eléctricos de distribución se definen como, según [14], el conjunto de elementos encargados de conducir la

energía desde una subestación de potencia hasta el usuario final. Generalmente, los sistemas de distribución están conformados por cables subterráneos, aéreos y los transformadores de distribución [15]. El sistema de distribución, según [16] constituye una parte importante del sistema eléctrico de potencia (SEP); debido a su magnitud y complejidad, presenta un gran dinamismo y rápido avance tecnológico para la incorporación de nuevos elementos o crecimiento propio de la demanda eléctrica.

- b) **Sistemas de prueba IEEE:** Los sistemas de prueba de la IEEE han sido desarrollados desde hace 25 años y algunos fueron hechos para propósitos académicos[17]. Son utilizados para probar los diferentes planteamientos teóricos que se han venido dando como lo son: Nuevos métodos de solución para flujos de potencia, algoritmos de optimización para ubicación de GD, ubicación de condensadores, ubicación de baterías, reconfiguración de redes, selección óptima de calibre de conductores, entre otros. Se emplean los sistemas de pruebas del IEEE, ya que al conocerse sus parámetros y variables se pueden implementar en software y simuladores. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizarán los sistemas de prueba IEEE para desarrollar el balance de fases y con ello poder determinar si la solución planteada mejora las condiciones operativas del sistema.
- c) **Flujo de potencia:** En [18], el flujo de potencia o flujo de carga, se utiliza ampliamente en el funcionamiento y la planificación del sistema eléctrico. El modelo de flujo de potencia de un sistema eléctrico se construye usando los datos pertinentes de la red, carga y generación. Los resultados del modelo de flujo de potencia incluyen las tensiones en las barras, los flujos de línea en la red y las pérdidas del sistema. Estos resultados se obtienen resolviendo las ecuaciones de equilibrio de potencia en los nodos. Dado que estas ecuaciones no son lineales, se suelen utilizar técnicas iterativas como el método Newton-Raphson, Gauss-Seidel y el método de desacoplamiento rápido para resolver este problema. En [18], sin embargo, existen métodos de solución para flujos de potencia en sistemas de distribución, los cuales aprovechan las características de estos, ya que al ser radiales se pueden representar en términos de la generación y demanda. Los métodos de solución en sistemas de distribución son:
 - i. **Aproximaciones sucesivas:** Según [19], se basa en una modificación del método numérico convencional de Gauss-Seidel, ya que permite trabajar con variables complejas, reduciendo el número de cálculos necesarios y evitando trabajar el flujo de potencia en coordenadas polares.
 - ii. **Barrido iterativo:** Según [20], se especializa en resolver flujos de carga en sistemas de distribución radiales. Puesto que este tipo de redes tienen valores de resistencia comparables con los de reactancia de las líneas, además no tiene que realizar la inversión de la matriz Jacobiana en cada iteración y está basado en dos pasos básicos, actualización de tensiones y corrientes, hasta lograr la convergencia deseada. Según [20], el método se basa en la teoría de grafos en donde se construye una matriz de incidencia que representa la topología de la red, relacionando nodos con ramas. También se basa en las leyes de Kirchhoff y la ley de Ohm [21].

- iii. **Método triangular:** Según [22], se basa en la teoría de grafos en donde se construye una matriz triangular que representa la topología del sistema por medio de la relación entre las corrientes que transportan las ramas y las corrientes netas inyectadas en los nodos, a través de la aplicación de la segunda ley de Kirchhoff en forma matricial.
 - iv. **Métodos basados en series de Taylor:** Según [23], son soluciones que permiten trabajar con variables complejas a través de la linealización de una función por medio de la aplicación de la serie de Taylor alrededor de cero en la ecuación de balance de potencia.
- d) **Pérdidas de potencia:** Según [24], se clasifican en dos categorías en función de su naturaleza: pérdidas técnicas, asociadas a características propias de las redes, producidas en los transformadores, conductores y equipos eléctricos, que corresponden a la diferencia entre la energía que se entrega a un sistema y la que es utilizada por el usuario final (independiente del pago de esta) y pérdidas no técnicas asociadas con ineficiencias administrativas, comerciales como facturación, gestión deficiente y por prácticas de los usuarios como fraude o conexiones ilegales.
- e) **Optimización en sistemas de distribución por balance de fases (BF):** El mayor porcentaje de pérdidas en los sistemas de distribución se presenta en alimentadores primarios y redes secundarias, por lo cual ha sido impredecible que se tomen estrategias para reducirlas debido a la incidencia económica que ello implica. De ahí se vuelve esencial minimizar los costos de operación mediante un proceso de optimización [16]. La optimización en sistemas de distribución está ligada al flujo de carga óptimo (OPF), el cual busca las mínimas pérdidas de potencia para minimizar costos de operación y maximizar el beneficio neto del sistema [25]. El BF es uno de los métodos utilizados en sistemas de distribución desbalanceados para su optimización. Este se puede representar por medio de un problema discreto de diferentes combinaciones de conexión para las cargas presentes en el sistema [26], el cual busca la conexión adecuada para cada carga, tal que se garanticen las menores pérdidas de potencia. En [27] el problema de flujo de potencia en redes de distribución trifásicas desequilibradas se aborda utilizando un método numérico sin derivadas, basado en la matriz triangular superior. La matriz triangular superior se obtiene a partir de la conexión topológica entre los nodos de la red (un método basado en gráficos). La principal ventaja del método propuesto es la posibilidad de trabajar con cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas, incluidas las conexiones en delta y estrella. Para el BF se propondrá una versión de optimización de búsqueda por caza de ballenas combinado con la versión trifásica del método de solución de flujo de potencia triangular, con la que se determinará la conexión óptima de las cargas, permitiendo que se minimicen las pérdidas de potencia en los sistemas de distribución desbalanceados.

1.4. Revisión de la literatura

En la literatura especializada se han planteado diferentes métodos y propuestas para el BF a partir de la reorganización de las demandas conectadas a estas. Este problema fue introducido por primera vez en 1998 por [28], el cual formula el BF por medio de programación entera mixta con restricciones lineales, donde se busca reducir el desbalance de las corrientes en las líneas de los sistemas de distribución. Un año después, en 1999 [29], desarrolla el BF a través del algoritmo metaheurístico Recocido Simulado, con el que se minimizaron costos totales de operaciones. En el año 2000, [30] plantea el BF utilizando un Algoritmo Genético, el cual tiene como finalidad minimizar el desbalance de fases del sistema.

Luego, en el año 2004, en [31], se desarrolla el problema de BF por medio de un algoritmo genético, en el cual se reducen las pérdidas de potencia en sistemas de distribución. Un año después, en el 2005, [32] fórmula el BF por medio de un algoritmo heurístico de búsqueda con recurrencia hacia atrás, con el que se minimiza el desbalance de fases del sistema, de modo que la corriente de neutro se reduce. Ese mismo año, los autores de [33], desarrollan el BF por medio de un algoritmo de optimización colonia de hormigas, donde se minimizan las pérdidas de energía en un intervalo de 24 horas para sistemas de distribución. En 2006, [34] propone un algoritmo de optimización enjambre de partículas para el BF, en el cual se reducen las pérdidas de potencia y se mejoran los perfiles de tensión.

En el año 2008, en [35] se formula el BF por medio de un sistema experto basado en reglas heurísticas, el cual tiene como objetivo minimizar costos operativos del sistema. Este mismo año, [36] desarrolla el BF por medio de un Algoritmo Inmune en donde se reducen los costos operativos del sistema en un intervalo de 24 horas. En el 2010, en [37] el problema de BF se aborda con el cambio de fase automático a partir de un mapeo de la información del sistema, teniendo en cuenta las características técnicas y el flujo de carga de este. En 2011 y 2012, los autores de [38] y [39] formulan el BF por medio del desarrollo de un algoritmo heurístico híbrido codicioso difuso y un algoritmo de evolución diferencial híbrida de autoadaptación respectivamente, con la finalidad de minimizar el desbalance de fases del sistema.

En el año 2012, en [40] se plantea el BF basándose en él forrajeo bacteriano orientado por un algoritmo de optimización de enjambre de partículas, el cual tiene como objetivo minimizar los costos operativos del sistema. Asimismo, los autores de [41], formulan el BF por medio de un algoritmo genético, donde se tiene como finalidad minimizar las pérdidas de energía en sistemas de distribución, se evidencia el mejoramiento de los perfiles de tensión.

En el 2016, en [42] se aborda el problema de BF a través de un método heurístico basado en el intercambio de fases para el equilibrio de carga, minimizando el grado de desequilibrio del sistema. Este mismo año, los autores de [43], formulan el BF en el sistema de prueba IEEE 13 nodos a partir de un algoritmo de balance de fases, el cual consiste en verificar en cada nodo las posibles combinaciones para el intercambio de fases hasta equilibrar el sistema.

En 2018, en [44] desarrollan el BF a través de la aplicación del algoritmo de

optimización de enjambres, el cual busca minimizar el desbalance de fases del sistema. Este mismo año, en otro estudio para el problema de BF en [45], se propone minimizar el desbalance en sistemas de distribución utilizando un algoritmo heurístico de búsqueda que defina como realizar el cambio de fases a través de contactores para las cargas.

En 2019, los autores de [26], plantean el BF por medio de un algoritmo genético que usa una codificación basada en la teoría de grupos, el cual busca minimizar las pérdidas de potencia en sistemas de distribución. De igual forma, [46], desarrolla el BF por medio de un enfoque analítico, tomando como consideración que el intercambio entre fases debe ser el mínimo, en el cual se busca reducir el desbalance en sistemas de distribución y por ende las pérdidas de potencia en el sistema. Simultáneamente, en [47] desarrollan el BF por medio de la implementación de un algoritmo genético, el cual tiene como objetivo reducir las pérdidas de energía en un intervalo de 24 horas.

En 2021, los autores de [48], desarrollan el BF por medio de una técnica meta-heurística de optimización llamada algoritmo de búsqueda de vórtice, esta técnica se utiliza para la solución de problemas en dominio continuo. En este caso se usó una versión discreta de este método y se busca seleccionar la combinación óptima para la selección de carga, la función objetivo es minimizar la pérdida de potencia del sistema de distribución.

Según la revisión anterior, actualmente el algoritmo estudiado en este proyecto de grado, el algoritmo de caza de ballenas, no ha sido aplicado para el BF en sistemas de distribución, por lo cual se propondrá una versión discreta del mismo, ya que se debe seleccionar la combinación óptima de conexión de las cargas.

1.5. Justificación

En las últimas décadas, los desarrollos tecnológicos y el crecimiento poblacional, ha generado un cambio en la operación de los sistemas de distribución a causa de desbalance en las fases, y esto ha generado un enfoque en los estudios de los sistemas eléctricos de distribución, ya que se pueden generar problemas como lo son el deterioro de la calidad de potencia y el aumento de los costos de operación debido a grandes pérdidas en el sistema de distribución, por esta razón se hace necesario balancear operativamente las cargas en los sistemas de distribución [49].

Esta investigación surge del interés de minimizar las pérdidas de potencia provocadas por el desbalance en los sistemas trifásicos de distribución, para ello se plantea realizar el balance de fases utilizando el algoritmo de optimización conocido como búsqueda por caza de ballenas (WOA, por sus siglas en inglés) el cual determinará el conjunto de conexiones óptimas para las cargas que componen el sistema, permitiendo encontrar un punto óptimo que minimice las pérdidas.

Al reducir las pérdidas en el sistema de distribución, las empresas trabajarán con mejores parámetros de calidad de energía, potencia y servicio, cumpliendo con las normas impuestas por los entes reguladores, y las necesidades de los usuarios. Para el caso colombiano se establece que los perfiles de tensión deberán encontrarse entre el 10% del valor nominal de operación [50], en el caso de la frecuencia el 3% del valor

nominal de operación del sistema, mientras que para las pérdidas se espera que estas no superen el 8% de la energía de entrada [51]. De no cumplirse, podrían los operadores de red incurrir en sanciones pecuniarias importantes.

1.6. Objetivos

Los objetivos generales y específicos considerados en el desarrollo de este proyecto de grado son los siguientes:

1.6.1. Objetivo General

Aplicar el algoritmo de optimización de búsqueda por caza de ballenas al problema de balance de fases en sistemas de distribución desbalanceados para reducir las pérdidas de potencia activa.

1.6.2. Objetivos Específicos

1. Implementar el método de flujo de potencia del tipo triangular en su versión trifásica para conocer el estado operativo del sistema (voltajes, corrientes, flujos, etc.), y así caracterizar sus pérdidas de potencia para una condición de demanda dada.
2. Validar los resultados del flujo de potencia triangular en MATLAB con los obtenidos mediante la utilización del software para análisis de sistemas de potencia DigSILENT en diferentes sistemas de prueba reportados en la literatura especializada.
3. Programar el Algoritmo de Optimización de Búsqueda por caza de ballenas en el software MATLAB y aplicarlo a escenarios al problema de balance de fases en sistemas de prueba disponibles en la literatura científica, verificando su eficiencia y robustez.
4. Comparar los resultados iniciales y finales del proceso de balance de fases en el software DigSILENT a través de la implementación de los resultados obtenidos por el WOA y los reportes de la literatura especializada.

1.7. Contribuciones del proyecto de grado

Este proyecto de grado realiza una contribución al ámbito académico y presenta de una manera clara el desarrollo de la investigación, en la cual se realiza la aplicación de una técnica metaheurística de optimización de búsqueda por caza de ballenas para el problema de desbalance de fases. Inicialmente, se abordan definiciones las cuales facilitarían la comprensión de este proyecto de grado, adicionalmente se muestra el paso a paso del proceso de aplicación del método de optimización de caza de ballenas

WOA a los problemas de desbalance de fases de los sistemas de distribución de 8, 25 y 37 nodos. Así mismo, para verificar los resultados obtenidos con dicho método se comparan con resultados hallados en otras investigaciones. Por otro lado, se realiza la simulación en el software DigSILENT y se comparan con los resultados obtenidos en este proyecto grado, permitiendo corroborar la efectividad del método para poder realizar las conclusiones pertinentes sobre dicha investigación y realizar contribuciones para futuras investigaciones en el campo de la ingeniería eléctrica.

Es importante mencionar que una vez culminado este proyecto de grado, se espera el envío de una publicación derivada de este a una revista científica indexada en la base de datos de Publindex.

1.8. Organización del documento

Este documento se encuentra organizado de la siguiente forma: En el Capítulo 2 se presenta la formulación matemática del problema de balance de fases en sistemas de distribución asimétricos. En el Capítulo 5 se presenta la teoría relacionada con el algoritmo de optimización por caza de ballenas, así como, su aplicación al problema de balance de fases. En el Capítulo 4 se describen las principales características de los sistemas de distribución IEEE 8, IEEE 25, y IEEE 37 nodos, los cuales se emplean para la validación computacional de la metodología propuesta. En el Capítulo 5 se presenta la comparación entre la herramienta de flujo de potencia programada en MATLAB, así como, su comparación con el software DIgSILENT. En el Capítulo 6 se presentan los principales hallazgos numéricos de la implementación de la metodología propuesta, así como, sus comparaciones con reportes de la literatura especializada. Finalmente, en el capítulo 7, se encuentran las conclusiones obtenidas en este trabajo de grado y posibles trabajos futuros derivados de este proyecto; seguido a esto se encuentra el listado de referencias bibliográficas que se empleó en la realización de este proyecto de grado.

2. Formulación matemática

El problema de equilibrio de fase óptimo en sistemas de distribución desequilibrados, se puede representar a través de un modelo de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP). Las variables binarias son las variables de decisión, que corresponden a las conexiones establecidas para cada carga presentada en el sistema [52]. Por otro lado, las variables continuas están asociadas con la formulación clásica de flujo de potencia, que utiliza magnitud y ángulo de tensión por nodo [53]. Finalmente, la naturaleza no lineal se debe a las funciones trigonométricas en las ecuaciones de balance de potencia y los productos entre las magnitudes de los nodos [54].

La formulación MINLP se presenta a continuación, como una adaptación de los modelos presentados por los autores de [41] y [55].

2.1. Función objetivo

El problema de balance óptimo de fases en sistemas de distribución trifásicos desbalanceados, tiene como objetivo la minimización total de las pérdidas de potencia en los alimentadores del sistema de distribución. Esta función objetivo se puede formular según lo planteado en [56].

$$\text{mín } Z = \sum_{\gamma \in \Lambda} \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{i \in \Psi} \sum_{j \in \Psi} V_i^\gamma V_j^\lambda Y_{ij}^{\lambda\gamma} \cos(\delta_i^\gamma - \delta_j^\lambda - \theta_{ij}^{\lambda\gamma}) \quad (2.1)$$

donde Z el valor de la función objetivo. Los conjuntos en los que se definen las variables corresponden a Λ y Ψ , siendo Λ el conjunto de fases asociadas a cada nodo i o j , los cuales están a su vez contenidos en el conjunto Ψ . Las magnitudes de las tensiones en cada nodo por cada fase se definen como V_i^γ y V_j^λ , con sus respectivos ángulos δ_i^γ y δ_j^λ . $Y_{ij}^{\lambda\gamma}$ representa la magnitud de las admitancias que conectan a los nodos i y j en sus respectivas fases λ y γ , siendo $\theta_{ij}^{\lambda\gamma}$ su respectivo ángulo.

2.2. Restricciones

El problema de balance óptimo de fases en sistemas de distribución, involucra restricciones asociadas con el balance de potencia activa y reactiva en cada nodo y cada fase del sistema, así como regulación de tensión en cada uno de los nodos y unicidad de las posibles configuraciones de carga para cada una de las fases.

A continuación se detalla cada una de las restricciones del modelo matemático, iniciando con la ecuación de balance de potencia activa definido en la ecuación (2.2).

$$P_i^{s\lambda} - \sum_{\lambda \in \Lambda} X_{i\lambda\gamma} P_i^{d\lambda} = \sum_{\gamma \in \Lambda} \sum_{j \in \Psi} V_i^\lambda Y_{ij}^{\lambda\gamma} V_j^\gamma \cos(\delta_i^\lambda - \delta_j^\gamma - \theta_{ij}^{\lambda\gamma}), \quad \{\forall \lambda \in \Lambda, \forall i \in \Psi\} \quad (2.2)$$

Donde la potencia activa entregada por la subestación s en la fase λ se define como $P_i^{s\lambda}$ siendo esta conectada al nodo i ; $P_i^{d\lambda}$ representa la demanda de potencia activa en la fase λ para el nodo i ; además, $X_{i\lambda\gamma}$ corresponde a una variable de decisión binaria que determina el tipo de conexión asignada para las demandas en el nodo i para las fases λ y γ , respectivamente.

Es importante mencionar que para la variable de decisión binaria $X_{i\lambda\gamma}$ existen seis posibles combinaciones de conexión. Estas combinaciones se reportan en la Tabla 2.1. Es importante mencionar que en caso de que el sistema de distribución tenga máquinas rotativas, se debe tener especial cuidado la inversión de fases (cambio de secuencia), ya que esto podría causar daños irreparables a estas máquinas [41].

Tabla 2.1

Seis posibles conexiones de una demanda trifásica en un nodo arbitrario del sistema de distribución.

Grupo de conexión	Conexión	Secuencia	Variable $X_{i\lambda\gamma}$, $\{\lambda = \{a, b, c\}, \gamma = \{a, b, c\}\}$
1	ABC		1 0 0
			0 1 0
			0 0 1
2	BCA	No cambia	0 1 0
			0 0 1
			1 0 0
3	CAB		0 0 1
			1 0 0
			0 1 0
4	ACB		1 0 0
			0 0 1
			0 1 0
5	CBA	Cambia	0 0 1
			0 1 0
			1 0 0
6	BAC		0 1 0
			1 0 0
			0 0 1

A manera de ilustración, en la Figura 2.1 se presenta un posible cambio de conexión desde la conexión original ABC hacia la conexión BAC la cual implica un cambio de secuencia.

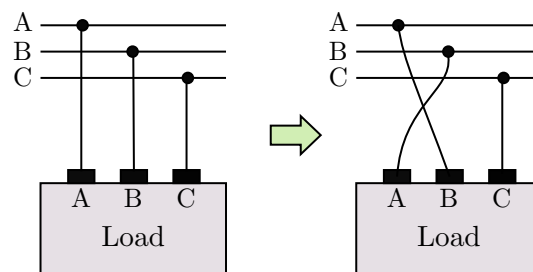


Figura 2.1: Ejemplo de cambio de conexión en las cargas de un nodo desde la conexión ABC hacia la conexión BAC.

Un hecho importante es que si no existe cargas trifásicas en algunos nodos, entonces para dichas fases se asigna un valor de cero en la conexión [48].

Para representar el equilibrio de potencia reactiva en sistemas de distribución se considera la Ecuación (2.3) [56].

$$Q_i^{s\lambda} - \sum_{\lambda \in \Lambda} X_{i\lambda\gamma} Q_i^{d\lambda} = \sum_{\gamma \in \Lambda} \sum_{j \in \Psi} V_i^\lambda Y_{ij}^{\lambda\gamma} V_j^\gamma \sin(\delta_i^\lambda - \delta_j^\gamma - \theta_{ij}^{\lambda\gamma}), \{\forall \lambda \in \Lambda, \forall i \in \Psi\} \quad (2.3)$$

Donde la generación de potencia reactiva en el nodo i para la subestación s en cada fase λ se define como $Q_i^{s\lambda}$, y la potencia reactiva demandada en el nodo i para la fase λ se escribe como $Q_i^{d\lambda}$.

Para asegurar que en cada nodo del sistema de distribución, los perfiles de tensión estén dentro de los rangos permitidos por la normatividad. Se asigna la restricción de regulación de tensión que aplica para cada nodo y cada fase, según se define en la Ecuación (2.4).

$$V_{\min} \leq V_i^\lambda \leq V_{\max}, \{\forall i \in \Psi, \forall \lambda \in \Lambda\} \quad (2.4)$$

siendo V_{\max} y V_{\min} los valores de regulación de tensión máximos y mínimos permitidos para la operación de la red.

Con el fin de asegurar que en cada nodo solo exista una de las seis configuraciones de carga de la Tabla 2.1 es posible de implementar, se agregan las restricciones (2.5) y (2.6).

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} X_{i\lambda\gamma} = 1, \{\forall i \in \Psi, \forall \gamma \in \Lambda\} \quad (2.5)$$

$$\sum_{\gamma \in \Lambda} X_{i\lambda\gamma} = 1, \{\forall i \in \Psi, \forall \lambda \in \Lambda\} \quad (2.6)$$

Es importante mencionar que el modelo matemático definido de (2.1) hasta (2.6) es de naturaleza no lineal y no convexa, con una mezcla de variables binarias y continuas que complejizan su solución mediante herramientas de optimización convencional; por lo cual en este proyecto de grado se aborda desde el punto de vista de las técnicas de optimización bio-inspiradas, siendo en este caso mediante la aplicación del algoritmo de caza de ballenas en conjunto con un flujo de potencia óptimo trifásico, mediante una estructura de optimización del tipo maestro-esclavo. Esta metodología se expondrá en detalle el siguiente capítulo.

3. Metodología propuesta

El problema de balance óptimo de fases en sistemas de distribución se aborda en este capítulo mediante la implementación de una metodología de tipo maestro-esclavo. En la etapa maestra se emplea el algoritmo de optimización de caza de ballenas, el cual se encarga de definir la configuración de conexión de cargas para cada nodo. En la etapa esclava se emplea un flujo de potencia de naturaleza trifásica, el cual se encarga de determinar las pérdidas de potencia para cada posible conexión de cargas proveída en la etapa maestra. A continuación, cada una de estas etapas se describe en detalle.

3.1. Etapa esclava: Flujo de potencia

Con el fin de presentar de mejor manera el problema de flujo de potencia para sistemas de distribución con naturaleza radial, en primer lugar se presenta la formulación monofásica del problema de flujo de potencia basado en el método triangular [13]; para posteriormente obtener el equivalente trifásico de esta metodología de flujo de potencia.

3.1.1. Formulación del flujo de potencia monofásico

Para ilustrar la formulación del método de flujo de potencia basado en la matriz triangular superior, se considera el sistema de distribución de ejemplo presentado en la Figura 3.1

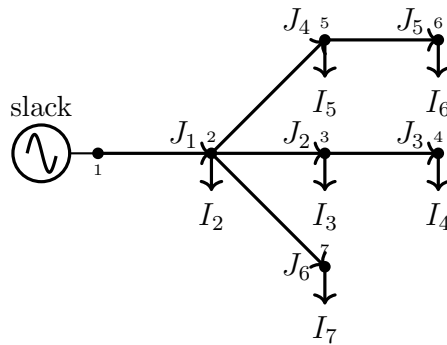


Figura 3.1: Equivalente monofásico de un sistema radial de 7 nodos.

Para este sistema de prueba se tiene la relación entre corrientes de las ramas J_j

las corrientes de las demandas I_i , tal como se muestra en la Ecuación (3.1).

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Siendo J_j la corriente que fluye a través de la rama j e I_i la corriente neta inyectada en el nodo i . La forma matricial presentada en la Ecuación (3.2) se define en la Ecuación (3.2).

$$\mathbb{J} = T\mathbb{I} \quad (3.2)$$

donde $\mathbb{J} \in \mathcal{C}^{b \times 1}$ es el vector que contiene todas las corrientes de rama en el dominio complejo, (i.e., b ramas) y $\mathbb{I} \in \mathcal{C}^{(n-1) \times 1}$ es el vector que contiene todas las corrientes netas demandas, es decir, todos los nodos menos el nodo slack. Por último, $T \in \mathcal{R}^{b \times b}$ representa a la matriz triangular superior, la cual da el nombre a esta metodología de flujo de potencia.

Ahora, si se aplica la segunda ley de Kirchhoff a cada trayectoria cerrada que contenga el nodo slack y cada una de las barras, se obtiene una expresión que relaciona la tensión en cada nodo i , i.e., V_i y las caídas de tensión en las ramas, las cuales se denotan como E_j . Haciendo el proceso anterior, se obtiene el conjunto de ecuaciones presentado en (3.3).

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} V_1 - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nótese que el conjunto de ecuaciones (3.3) puede compactarse a través de la matriz triangular, como se muestra en la Ecuación (3.4).

$$\mathbb{V} = \mathbf{1}V_1 - T^T\mathbb{E}. \quad (3.4)$$

donde $\mathbb{E} \in \mathcal{C}^{b \times 1}$ es un vector que contiene las caídas de voltaje de todas las ramas, $\mathbb{V} \in \mathcal{C}^{(n-1) \times 1}$ representa el vector que contiene los voltajes en los nodos de demanda.

Aplicando la ley de Ohm a cada una de las ramas del circuito de distribución de la Figura 3.1, se obtiene una expresión que relaciona las corrientes de las ramas y las caídas de tensión sobre estas, es decir, se llega a la Ecuación (3.5).

$$\mathbb{E} = Z\mathbb{J} \quad (3.5)$$

siendo $Z \in \mathcal{C}^{b \times b}$ una matriz diagonal compleja que contiene la impedancia de las ramas, i.e., $Z = \text{diag}([Z_1, Z_2, \dots, Z_6])$.

Ahora, al combinar las ecuaciones (3.2), (3.4) y (3.5) se llega a la Ecuación (3.6).

$$\mathbb{V} = 1V_1 - T^\top ZT\mathbb{I}. \quad (3.6)$$

Para calcular la corriente de las demandas que aparece en la Ecuación (3.6) se necesita recurrir al segundo teorema de Tellegen relacionado con la definición de potencia compleja [21]. Esto se define en la Ecuación (3.7).

$$\mathbb{I} = \text{diag}^{-1}(\mathbb{V}^*)\mathbb{S}^* \quad (3.7)$$

donde $\mathbb{S} \in \mathcal{C}^{(n-1) \times 1}$ es un vector en variable compleja que contiene todas las demandas de potencia constante, siendo $(X)^*$ el operador conjugado aplicado al vector X .

Sustituyendo la Ecuación (3.7) en la Ecuación (3.6) se obtiene la expresión general no lineal que representa el problema de flujo de potencia mediante el método triangular [13], tal como se define en la Ecuación (3.8).

$$\mathbb{V} = 1V_1 - T^\top ZT \text{diag}^{-1}(\mathbb{V}^*)\mathbb{S}^* \quad (3.8)$$

Es importante mencionar que para resolver la Ecuación (3.8) se requiere de la aplicación de un proceso iterativo que inicializa todas las tensiones de manera plana (i.e., $\mathbb{V}^0 = \mathbf{1}\angle 0^\circ$) y las va actualizando en cada iteración, hasta que el criterio de convergencia sea alcanzado. La ecuación recursiva, así como, el criterio de convergencia, se definen en (3.9) y (3.10).

$$\mathbb{V}^{m+1} = 1V_1 - T^\top ZT \text{diag}^{-1}(\mathbb{V}^{m,*})\mathbb{S}^* \quad (3.9)$$

$$\text{máx} \{ \|\mathbb{V}^{m+1}\| - \|\mathbb{V}^m\| \} \leq \varepsilon \quad (3.10)$$

siendo ε el error de convergencia máximo permitido.

3.1.2. Equivalente trifásico para flujo de potencia

En el caso de un sistema trifásico, la ecuación de recurrencia presentada en (3.9) no puede aplicarse directamente, debido a que las corrientes en este tipo de sistemas pueden deberse a cargas conectadas en estrella o en triángulo, para lo anterior, se recurre a la fórmula previa (3.6), la cual se reescribe en forma trifásica, según se define en la Ecuación (3.11).

$$\mathbb{V}_{3\varphi}^{m+1} = \mathbf{1}_{3\varphi}V_{13\varphi} - T_{3\varphi}^\top Z_{3\varphi}T_{3\varphi}\mathbb{I}_{3\varphi}^m, \quad (3.11)$$

Nótese que en (3.11) cada una de los vectores tiene una connotación trifásica, lo cual puede ser consultado en detalle en la referencia [57].

Como se mencionó anteriormente, la principal diferencia entre una carga monofásica y una trifásica, está relacionada con el tipo de conexión de esta, ya que puede estar conectada en estrella o triángulo. Para el caso de una conexión en estrella (ver Figura 3.2), se tiene las corrientes que se presentan en las ecuaciones (3.12).

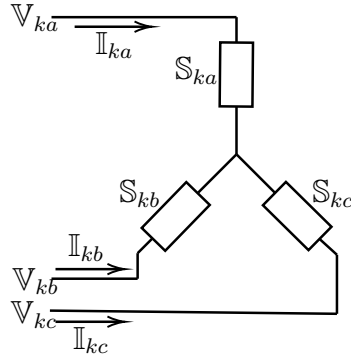


Figura 3.2: Carga trifásica conectada en estrella.

$$\mathbb{I}_{ka}^m = \frac{S_{ka}^*}{V_{ka}^*}, \quad \mathbb{I}_{kb}^m = \frac{S_{kb}^*}{V_{kb}^*}, \quad \mathbb{I}_{kc}^m = \frac{S_{kc}^*}{V_{kc}^*}, \quad (3.12)$$

Con el fin de obtener una forma compacta del conjunto de ecuaciones (3.12), se emplea la formulación equivalente mediante la matriz diagonal, como se ilustra en la Ecuación (3.13).

$$\mathbb{I}_{k3\varphi}^m = \text{diag}^{-1} (V_{k3\varphi}^{m,*}) S_{k3\varphi}^* \quad (3.13)$$

Para el caso de una carga conectada en triángulo, como se muestra en la Figura 3.3, el cálculo de las corrientes equivalentes por fase se hace según se muestra en el conjunto de ecuaciones (3.14).

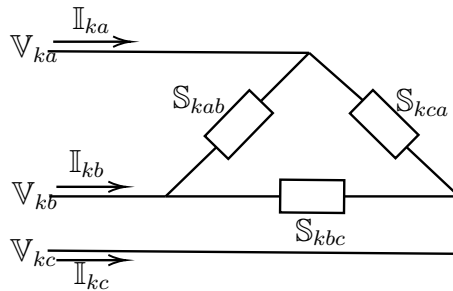


Figura 3.3: Carga conectada en triángulo.

$$\begin{aligned} \mathbb{I}_{ka}^m &= \left(\frac{S_{kab}}{V_{ka} - V_{kb}} \right)^* - \left(\frac{S_{kca}}{V_{kc} - V_{ka}} \right)^*, \\ \mathbb{I}_{kb}^m &= \left(\frac{S_{kbc}}{V_{kb} - V_{kc}} \right)^* - \left(\frac{S_{kab}}{V_{ka} - V_{kb}} \right)^*, \\ \mathbb{I}_{kc}^m &= \left(\frac{S_{kca}}{V_{kc} - V_{ka}} \right)^* - \left(\frac{S_{kbc}}{V_{kb} - V_{kc}} \right)^*, \end{aligned} \quad (3.14)$$

Nótese que el conjunto de ecuaciones definido en (3.14) puede compactarse, según se muestra en la Ecuación (3.15).

$$\mathbb{I}_{k3\varphi}^m = (\text{diag}^{-1}(\mathbf{M}\mathbb{V}_{k3\varphi}^*) - \mathbf{diag}^{-1}(\mathbf{M}^\top \mathbb{V}_{k3\varphi}^*) \mathbf{H}) \mathbb{S}_{k3\varphi}^* \quad (3.15)$$

siendo las matrices \mathbf{M} y \mathbf{H} definidas como se muestra a continuación:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Es importante mencionar que el criterio de parada para el flujo monofásico definido por (3.10) es perfectamente aplicable al problema de flujo de potencia trifásico.

Con el fin de resumir la implementación de la etapa esclava, para evaluar el problema de flujo de potencia trifásico para cada configuración de demandas de potencia en el sistema de distribución, se muestra su implementación genérica en el Algoritmo 3.1.

Algoritmo 3.1: Problema de flujo de potencia para sistemas trifásicos

Data: Definir la red trifásica en estudio.

```

1 Transformar el sistema en un equivalente por unidad;
2 Calcular la matriz triangular superior trifásica  $T_{3\varphi}$ ;
3 Calcular la matriz de impedancia de rama primitiva  $Z_{3\varphi}$ ;
4 Calcular la matriz  $Z$  de impedancia trifásica autobús  $Z_{3\varphi}^{bus} = T_{3\varphi}^\top Z_{3\varphi} T_{3\varphi}$ ;
5 Definir el número máximo de iteraciones  $t_{m\acute{a}x}$ ;
6 Definir error de convergencia  $\varepsilon = 1 \times 10^{-10}$ ;
7 Definir los voltajes de la subestación:  $V_{13\varphi} = [1\angle 0, 1\angle 2\pi/3, 1\angle 2\pi/3]^\top$ ;
8 Iniciar el contador de iteraciones  $m = 0$  Definir los voltajes iniciales como:  $\mathbb{V}_{3\varphi}^m = \mathbf{1}_{3\varphi} V_{13\varphi}$ ;
9 for  $m \leq m_{m\acute{a}x}$  do
10   for  $k > 2 : n$  do
11     if ¿Carga del nodo  $k$  conectada en estrella? then
12       Calcule la corriente demandada  $\mathbb{I}_{K3\varphi}^m$  usando la Ecuación (3.13);
13     else
14       Calcule la corriente demandada  $\mathbb{I}_{K3\varphi}^m$  usando la Ecuación (3.15);
15     end
16     Hallar los nuevos voltajes  $\mathbb{V}_{3\varphi}^{m+1}$  usando la ecuación (3.11)
17   end
18   ;
19   if  $|\mathbb{V}_{3\varphi}^{m+1}| - |\mathbb{V}_{3\varphi}^m| \leq \varepsilon$  then
20     Reportar la solución de los voltajes  $\mathbb{V}_{3\varphi}^{m+1}$ ;
21     Hallar y reportar las pérdidas de potencia compleja  $\mathbb{S}_{\text{loss}}$  según la Ecuación (3.16);
22     break;
23   else
24     Hacer  $\mathbb{V}_{3\varphi}^m = \mathbb{V}_{3\varphi}^{m+1}$ ;
25   end
26 end

```

Uno de los principales objetivos de las soluciones eléctricas en redes monofásicas y trifásicas es, después de determinar todos los voltajes de los nodos de demanda,

calcular las pérdidas de potencia de todos los conductores de la red. Para realizar esta tarea, ya se suponen conocidos los voltajes en los nodos y las corrientes demandadas, i.e., $\mathbb{V}_{3\varphi}$ y $\mathbb{I}_{3\varphi}$. Con estas variables determinadas se calculan las corrientes en las ramas y sus caídas de tensión como:

$$\begin{aligned}\mathbb{J}_{3\varphi} &= T_{3\varphi}\mathbb{I}_{3\varphi}, \\ \mathbb{E}_{3\varphi} &= Z_{3\varphi}\mathbb{J}_{3\varphi}\end{aligned}$$

Las cuales al combinarse permiten hallar la potencia compleja de pérdidas (i.e., \mathbb{S}_{loss}) en todo el sistema de distribución, como se presenta en la Ecuación (3.16).

$$\mathbb{S}_{\text{loss}} = \mathbb{E}_{3\varphi}^{\top}\mathbb{J}_{3\varphi}^* \quad (3.16)$$

3.2. Etapa maestra: Algoritmo de caza de ballenas

La etapa maestra en este proyecto de grado corresponde a la aplicación del algoritmo de caza de ballenas, para generar las configuraciones de demanda que serán asignadas a cada uno de los nodos de carga del sistema. Para lo anterior se emplea una codificación discreta que contiene números asociados a los posibles grupos de conexión de las cargas. La codificación empleada se ilustra en la Ecuación (3.17).

$$X_i^t = [1, 5, 3, \dots, c, \dots, 6], \quad (3.17)$$

Donde X_i^t representa la solución candidata i en la iteración t , siendo c una constante entera definida entre 1 y 6. Es importante mencionar que para inicializar el algoritmo de caza de ballenas se genera una matriz X^{\top} en la primera iteración con N_i filas (i.e., posibles soluciones) y $n - 1$ columnas (número de variables de decisión), siendo esta una matriz aleatoria con distribución uniforme.

Debido a que en este proyecto de grado se emplea el algoritmo de optimización por caza de ballenas, a continuación se ilustran sus principales componentes [12].

El método de caza de ballenas se divide en tres partes, las cuales corresponden a: (i) acechamiento de la presa, (ii) generación de burbujas de aire, y (iii) caza de la presa. Matemáticamente, cada uno de estos aspectos se define como sigue [12]:

Cada posición de la población descendiente X_i^{t+1} se calcula a partir de la posición actual X_i^{\top} , y de algunos vectores de ajuste, según se muestra en la Ecuación (3.18).

$$X_i^{t+1} = X^{*,t} - A \cdot D, \quad (3.18)$$

siendo $X^{*,t}$ la mejor solución actual de la población y A un vector con coeficientes de ajuste. Nótese que para conocer la mejor solución, se requiere de resolver el problema de flujo de potencia según el Algoritmo 3.1 para cada uno de los N_i individuos en la población inicial X^{\top} . El vector D se calcula en función de la mejor solución y un vector de ajuste C , tal como se presenta en la Ecuación (3.19).

$$D = C \cdot X^{*,t} - X_i^{\top}, \quad (3.19)$$

Para definir los vectores de coeficientes de ajuste A y C se emplean las Ecuaciones (3.20) y (3.21).

$$A = 2arand - a, \quad (3.20)$$

$$C = 2rand, \quad (3.21)$$

Donde a es un parámetro de control que disminuye linealmente de 2 a 0 en el proceso iterativo (en la fase de exploración y desarrollo), y $rand$ es vector aleatorio con distribución uniforme que contiene números entre 0 y 1 de las mismas dimensiones de X_i^t . El parámetro a se define de forma lineal decreciente, según la Ecuación (3.22).

$$a = 2(-t/t_{\text{máx}}) \quad (3.22)$$

Con $t_{\text{máx}}$ siendo el número máximo de iteraciones asociado a la exploración y explotación del espacio de soluciones por parte del algoritmo de optimización por caza de ballenas.

Por otro lado, el mecanismo de generación de burbujas, se basa en el movimiento en espiral por parte de las ballenas (i.e., individuo, solución X_i^t), con lo cual el nuevo individuo podría ser generado, como se define en la Ecuación (3.23).

$$X_i^{t+1} = De^{bl} \cos(2\pi l) + X^{*,t} \quad (3.23)$$

Donde b es un coeficiente de ajuste de la forma espiral del movimiento de las ballenas, y l es un parámetro aleatorio que toma valores en una distribución uniforme entre -1 y 1 .

Es importante mencionar que dependiente de los valores en cada posición del vector A , es decir, $|A_j| \geq 1$, se selecciona una posición aleatoria dentro la probación, i.e., X_{kj}^t , para hacer el proceso de evolución y obtener la nueva solución X_i^{t+1} . Esto se hace con el fin de mejorar las capacidades de exploración del algoritmo y encontrar soluciones en regiones diferentes a la mejor solución actual ($Xkj^{*,t}$).

Nótese que para definir que forma será aplicada para la generación del individuo (X_i^{t+1}), es decir, mediante la Ecuación (3.18) o la Ecuación (3.23), se usa una probabilidad p generada con distribución uniforme entre 0 y 1, tal como se muestra en la Ecuación (3.24).

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X^{*,t} - A \cdot D & \text{si } p < 0,5 \\ De^{bl} \cos(2\pi l) + X^{*,t} & \text{si } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (3.24)$$

Es importante resaltar, que una vez es generado el individuo descendiente X_i^{t+1} este debe ser revisado, con el fin de verificar que todas las posiciones sean números enteros entre 1 y 6, en caso contrario se redondea el número decimal que se tenga, por último si está fuera del rango posibilidades de conexión, entonces se genera un número aleatorio entre 1 y 6, y se reemplaza la posición correspondiente. Nótese que este proceso mantiene factible el espacio de soluciones y es un requisito para el correcto funcionamiento de la etapa esclava.

De manera general, en el Algoritmo 3.2 se resume la aplicación del método de caza de ballenas, para resolver el problema de balance óptimo de fases en sistemas de distribución.

Algoritmo 3.2: Algoritmo de caza de ballenas aplicación a problemas de optimización discreta

Data: Generar la población inicial X^t con la forma (3.17).

- 1 Definir el número de individuos N_i , el número de iteraciones $t_{\text{máx}}$;
- 2 Evaluar cada individuo X_i^t en la etapa esclava;
- 3 Seleccionar el mejor individuo como $X^{*,t}$;
- 4 **for** $t = 1 : t_{\text{máx}}$ **do**
- 5 **for** $i = 1 : N_i$ **do**
- 6 **for** $j = 1 : n - 1$ **do**
- 7 Calcular los parámetros y vectores A, C, D, a, b , y l ;
- 8 Generar la probabilidad p entre 0 y 1;
- 9 **if** $|A_j| > 1$ **then**
- 10 | Seleccionar un individuo aleatorio X_{kj}^t ;
- 11 **else**
- 12 | Trabajar con la mejor solución $X_j^{*,t}$;
- 13 Aplicar la regla de evolución (3.24);
- 14 Revisar y corregir la factibilidad del vector de soluciones descendiente X_i^{t+1} ;
- 15 | Evaluar la etapa esclava para cada individuo X_i^{t+1} ;
- 16 | Actualizar la mejor solución $X^{*,t}$;

Es importante mencionar que para mayores detalles sobre la implementación del algoritmo de caza de ballenas para solución de problemas de optimización, el autor de la metodología (ver [12]) ha proveído los códigos para acceso libre en el siguiente enlace [the-whale-optimization-algorithm](#).

4. Sistema de prueba y escenarios de simulación

En este capítulo se presentan las principales características de los sistemas de prueba empleados para validar la metodología de optimización propuesta, el cual la etapa maestra corresponde al algoritmo de caza de ballenas y la etapa esclava que corresponde al método de flujo de potencia triangular. Los sistemas de prueba empleados corresponden a redes de distribución de 8, 25, y 37 nodos, los cuales han sido reportados por [5] para estudiar problemas de balance de fases. Las características de cada uno de estos sistemas de prueba se presenta a continuación.

4.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos

El alimentador de prueba de ocho barras corresponde a una red de distribución radial compuesta por ocho nodos y siete líneas, donde el nodo de holgura se encuentra en la barra 1. Para este sistema de prueba el nivel de tensión asociado es de 11 kV entre líneas. El diagrama equivalente para este sistema de prueba se presenta en la Figura 4.1.

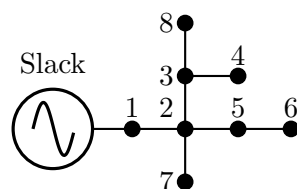


Figura 4.1: Equivalente monofásico para el sistema IEEE 8 nodos.

Para el sistema de prueba IEEE 8 nodos se tienen las demandas presentadas en la Tabla 4.3 y las matrices de impedancia por cada línea que se reportan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1

Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 8 nodos.

Línea	Nodo i	Nodo j	Cond.	Long. [ft]	P_{jA} (kW)	Q_{jA} (kvar)	P_{jB} (kW)	Q_{jB} (kvar)	P_{jC} (kW)	Q_{jC} (kvar)
1	1	2	1	5280	519	250	259	126	515	250
2	2	3	2	5280	0	0	259	126	486	235
3	2	5	3	5280	0	0	0	0	226	109
4	2	7	3	5280	486	235	0	0	0	0
5	3	4	4	5280	0	0	0	0	324	157
6	3	8	5	5280	0	0	267	129	0	0
7	5	6	6	5280	0	0	0	0	145	70

Tabla 4.2

Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 8 nodos.

Conductor	Matriz de impedancias (Ω/mi)		
1	0.093654+j0.0402930	0.031218+j0.0134310	0.031218+j0.0134310
	0.031218+j0.0134310	0.093654+j0.0402930	0.031218+j0.0134310
	0.031218+j0.0134310	0.031218+j0.0134310	0.093654+j0.0402930
2	0.156090+j0.0671550	0.052030+j0.0223850	0.052030+j0.0223850
	0.052030+j0.0223850	0.156090+j0.0671550	0.052030+j0.0223850
	0.052030+j0.0223850	0.052030+j0.0223850	0.156090+j0.0671550
3	0.046827+j0.0201465	0.015609+j0.0067155	0.015609+j0.0067155
	0.015609+j0.0067155	0.046827+j0.0201465	0.015609+j0.0067155
	0.015609+j0.0067155	0.015609+j0.0067155	0.046827+j0.0201465
4	0.031218+j0.0134310	0.010406+j0.0044770	0.010406+j0.0044770
	0.010406+j0.0044770	0.031218+j0.0134310	0.010406+j0.0044770
	0.010406+j0.0044770	0.010406+j0.0044770	0.031218+j0.0134310
5	0.062436+j0.0268620	0.020812+j0.0089540	0.020812+j0.0089540
	0.020812+j0.0089540	0.062436+j0.0268620	0.020812+j0.0089540
	0.020812+j0.0089540	0.020812+j0.0089540	0.062436+j0.0268620
6	0.078045+j0.0335775	0.026015+j0.0111925	0.026015+j0.0111925
	0.026015+j0.0111925	0.078045+j0.0335775	0.026015+j0.0111925
	0.026015+j0.0111925	0.026015+j0.0111925	0.078045+j0.0335775

4.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos

Este es un sistema de distribución radial desequilibrado con 25 nodos, 24 líneas y 22 cargas. La fuente está ubicada en el nodo 1 y la tensión nominal es de 4.16 kV. La configuración de este sistema se puede ver en la Figura 4.2.

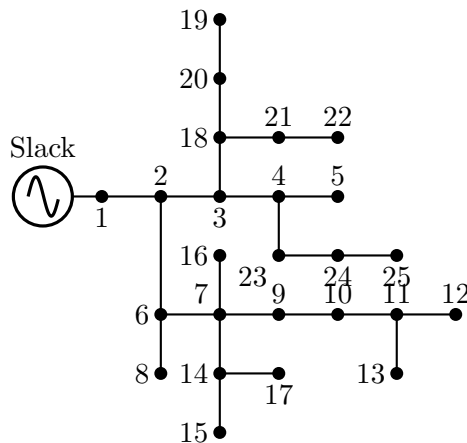


Figura 4.2: Equivalente monofásico para el sistema IEEE 25 nodos.

Para el sistema de prueba IEEE 25 nodos se tienen las demandas presentadas en la Tabla 4.3 y las matrices de impedancia por cada línea que se reportan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3

Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 25 nodos.

Línea	Nodo i	Nodo j	Cond.	Long. [ft]	P_{jA} (kW)	Q_{jA} (kvar)	P_{jB} (kW)	Q_{jB} (kvar)	P_{jC} (kW)	Q_{jC} (kvar)
1	1	2	1	1000	0	0	0	0	0	0
2	2	3	1	500	36	21.6	28.8	19.2	42	26.4
3	2	6	2	500	43.2	28.8	33.6	24	30	30
4	3	4	1	500	57.6	43.2	4.8	3.4	48	30
5	3	18	2	500	57.6	43.2	38.4	28.8	48	36
6	4	5	2	500	43.2	28.8	28.8	19.2	36	24
7	4	23	2	400	8.6	64.8	4.8	3.8	60	42
8	6	7	2	500	0	0	0	0	0	0
9	6	8	2	1000	43.2	28.8	28.8	19.2	3.6	24
10	7	9	2	500	72	50.4	38.4	28.8	48	30
11	7	14	2	500	57.6	36	38.4	28.8	60	42
12	7	16	2	500	57.6	4.3	3.8	28.8	48	36
13	9	10	2	500	36	21.6	28.8	19.2	32	26.4
14	10	11	2	300	50.4	31.7	24	14.4	36	24
15	11	12	3	200	57.6	36	48	33.6	48	36
16	11	13	3	200	64.8	21.6	33.6	21.1	36	24
17	14	15	2	300	7.2	4.3	4.8	2.9	6	3.6
18	14	17	3	300	57.6	43.2	33.6	24	54	38.4
19	18	20	2	500	50.4	36	38.4	28.8	54	38.4
20	18	21	3	400	5.8	4.3	3.4	2.4	5.4	3.8
21	20	19	3	400	8.6	6.5	4.8	3.4	6	4.8
22	21	22	3	400	72	50.4	57.6	43.2	60	48
23	23	24	2	400	50.4	36	43.2	30.7	4.8	3.6
24	24	25	3	400	8.6	6.5	4.8	2.9	6	4.2

Tabla 4.4

Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 25 nodos.

Conductor	Matriz de impedancias (Ω/mi)		
1	0.3686+j0.6852	0.0169+j0.1515	0.0155+j0.1098
	0.0169+j0.1515	0.3757+j0.6715	0.0188+j0.2072
	0.0155+j0.1098	0.0188+j0.2072	0.3723+j0.6782
2	0.9775+j0.8717	0.0167+j0.1697	0.0152+j0.1264
	0.0167+j0.1697	0.9844+j0.8654	0.0186+j0.2275
	0.0152+j0.1264	0.0186+j0.2275	0.9810+j0.8648
3	1.9280+j1.4194	0.0161+j0.1183	0.0161+j0.1183
	0.0161+j0.1183	1.9308+j1.4215	0.0161+j0.1183
	0.0161+j0.1183	0.0161+j0.1183	1.9337+j1.4236

4.3. Sistema de prueba IEEE 37 nodos

El sistema de prueba IEEE de 37 nodos es un sistema de distribución radial desequilibrado real ubicado en California, totalmente compuesto por líneas subterráneas [1]. Este sistema tiene 37 nodos, siendo el nodo 1 la fuente, 35 líneas y 25 cargas. Tiene un transformador que opera de forma desequilibrada y un regulador de voltaje [41]. La tensión nominal es de 4.8 kV [56]. La configuración eléctrica de este sistema se puede apreciar en la Figura 4.3.

Para el sistema de prueba IEEE 37 nodos, se tienen las demandas presentadas en

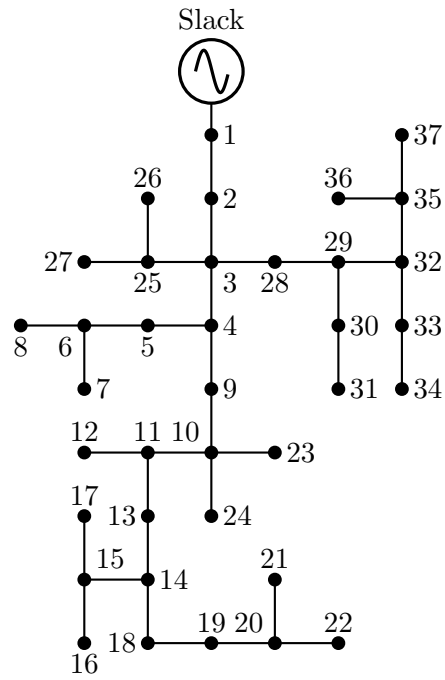


Figura 4.3: Equivalente monofásico para el sistema IEEE 37 nodos.

la Tabla 4.5 y las matrices de impedancia por cada línea que se reportan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.5

Parámetros de líneas y nodos para el sistema IEEE 37 nodos.

Línea	Nodo i	Nodo j	Cond.	Long. [ft]	P_{jA} (kW)	Q_{jA} (kvar)	P_{jB} (kW)	Q_{jB} (kvar)	P_{jC} (kW)	Q_{jC} (kvar)
1	1	2	1	1850	140	70	140	70	350	175
2	2	3	2	960	0	0	0	0	0	0
3	3	24	4	400	0	0	0	0	0	0
4	3	27	3	360	0	0	0	0	85	40
5	3	4	2	1320	0	0	0	0	0	0
6	4	5	4	240	0	0	0	0	42	21
7	4	9	3	600	0	0	0	0	85	40
8	5	6	3	280	42	21	0	0	0	0
9	6	7	4	200	42	21	42	21	42	21
10	6	8	4	280	42	21	0	0	0	0
11	9	10	3	200	0	0	0	0	0	0
12	10	23	3	600	0	0	85	40	0	0
13	10	11	3	320	0	0	0	0	0	0
14	11	13	3	320	85	40	0	0	0	0
15	11	12	4	320	0	0	0	0	42	21
16	13	14	3	560	0	0	0	0	42	21
17	14	18	3	640	140	70	0	0	0	0
18	14	15	4	520	0	0	0	0	0	0
19	15	16	4	200	0	0	0	0	85	40
20	15	17	4	1280	0	0	42	21	0	0
21	18	19	3	400	126	62	0	0	0	0
22	19	20	3	400	0	0	0	0	0	0
23	20	22	3	400	0	0	0	0	42	21
24	20	21	4	200	0	0	0	0	85	40
25	24	26	4	320	8	4	85	40	0	0
26	24	25	4	240	0	0	0	0	85	40
27	27	28	3	520	0	0	0	0	0	0
28	28	29	4	80	17	8	21	10	0	0
29	28	31	3	800	0	0	0	0	85	40
30	29	30	4	520	85	40	0	0	0	0
31	31	34	4	920	0	0	0	0	0	0
32	31	32	3	600	0	0	0	0	0	0
33	32	33	4	280	0	0	42	21	0	0
34	34	36	4	760	0	0	42	21	0	0
35	34	35	4	120	0	0	140	70	21	10

Tabla 4.6

Matriz de impedancias por tipo de conductor para el sistema IEEE 37 nodos.

Conductor	Matriz de impedancias (Ω/mi)		
1	0.2926 + j0.1973	0.0673 - j0.0368	0.0337 - j0.0417
	0.0673 - j0.0368	0.2646 + j0.1900	0.0673 - j0.0368
	0.0337 - j0.0417	0.0673 - j0.0368	0.2926 + j0.1973
2	0.4751 + j0.2973	0.1629 - j0.0326	0.1234 - j0.0607
	0.1629 - j0.0326	0.4488 + j0.2678	0.1629 - j0.0326
	0.1234 - j0.0607	0.1629 - j0.0326	0.4751 + j0.2973
3	1.2936 + j0.6713	0.4871 + j0.2111	0.4585 + j0.1521
	0.4871 + j0.2111	1.3022 + j0.6326	0.4871 + j0.2111
	0.4585 + j0.1521	0.4871 + j0.2111	1.2936 + j0.6713
4	2.0952 + j0.7758	0.5204 + j0.2738	0.4926 + j0.2123
	0.5204 + j0.2738	2.1068 + j0.7398	0.5204 + j0.2738
	0.4926 + j0.2123	0.5204 + j0.2738	2.0952 + j0.7758

5. Validación del flujo de potencia DIgSILENT y MATLAB

En este capítulo se realiza la comparación computacional del método de flujo de potencia basado en el método triangular, el cual se presentó en el Capítulo 3, con el método de Newton-Raphson trifásico, disponible en el software de análisis de sistemas de potencia DIgSILENT. En esta comparación se revisan los perfiles de tensión y los ángulos por fase, así como las pérdidas de energía por fase y las pérdidas totales. A continuación se presentan los resultados para cada uno de los sistemas de prueba.

Es importante mencionar que el método de flujo de potencia triangular fue implementado en el software MATLAB 2020b en un ordenador portátil con una CPU Intel(R) Core(DM) i5-4200U CPU a 1.60 GHz, (4CPU), 2.3 GHz, con 4.096 GB de memoria RAM que ejecuta el sistema operativo Windows 10 Home Single Language de 64 bits. Observe que, para determinar el tiempo de ejecución, se ha establecido un máximo de 1000 iteraciones y una tolerancia máxima de 1×10^{-10} según lo recomendado en [57].

5.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos

Para este sistema de prueba en la Tabla 5.1 se presentan los resultados comparativos entre el método de flujo de potencia triangular programado en MATLAB y el método de Newton-Raphson disponible en el software DIgSILENT.

Tabla 5.1

Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 8 nodos.

Nodo	MATLAB						DIgSILENT					
	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C
1	1.0000	0.0000	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000	1.0000	0.0029	1.0001	-119.9932	0.9999	119.9903
2	0.9983	-0.0385	0.9991	-119.9651	0.9961	120.0203	0.9983	-0.0357	0.9992	-119.9584	0.9960	120.0107
3	0.9993	-0.0635	0.9973	-119.8973	0.9926	119.9881	0.9994	-0.0606	0.9974	-119.8905	0.9925	119.9785
4	0.9994	-0.0686	0.9974	-119.8924	0.9923	119.9889	0.9994	-0.0658	0.9974	-119.8856	0.9922	119.9793
5	0.9984	-0.0474	0.9992	-119.9567	0.9955	120.0216	0.9984	-0.0446	0.9993	-119.9499	0.9954	120.0120
6	0.9984	-0.0532	0.9992	-119.9512	0.9952	120.0225	0.9985	-0.0503	0.9993	-119.9444	0.9951	120.0128
7	0.9976	-0.0368	0.9992	-119.9767	0.9962	120.0314	0.9977	-0.0340	0.9993	-119.9700	0.9961	120.0217
8	0.9994	-0.0554	0.9968	-119.8960	0.9927	119.9795	0.9995	-0.0525	0.9969	-119.8892	0.9926	119.9699

Según los resultados presentados en la Tabla 5.1 para las tensiones de fase en el sistema IEEE 8 nodos, es posible notar que el error máximo entre el método triangular y el método de Newton-Raphson es 0,0073 % para la fase A, 0,0114 % para la fase B, y 0,0144 %, respectivamente. Lo cual confirma que el método triangular presentado en el Capítulo 3 es eficiente para resolver problemas de flujo de potencia en sistemas trifásicos desbalanceados.

Por otro lado, una vez halladas las tensiones de fase reportadas en la Tabla 5.1, se determinan las pérdidas de potencia por fase y totales en el sistema de prueba IEEE 8 nodos. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2

Comparación de pérdidas entre DIgSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 8 nodos.

Parámetro	MATLAB	DIgSILENT	Unidad
Iteraciones	5	3	—
Tiempo de cómputo	0.0905	—	s
Pérdida Fase A	1.7158	1.7158	KW
Pérdida Fase B	2.3305	2.3295	KW
Pérdida Fase C	9.9462	9.9487	KW
Pérdidas Totales	75.4020	75.4232	KW

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la Tabla 5.2 el método triangular para flujo de potencia se asemeja mucho a los valores obtenidos con el método de Newton-Raphson. Esto demuestra que el método triangular es confiable para resolver problemas asociados a flujo de potencia en sistemas de distribución asimétricos; además, este solo tomó 5 iteraciones y de 0,0905 s. En términos del error entre las pérdidas por fase, y las pérdidas totales, para el método triangular y el método de Newton-Raphson, son de 0,0007% para la fase A, 0,0436% para la fase B, 0,0250% para la fase C, y 0,0104% para todo el sistema.

Es importante recalcar que los errores entre los métodos están asociados al criterio de convergencia, ya que el método triangular trabaja con un valor de 1×10^{-10} , mientras que el DIgSILENT permite un error de convergencia máximo de 1×10^{-06} .

5.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos

Para este sistema de prueba en la Tabla 5.3 se presentan los resultados comparativos entre el método de flujo de potencia triangular programado en MATLAB y el método de Newton-Raphson disponible en el software DIgSILENT.

Tabla 5.3

Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 25 nodos.

Nodo	MATLAB						DigSILENT					
	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C
1	1.0000	0.0000	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000	1.0000	-0.0034	1.0000	-119.9584	1.0000	119.9999
2	0.9750	-0.6501	0.9867	-120.1361	0.9810	119.5639	0.9749	-0.6536	0.9868	-120.1324	0.9810	119.5638
3	0.9691	-0.7637	0.9838	-120.1732	0.9766	119.4572	0.9690	-0.7672	0.9838	-120.1695	0.9766	119.4572
4	0.9662	-0.8026	0.9829	-120.1871	0.9747	119.4152	0.9661	-0.8061	0.9830	-120.1834	0.9747	119.4151
5	0.9651	-0.8077	0.9823	-120.1854	0.9739	119.4129	0.9650	-0.8112	0.9823	-120.1817	0.9739	119.4128
6	0.9617	-0.7779	0.9791	-120.0724	0.9709	119.5594	0.9617	-0.7814	0.9791	-120.0688	0.9709	119.5593
7	0.9508	-0.8995	0.9729	-120.0039	0.9615	119.5421	0.9507	-0.9030	0.9729	-120.0002	0.9615	119.5420
8	0.9594	-0.7865	0.9779	-120.0855	0.9709	119.5683	0.9593	-0.7900	0.9779	-120.0819	0.9709	119.5683
9	0.9438	-0.9633	0.9689	-119.9915	0.9566	119.5386	0.9438	-0.9669	0.9689	-119.9878	0.9566	119.5385
10	0.9388	-1.0206	0.9658	-119.9830	0.9528	119.5385	0.9387	-1.0241	0.9658	-119.9794	0.9528	119.5385
11	0.9363	-1.0512	0.9643	-119.9793	0.9510	119.5371	0.9362	-1.0547	0.9644	-119.9757	0.9510	119.5370
12	0.9352	-1.0544	0.9634	-119.9785	0.9500	119.5402	0.9351	-1.0580	0.9635	-119.9748	0.9500	119.5402
13	0.9352	-1.0713	0.9637	-119.9800	0.9502	119.5376	0.9352	-1.0749	0.9638	-119.9763	0.9502	119.5376
14	0.9477	-0.9139	0.9710	-119.9886	0.9585	119.5349	0.9476	-0.9174	0.9711	-119.9849	0.9582	119.5348
15	0.9476	-0.9147	0.9709	-119.9886	0.9584	119.5344	0.9475	0.9183	0.9710	-119.9850	0.9584	119.5344
16	0.9499	-0.9447	0.9725	-119.9626	0.9602	119.5352	0.9499	-0.9482	0.9725	-119.9589	0.9602	119.5352
17	0.9459	-0.9111	0.9701	-119.9863	0.9569	119.5378	0.9459	-0.9147	0.9701	-119.9826	0.9569	119.5377
18	0.9640	-0.7742	0.9803	-120.1533	0.9723	119.4575	0.9640	-0.7777	0.9804	-120.1495	0.9723	119.4574
19	0.9622	-0.7770	0.9791	-120.1454	0.9706	119.4561	0.9621	-0.7805	0.9791	-120.1417	0.9706	119.4560
20	0.9625	-0.7776	0.9792	-120.1456	0.9708	119.4546	0.9625	-0.7811	0.9793	-120.1419	0.9708	119.4545
21	0.9610	-0.7735	0.9780	-120.1467	0.9697	119.4701	0.9609	-0.7770	0.9780	-120.1429	0.9697	119.4700
22	0.9582	-0.7730	0.9758	-120.1403	0.9672	119.4825	0.9581	-0.7765	0.9758	-120.1366	0.9672	119.4824
23	0.9641	-0.7590	0.9820	-120.1890	0.9734	119.4163	0.9640	-0.7626	0.9820	-120.1853	0.9734	119.4163
24	0.9628	-0.7599	0.9811	-120.1954	0.9733	119.4204	0.9627	-0.7634	0.9811	-120.1917	0.9733	119.4203
25	0.9624	-0.7593	0.9809	-120.1960	0.9731	119.4210	0.9624	-0.7628	0.9810	-120.1922	0.9731	119.4209

Según los resultados presentados en la Tabla 5.3 para las tensiones de fase en el sistema IEEE 25 nodos, es posible notar que el error máximo entre el método triangular y el método de Newton-Raphson es 0.0098 % para la fase A, 0.0104 % para la fase B y 0.0051 % para la fase C, respectivamente. Lo cual confirma que el método triangular presentado en el Capítulo 3 es eficiente para resolver problemas de flujo de potencia en sistemas trifásicos desbalanceados.

Por otro lado, una vez halladas las tensiones de fase reportadas en la Tabla 5.3, se determinan las pérdidas de potencia por fase y totales en el sistema de prueba IEEE 25 nodos. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.4

Tabla 5.4

Comparación de pérdidas entre DIGSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 25 nodos.

Parámetro	MATLAB	DIGSILENT	Unidad
Iteraciones	9	4	—
Tiempo de cómputo	0.1882	—	s
Pérdida Fase A	36.8801	36.8844	KW
Pérdida Fase B	14.7837	15.7835	KW
Pérdida Fase C	23.7570	23.7553	KW
Pérdidas Totales	75.4207	75.4232	KW

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la Tabla 5.4 el método triangular para flujo de potencia se asemeja mucho a los valores obtenidos con el método Newton-Raphson. Esto demuestra que el método triangular es confiable para resolver problemas asociados a flujo de potencia en sistemas de distribución asimétricos; además,

este solo tomó 9 iteraciones. En términos del error entre las pérdidas por fase y las pérdidas totales, para el método triangular y el método de Newton-Raphson, son de 0.0115 % para la fase A, 0.0015 % para la fase B, 0.0071 % para la fase C y 0.0032 % para las pérdidas totales del sistema.

Es importante recalcar que los errores entre los métodos están asociados al criterio de convergencia, ya que el método triangular trabaja con un valor 1×10^{-10} , mientras que el DIGSILENT permite un error de convergencia máximo de 1×10^{-6}

5.3. Sistema de prueba IEEE 37 nodos

Para este sistema de prueba en la Tabla 5.5 se presentan los resultados comparativos entre el método de flujo de potencia triangular programado en MATLAB y el método de Newton-Raphson disponible en el software DIGSILENT.

Tabla 5.5

Comportamiento de la tensión por fase en cada nodo del sistema IEEE 37 nodos.

Nodo	MATLAB						DigSILENT					
	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C	V_A	δ_i^A	V_B	δ_i^B	V_C	δ_i^C
1	1.0000	0.0000	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000	1.0000	0.0016	1.0000	-119.9965	0.9999	119.9949
2	0.9868	-0.2074	0.9925	-120.2320	0.9808	119.6710	0.9868	-0.2057	0.9925	-120.2286	0.9808	119.6659
3	0.9787	-0.3596	0.9882	-120.3445	0.9714	119.4834	0.9787	-0.3580	0.9882	-120.3410	0.9714	119.4783
4	0.9686	-0.5260	0.9873	-120.4685	0.9639	119.3764	0.9686	-0.5244	0.9873	-120.4651	0.9638	119.3713
5	0.9669	-0.5214	0.9871	-120.4719	0.9630	119.3994	0.9669	-0.5197	0.9871	-120.4685	0.9629	119.3943
6	0.9656	-0.5230	0.9869	-120.4906	0.9628	119.4125	0.9656	-0.5214	0.9870	-120.4872	0.9628	119.4074
7	0.9652	-0.5192	0.9865	-120.4866	0.9625	119.4153	0.9652	-0.5176	0.9866	-120.4832	0.9624	119.4102
8	0.9648	-0.5182	0.9870	-120.5004	0.9629	119.4214	0.9648	-0.5165	0.9871	-120.4970	0.9629	119.4164
9	0.9615	-0.6532	0.9875	-120.4656	0.9566	119.4366	0.9615	-0.6516	0.9876	-120.4622	0.9566	119.4315
10	0.9590	-0.6832	0.9875	-120.4774	0.9549	119.4585	0.9590	-0.6816	0.9875	-120.4740	0.9548	119.4534
11	0.9548	-0.7519	0.9885	-120.4953	0.9520	119.5149	0.9549	-0.7503	0.9886	-120.4919	0.9519	119.5098
12	0.9549	-0.7631	0.9886	-120.4837	0.9511	119.5206	0.9549	-0.7614	0.9887	-120.4803	0.9510	119.5155
13	0.9506	-0.8107	0.9894	-120.5233	0.9496	119.5721	0.9506	-0.8091	0.9895	-120.5199	0.9495	119.5671
14	0.9452	-0.9099	0.9907	-120.5351	0.9450	119.6411	0.9452	-0.9083	0.9907	-120.5317	0.9450	119.6361
15	0.9457	-0.9273	0.9897	-120.4865	0.9424	119.6372	0.9467	-0.9257	0.9897	-120.4831	0.9423	120.6322
16	0.9458	-0.9413	0.9898	-120.4717	0.9413	119.6429	0.9459	-0.9397	0.9898	-120.4683	0.9412	119.6379
17	0.9461	-0.8802	0.9863	-120.4621	0.9428	119.5912	0.9462	-0.8786	0.9864	-120.4587	0.9428	119.5862
18	0.9384	-0.9814	0.9925	-120.6104	0.9431	119.7487	0.9384	-0.9798	0.9926	-120.6070	0.9430	119.7437
19	0.9365	-1.0243	0.9933	-120.6123	0.9414	119.7785	0.9365	-1.0227	0.9933	-120.6089	0.9413	119.7735
20	0.9368	-1.0644	0.9937	-120.5738	0.9392	119.7744	0.9368	-1.0628	0.9937	-120.5704	0.9392	119.7694
21	0.9369	-1.0786	0.9938	-120.5589	0.9381	119.7802	0.9370	-1.0770	0.9939	-120.5555	0.9381	119.7752
22	0.9369	-1.0779	0.9938	-120.5611	0.9385	119.7738	0.9369	-1.0763	0.9939	-120.5577	0.9384	119.7688
23	0.9594	-0.6451	0.9854	-120.4788	0.9553	119.4189	0.9594	-0.6435	0.9855	-120.4754	0.9552	119.4139
25	0.9790	-0.3561	0.9864	-120.3058	0.9696	119.4690	0.9790	-0.3545	0.9864	-120.3024	0.9695	119.4639
26	0.9692	-0.3720	0.9865	-120.2884	0.9683	119.4755	0.9792	-0.3704	0.9866	-120.2850	0.9683	119.4704
27	0.9791	-0.3321	0.9847	-120.2979	0.9699	119.4490	0.9791	-0.3304	0.9848	-120.2945	0.9698	119.4439
28	0.9783	-0.3479	0.9854	-120.3203	0.9695	119.4309	0.9783	-0.3463	0.9854	-120.3169	0.9694	119.4258
29	0.9775	-0.2986	0.9809	-120.3178	0.9685	119.3591	0.9775	-0.2970	0.9809	-120.3144	0.9685	119.3540
30	0.9770	-0.2947	0.9809	-120.3238	0.9686	119.3639	0.9770	-0.2931	0.9809	-120.3203	0.9686	119.3588
31	0.9743	-0.2809	0.9813	-120.3595	0.9690	119.3973	0.9743	-0.2793	0.9813	-120.3561	0.9689	119.3922
32	0.9794	-0.2276	0.9742	-120.2509	0.9663	119.2086	0.9794	-0.2260	0.9742	-120.2475	0.9663	119.2035
33	0.9796	-0.2090	0.9731	-120.2502	0.9665	119.1887	0.9797	-0.2074	0.9732	-120.2468	0.9664	119.1836
34	0.9797	-0.1990	0.9724	-120.2447	0.9666	119.1788	0.9797	-0.1974	0.9724	-120.2413	0.9665	119.1737
35	0.9809	-0.0984	0.9637	-120.1553	0.9666	119.0732	0.9809	-0.0968	0.9637	-120.1519	0.9665	119.0682
36	0.9811	-0.0859	0.9626	-120.1451	0.9666	119.0599	0.9811	-0.0843	0.9627	-120.1416	0.9665	119.0548
37	0.9812	-0.0708	0.9617	-120.1400	0.9669	119.0462	0.9812	-0.0692	0.9617	-120.1366	0.9668	119.0411

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA DIGSILENT Y MATLAB30

Según los resultados presentados en la Tabla 5.5 para las tensiones de fase en el sistema IEEE 37 nodos, es posible notar que el error máximo entre el método triangular y el método de Newton-Raphson es 0.0068 % para la fase A, 0.091 % para la fase B, y 0.0110 % para la fase C, respectivamente. Lo cual confirma que el método triangular presentado en el Capítulo 3 es eficiente para resolver problemas de flujo de potencia en sistemas trifásicos desbalanceados.

Por otro lado, una vez halladas las tensiones de fase reportadas en la Tabla 5.5, se determinan las pérdidas de potencia por fase y totales en el sistema de prueba IEEE 37 nodos. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6

Comparación de pérdidas entre DIgSILENT y MATLAB para el sistema de prueba IEEE 37 nodos.

Parámetro	MATLAB	DIgSILENT	Unidad
Iteraciones	9	4	—
Tiempo de cómputo	0.2919	—	s
Pérdida Fase A	27.1532	27.1533	KW
Pérdida Fase B	11.9143	11.9121	KW
Pérdida Fase C	37.0683	37.0732	KW
Pérdidas Totales	76.1357	76.1386	KW

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la Tabla 5.6 el método triangular para flujo de potencia se asemeja mucho a los valores obtenidos con el método de Newton-Raphson. Esto demuestra que el método triangular es confiable para resolver problemas asociados a flujo de potencia en sistemas de distribución asimétricos; además, este solo tomó 5 iteraciones y de 0.0905 s. En términos del error entre las pérdidas por fase, y las pérdidas totales, para el método triangular y el método de Newton-Raphson, son de 0.0098 % para la fase A, 0.0104 % para la fase B, 0.0051 % para la fase C.

Es importante recalcar que los errores entre los métodos están asociados al criterio de convergencia, ya que el método triangular trabaja con un valor de 1×10^{-10} , mientras que el DIgSILENT permite un error de convergencia máximo de 1×10^{-06} .

6. Balance óptimo de fases

En este capítulo se muestran los resultados de balance óptimo de fases para sistemas de distribución asimétricos mediante la aplicación del método de caza de ballenas (WOA) y el método triangular, según lo expuesto en el Capítulo 3. Con el fin de realizar las validaciones computacionales, este método se compara con diferentes reportes de la literatura especializada que incluyen el algoritmo genético de Chu & Beasley (CBGA), el método de búsqueda por vórtices discreto (DVSA) propuestos por cortés-Caicedo et al., en [5].

En el caso del método de optimización propuesto con el fin de hacer sus validaciones computacionales, se emplean los parámetros presentados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1

Parámetros usados en la implementación del WOA.

Método caza de ballenas	
Número de soluciones candidatas	20
Número de iteraciones	1000
Flujo de potencia	
Número de iteraciones	1000
Tolerancia	1×10^{-10}
Prueba por sistema	
Número de evaluaciones	100

Para determinar el número de soluciones candidatas y el número de iteraciones del WOA, se realizó un análisis de sensibilidad. En este análisis se probaron entre 15 y 50 soluciones candidatas, y entre 500 y 10000 iteraciones. De estas se pudo determinar lo siguiente:

- i. Para un número reducido de iteraciones y soluciones candidatas, el proceso es más rápido, pero la probabilidad de encontrar el balance de fases óptimo es baja.
- ii. Para un número elevado de iteraciones y soluciones candidatas, el proceso se hace más lento, pero la probabilidad de encontrar el balance de fases óptimo es mayor.
- iii. Para un número de entre 500 y 1000 iteraciones, y entre 15 y 50 soluciones candidatas, se encontró un equilibrio entre el tiempo y la posibilidad de encontrar el balance óptimo de fases.

Después de realizar el análisis anterior, se decidió tomar como parámetros del WOA un número de iteraciones máximo de 1000 y de soluciones candidatas 20 como se observa en la tabla 6.1.

6.1. Sistema de prueba IEEE 8 nodos

En la Tabla 6.2 se observan los resultados obtenidos con el método propuesto, así como, con las estrategias comparativas reportadas en [5].

Tabla 6.2

Resultados balance de fases sistema de 8 Nodos

Método	Conexión	Fase A (kW)	Fase B (kW)	Fase C (kW)	Total (kW)
Mod. Referencia	1,1,1,1,1,1	1.7158	2.3305	9.9462	13.9925
CBGA	6,1,5,1,4,4,1	2.7295	4.0957	3.7617	10.5869
DVSA	6,1,5,1,2,1,1	2.7295	4.0957	3.7617	10.5869
WOA	2,4,3,2,1,4,4	2.7214	3.9993	3.8464	10.5869

Según los resultados presentados en la Tabla 6.2, se puede observar que: (i) el método propuesto obtuvo una reducción del 24.33 %, es decir, 3.4056 kW sobre las pérdidas totales del modelo de referencia; y (ii) el CBGA y el DVSA presentan la misma función objetivo que el WOA, sin embargo, la principal diferencia está en que para este sistema de prueba, con diferentes configuraciones de conexión (ver segunda columna de la Tabla 6.2), lo cual hace que el problema de balance de fases sea un problema multimodal, i.e., que presenta múltiples soluciones óptimas equivalentes.

Con el fin de verificar la eficiencia del método propuesto en términos de reducción de pérdidas para el sistema IEEE 8 nodos, se realiza la gráfica de las pérdidas por fase y totales para el modelo de referencia y el WOA. En la Figura 6.1 se presenta esta comparación.

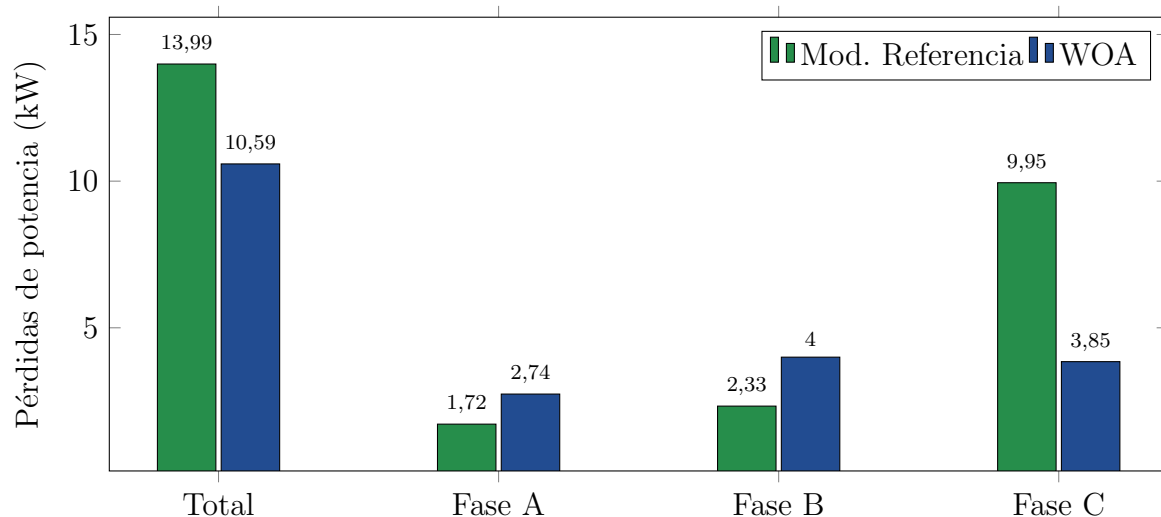


Figura 6.1: Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 8 nodos.

Según los resultados presentados en la Figura 6.1 para las pérdidas de potencia en el sistema IEEE 8 nodos, los resultados obtenidos con el método WOA y con el caso base se encuentra una reducción de las pérdidas totales en un error de 24.30 % (3.40) kW sobre las pérdidas totales del modelo de referencia, para la Fase A es mayor al de referencia en un error de 59.30 %, i.e., (1.02) kW, para la Fase B es mayor al de referencia en un error de 71.67 %, lo que implica una diferencia de 1.67 kW, para la Fase C se disminuyó el valor un error de 61.31 %, es decir, un 6.10 kW. Lo cual comprueba que el método WOA presenta un mejor balance de fases, ya que la diferencia no supera el 2 % lo cual permite cumplir con el objetivo de balance de fases.

6.2. Sistema de prueba IEEE 25 nodos

En la Tabla 6.3. Se observan los resultados obtenidos con el método de propuesto, así como, con las estrategias comparativas reportadas en [5].

Tabla 6.3

Resultados balance de fases sistema de 25 nodos

Método	Conexión	Fase A (kW)	Fase B (kW)	Fase C (kW)	Total (kW)
Mod. de referencia	1,1	36.8801	14.7837	23.757	75.4207
CBGA	1,1,3,5,2,1,1,1,2,6,5,1,5,3,6,6,3,3,1,3,5,2,4,3	25.7626	25.9510	20.5782	72.2919
DVSA	1,2,4,5,6,1,2,3,1,5,4,3,3,5,5,2,3,3,5,4,2,2,2,3	25.6645	26.1613	20.4630	72.2888
WOA	1,5,2,1,2,6,6,1,3,2,1,3,3,1,1,2,2,2,3,2,4,4,2,3	26.3159	26.3842	19,6207	72.3208

Según los resultados presentados en la Tabla 6.3, se puede observar que: (i) el método propuesto obtuvo una reducción del 4.11 %, es decir, 3.1 kW sobre las pérdidas totales del modelo de referencia; y (ii) el CBGA y el DVSA presentan un resultado con mejor desempeño que el método WOA; sin embargo, esta diferencia es inferior a 0.0314 kW, lo cual en términos prácticos de implementación no produce un efecto significativo en el resultado final. Lo más importante de los resultados reportados en la Tabla 6.3 corresponde a la posibilidad de tener múltiples opciones para implementar el balance de fases por parte de los operadores de red, lo cual les garantiza una gama de posibilidades que pueden ser exploradas en función de la cantidad de movimientos por nodo que haya que realizar, así como el desplazamiento de las cuadrillas que implementan dichos planes.

Con el fin de verificar la eficiencia del método propuesto en términos de reducción de pérdidas para el sistema IEEE 25 nodos, se realiza la gráfica de las pérdidas por fase y totales para el modelo de referencia y el WOA. En la Figura 6.2 se presenta esta comparación.

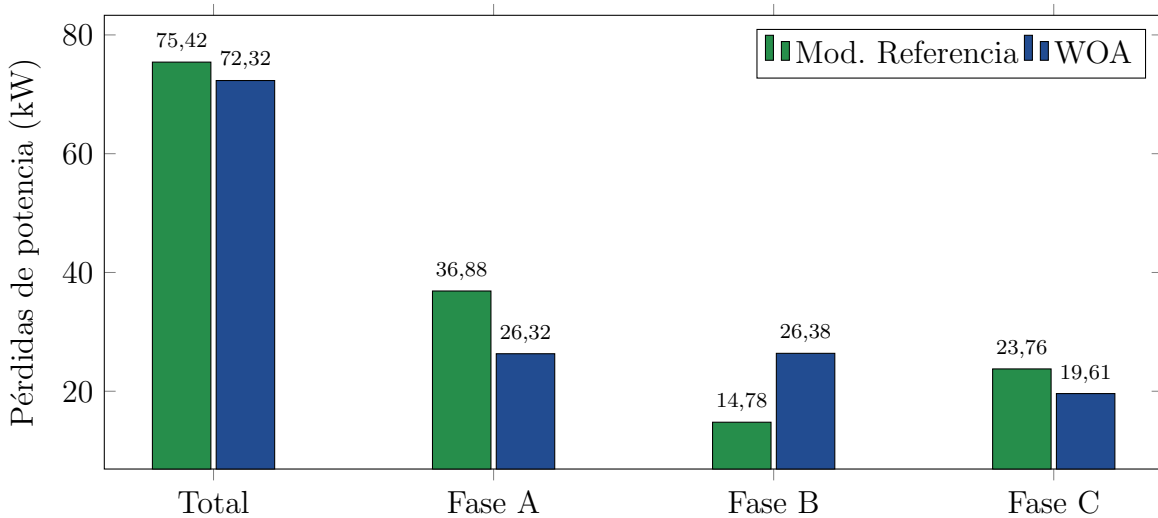


Figura 6.2: Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 25 nodos.

Según los resultados presentados en la Figura 6.2, para las pérdidas de potencia en el sistema IEEE 25 nodos, los resultados obtenidos con el método WOA y con el

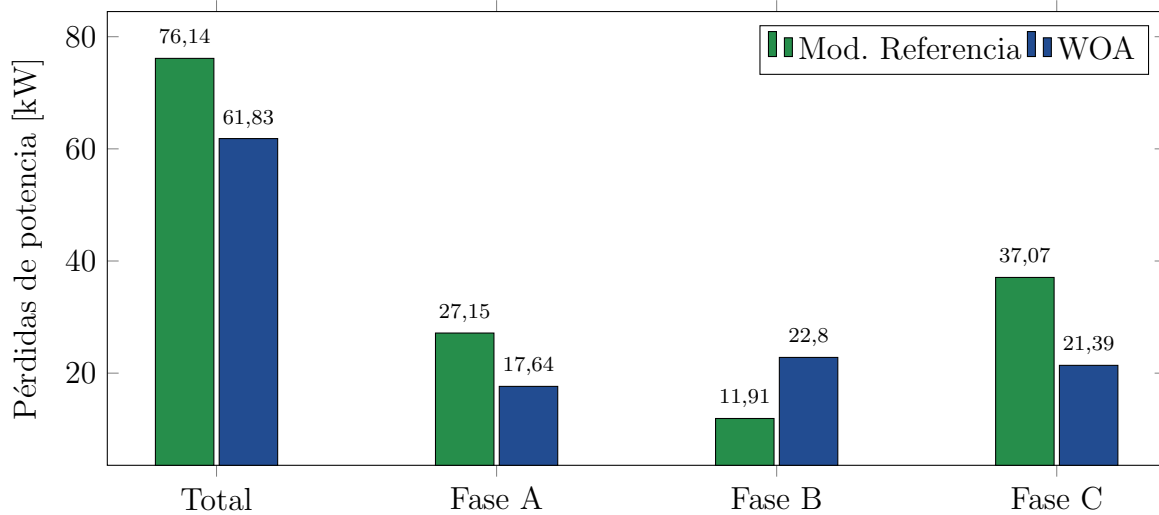


Figura 6.3: Comparación de pérdidas entre el caso base y el WOA para el sistema de prueba IEEE 37 nodos.

Según los resultados presentados en la Figura 6.3 para las pérdidas de potencia en el sistema IEEE 37 nodos, los resultados obtenidos con el método WOA y con el caso base se encuentra una reducción de las pérdidas totales en un error de 18.79 % es decir 14.31 kW, sobre las pérdidas totales del modelo de referencia, para la Fase A es mayor al de referencia en un error de 35.03 % es decir 9.51 kW, para la Fase B es mayor al de referencia en un error de 91.44 % es decir un 10.89 kW, para la Fase C se disminuyo el valor un error de 42.29 % es decir un 15.68 kW.

7. Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación, así como, los posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar.

En este proyecto de grado se presentó la aplicación del método de optimización basado en el proceso de caza de las ballenas jorobadas, el cual se implementó para resolver el problema de balance de fases en sistemas de distribución de energía con estructura trifásica desbalanceada. Se propuso una metodología del tipo maestro-esclavo, en la cual la etapa maestra del algoritmo de caza de ballenas WOA, se encarga de la generación de las posibles configuraciones para los nodos de demanda, empleando una codificación discreta con números entre 1 y 6, los cuales representan todas las posibles configuraciones de carga por cada nodo. En la etapa esclava se empleó el método de flujo de potencia trifásico triangular, en el cual se evaluó cada configuración asociada con el algoritmo maestro, con el fin de hallar las pérdidas de potencia.

Los resultados numéricos obtenidos demuestran que el algoritmo WOA permite obtener la misma solución óptima para el sistema de prueba IEEE 8 nodos que los métodos DVSA y CBGA, sin embargo, para los sistemas de prueba IEEE 25 y IEEE 37 nodos, los resultados están por debajo en relación con los métodos comparativos. No obstante, las diferencias son inferiores a 0.40 kW, lo cual, es un valor bajo en comparación con los niveles de reducción alcanzados. Por lo anterior, los resultados obtenidos en este trabajo de grado pueden tomarse como referencia para proponer mejoras en el algoritmo WOA, con el fin de mejorar su desempeño numérico.

Para trabajos futuros, es posible desarrollar las siguientes propuestas:

- i. Proponer un algoritmo híbrido basado en el EOA y el DVSA, para solucionar el problema de balance de fases en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- iii. Realizar mejoras en el proceso del algoritmo de caza de ballenas WOA, que refiere a las variables de selección aleatorias, haciendo que el proceso de selección de dichas variables sea más adecuado y lo que va a permitir mejorar el proceso iterativo.
- iii. Formular un flujo de potencia de naturaleza trifásica de cuatro hilos, con el fin de considerar los efectos del conductor de neutro en las pérdidas de energía de la red, especialmente para cargas trifásicas con conexión estrella, así como cargas monofásicas y bifásicas con conexión a neutro.

Como recomendación, es importante tener en cuenta qué, en el caso de cargas trifásicas como motores, es importante incluir el modelo matemático las restricciones necesarias para mantener la secuencia de alimentación, ya que una inversión en dicha secuencia puede causar daños irreparables en estos dispositivos.

8. Bibliografía

- [1] B. Cortés-Caicedo, F. Molina-Martin, L. F. Grisales-Noreña, O. D. Montoya, and J. C. Hernández, “Optimal Design of PV Systems in Electrical Distribution Networks by Minimizing the Annual Equivalent Operative Costs through the Discrete-Continuous Vortex Search Algorithm,” *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 851, jan 2022.
- [2] M. Lavorato, M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, “A Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1734–1742, aug 2010.
- [3] O. D. Montoya, F. M. Serra, C. H. D. Angelo, H. R. Chamorro, and L. Alvarado-Barrios, “Heuristic Methodology for Planning AC Rural Medium-Voltage Distribution Grids,” *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5141, aug 2021.
- [4] A. A. Sallam and O. P. Malik, *Electric Distribution Systems*. John Wiley & Sons, Inc., apr 2011.
- [5] B. Cortés-Caicedo, L. S. Avellaneda-Gómez, O. D. Montoya, L. Alvarado-Barrios, and H. R. Chamorro, “Application of the Vortex Search Algorithm to the Phase-Balancing Problem in Distribution Systems,” *Energies*, vol. 14, no. 5, p. 1282, feb 2021.
- [6] O. D. Montoya, F. M. Serra, and C. H. D. Angelo, “On the Efficiency in Electrical Networks with AC and DC Operation Technologies: A Comparative Study at the Distribution Stage,” *Electronics*, vol. 9, no. 9, p. 1352, aug 2020.
- [7] S. K. Mondal, “Active and reactive power compensation of Data Center using Multi-Level STATCOM Inverter,” in *2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, jun 2016.
- [8] N. Shirzadi, F. Nasiri, and U. Eicker, “Optimal Configuration and Sizing of an Integrated Renewable Energy System for Isolated and Grid-Connected Microgrids: The Case of an Urban University Campus,” *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3527, jul 2020.
- [9] H. A. Alvizures Aguilar, “Desarrollo de una guía práctica para ubicar fallas en subestaciones de media y alta tensión, por medio de estudios termográficos,” Ph.D. dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.
- [10] K. Laconico and R. Aguirre, “Optimal load balancing and capacitor sizing and siting of an unbalanced radial distribution network,” in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. IEEE, 2019, pp. 939–944.
- [11] M. Fahim, M. El Hassan, and M. B. El Najjar, “Single phase load balancing in a three phase system at distribution and unit level,” in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2018.

- [12] P. D. Prasad-Reddy, V. C. Veera-Reddy, and T. Gowri-Manohar, “Whale optimization algorithm for optimal sizing of renewable resources for loss reduction in distribution systems,” *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 4, no. 1, mar 2017.
- [13] A. Marini, S. Mortazavi, L. Piegari, and M.-S. Ghazizadeh, “An efficient graph-based power flow algorithm for electrical distribution systems with a comprehensive modeling of distributed generations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 229–243, may 2019.
- [14] E. F. González González, J. A. Morante Benavides, and W. F. Vicuña Terán, “Estudio de un sistema de distribución y acometidas en baja tensión.” B.S. thesis, 2015.
- [15] “fundacionendesa, “¿Qué es la red de distribución y qué elementos la componen?”,” cited October 2020. [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-red-de-distribucion>
- [16] O. I. Correa Maza, “Estudio de reconfiguración y optimización de los alimentadores de la subestación machala perteneciente a la corporación nacional de electricidad sa-regional el oro,” B.S. thesis, 2010.
- [17] K. P. Schneider, B. Mather, B. Pal, C.-W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, J. C. Fuller, J. L. R. Pereira, L. F. Ochoa, L. R. de Araujo *et al.*, “Analytic considerations and design basis for the ieeee distribution test feeders,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3181–3188, 2017.
- [18] M. Albadi and K. Volkov, “Power flow analysis,” *Computational Models in Engineering*, 2020.
- [19] F. S. Quille Pinto, “Optimización del flujo de potencia en el sistema eléctrico ecuatoriano con programación no lineal bajo matlab,” B.S. thesis, 2015.
- [20] K.P.Tapasco-Suarez, “Aproximaciones del flujo de carga en sistemas de distribución,” *Energies*, p. 16, 2017.
- [21] O. D. Montoya and W. Gil-González, “On the numerical analysis based on successive approximations for power flow problems in ac distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106454, 2020.
- [22] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, W. T. Amin, L. A. Rojas, and J. Campillo, “Vortex search algorithm for optimal sizing of distributed generators in ac distribution networks with radial topology,” in *Workshop on Engineering Applications*. Springer, 2019, pp. 235–249.
- [23] A. Garces, “A linear three-phase load flow for power distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, 2015.
- [24] G. Chang, S. Chu, and H. Wang, “An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 2, pp. 882–884, 2007.

- [25] T. Shen, Y. Li, and J. Xiang, “A graph-based power flow method for balanced distribution systems,” *Energies*, vol. 11, no. 3, pp. 1–11, 2018.
- [26] M. A. Rios, J. C. Castano, A. Garcés, and A. Molina-Cabrera, “Phase balancing in power distribution systems: A heuristic approach based on group-theory,” in *2019 IEEE Milan PowerTech*. IEEE, 2019.
- [27] D. J. Romero-López and A. Vargas-Rojas, “Modelo de incentivos para la reducción de pérdidas de energía eléctrica en colombia,” *Revista de la Maestría en Derecho Económico*, vol. 6, no. 6, p. 227, 2010.
- [28] J. Zhu, M.-Y. Chow, and F. Zhang, “Phase balancing using mixed-integer programming [distribution feeders],” *IEEE transactions on power systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1487–1492, 1998.
- [29] J. Zhu, G. Bilbro, and M.-Y. Chow, “Phase balancing using simulated annealing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, 1999.
- [30] T.-H. Chen and J.-T. Cherng, “Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm,” in *Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Connecting Utilities. PICA 99. To the Millennium and Beyond (Cat. No. 99CH36351)*. IEEE, 1999, pp. 145–151.
- [31] M. Gandomkar, “Phase balancing using genetic algorithm,” in *39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004.*, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 377–379.
- [32] C.-H. Lin, C.-S. Chen, H.-J. Chuang, and C.-Y. Ho, “Heuristic rule-based phase balancing of distribution systems by considering customer load patterns,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 709–712, 2005.
- [33] A. G. Ruiz, M. G. Echeverri, and R. A. Gallego, “Balance de fases usando colonia de hormigas,” *Lenguaje*, vol. 7, no. 2, 2005.
- [34] Y. Tuppadung and W. Kurutach, “The modified particle swarm optimization for phase balancing,” in *TENCON 2006-2006 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2006, pp. 1–4.
- [35] C.-H. Lin, C.-S. Chen, H.-J. Chuang, M.-Y. Huang, and C.-W. Huang, “An expert system for three-phase balancing of distribution feeders,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1488–1496, 2008.
- [36] M.-Y. Huang, C.-S. Chen, C.-H. Lin, M.-S. Kang, H.-J. Chuang, and C.-W. Huang, “Three-phase balancing of distribution feeders using immune algorithm,” *IET generation, transmission & distribution*, vol. 2, no. 3, pp. 383–392, 2008.
- [37] C.-C. Kuo and Y.-T. Chao, “Energy management based on am/fm/gis for phase balancing application on distribution systems,” *Energy conversion and management*, vol. 51, no. 3, pp. 485–492, 2010.

- [38] M. Sathiskumar and S. Thiruvankadam, “Phase balancing of unbalanced distribution network through hybrid greedy-fuzzy algorithm,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 34, no. 6, 2011.
- [39] M. Sathiskumar, L. Lakshminarasimman, S. Thiruvankadam *et al.*, “A self adaptive hybrid differential evolution algorithm for phase balancing of unbalanced distribution system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 91–97, 2012.
- [40] R. A. Hooshmand and S. Soltani, “Fuzzy optimal phase balancing of radial and meshed distribution networks using bf-pso algorithm,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 47–57, 2011.
- [41] M. Granada Echeverri, R. A. Gallego Rendón, and J. M. López Lezama, “Optimal phase balancing planning for loss reduction in distribution systems using a specialized genetic algorithm,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 8, no. 15, 2012.
- [42] G. Grigoraş and M. Gavrilas, “Phase swapping of lateral branches from low-voltage distribution networks for load balancing,” in *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2016, pp. 20–22.
- [43] M. Swapna and R. Udaykumar, “An algorithm for optimal phase balancing of secondary distribution systems at each node,” in *2016 IEEE PES 13th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance (ESMO)*. IEEE, 2016.
- [44] N. Toma, O. Ivanov, B. Neagu, and M. Gavrilas, “A pso algorithm for phase load balancing in low voltage distribution networks,” in *2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2018, pp. 857–862.
- [45] F. K. Handhal and A. T. Rashid, “Load balancing in distribution system using heuristic search algorithm,” in *2018 International Conference on Advance of Sustainable Engineering and its Application (ICASEA)*. IEEE, 2018, pp. 48–53.
- [46] P. Gangwar, S. N. Singh, and S. Chakrabarti, “An analytical approach for phase balancing considering customer load profile,” in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [47] O. Ivanov, B.-C. Neagu, M. Gavrilas, G. Grigoras, and C.-V. Sfintes, “Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms,” in *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. IEEE, 2019.
- [48] B. Cortés-Caicedo, L. S. Avellaneda-Gómez, O. D. Montoya, L. Alvarado-Barrios, and H. R. Chamorro, “Application of the vortex search algorithm to the phase-balancing problem in distribution systems,” *Energies*, vol. 1, p. 4, 2021.
- [49] S. Mansani and U. R. Yaragatti, “Backward sweep technique based phase balancing algorithm for secondary distribution system,” in *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. IEEE, 2017, pp. 2–7.

- [50] “CREG, “Resolución 025 de 1995,” 1995.”
- [51] “CREG., “Resolución 023 del 2001,” 2001.”
- [52] J. Arias, M. Calle, D. Turizo, J. Guerrero, and J. E. Candelo-Becerra, “Historical load balance in distribution systems using the branch and bound algorithm,” *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1219, 2019.
- [53] O. D. Montoya, W. Gil-González, and L. Grisales-Noreña, “An exact minlp model for optimal location and sizing of dgs in distribution networks: A general algebraic modeling system approach,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 409–418, 2020.
- [54] W. Gil-González, O. D. Montoya, A. Rajagopalan, L. F. Grisales-Noreña, and J. C. Hernández, “Optimal selection and location of fixed-step capacitor banks in distribution networks using a discrete version of the vortex search algorithm,” *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4914, 2020.
- [55] O. Montoya, W. Gil-González, J. Hernández, D. Giral-Ramírez, and A. Medina-Quesada, “A mixed-integer nonlinear programming model for optimal reconfiguration of dc distribution feeders,” *Energies*, vol. 13, no. 17, p. 4440, 2020.
- [56] O. D. Montoya, J. A. Alarcon-Villamil, and J. C. Hernández, “Operating Cost Reduction in Distribution Networks Based on the Optimal Phase-Swapping including the Costs of the Working Groups and Energy Losses,” *Energies*, vol. 14, no. 15, p. 4535, jul 2021.
- [57] O. D. Montoya, J. S. Giraldo, L. F. Grisales-Noreña, H. R. Chamorro, and L. Alvarado-Barrios, “Accurate and Efficient Derivative-Free Three-Phase Power Flow Method for Unbalanced Distribution Networks,” *Computation*, vol. 9, no. 6, p. 61, may 2021.

Anexos

