

**ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO
DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN
MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO
DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN
MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: KAREN VANESSA BENÍTEZ TUPIZA
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito -Ecuador
2022

Karen Vanessa Benítez Tupiza

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Karen Vanessa Benítez Tupiza (Y'1997 – M'12). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Concejo Provincial de Pichincha de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el análisis multi-objetivo para óptimo dimensionamiento y ubicación de generación distribuida enfocado en mejorar la calidad de la energía eléctrica. kbenitez@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Dario Jaramillo Monge (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. mjaramillo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Karen Vanessa Benítez Tupiza con documento de identificación N° 1726456864 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



Karen Vanessa Benítez Tupiza
1726456864

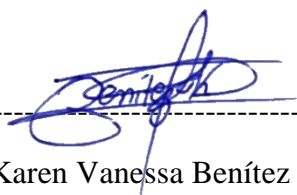
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Karen Vanessa Benítez Tupiza con documento de identificación No. 1726456864, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Análisis multi-objetivo para óptimo dimensionamiento y ubicación de generación distribuida enfocado en mejorar la calidad de la energía eléctrica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



Karen Vanessa Benítez Tupiza

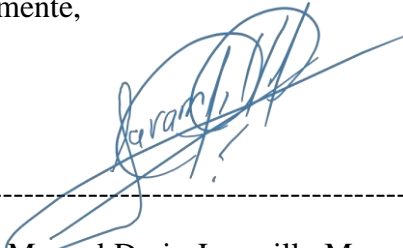
1726456864

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N° 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA, realizado por Karen Vanessa Benítez Tupiza con documento de identificación N° 1726456864, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de octubre del año 2022

Atentamente,



Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc
1714298005

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.2	Calidad en los Sistemas de Distribución	4
2.2.1	Pérdidas en el Sistema de Distribución	4
2.2.2	Estabilidad de Voltaje	5
2.3	Generación Distribuida.....	5
2.3.1	Fuentes de energía para la GD.....	5
2.3.2	Impacto en el sistema por integración de GD.....	7
2.4	Algoritmos de Optimización.....	7
2.4.1	Principio del Algoritmo Optimizador Ant Lion.....	8
3	Planteamiento del Problema.....	8
3.1	Formulación del problema.....	9
3.1.1	Función Objetivo	9
3.1.2	Algoritmo Optimizador Ant Lion.....	11
3.1.1	Metodología	12
4	Análisis de resultados.....	14
4.1	Sistema de Prueba.....	14
4.1.1	Escenario con un incremento de la demanda en sistema IEEE 14	14
4.2	Caso de Estudio.....	16
4.2.1	Inclusión de PV en barra más crítica	16
4.2.2	Incorporación de GD mediante Algoritmo OAL	17
5	Conclusiones	22
6	Referencias.....	22
6.1	Matriz de Estado del Arte	27
6.2	Resumen de Indicadores.....	32
7	Anexos.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Red eléctrica desde la generación hasta el usuario.....	4
Figura 2.- Generación distribuida solar fotovoltaica y eólica en una ciudad.....	5
Figura 3.- Casa con GD solar fotovoltaica.....	6
Figura 4.- Casa con GD eólica.....	6
Figura 5.- Caza de hormigas por Hormigas León.....	8
Figura 6.- Diagrama de pasos que forman el Algoritmo OAL.....	8
Figura 7.- Diagrama dos barras.....	9
Figura 8.- Sistema IEEE 14 barras.....	14
Figura 9.- Perfil de voltaje con IEV en el escenario con incremento de la demanda.....	15
Figura 10.- Perfil de pérdidas en líneas del escenario con incremento de la demanda.....	15
Figura 11.- IEV en cada barra con GD en Barra 14.....	16
Figura 12.- Perfil de pérdidas en líneas con GD en Barra 14.....	16
Figura 13.- Perfil de voltaje sistema IEEE 14 con GD en barra 14.....	17
Figura 14.- Curva de convergencia de Fobj1 con AG.....	17
Figura 15.- Curva de convergencia AG de Fobj con varios agentes.....	18
Figura 16.- Curva de convergencia de Fobj con OAL.....	18
Figura 17.- Curva de convergencia OAL de Fobj con varios agentes.....	18
Figura 18.- a) Pérdidas de potencia activa para cada uno de los arreglos de GD obtenidos mediante OAL y b) IEV para activa para cada uno de los arreglos de GD obtenidos mediante OAL.....	19
Figura 19.- Perfil de voltaje sistema IEEE 14 con GD en Barra 4 y Barra 3.....	21
Figura 20.- Perfil de pérdidas en líneas con GD en Barra 4 y Barra 3.....	21
Figura 21.- IEV en cada barra con GD en Barra 4 y Barra 3.....	21
Figura 22.- Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	32
Figura 23.- Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	32
Figura 24.- Indicador de solución - Estado del arte.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidades según tecnologías para GD	6
Tabla 2. Arreglos para obtener diferentes valores de potencia.	7
Tabla 3. Variables para el algoritmo OAL	13
Tabla 4. Tabla de funciones para implementación de OAL.....	13
Tabla 5. Pseudo código OAL	13
Tabla 6. Variables para flujo de potencia.....	14
Tabla 7. Pseudo código Flujo de Potencia	14
Tabla 8. Incremento de carga	15
Tabla 9. Pérdida e índice de voltaje total del sistema	15
Tabla 10. Integración de GD en barra crítica	16
Tabla 11. Resultados ante la integración de 2 sistemas de GD.....	20
Tabla 12: Matriz de estado del arte.	27
Tabla 13. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras.	33
Tabla 14. Datos de cargas del sistema IEEE de 14 barras	33

ANÁLISIS MULTI-OBEJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Resumen

El comportamiento creciente de la demanda de energía eléctrica y la concientización acerca del cuidado del medio ambiente ha permitido que la generación distribuida (GD) esté en auge en los últimos años. Es por ello, que el presente documento tiene como propósito la óptima localización y capacidad de (GD) en función de múltiples objetivos que corresponden a la minimización de pérdidas de potencia activa, mejoramiento del índice de estabilidad de voltaje y reducción de costos en la red. Con este fin, se propone la utilización de un algoritmo inspirado en el comportamiento de las hormigas león que es conocido como optimizador Ant Lion (OAL).

Palabras Clave: Generación distribuida, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas de Distribución, Optimización Ant Lion, Calidad de energía.

Abstract

The growing behavior of electric power demand and the awareness of environmental care has allowed distributed generation (DG) to be booming in recent years. For this reason, the purpose of this document is the optimal location and capacity of (DG) based on multiple objectives that correspond to the minimization of active power losses, improvement of the voltage stability index and cost reduction in the network. To this goal, the use of an algorithm inspired by the behavior of lion ants, known as Ant Lion Optimizer (OAL), was proposed.

Keywords: Distributed power generation, Renewable energy sources, Power distribution networks, Ant Lion optimization, Power quality.

1 Introducción

Con el pasar de los años el crecimiento considerable y constante de la población mundial. Sumado a la industrialización, la creciente adquisición de nuevos electrodomésticos y la falta de concientización por parte de los usuarios sobre el uso de la electricidad. Ha incitado que cada año aumente cuantiosamente la demanda mundial de energía eléctrica [1],[2].

La Agencia Internacional de Energía (AIE) indica que la energía eléctrica pertenece al tipo de energía final con un crecimiento más rápido en cuestiones de demanda, en el año 2021 incremento en un 6% y para el periodo 2022-2024 se espera un incremento anual del 2.7 % [3]. En consecuencia, al mencionado comportamiento se han presentado varios problemas como: la escasez y cortes de energía, además de grandes impactos ambientales como el incremento de las emisiones de CO₂ por el uso de fuentes de energía convencionales [4],[5].

El CO₂ es un gas de efecto invernadero que influye directamente en el calentamiento global. La generación de energía en conjunto con el transporte representó un poco más de los dos tercios de las emisiones globales en el año 2019 [6]. Para el año 2020 dichas emisiones disminuyeron en un 5.8% debido a que la pandemia afectó tanto a la demanda de petróleo como al carbón. Todo lo contrario, sucedió para el 2021, pues se tuvo un aumento del 6.9 % en emisiones de CO₂, debido al incremento anual de demanda global de electricidad [7],[8].

Los autores [9],[10] mencionan que las fuentes de energía a base de combustibles fósiles emiten cantidades altas de CO₂/kWh como: el gas natural con valores de 0.6 a 2 lb CO₂/kWh y el carbón un rango de 1.4 a 3.6 lb CO₂/kWh. Para el caso de las energías

renovables se tienen valores más bajos de emisión, con la de tipo fotovoltaico se tiene valores de 0.066 y 0.18 lb CO₂/kWh, mientras que la eólica emite 0.017 a 0.044 lb CO₂/kWh.

Por todo lo mencionado y basándose en el escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 planeado por AIE y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7) planteados por la ONU, donde se menciona el garantizar acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables, sostenibles y modernos para el año 2030 [11],[12]. Se plantea la generación distribuida (GD) como solución a la creciente necesidad de implementar más unidades de generación para satisfacer la demanda.

La GD es un tipo de generación de corto alcance por eso se integra en lugares cercanos a la carga y utilizan fuentes de energía renovable, que por naturaleza son: pequeñas, modulares y distribuidas geográficamente [13],[14]. Las comúnmente utilizadas son las de tipo solar fotovoltaica y eólica.

Las principales ventajas de la inserción de GD en el sistema son: reducción de pérdidas en las líneas, mejoramiento de la calidad de energía y disminución de costos de operación y mantenimiento [9]. Pero un acceso desordenado o no controlado, repercutirá negativamente en la operación del sistema de distribución lo que afecta a la calidad y confiabilidad de la red [15].

Se han utilizado diferentes algoritmos para determinar la capacidad y ubicación de la GD dentro de los sistemas. Algunos mencionados son:

Algoritmo Genético (AG) utilizado en [16], se enfoca en la minimización de pérdidas y de la distorsión armónica total. De manera que su resultado es un mejor perfil de tensión.

El Método de Optimización de Colonia de Hormigas (OCH), cuya función objetivo es la reducción de pérdidas de potencia y costos. Obteniendo resultados donde se mejora el perfil de tensión [17]. Lo mismo para el Algoritmo Meta-Evolutivo de Luciérnaga (AMEDL) que es utilizado en función de la minimización de costos y pérdidas [18].

También el autor [19], propone el Algoritmo de Optimización Cuckoo Search (AOCS), para la mejora del perfil de voltaje mediante la minimización de pérdidas y la mejora del índice de estabilidad de voltaje (IEV). Otro método es el Big Bang Big Crunch (MBBBC), que se utiliza para minimización de pérdidas en sistemas de distribución equilibrados y desequilibrados [20].

Algunos de los métodos mencionados tienen como característica común que se enfocan en un solo objetivo como minimización de pérdidas de potencia. Otros tienen dos funciones objetivo como reducción de pérdidas y costos. De forma que ninguno, se enfoca en tres funciones objetivo, que además correspondan a mejorar el índice de estabilidad de voltaje, minimizar pérdidas y costos. Todo esto sumado a una característica en común que comparten varios métodos, que es realizar un mayor esfuerzo computacional para encontrar una óptima solución [21].

Debido a estas razones, el presente artículo propone el uso de del algoritmo Optimizador Ant Lion (OAL), pues es uno

con los más altos índices de superioridad ante problemas de optimización. Además, ha sido utilizado para la solución de varios problemas de los sistemas eléctricos como despacho económico de energía, previsión de la demanda y control de frecuencia [9]. El método propuesto se lo realiza en el software MATLAB y se lo prueba para un sistema de distribución, de manera que se ocupa el modelo de barras IEEE 14.

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera: Sección II: Marco teórico relacionado a los aspectos generales necesarios para la comprensión del tema, Sección III: Planteamiento del problema donde se desarrolla el método propuesto, Sección IV: Análisis de resultados y finalmente la Sección IV: Conclusiones.

2 Marco teórico

En esta sección del documento se establecen todos los aspectos generales del sistema de distribución, la generación distribuida y el algoritmo optimizador Ant Lion.

2.1 Sistema de Distribución

El sistema eléctrico de potencia (SEP) tiene como objetivo el suministrar energía eléctrica a los usuarios finales de manera segura y confiable [22]. Este gran sistema se observa en la Figura 1, donde se indica cada uno de los subsistemas que lo conforman, que son: generación, transmisión, subtransmisión y distribución [23].

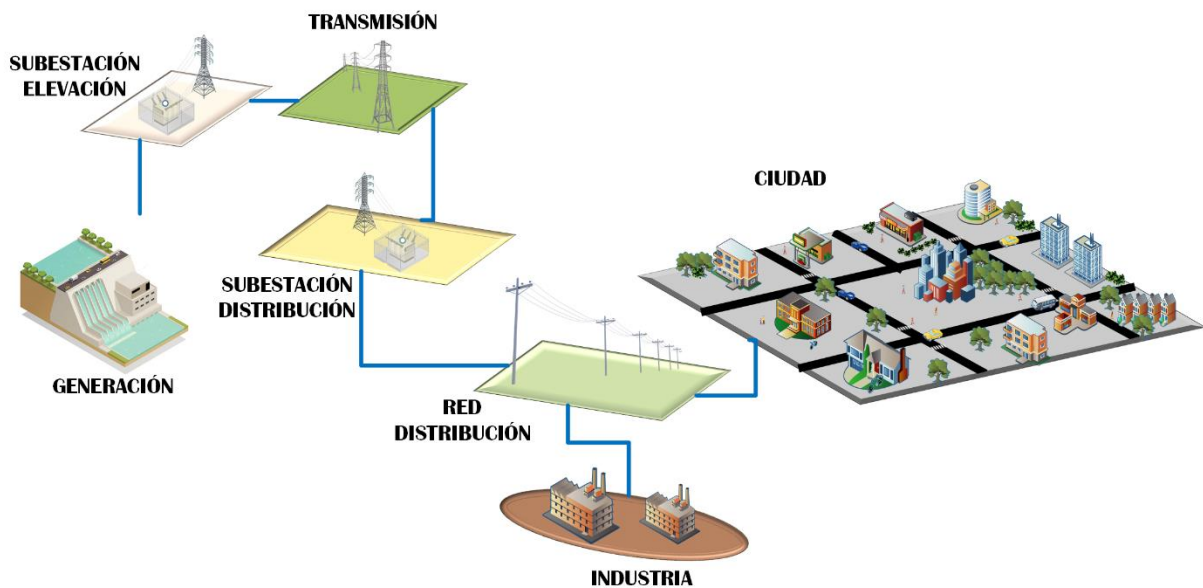


Figura 1.- Red eléctrica desde la generación hasta el usuario

El sistema de distribución es el encargado de suministrar de energía eléctrica al usuario final [23]. Donde los altos voltajes que llegan de subtransmisión se reducen mediante las subestaciones de distribución. De forma que la energía pueda ser repartida a lo largo de calles y avenidas por las líneas de distribución [24].

Esta energía llega a los transformadores de distribución, los mismos que reducen los niveles de voltaje a 220/127 v o 240/120 v, estos finalmente son los valores de tensión que llegan al consumidor final [24].

2.2 Calidad en los Sistemas de Distribución

Un requisito importante dentro de los sistemas eléctricos de potencia es brindar de un servicio de calidad al usuario [25]. La calidad está relacionada con la continuidad de servicio y la forma de la onda de voltaje [25]. Por ello, se puede definir a la calidad como la ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones producidas por los armónicos, de forma que las variables eléctricas se encuentren dentro de sus valores nominales [26].

Dado que es improbable que un sistema sea ideal y no presente alguna de estas perturbaciones. La calidad es calificada o cuantificada en base al número de veces que se presenten dichas perturbaciones dentro del sistema [25].

Las principales perturbaciones que afectan a la calidad de energía se producen en el sistema de distribución, pues esta parte del SEP es donde se producen interrupciones, caídas de voltaje, sobretensiones, entre otros [27]. Estos se producen debido a diferentes eventos como: cortocircuitos remotos, descargas atmosféricas, conexión y desconexión de cargas, etc [25].

La constante presencia de estas perturbaciones dentro del sistema produce efectos negativos como: mal funcionamiento de los equipos, envejecimiento prematuro y daños en los equipos.

2.2.1 Pérdidas en el Sistema de Distribución

La red de distribución se encuentra al final de la cadena que comprende todo el SEP, ya que es la encargada de suministrar energía al usuario final. Es por esto que

dicha red está conformada por varios dispositivos, abarca un extenso rango de cobertura y maneja un nivel de voltaje bajo [23],[28].

Todos los factores detallados anteriormente provocan grandes pérdidas en el sistema de distribución, por acción del efecto Joule [28]. Estas pérdidas pueden llegar a representar un valor de un 13% de la energía generada, lo cual implica que no es un valor a despreciar, de manera que tiene un impacto tanto en costos como en la eficiencia del sistema [29]. Por lo que se considera como un problema de carácter técnico y económico [30].

2.2.2 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje se define como la capacidad de un sistema eléctrico de mantener los valores de los voltajes cercanos a las cargas dentro del rango permisible luego de una perturbación [31].

En el caso de una inestabilidad el sistema presenta un colapso de voltaje, pues los valores se encuentran debajo de los rangos permisibles, esto puede manifestarse de forma parcial o total que vendría siendo un apagón [31].

La estabilidad de voltaje tiene dos formas de analizarse, mediante un enfoque dinámico o estático; el primero requiere de mucho tiempo, mientras que en el caso del análisis estático se basa en flujos de potencia que pueden realizarse en marcos de tiempo, dando un resultado más rápido y aproximado [31],[32].

La estimación de estabilidad de voltaje más rápida se realiza a través de índices de estabilidad que calculan un valor del flujo de energía, proporcionando como resultado el estado de estabilidad del sistema [32].

2.3 Generación Distribuida

La generación distribuida (GD) se diferencia del tipo convencional porque sus instalaciones son pequeñas y se ubican en lugares cercanos al usuario final, de forma que se ahorra el costo de transporte a través de las líneas de transmisión [33],[21].

Este tipo de generación permite la integración de suministros verdes, los principales corresponden a: energía eólica y solar fotovoltaica. Esto permite tener una diversidad de fuentes de generación dentro del SEP [33],[21].



Figura 2.- Generación distribuida solar fotovoltaica y eólica en una ciudad

Debido al aumento de integración de GD en los sistemas de distribución, estos se encuentran evolucionado de redes pasivas a activas [21]. Los valores de las unidades de GD son valores de pequeña escala (1kW a 50MW) en relación con las centrales de generación centralizadas, pero con la capacidad suficiente para interconectarse en cualquier punto del sistema [5],[34].

La GD desempeña una gran función en el mantenimiento de la calidad de energía y la estabilidad de voltaje [35]. Esto porque reducen los principales problemas que se presentan dentro del sistema. De forma que se reduce las pérdidas de energía, minimiza los costos de mantenimiento y operación. Además, mejora en el perfil de voltaje, reduce la emisión de gases contaminantes y refuerza la red [34].

2.3.1 Fuentes de energía para la GD

Existen diferentes tipos de fuentes para la GD, algunas de ellas son las de categoría

renovable que utilizan recursos locales como: energía solar, eólica, biomasa, etc [18],[36]. También se puede utilizar recursos de categoría no renovable como: pilas de combustible, turbinas de combustión y gas, etc [18].

Debido a la concientización acerca del cambio climático y el efecto de la contaminación ambiental, ha incrementado el interés por una energía limpia y respetuosa con el ambiente [36],[37].Es por ello, que se declinó por el uso de fuentes renovables para la GD [18], donde las principales a utilizar corresponden a: energía eólica (EO), solar fotovoltaica (SF) y solar térmica (ST) [38].

Energía Solar Fotovoltaica

Es la energía proveniente de la luz del sol, la cual es convertida en eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas [39].

La corriente obtenida por medio de estas celdas es de tipo continua (DC), de manera que es procesada por inversores para obtener corriente alterna (AC), que puede ser utilizada por los consumidores [39], [40].

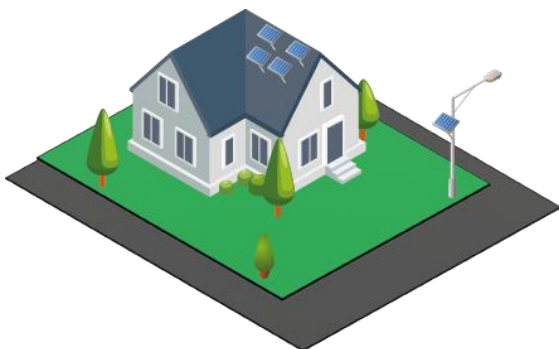


Figura 3.- Casa con GD solar fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas pueden ser fácilmente ubicadas en techos o fachadas de casas y edificios [40], esta característica sumada a: la disponibilidad del recurso, bajo requerimiento de mantenimiento, extensa vida útil y que sus costos han

disminuido en los últimos años permiten que sea una opción viable para la GD [41].

Energía Eólica

Es la energía del viento que puede ser transformada a energía eléctrica a través de turbinas eólicas que se encuentran acopladas a generadores [40].Los sistemas que aprovechan este tipo de energía se encuentran formados por: aerogeneradores, controladores, generadores y dispositivos de interconexión [42].



Figura 4.- Casa con GD eólica

Actualmente la eficiencia de los aerogeneradores ha incrementado a un 45%, adicionalmente sus bajas emisiones de carbono y el ser considerado un sistema autónomo, le permite establecerse como una fuente de energía solicitada para la GD [42]. Es por ello, que dentro de un aproximado de 25 años se espera, que la EO y la SF contribuyan con un 64% del total de energía que aportarían el conjunto de fuentes de cero emisiones [42].

El autor [37], menciona las capacidades típicas de las tecnologías más usadas para GD, que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Capacidades según tecnologías para GD

Tecnología	Tamaño
Aerogenerador	200 W-3MW
Celdas fotovoltaicas	20 W- 100 kW

Basándose en las capacidades propuestas de las celdas, se realizan los diferentes arreglos para formar una planta solar

fotovoltaica. Dichos arreglos se los especifica en la Tabla 2.

Tabla 2. Arreglos para obtener diferentes valores de potencia.

		Módulo	
Células por módulo	60	Potencia Máxima [W]	290.016
Arreglo Paralelo	Arreglo Serie	Total P [MW]	
40	10	0.1219	
112	10	0.3248	
124	16	0.5754	
204	18	1.065	
224	18	1.1693	
234	18	1.2215	
288	18	1.5034	
394	18	2.056	

2.3.2 Impacto en el sistema por integración de GD

La combinación del sistema de distribución con la GD provoca muchos efectos en el sistema, que pueden ser positivos y negativos [37].

Dentro de los aspectos positivos se tiene: la compensación de la potencia reactiva para poder controlar el nivel de voltaje, con ello se mejora el perfil de tensión y se reducen pérdidas dentro del sistema [34],[43].

También se encuentra la mejora de la fiabilidad, pues la GD se utiliza como energía de reserva para apoyar durante los cortes de generación [43],[37]. Otros beneficios corresponden a: refuerzo de la red, reducción de costos y emisiones de gases contaminantes [34].

En cuanto a los aspectos negativos se tiene que un dimensionamiento y ubicación inadecuado de la unidad de GD trae efectos no deseados como aumento de pérdidas y costos del sistema [11],[17].

Debido a la cualidad estocástica de la energía solar fotovoltaica se producen variaciones en su potencia generada [44].

Esto influye de manera significativa cuando dicha potencia es mayor que la carga, pues se dará un flujo bidireccional[44].

Es por ello, que la ubicación de la GD influye mucho en el flujo de potencia y perfil de voltaje, lo que a su vez involucra las pérdidas [34],[44]. El límite de capacidad para la GD, permite reducir la penetración de energía SF en el sistema evitando así sobretensiones y un flujo bidireccional de energía [44].

2.4 Algoritmos de Optimización

En la actualidad existen varios algoritmos que tratan el problema de la ubicación y dimensionamiento de GD. Varios de ellos como [18] y [45] se basan en un solo objetivo que corresponde a minimizar pérdidas para mejorar el perfil de voltaje. El utilizar solo una variable como objetivo para encontrar una solución adecuada no es lo más aconsejable. Debido a que se pueden presentar conflictos entre las variables de solución en los flujos de potencia [46].

Otros algoritmos como los utilizados en [16], [17] y [19] utilizan dos funciones objetivo que corresponden a la minimización de pérdidas de potencia activa junto a uno de los siguientes objetivos: reducción de THD, costos o mejoramiento del IEV. Todos ellos cumplen con sus objetivos establecidos influyendo así en la mejora del perfil de voltaje y la calidad de energía. Sin embargo, varios de ellos tienen en común que necesitan un gran esfuerzo computacional para encontrar a una solución óptima global [38].

Por todo lo detallado anteriormente se propone otro algoritmo optimizador como posible opción para el dimensionamiento y ubicación de GD. El mismo corresponde al denominado Optimizador Ant Lion (OAL),

que propone la mejora del índice de estabilidad de voltaje (IEV), minimizar pérdidas y costos [47].

2.4.1 Principio del Algoritmo Optimizador Ant Lion

Este algoritmo fue presentado por Seyedali Mirjalili [37] y se inspira en la naturaleza, pues simula el mecanismo de la hormiga león en la caza de su presa [47],[9].

El ciclo de vida de las hormigas león cuenta con dos etapas: larvas y adultos. Es en la primera fase donde las hormigas león cazan y la segunda la utilizan para su reproducción [48],[37]. Partiendo de lo anteriormente mencionado, la etapa de larva de la hormiga león es la inspiración para el algoritmo OAL.

La caza de presas para las hormigas leones mencionada en [9], consiste en que las larvas se mueven por la arena de manera que cavan en forma de cono, arrojando la arena por los costados para que el borde sea afilado. Luego de construir la trampa, se esconden en el fondo del cono y esperan a que los insectos queden atrapados [37].

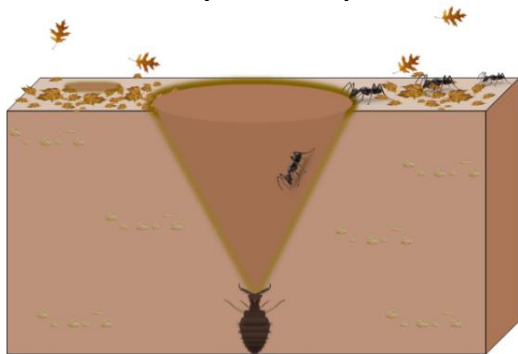


Figura 5.- Caza de hormigas por Hormigas León

Cuando la presa (hormiga) cae en la trampa, la atrapa y la consume [9]. Una vez realizada la última acción, tiran los restos fuera del cono y vuelven a preparar el pozo para cazar a su próxima presa [37].

Algoritmo

El algoritmo basado en el mecanismo de caza de hormigas por parte de la hormiga

león consta de 5 etapas, las mismas se visualizan en la Figura 6. [37]. Hay que tomar en consideración que las hormigas se mueven de manera estocástica [9].

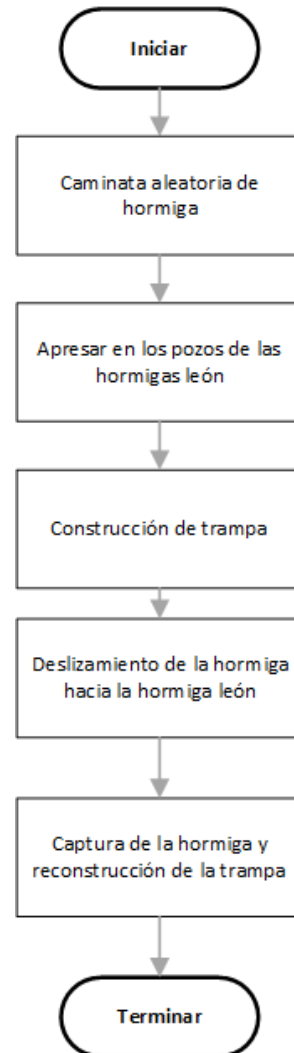


Figura 6.- Diagrama de pasos que forman el Algoritmo OAL

3 Planteamiento del Problema

Dado el incremento de usuarios a medida que pasa el tiempo, el área del SEP dedicada a la distribución es la más afectada en el tema de calidad. Por ello presenta más pérdidas de potencia en la red y un perfil de tensión deficiente, entre otros problemas. Por lo detallado se puede considerar al sistema de distribución como el área más vulnerable del SEP en temas de calidad.

3.1 Formulación del problema

La solución propuesta para el problema planteado es la integración de GD en un sistema de distribución, con el objetivo de reducir pérdidas de potencia, costos de implementación y mejorar el IEV. Todo esto mediante el uso de OAL.

3.1.1 Función Objetivo

El algoritmo transforma múltiples objetivos en uno, el cual es multiplicado por un factor ponderado positivo que va en un rango de 0-1 y cuya suma debe ser uno [48], [9].

La función objetivo consta de la minimización de pérdidas de potencia, minimización de costos de instalación de la GD y maximización del IEV. Estas funciones se encuentran dentro una sola función objetivo que se calcula mediante la ecuación (1) [42].

$$\min F_{obj} = wf_1 + wf_2 + wf_3 \quad (1)$$

$$0 \leq w \leq 1 \quad (2)$$

Donde:

- f_1 : pérdidas de potencia activa.
- f_2 : índice de estabilidad de voltaje.
- f_3 : costo de instalación de GD.
- w : factor de ponderación

Partiendo de lo detallado anteriormente se especificarán las ecuaciones para cada función objetivo [42],[9].

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^b PP_{\sin GD(i)}}{\sum_{i=1}^b PP_{\cos GD(i)}} \quad (3)$$

Donde:

- b : número de barras
- PP : pérdidas de potencia activa

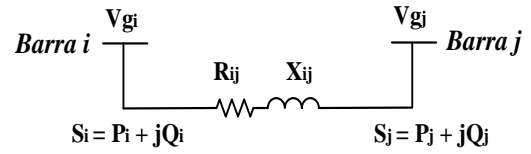


Figura 7.- Diagrama dos barras

Según los autores [48], [49] la ecuación para el cálculo de la potencia activa (P) corresponde a:

$$P = \sum_{r=1}^b G_r (|vg_i|^2 + |vg_j|^2 - 2|vg_i| |vg_j| \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (4)$$

Donde:

- b : número de barras
- G_r : conductancia de la primera barra
- vg_i : módulo de voltaje de la barra i
- vg_j : módulo de voltaje de la barra j
- δ_i : ángulo de la barra i
- δ_j : ángulo de la barra j

La segunda función objetivo corresponde a la maximización de índice de estabilidad de voltaje, para ello se utiliza la siguiente ecuación (5) [9].

$$f_2 = \frac{1}{IEV(b)_{\cos GD}} \quad (5)$$

Donde:

IEV : Índice de estabilidad de voltaje

Para el cálculo de este índice [47] indica siguiente ecuación.

- Índice de estabilidad de voltaje

$$I_{EV} = |v_i|^4 - 4 \times (P_j \times R_{ij} + Q_j \times X_{ij}) \times |v_i|^2 - 4 \times ((P - P_j) \times X_{ij} + (Q - Q_j) \times R_{ij})^2 \quad (6)$$

$$I_{ETV} = \sum_{j=2}^n (I_{EV_j}) \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Otra manera para calcular el I_{EV} como indica [50], es el inverso de los elementos que comprenden la matriz del Jacobiano.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{C_{P/\delta}} & J_{C_{P/V}} \\ J_{C_{Q/\delta}} & J_{C_{Q/V}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[\Delta Q] = [Jc]^{-1}[\Delta |V|] \quad (9)$$

La diagonal del inverso de Jc indica el I_{EV} de todas las barras excepto las de tipo pv o slack.

La tercera función objetivo corresponde a la minimización de costos de instalación de GD y se muestra en la ecuación (10) [42],[48].

$$f_3 = GD_{cost} \quad (10)$$

El costo de instalación depende del número, capacidad y tipo de las unidades de GD.

$$GD_{cost} = \sum_{j=1}^{n_{GD}} (C_{inv} \times GD_{max_j}) + 8760 \times \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_{GD}} (p_t \times CMO_j \times PGD_j) \quad (11)$$

Donde:

GD_{cost} : Costo total de instalación

n_{GD} : número de unidades de GD

GD_{max_j} : máxima capacidad de instalación de la barra j

PGD_j : potencia generada por la unidad de GD instalada en j

C_{inv} : costo de inversión de GD [M\$/MVA]

CMO_j : costo de mantenimiento y operación [\$/MWh]

T : periodo

Las restricciones de balance de potencia corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$P_{GD_i} - P_{Di} = \sum_{j=1}^n |vg_i| |vg_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_{GD_i} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^n |vg_i| |vg_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (13)$$

Donde:

P_{GD_i} : potencia activa generada por la GD en la barra i

Q_{GD_i} : potencia reactiva generada por la GD en la barra i

P_{Di} : potencia activa demandada

Q_{Di} : potencia reactiva demandada

Las restricciones de límites de voltaje, capacidad de la GD y restricciones de flujo de potencia se detallan en las ecuaciones (14)-(7) [22],[26],[47].

- Límites de voltaje

$$|vg_i^{min}| \leq |vg_i| \leq |vg_i^{max}| \quad (14)$$

- La capacidad de unidad de GD

$$P_{GD_i}^{min} \leq P_{GD_i} \leq P_{GD_i}^{max} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{GD}} (P_{GD_i} + Q_{GD_i}) \leq P_{sub} + Q_{sub} \quad (16)$$

- Restricciones de flujo

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \quad (17)$$

$$S_{ji} \leq S_{ji}^{max} \quad (18)$$

Para los límites de voltaje se toman los valores para media tensión detallados en la norma ecuatoriana que corresponden a 0.94 y 1.06 pu [51]. Por otro lado, en el caso de límites de capacidad de GD se tienen los valores en un rango de 100 kW a 10 MW. Estos valores normados para la generación de energía por parte de una empresa habilitada [52].

3.1.2 Algoritmo Optimizador Ant Lion

A continuación, se detallará los modelos matemáticos de cada una de las etapas del OAL.

Caminata Aleatoria de Hormiga

Las hormigas buscan su comida de manera estocástica, es por ello, que su movimiento es aleatorio y [9] menciona que puede ser descrito matemáticamente de la siguiente manera:

$$C(j) = [0, \text{sum}_{ac}(2r(j_1) - 1), \text{sum}_{ac}(2r(j_2) - 1), \dots, \text{sum}_{ac}(2r(j_n) - 1)] \quad (19)$$

Donde:

sum_{ac} : suma acumulada

j : iteración

$r(j)$: función estocástica.

Esta última el autor [37], dice que se encuentra definida como:

$$r(j) = \begin{cases} 0, & \text{rand} > 0.5 \\ 1, & \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

Donde:

rand : número randómico.

La posición de las hormigas se guarda en una matriz [37].

$$M_A = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1,d} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{n,d} \end{bmatrix} \quad (21)$$

De igual forma la posición de las hormigas león el autor [47], la presenta como:

$$M_{AL} = \begin{bmatrix} HL_{11} & HL_{12} & \dots & HL_{1,d} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ HL_{n1} & HL_{n2} & \dots & HL_{n,d} \end{bmatrix} \quad (22)$$

En las cuales n representa el número de hormigas u hormigas león y d es el número de variables [47].

Al momento de la optimización la matriz guardará la ubicación de todas las hormigas, de tal manera que los datos del movimiento

aleatorio de las hormigas se tienen que normalizar como muestra la Ecuación (23), para así asegurar que se mueven dentro del área de búsqueda [37].

$$C_k^j = \frac{(C_k^j - A_k) \times (D_k - Y_k^j)}{(B_k^j - A_k)} \dots \dots + Y_k \quad (23)$$

Donde:

A_k : mínimo paseo aleatorio de la k -ésima variable.

D_k : máximo paseo aleatorio de la k -ésima variable.

Para el modelamiento de los pozos de hormigas león se utilizan las siguientes ecuaciones [37].

$$Y_k^j = \text{AntLion}_k^j + Y^j \quad (24)$$

$$B_k^j = \text{AntLion}_k^j + B^j \quad (25)$$

Las Ecuaciones (24),(25) dan como resultado el movimiento aleatorio de las hormigas en un área definida por los vectores Y y B , alrededor de una hormiga león determinada [9].

Construcción de Trampa

El algoritmo OAL tiene que optar por un operador de ruleta para poder escoger del conjunto de hormigas leones, las más adecuadas en función de su aptitud. Esto sucede mientras se realizan las iteraciones para así tener altas probabilidades de capturar hormigas (presa) [9],[37].

A este comportamiento se lo considera elitismo, pues la hormiga más apta influirá en el comportamiento de las demás durante las iteraciones. Cada paseo aleatorio de las hormigas que rodea a una hormiga león seleccionada (H_s) y de la elite (H_e) [18], se representa de la siguiente manera:

$$\text{Ant}_i^j = \frac{P_S^j + P_E^j}{2} \quad (26)$$

Donde:

P_S^j : paseo aleatorio cercano a la hormiga león seleccionada.

P_E^j : paseo aleatorio cercano a la hormiga león elite.

Deslizamiento de Hormiga hacia Hormiga León

Una vez la hormiga se encuentra en la trampa, las hormigas león lanzan arena y atrapan a su presa en el centro del pozo [37]. Las ecuaciones (27),(28) indican el radio del paseo aleatorio que realizan las hormigas [9].

$$Y^j = Y^j / I \quad (27)$$

$$D^j = D^j / I \quad (28)$$

Donde:

La I es el radio.

Captura de la Hormiga y Reconstrucción de la trampa

La captura y reconstrucción son la última fase de la caza [37]. Para modelar este comportamiento se lo realiza mediante la función objetivo. Si una hormiga tiene dicha función mejor que la de la hormiga seleccionada cambia su puesto por la última hormiga cazada para mejorar la posibilidad de atrapar otra [9].

La siguiente ecuación muestra lo anteriormente explicado.

$$\begin{aligned} AntLion_k^j &= AntLion_i^j \quad \text{si} \quad (29) \\ f(Ant_i^j) &> f(AntLion_k^j) \end{aligned}$$

3.1.1 Metodología

En primer lugar, plantea un flujo de potencia mediante el método de Newton Raphson. Con los datos obtenidos de voltaje e IEV en cada bus y las pérdidas de potencia del sistema se aplica la técnica del algoritmo OAL. Esto con el propósito de determinar la ubicación y capacidad adecuada de dos unidades de GD.

El algoritmo utiliza múltiples objetivos mediante la transformación de los mismos en uno solo. Esto se lo realiza por medio del uso de factores ponderados. Para el presente documento se establecen los siguientes valores de ponderación para cada función objetivo: $w_1=0.5$, $w_2=0.25$ y $w_3=0.25$.

El algoritmo OAL asigna de manera aleatoria barras para la inserción y capacidades. El primero se encuentran limitado en función del número de barras del sistema. En el caso de capacidad de la GD se tiene un rango que va desde 100 kW a 10 MW, que son los valores asignados para la generación de energía eléctrica desarrollada por una empresa de generación distribuida habilitada.

Con estas características de restricción el algoritmo crea vectores aleatorios con las dos barras de ubicación y su respectiva capacidad. Para luego proceder a realizar flujos de potencia con estos nuevos datos y obtener las variables eléctricas que forman parte de la función objetivo.

Este proceso es iterativo y va guardando en una matriz las soluciones óptimas donde una de ellas se considera la elite. Con el paso de la iteración puede ser remplazada por otra si es más adecuada y se repite hasta que se termine de iterar. Al final de este proceso se encuentra una solución que satisface la función objetivo. Durante este proceso se descartan soluciones que no cumplan con la restricción de voltaje. Estos valores corresponden a 0.94 pu como voltaje mínimo aceptable y para el valor máximo 1.06 pu.

Dado que es un proceso repetitivo es importante determinar el número de agentes de búsqueda y sus iteraciones. Para ello, se realiza varias simulaciones, determinando así los valores adecuados.

La Tabla 3 y Tabla 4 indican la descripción de la principales variables y funciones que forman parte del desarrollo del OAL. El mismo se encuentra detallado en el pseudocódigo de la Tabla 5.

Tabla 3. Variables para el algoritmo OAL

Símbolo	Definición	Unidad
nbus	Número de barras	-
ngd	Número de unidades de GD	-
nAgnt,	Número de agentes	-
max_iter	Número máximo de iteraciones	-
Vsgd	Perfil de voltaje sin GD	pu
PPsgd	Pérdidas de potencia sin GD	MW
Vgd	Perfil de voltaje con GD	pu
PPgd	Pérdidas de potencia con GD	MW
mincap	Capacidad mínima de la GD	MW
maxcap	Capacidad máxima de la GD	MW
minb	Numero de barra inicial	-
maxb	Numero de barra final	-
HLe	Hormiga león élite	-
HLF	Hormiga león fitness	-
HLeF	Hormiga león élite fitness	-
H	Hormiga	-
HF	Hormiga fitness	-
PosHLF	Posición HLF	-
PosHLe	Posición Hormiga león élite	-
PosHL	Posición Hormiga león	-
PosH	Posición Hormiga	-
PosHF	Posición Hormiga fitness	-
CConv	Curva de convergencia	-

Tabla 4. Tabla de funciones para implementación de OAL

Nomenclatura	Característica
WithoutGD	Flujo de potencia NR sin GD
ALO	Algoritmo Optimizador Ant Lion
Initialization	Crea la primera población randómica
Sort	Función de Matlab que permite clasificar en orden ascendente
RouletteWheel	Selección de un individuo de su población
RandomwalkAL	Crea caminos aleatorios
FeedP	Flujo de potencia NR con GD

Tabla 5. Pseudo código OAL

Algoritmo OAL para integración de GD	
Paso 1:	Inicio
Paso 2:	Ejecutar flujo de potencia NR para sistema IEEE 14 con incremento de demanda Ingresa: nbus Devuelve: Vsgd, PPsgd, IEV
Paso 3:	Inicializar matrices para guardar PosHLe, HLeF, HLF, HF, CConv.
Paso 4:	Inicializar población de hormigas y hormigas león PosHL= initialization (N, mincap, maxcap, minb, maxb, ngd) PosH= initialization (N, mincap, maxcap, minb, maxb, ngd)
Paso 5:	Calcular la aptitud de las HL iniciales HLF= FeedP (nbus, PosHL, ngd, Vsgd, PPsgd) $Fobj = wf_1 + wf_2 + wf_3$
Paso 6:	Ordenar las HLF en función de su aptitud HLFO= sort (HLF) HLO= HL ordenada Escoger la hormiga león más apta de HLO como fitness HLeF con su determinada posición PosHLe.
Paso 7:	Iniciar caminos aleatorios de hormigas alrededor de las hormigas león. for i=1 hasta tamaño (PosH,1) do indr= RouletteWheel (HLFO) RA= RandomwalkAL (max_iter, HLO(indr),iter) RE= RandomwalkAL (max_iter, PosHLe,iter)
	$PosH = \frac{P_S^i + P_E^i}{2}$ HF= FeedP (nbus, PosH, ngd, Vsgd, PPsgd) end for
Paso 9:	Actualizar HLO y HF si una hormiga se vuelve más apta que el cazador DPOF= sort ([HLFO; HF]) HLF=DPOF HLO= posición HLF
Paso 10:	Actualizar hormiga león élite si otra hormiga león es mejor que la determinada como élite. if HLF<HLeF PosHLe = HLO HLeF=HLF end for
Paso 11:	Repetir desde Paso 8 hasta Paso 9 hasta que se cumpla con el número de iteraciones Devuelve: PosHLe (Loc y Cap GD) y HLeF(Fobj)
Paso 12:	Graficar CConv
Paso 13:	Ejecutar Flujo de potencia FeedP para solución óptima. Ingresa: nbus, PosHLe, ndg Devuelve: Vgd, PPgd, IEV, Cost Fin del Algoritmo

La Tabla 6 indica la descripción de las variables a utilizar para el algoritmo del flujo de potencia que se detalla en Tabla 7.

Tabla 6. Variables para flujo de potencia

Símbolo	Definición	Unidad
M_Y	Matriz Y de barra	pu
P_{prog}	Potencia activa especificada	pu
P_{Gn}	Potencia activa de generación	pu
P_{Crg}	Potencia activa de carga	pu
Q_{prog}	Potencia reactiva especificada	pu
Q_{Gn}	Potencia reactiva de generación	pu
Q_{Crg}	Potencia reactiva de carga	pu
V	Voltaje	pu
δ	Ángulo de voltaje	rad
δ_n	Ángulo de voltaje nuevo	rad
V_n	Voltaje nuevo	pu
V_{ant}	Voltaje iteración-1	pu
δ_{ant}	Ángulo de voltaje iteración-1	rad

Tabla 7. Pseudo código Flujo de Potencia

Algoritmo Flujo de Potencia NR	
Paso 1:	Inicio
Paso 2:	Ingreso de valores del sistema IEEE 14
	Ingresar: datos de líneas y datos de barras
Paso 3:	Cambio a valores normalizados o pu
Paso 4:	Calcular M_Y
Paso 5:	Determinar Potencias especificadas $P_{prog} = P_{Gn} - P_{Crg}$ $Q_{prog} = Q_{Gn} - Q_{Crg}$
Paso 6:	Calcular potencias calculadas P_{cal} y Q_{cal}
Paso 7:	Determinar errores entre potencias especificadas y calculadas
Paso 8:	Construir la matriz Jacobiana $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{C_P/\delta} & J_{C_P/V} \\ J_{C_Q/\delta} & J_{C_Q/V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$
Paso 9:	Calcular las variables de voltaje y ángulo $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J_C]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$
Paso 10:	Actualizar variables de voltaje y ángulo $\delta_n = \delta_{ant} + \Delta \delta$ $V_n = V_{ant}(1 + \Delta V)$
Paso 11:	Repetir del Paso 4 al Paso 10 hasta que se satisfaga el valor de tolerancia.
Fin del Algoritmo	

4 Análisis de resultados

Para verificar la eficacia del método propuesto para la integración de GD, se ha preparado diferentes casos de estudio, en los cuales se analizará el comportamiento de las variables del sistema. Además, se comparará con el AG para así determinar cuál resultado es el más óptimo y la eficacia del algoritmo propuesto.

4.1 Sistema de Prueba

El sistema de 14 de Barras de la IEEE que se puede visualizar en la Figura 8, se encuentra formado por 2 generadores, 3 transformadores, 14 barras, 17 líneas, 1 condensador y 11 cargas.

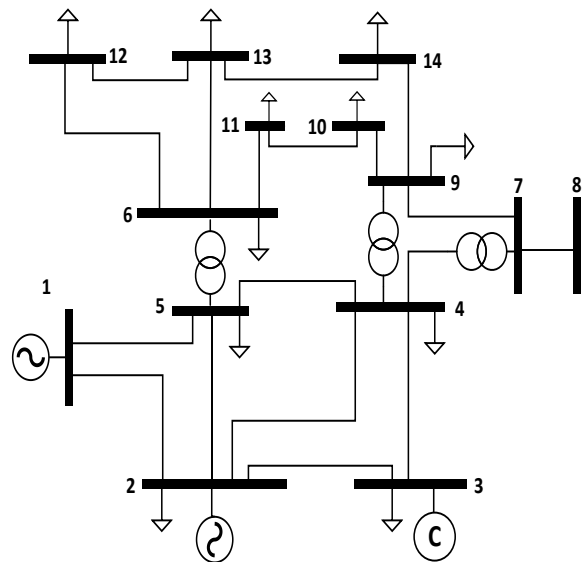


Figura 8.- Sistema IEEE 14 barras

4.1.1 Escenario con un incremento de la demanda en sistema IEEE 14

En este escenario los valores que corresponden a la demanda fueron incrementados en un 100%, de manera que el valor original se duplicó. La Tabla 8. muestra los nuevos valores de las cargas. Esta modificación se realizó con la finalidad de poder visualizar de mejor manera los cambios dentro del perfil de voltaje y del IEV, que fue calculado mediante la ecuación (9).

Tabla 8. Incremento de carga

Barra	Carga [MW]
1	0
2	43.4
3	188.4
4	95.6
5	15.2
6	22.4
7	0
8	0
9	59
10	18
11	7
12	12.2
13	27
14	29.8

La Tabla 9 y la Figura 9, indican las nuevas características del sistema, que son adecuadas para realizar los diferentes estudios para la implementación de la GD.

Tabla 9. Pérdida e índice de voltaje total del sistema

Pérdidas de Potencia Activa [MW]	IEV
56.8420	18.98

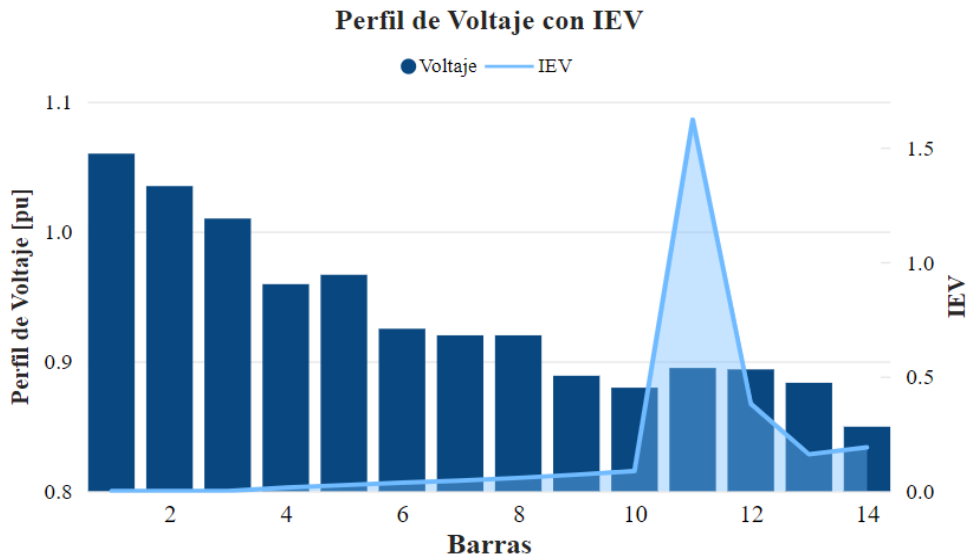


Figura 9.- Perfil de voltaje con IEV en el escenario con incremento de la demanda

La representación gráfica del perfil de voltaje indica que varias barras se encuentran debajo del 1 pu, siendo la más representativa la Barra 14 con 0.85 pu. En el caso de las pérdidas de cada línea del sistema, la Figura 10, indica los valores más representativos. Donde el mayor valor es 20.67 MW, que corresponde a la línea que comunica la Barra 1 con la Barra 2 (L12).

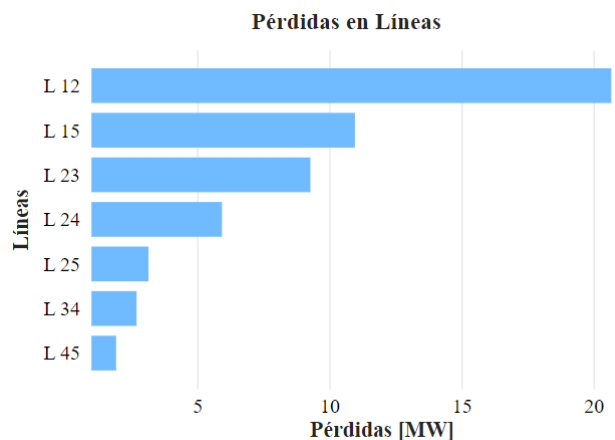


Figura 10.- Perfil de pérdidas en líneas del escenario con incremento de la demanda

4.2 Caso de Estudio

Para el análisis de los casos de estudio se utiliza el escenario IEEE 14 con incremento de la demanda y para la tecnología de la GD se utiliza la de tipo solar fotovoltaico.

4.2.1 Inclusión de PV en barra más crítica

Para el presente caso se implementó la unidad de GD en la barra, cuyo valor de voltaje es el más crítico. Este dato se obtuvo del perfil mostrado en la Figura 9, en la cual se puede visualizar que el valor más bajo de voltaje corresponde a la Barra 14 con 0.85 pu.

Identificado el lugar se estima el valor de 1MW para la capacidad de la planta. Partiendo con estos datos, se procede a realizar el flujo de potencia obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 10. Integración de GD en barra crítica

Costos [€]	Loc DG		Cap DG [MW]		Diferencia [MW]
	14		1		
	IEV		Pérdidas P [MW]		
	Sin GD	Con GD	Sin GD	Con GD	
377000	18.98	17.08	56.84	47.43	9.41

Los datos del caso 1 muestran un buen comportamiento en cuanto a reducción de pérdidas de potencia, los mismos se pueden visualizar en la Tabla 10, obteniendo una diferencia de 9.41 MW. En el caso del IEV del sistema se obtuvo una reducción, si bien no es muy considerable, pues solo baja un 1.9, este valor ya incumple con el objetivo de maximizar dicho índice.

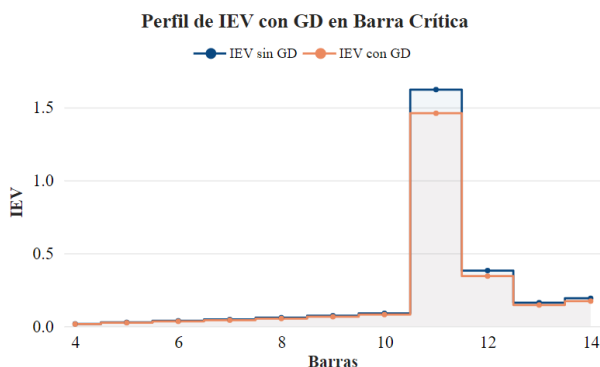


Figura 11.- IEV en cada barra con GD en Barra 14.

Esta reducción se aprecia visualmente en la Figura 11 donde se detalla el IEV en cada barra. Por ello se observa que la Barra 11 es la que experimentó una caída considerable comparada con las demás barras del sistema.

Los valores de pérdida de potencia en las líneas se observan en la Figura 12, dando como resultado que la L12 es la que pierde más, con un valor de 13.14 MW. Dicha cantidad comparada con el del caso base es menor con 7.53 MW de diferencia.

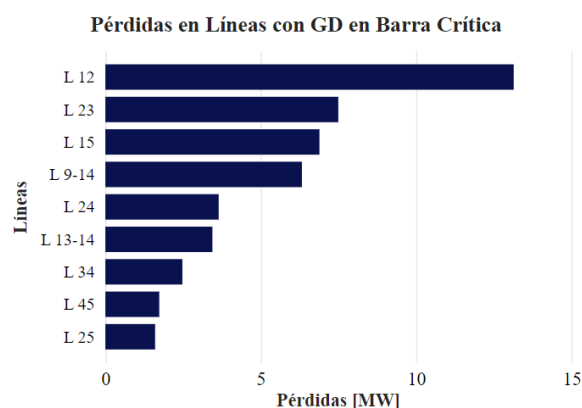


Figura 12.- Perfil de pérdidas en líneas con GD en Barra 14.

El perfil de voltaje se puede observar en la Figura 13, donde se indica un incremento de voltaje en comparación con los valores obtenidos en el caso base. Esto debido a que los valores que se encontraban por debajo de 1 pu incrementaron, pero esto no confirma una mejora para el perfil de voltaje. Porque los valores que corresponden específicamente a la: Barra 6, Barra 12, Barra 13 y Barra 14 sobrepasan el límite máximo de voltaje establecido de 1.06 pu.

En especial la última barra mencionada es la que más sobrepasa este límite con un valor de 1.29 pu. Esta cantidad de voltaje dentro del sistema ocasionaría otro problema de calidad de energía, el cual se denomina sobretensión.

Es por esto, que el resultado obtenido en este caso de estudio no es el más adecuado, ya que aparte de infringir con uno de los

objetivos planteados, ocasionaría otro tipo de perturbación dentro del perfil de voltaje.

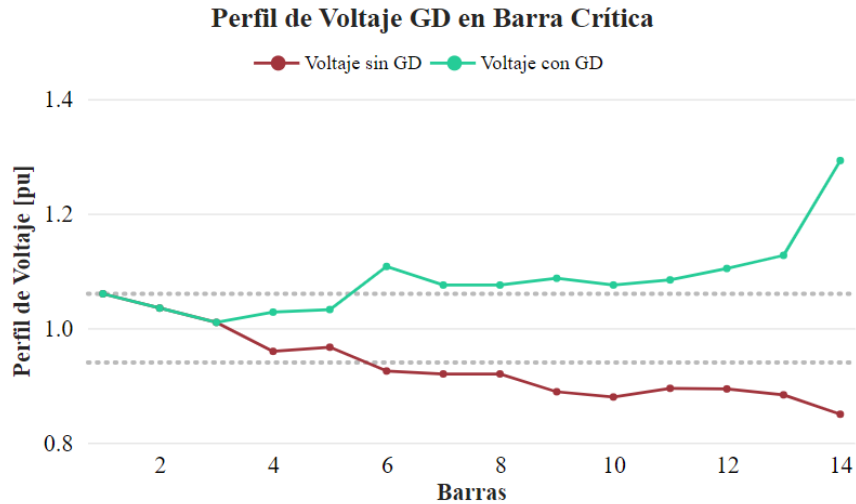


Figura 13.- Perfil de voltaje sistema IEEE 14 con GD en barra 14

4.2.2 Incorporación de GD mediante Algoritmo OAL

En este caso, se inserta al sistema dos unidades de GD utilizando el algoritmo OAL. Como primer punto se establece el número de simulaciones y agentes. De manera que se procede a realizar diferentes simulaciones que van en un rango de 10 hasta 80 agentes y el límite máximo de iteraciones corresponde a 500. Para el análisis de este caso se utiliza un algoritmo

de comparación, el elegido para el presente análisis corresponde al denominado AG, que fue mencionado en la sección 2.4. Para dicho método se realizó por cada agente 500 iteraciones, el resultado de este proceso se lo puede visualizar en las siguientes figuras.

La Figura 14, indica una línea de tendencia de mayor a menor que permite determinar el número necesario de iteraciones al obtener una convergencia de resultados.

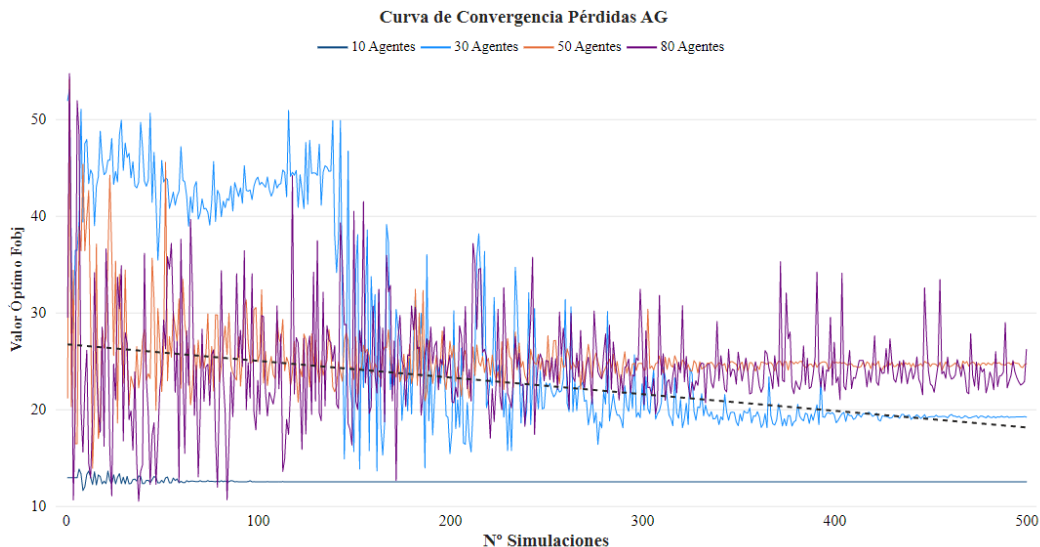


Figura 14.- Curva de convergencia de Fobj1 con AG

Para determinar el número de agentes necesario entre el rango establecido se realizaron varias simulaciones. Cada una con 500 iteraciones, ya que este es el número necesario para obtener una convergencia.

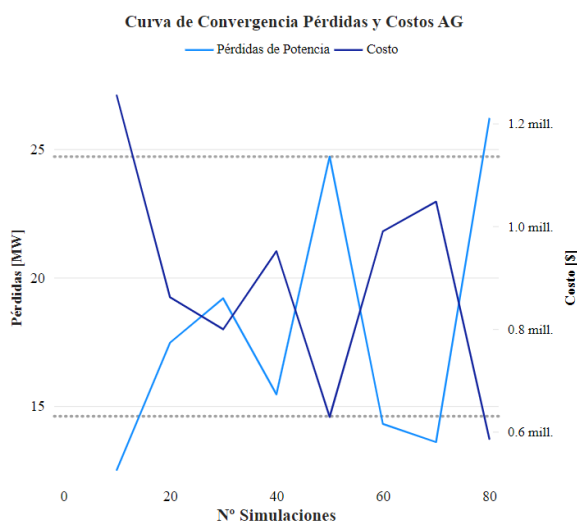


Figura 15.- Curva de convergencia AG de Fobj con varios agentes

Los objetivos escogidos para determinar la cantidad de agentes son pérdidas y costos de instalación. De forma que analizando la Figura 17 se escoge al valor de 50 agentes como el más apropiado, pues con esta cantidad se obtiene un resultado aceptable entre pérdidas de potencia activa y costos de instalación.

El análisis realizado para el AG, también se lo implementó en el método OAL, con el fin de establecer el número de iteraciones necesarias para obtener un resultado favorable.

Esto se lo analizó en la Figura 16, la misma indica que en la iteración 100 el resultado ya converge, pero para tener un resultado completamente seguro se amplió el rango hasta 150 iteraciones.

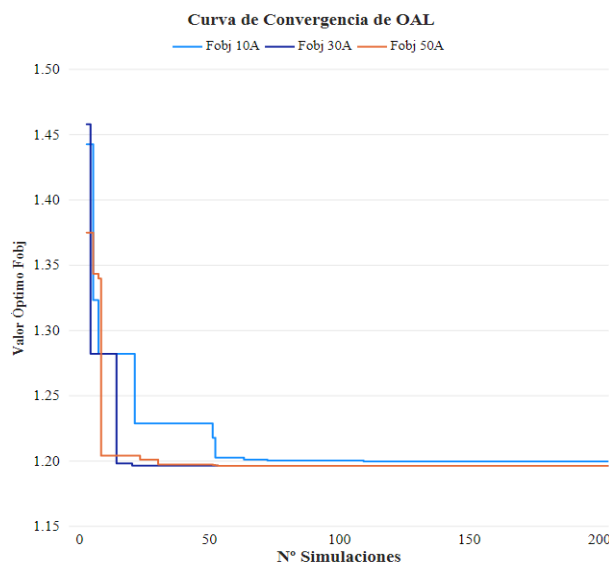


Figura 16.- Curva de convergencia de Fobj con OAL

Para el caso de la cantidad apropiada de agentes se lo determinó analizando la Figura 17. Donde la curva de convergencia indica que desde 30 agentes el resultado ya es favorable, por lo que no es necesario una cantidad más extensa de agentes.

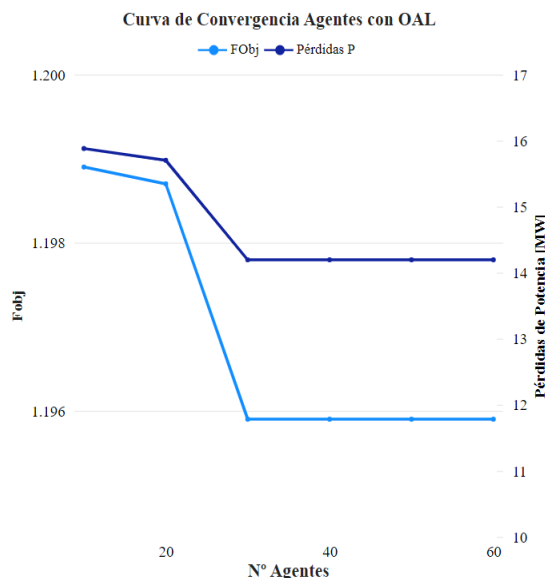


Figura 17.- Curva de convergencia OAL de Fobj con varios agentes

Ya obteniendo los valores tanto de iteraciones como de agentes se procede a simular el programa con dichos datos. Como se especificó en el pseudocódigo de la Tabla 5, el algoritmo a manera que va

iterando actualiza la matriz de soluciones que se construye en base de la mejor aptitud. Por lo que, para cada iteración se escoge la mejor de entre todos los valores de esta matriz. Las siguientes figuras indican estas soluciones, las mismas se pueden repetir para muchas iteraciones.

Por ello, los valores se escogieron una sola vez. Esto, debido a que el enfoque del estudio de las siguientes gráficas no se basa en el número de veces que se repitió dicha solución, sino en el comportamiento de cada una, en relación con una sola función objetivo.

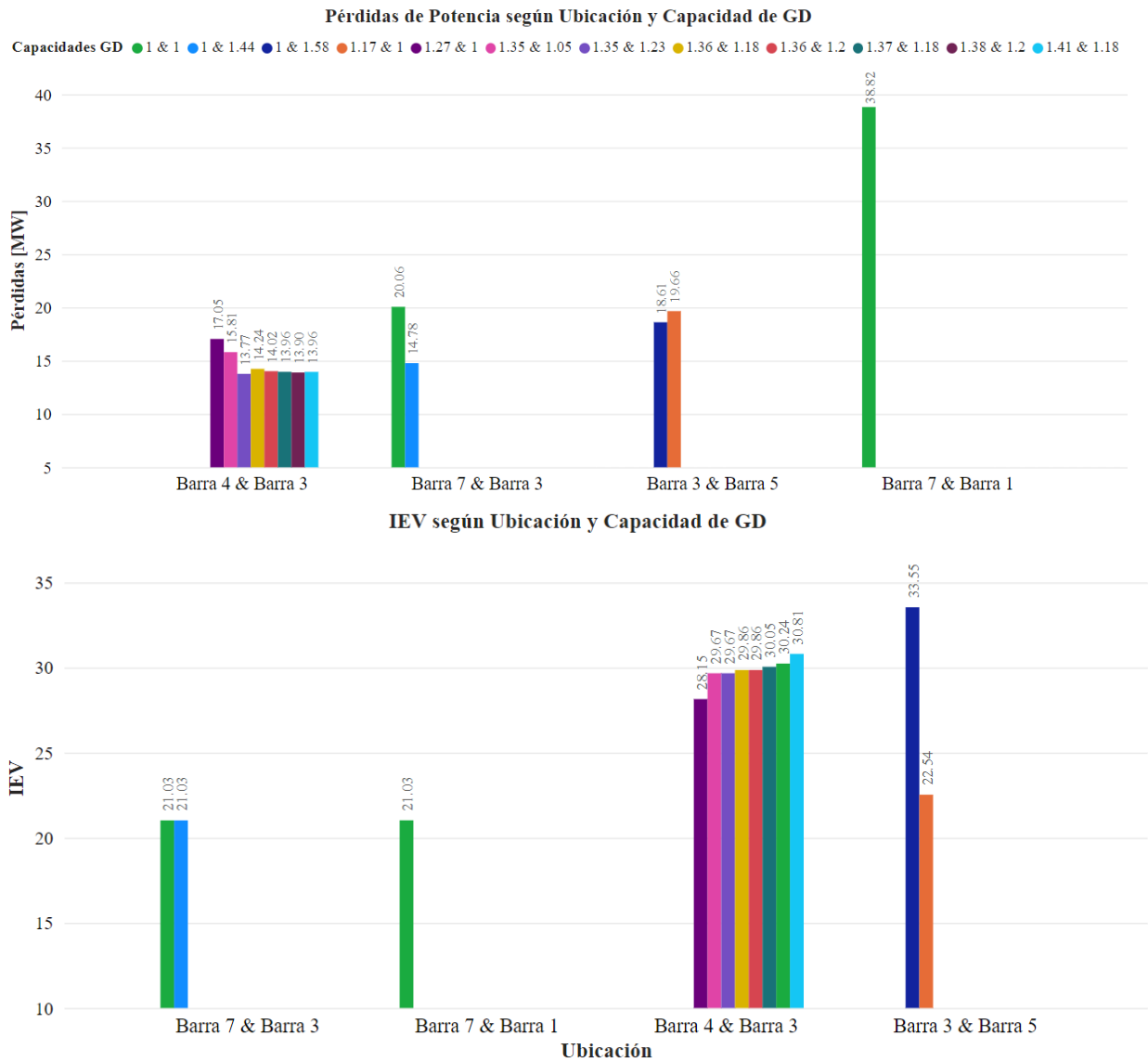


Figura 18.- a) Pérdidas de potencia activa para cada uno de los arreglos de GD obtenidos mediante OAL y b) IEV para activa para cada uno de los arreglos de GD obtenidos mediante OAL.

La Figura 18 muestra dos ilustraciones enfocadas en diferentes variables de análisis. La Figura 18 a) se encuentra en relación con la función objetivo de pérdidas de potencia. Mientras que la Figura 18 b)

indica un análisis en base al IEV. Ambas graficas detallan el comportamiento de su respectiva variable ante diferentes lugares y capacidades determinados por OAL para la inserción de dos unidades de GD en el

sistema de 14 barras. En la sección a) se puede visualizar que la mejor opción en función de la reducción de pérdidas de potencia corresponde al arreglo de la Barra 4 y Barra 3 con capacidad de 1.35 MW y 1.23MW.

Por otro lado, con los datos obtenidos en la sección b) y en base al criterio de maximizar el IEV. Se indica que la mejor opción para ubicación es la Barra 3 y Barra 5 con capacidades de 1MW y 1.58 MW.

Las diferentes soluciones indicadas anteriormente cumplen con su determinado objetivo. Sin embargo, la solución optada en base a la reducción de pérdidas no puede ser la mejor en temas de costo o mejoramiento del índice de estabilidad.

Esto se verifica con los resultados anteriores, donde el arreglo considerado como mejor opción en a), no corresponde al mejor en el tema del IEV. Debido a que su índice tiene un valor de 29.67 que es menor al 33.55 obtenido por el arreglo de la sección b).

Es por ello, que el resultado entregado por el algoritmo OAL al concluir todas las iteraciones, es la solución élite de entre todas las soluciones propuestas. Debido a que cumple con las funciones objetivo planteadas. Por este motivo es importante definir bien el número de iteraciones y agentes para el estudio.

La solución óptima se detalla en la Tabla 11, junto a la respuesta del AG. Esta tabla permite comparar la eficacia de ambos algoritmos ante el problema planteado.

Tabla 11. Resultados ante la integración de 2 sistemas de GD

Método	Loc GD	Cap DG [MW]	Costos [\$]	IEV		Pérdidas P [MW]		Diferencia [MW]
				Sin GD	Con GD	Sin GD	Con GD	
AG	3	1.18	630385	18.98	17.78	56.84	24.64	32.2
	8	0.41						
OAL	4	1.36	965120		29.86		14.02	42.82
	3	1.2						

Los valores obtenidos del caso 2 muestran los resultados esperados, con los dos algoritmos se obtiene el mejoramiento del perfil de voltaje. Lo que los diferencia son las funciones objetivo planteadas como reducción de pérdidas de potencia, costos y maximización del índice de estabilidad de voltaje.

El AG cumple con la minimización tanto de costos como de pérdidas de potencia, pero no con el asociado al IEV. Para el caso del OAL se obtuvo el cumplimiento de las tres funciones objetivo mencionadas, por ello su solución es considerada la más óptima en comparación a la brindada por el AG.

Los gráficos de los objetivos planteados para la integración de GD mediante el uso del OAL se presentan a continuación. La Figura 19 indica el estado del perfil de voltaje ante la integración de dos unidades de GD en la Barra 4 y Barra 3 con capacidades de 1.36 y 1.20 MW. Ante esta inyección de potencias, el perfil mejora, pues los valores se encuentran dentro del rango de voltaje admisible.

Por otro lado, la Figura 20 indica las pérdidas de potencia activa en las líneas con valores superiores a 0.5 MW y al ser comparados con los de la Figura 10, se visualiza que las pérdidas se redujeron considerablemente.

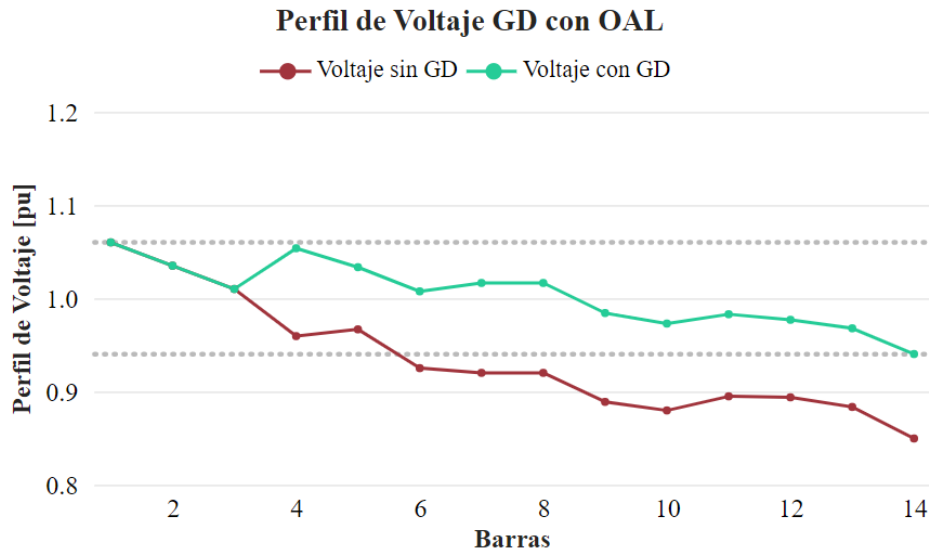


Figura 19.- Perfil de voltaje sistema IEEE 14 con GD en Barra 4 y Barra 3.

Tomando como ejemplo la L12, antes de la integración tenía un valor de 20.67 MW. En cambio, luego de la inserción de las unidades de GD en la Barra 4 y Barra 3 se tiene un valor de 4.12 MW, teniendo una diferencia total entre ambos casos de 42.82 MW.

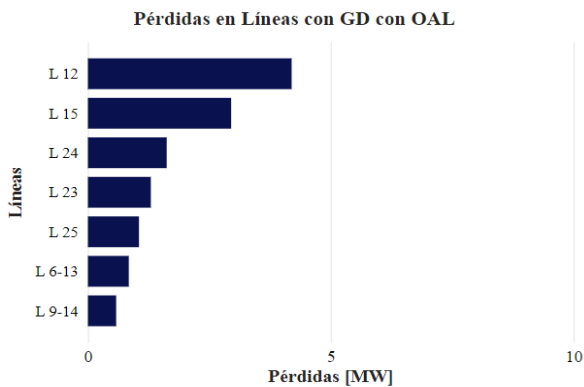


Figura 20.- Perfil de pérdidas en líneas con GD en Barra 4 y Barra 3

Con respecto al IEV se detalla que efectivamente se maximizó, dando como resultado un índice total del sistema de 29.86. que es mejor comparado con 18.98 del sistema base. En la Figura 21 se puede observar el índice que corresponde a cada barra del sistema, observándose un perfil superior al obtenido en el caso base.

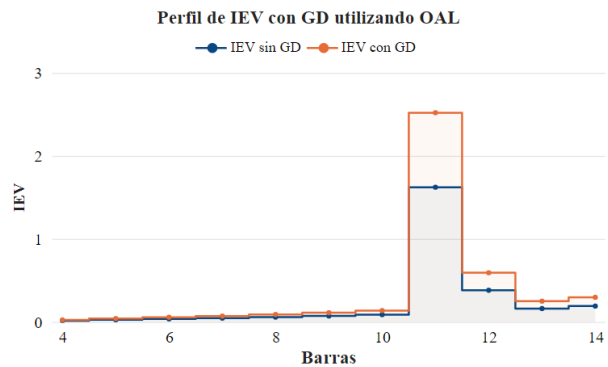


Figura 21.- IEV en cada barra con GD en Barra 4 y Barra 3.

Ante los resultados obtenidos se comprueba la eficacia del algoritmo OAL en la búsqueda de una ubicación y capacidad óptima con tres funciones objetivo. Donde dos de ellas se enfocan en la minimización de variables y la otra en maximizar.

Los algoritmos mencionados en el inicio de este trabajo se enfocan ya sea en uno o dos funciones objetivo con el carácter de minimización. Por lo que, el comportamiento de ALO con tres criterios como objetivo. Lo colocan como flexible y eficiente, pues la búsqueda de una solución óptima se consigue con menos número de agentes e iteraciones en comparación a los necesitados para el AG.

5 Conclusiones

La integración de GD permite ir cambiando la matriz energética de un país, para así evitar depender de fuentes contaminantes que día con día emiten gases de efecto invernadero, que contribuyen con el calentamiento global que está afectando al planeta.

El uso del algoritmo optimizador Ant Lion cumple con los objetivos planteados al inicio del presente trabajo, ya que se obtuvo un mejoramiento del perfil de voltaje. Puesto que, el valor promedio de dicho perfil antes de la integración de GD era de 0.93 pu. Por lo que se encuentra debajo de los límites de voltaje establecidos en la regulación de la ACERNNR para garantizar la calidad de energía eléctrica. Mientras que el resultado obtenido ante la integración de 2 unidades de GD mediante el OAL, arrojó un resultado favorable, el cual corresponde a un valor promedio de 1.004 pu en su perfil de voltaje, que representa una mejora de un 6%.

El IEV también obtuvo una mejora, pues tenía como objetivo maximizar el valor de 18.98. Lo que se logró mediante el OAL con una cantidad de 29.86 que representa una mejora del 57%. En cambio, al utilizar el AG se alcanzó un 17.78 que representa un descenso de 6.32%, incumpliendo con el objetivo trazado.

Para el tema de reducción de pérdidas de potencia activa dentro del sistema se determina que ambos algoritmos cumplen este objetivo. Sin embargo, el que lo realiza con mayor eficacia es el OAL, ya que pasó de tener un valor de 56.84 MW a 14.02MW, representando una mejora de un 75%. En lo referente a costos, la comparación muestra que el menor costo se obtuvo con el AG, pero analizado en función de costo-beneficio, el resultado logrado por el OAL es la mejor opción.

El ubicar y dimensionar de manera adecuada una unidad de GD permite evitar efectos negativos en el sistema. Al comparar el OAL con el denominado AG, se concluye que el método propuesto es el más eficaz. Dado que aparte de cumplir con los objetivos de: reducción de pérdidas para potencia activa, mejoramiento del índice de estabilidad de voltaje y reducción de costos de implementación. También necesita menos recurso computacional, pues se usa una menor cantidad de iteraciones y agentes para obtener una convergencia en el resultado de la función objetivo.

6 Referencias

- [1] I. Khan, "Importance of GHG emissions assessment in the electricity grid expansion towards a low-carbon future: A time-varying carbon intensity approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1587–1599, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.162.
- [2] M. T. Ahammed and I. Khan, "Ensuring power quality and demand-side management through IoT-based smart meters in a developing country," *Energy*, vol. 250, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123747.
- [3] International Energy Agency, "Electricity Market Report - Jan 2022," Jan. 2022.
- [4] Z. Song, X. Guan, and M. Cheng, "Multi-objective optimization strategy for home energy management system including PV and battery energy storage," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 5396–5411, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.04.023.
- [5] J. P. Muñoz-Vizhñay, M. V. Rojas-Moncayo, and C. R. Barreto-Calle, "Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador," *Ingenius*,

- no. 19, pp. 60–68, Jan. 2018, doi: 10.17163/ings.n19.2018.06.
- [6] International Energy Agency, “Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview,” Paris, Aug. 2021.
- [7] International Energy Agency, “Global Energy Review 2021,” Paris, Apr. 2021. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [8] International Energy Agency, “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level,” Paris, Mar. 2022. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [9] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, “Ant Lion Optimization Algorithm for renewable Distributed Generations,” *Energy*, vol. 116, pp. 445–458, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.104.
- [10] O. Edenhofer, R. Pichs Madruga, Y. Sokona, United Nations Environment Programme, and World Meteorological Organization, “Special report on renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers: a report of working group III of the IPCC and technical summary,” The Intergovernmental Panel on climate change, 2012.
- [11] International Energy Agency, “TRACKING SDG7 A joint report of the custodian agencies,” Jun. 2021. [Online]. Available: www.worldbank.org
- [12] “World Energy Model Documentation,” 2021.
- [13] K. Roy, L. Srivastava, and S. Dixit, “Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Using Multi-Verse Optimization,” in *Proceedings - 2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN* 2020, Sep. 2020, pp. 268–272. doi: 10.1109/CICN49253.2020.9242614.
- [14] A. Jain, J. Choi, and B. Kim, “Impact of integrating the photovoltaic and wind energy sources on generation system reliability and operation economics,” in *PowerCon 2002 - 2002 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, 2002, vol. 4, pp. 2437–2442. doi: 10.1109/ICPST.2002.1047223.
- [15] Y. Xu, S. Dong, L. Lin, S. Zhang, and H. Mao, “Optimal Siting and Sizing of Distributed Generation Considering Voltage Stability Fluctuation,” May 2021. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510610.
- [16] A. A. Abdelsalam, A. A. Zidan, and E. F. El-Saadany, “Optimal DG Allocation in Radial Distribution Systems with High Penetration of Non-linear Loads,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 13, pp. 1487–1497, Aug. 2015, doi: 10.1080/15325008.2015.1043601.
- [17] T. L. A. de Carvalho and N. R. Ferreira, “Optimal allocation of distributed generation using ant colony optimization in electrical distribution system,” in *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*, Jun. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395672.
- [18] A. H. Ali, A.-R. Youssef, T. George, and S. Kamel, “Optimal DG Allocation in Distribution Systems Using Ant Lion Optimizer,” Feb. 2018.
- [19] W. S. Tan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, and H. A. Rahman, “Allocation and sizing of DG using Cuckoo Search algorithm,” in *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power*

- and Energy, 2012, pp. 133–138. doi: 10.1109/PECon.2012.6450192.
- [20] Y. G. Hegazy, M. M. Othman, W. El-Khattam, and A. Y. Abdelaziz, “Optimal sizing and siting of distributed generators using Big Bang Big Crunch method,” Oct. 2014. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934787.
- [21] K. Mahmoud, N. Yorino, and A. Ahmed, “Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 960–969, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2418333.
- [22] R. C. G. Teive *et al.*, “Intelligent system for automatic performance evaluation of distribution system operators,” Oct. 2017. doi: 10.1109/ISAP.2017.8071399.
- [23] T. Gönen, *Electrical Power Transmission System Engineering Analysis and Design*, 3rd ed. CRC Press, 2014. [Online]. Available: www.EngineeringEBooksPdf.com
- [24] L. Grigsby, *Electric Power Generation, Transmission and Distribution*, 3rd ed. CRC Press, 2012.
- [25] S. Ramírez and A. Cano, *Calidad del Servicio de la Energía Eléctrica*, 1 Ed. Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [26] H. Enríquez, *ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México: LIMUSA, 2004.
- [27] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic Press/Elsevier, 2008.
- [28] B. Chen, K. Xiang, L. Yang, Q. Su, D. Huang, and T. Huang, “2016 China International Conference on Electricity Distribution: proceedings: 17-19 September 2018, Tianjin, China,” in *Theoretical Line Loss Calculation of Distribution Network Based on the Integrated electricity and line loss management system*, Sep. 2018, pp. 2531–2535. doi: 10.1109/CICED.2018.8592309.
- [29] A. Mahroqi, A. Metwally, A. Hinai, and A. Badi, “Reduction of Power Losses in Distribution Systems,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 63, pp. 585–592, 2012.
- [30] G. Gutiérrez, A. Aguila, D. González, and L. Ortiz, “Optimum Location and Sizing of Capacitor Banks Using VOLT VAR Compensation in Micro-grids,” *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 18, pp. 465–471, Mar. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082717.
- [31] D. Kothari and I. Nagrath, *Sistemas Eléctricos de Potencia*, 3rd ed. México: McGraw-Hill, 2008.
- [32] S. Ratra, R. Tiwari, and K. R. Niazi, “Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 199–211, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.12.046
- [33] O. F. B. Angarita, R. C. Leborgne, D. D. S. Gazzana, and C. Bortolosso, “Power loss and voltage variation in distribution systems with optimal allocation of distributed generation,” in *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015*, Jan. 2015, pp. 214–218. doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381156.
- [34] A. Afoz, G. Abhishek, B. Parth, S. Aiman, and Z. Mohammad, “Power Loss Minimization in a Radial Distribution System with Distributed Generation,” Feb. 2018. doi: 10.1109/ICPECTS.2018.8521619.

- [35] A. Afroz, B. Parth, Z. Mohammad, G. Abhishek, and S. Aiman, "Power Loss Reduction in a Radial Distribution Network Using Distributed Generation," 2018.
- [36] E. E. Aponte and J. K. Nelson, "Time optimal load shedding for distributed power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 269–277, Feb. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2005.857826.
- [37] Z. M. Yasin, M. R. Rusdi, and Z. Zakaria, "Distribution generation planning in distribution network using ant lion optimizer," in *PECon 2020 - 2020 IEEE International Conference on Power and Energy*, Dec. 2020, pp. 182–187. doi: 10.1109/PECon48942.2020.9314408.
- [38] K. Mahmoud, N. Yorino, and A. Ahmed, "Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 960–969, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2418333.
- [39] M. Gonzales, "ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA," Oct. 2019.
- [40] M. Gradella, *Energía Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede*, vol. 2. Sao Paulo: Editora Saraiva, 2012.
- [41] A. Desai, I. Mukhopadhyay, and A. Ray, "Techno-Economic-Environment Analysis of Solar PV Smart Microgrid for Sustainable Rural Electrification in Agriculture community," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Jun. 2021, pp. 2281–2285. doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518454.
- [42] K. Amritha, V. Rajagopal, K. N. Raju, and S. R. Arya, "Ant lion algorithm for optimized controller gains for power quality enrichment of off-grid wind power harnessing units," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 85–97, Sep. 2020, doi: 10.23919/CJEE.2020.000022.
- [43] R. E. Brown and L. A. A. Freeman, "Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation," Jul. 2001. doi: 10.1109/PESS.2001.970197.
- [44] T. Prasetyo, Sarjiya, and L. Multa, "Optimal Sizing and Siting of PV-Based Distributed Generation for Losses Minimization of Distribution using Flower Pollination Algorithm," in *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, 2019, pp. 779–783.
- [45] T. Bouktir, K. R. Guerriche, and T. Bouktir, "Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction," *Revue des Sciences et de la Technologie*, vol. 6, pp. 59–69, 2015, [Online]. Available: <http://www.researchgate.net/publication/271373002>
- [46] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, "Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm," *Heliyon*, vol. 7, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [47] A. Tawfiq, M. Elhameed, and A. Elgawad, "Antlion Optimizer For Effective Integration Of Distributed Generation In Radial Electrical Distribution Networks," in *2017 Nineteenth International Middle-East Power Systems Conference (MEPCON) December 2017*, Dec. 2017, pp. 248–262.
- [48] A. Victorie, C. Chelladurrai, S. Selladurai, A. Kanimozhi, S. Gobu,

- and D. SN, “Multi Objective Optimization for Sizing and Placement of Distributed Generators Using a Modified Ant Lion Optimizer Algorithm,” in *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2019, p. 6. doi: 10.1109 / ICPES47639.2019.9105513.
- [49] C. Chelladurai and A. A. Victoire, “Crisscross optimization with comprehensive vertical crossover to solve combined economic emission dispatch,” *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 131–140, Aug. 2018, doi: 10.4316/AECE.2018.03018.
- [50] K. Anuradha, U. Jayatunga, and H. Ranjit, “Voltage-Loss Sensitivity Based Approach for Optimal DG Placement in Distribution Networks,” in *2019 IEEE 14th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Dec. 2019, pp. 553–558.
- [51] “REGULACIÓN-No.- ARCERNNR-002/20-Calidad de servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,” Nov. 2020.
- [52] “REGULACIÓN Nro. ARCERNNR-002/21-Marco normativo para la participación en generación distribuida de empresas habilitadas para realizarla actividad de generación,” Apr. 2021.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 12: Matriz de estado del arte.

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA																									
ITEM	AÑO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Incremento de la Demanda e Impactos de la Generación en el Medio Ambiente	Calidad en los Sistemas de Distribución	Generación Distribuida	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Escenario de Prueba	Minimización de Pérdidas de Potencia	Maximización del Índice de Estabilidad de Voltaje	Perfil de Voltaje	Dimensionamiento y Ubicación Óptima de GD	Balance de Potencia	Límites Máximo y Mínimo de Voltaje	Límites Máximo y Mínimo de Capacidad de GD	Algoritmos de Optimización	Flujo de Potencia	Algoritmo Genético (AG)	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de GD	Mejor Perfil de Voltaje	Pérdidas de Potencias Menores	Estabilidad de Voltaje	
1	2018	Importance of GHG emissions assessment in the electricity grid expansion towards a low-carbon future: A time-varying carbon intensity approach	0	☒																					
2	2022	Ensuring power quality and demand-side management through IoT-based smart meters in a developing country	13	☒																					
3	2022	Electricity Market Report - Jan 2022	0	☒																					
4	2022	Multi-objective optimization strategy for home energy management system including PV and battery energy storage	0	☒																					
5	2018	Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador	31	☒																					
6	2021	Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview	0	☒																					
7	2021	Global Energy Review 2021	0	☒																					
8	2022	Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level	0	☒																					
9	2016	Ant Lion Optimization Algorithm for renewable Distributed Generations	176	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒			☒			☒		☒				
10	2012	Special report on renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers: a report of working group III of the IPCC and technical summary	0	☒																					

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Incremento de la Demanda e Impactos de la Generación en el Medio Ambiente	Calidad en los Sistemas de Distribución	Generación Distribuida	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Escenario de Prueba	Minimización de Pérdidas de Potencia	Maximización del Índice de Estabilidad de Voltaje	Perfil de Voltaje	Dimensionamiento y Ubicación Óptima de GD	Balance de Potencia	Límites Máximo y Mínimo de Voltaje	Límites Máximo y Mínimo de Capacidad de GD	Algoritmos de Optimización	Flujo de Potencia	Algoritmo Genético (AG)	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de GD	Mejor Perfil de Voltaje	Pérdidas de Potencias Menores	Estabilidad de Voltaje
11	2021	TRACKING SDG7 A joint report of the custodian agencies	0	☒		☒																		
12	2021	World Energy Model Documentation	0	☒		☒																		
13	2020	Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Using Multi-Verse Optimization	1			☒				☒		☒			☒				☒	☒	☒	☒		
14	2002	Impact of integrating the photovoltaic and wind energy sources on generation system reliability and operation economics	5			☒																		
15	2021	Optimal Siting and Sizing of Distributed Generation Considering Voltage Stability Fluctuation	0		☒	☒				☒	☒	☒	☒			☒				☒	☒	☒	☒	
16	2015	Optimal DG Allocation in Radial Distribution Systems with High Penetration of Non-linear Loads	15				☒			☒		☒	☒	☒		☒				☒	☒	☒		
17	2018	Optimal allocation of distributed generation using ant colony optimization in electrical distribution system	1				☒			☒		☒	☒	☒		☒				☒	☒	☒		
18	2018	Optimal DG Allocation in Distribution Systems Using Ant Lion Optimizer	18	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒				☒		☒	☒	☒	☒	☒		
19	2012	Allocation and sizing of DG using Cuckoo Search algorithm	52				☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒				☒	☒	☒	☒	
20	2014	Optimal sizing and siting of distributed generators using Big Bang Big Crunch method	15				☒			☒		☒	☒	☒		☒				☒	☒	☒		
21	2016	Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization	210			☒		☒				☒												
22	2017	Intelligent system for automatic performance evaluation of distribution system operators	2					☒																

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Incremento de la Demanda e Impactos de la Generación en el Medio Ambiente	Calidad en los Sistemas de Distribución	Generación Distribuida	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Escenario de Prueba	Minimización de Pérdidas de Potencia	Maximización del Índice de Estabilidad de Voltaje	Perfil de Voltaje	Dimensionamiento y Ubicación Óptima de GD	Balance de Potencia	Límites Máximo y Mínimo de Voltaje	Límites Máximo y Mínimo de Capacidad de GD	Algoritmos de Optimización	Flujo de Potencia	Algoritmo Genético (AG)	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de GD	Mejor Perfil de Voltaje	Pérdidas de Potencias Menores	Estabilidad de Voltaje	
23	2014	Electrical Power Transmission System Engineering Third Edition Analysis and Design	0						☒																
24	2012	Electric Power Generation, Transmission and Distribution	0						☒																
25	2006	Calidad del Servicio de la Energía Eléctrica	0		☒						☒														
26	2004	ABC de la calidad de la energía eléctrica	0		☒																				
27	2008	Power quality in power systems and electrical machines	0		☒						☒														
28	2018	Theoretical Line Loss Calculation of Distribution Network Based on the Integrated electricity and line loss management system	10		☒				☒					☒	☒	☒									
29	2012	Reduction of Power Losses in Distribution Systems	23		☒												☒								
30	2020	Optimum Location and Sizing of Capacitor Banks Using VOLT VAR Compensation in Micro-grids	4				☒							☒				☒				☒			
31	2008	Sistemas Eléctricos de Potencia	0		☒		☒				☒							☒			☒	☒		☒	
32	2018	Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index	37		☒		☒				☒							☒							☒
33	2015	Power loss and voltage variation in distribution systems with optimal allocation of distributed generation	9			☒		☒						☒	☒	☒									
34	2018	Power Loss Minimization in a Radial Distribution System with Distributed Generation	13	☒		☒	☒			☒	☒											☒	☒		

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

ITEM	AÑO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Incremento de la Demanda e Impactos de la Generación en el Medio Ambiente	Calidad en los Sistemas de Distribución	Generación Distribuida	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Escenario de Prueba	Minimización de Pérdidas de Potencia	Maximización del Índice de Estabilidad de Voltaje	Perfil de Voltaje	Dimensionamiento y Ubicación Óptima de GD	Balance de Potencia	Límites Máximo y Mínimo de Voltaje	Límites Máximo y Mínimo de Capacidad de GD	Algoritmos de Optimización	Flujo de Potencia	Algoritmo Genético (AG)	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de GD	Mejor Perfil de Voltaje	Pérdidas de Potencias Menores
35	2018	Power Loss Reduction in a Radial Distribution Network Using Distributed Generation	2		☒	☒	☒		☒		☒	☒								☒	☒	☒	☒
36	2006	Time optimal load shedding for distributed power systems	56	☒		☒																	
37	2020	Distribution generation planning in distribution network using ant lion optimizer	0	☒			☒		☒			☒				☒			☒	☒	☒	☒	☒
38	2016	Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization	202			☒						☒				☒				☒			
39	2019	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	0			☒																	
40	2012	Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede	0			☒																	
41	2021	Techno-Economic-Environment Analysis of Solar PV Smart Microgrid for Sustainable Rural Electrification in Agriculture community	0			☒																	
42	2020	Ant lion algorithm for optimized controller gains for power quality enrichment of off-grid wind power harnessing units	3	☒		☒	☒	☒		☒	☒									☒	☒	☒	☒
43	2001	Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation	95	☒		☒	☒			☒		☒									☒	☒	
44	2019	Optimal Sizing and Siting of PV-Based Distributed Generation for Losses Minimization of Distribution using Flower Pollination Algorithm	6		☒	☒				☒		☒								☒			
45	2015	Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction	24			☒	☒			☒		☒				☒				☒	☒	☒	

ANÁLISIS MULTI-OBJETIVO PARA ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENFOCADO EN MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
				Incremento de la Demanda e Impactos de la Generación en el Medio Ambiente	Calidad en los Sistemas de Distribución	Generación Distribuida	Mejoramiento de Perfil de Voltaje	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Escenario de Prueba	Minimización de Pérdidas de Potencia	Maximización del Índice de Estabilidad de Voltaje	Perfil de Voltaje	Dimensionamiento y Ubicación Óptima de GD	Balance de Potencia	Límites Máximo y Mínimo de Voltaje	Límites Máximo y Mínimo de Capacidad de GD	Algoritmos de Optimización	Flujo de Potencia	Algoritmo Genético (AG)	Algoritmo Optimizador Ant Lion	Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de GD	Mejor Perfil de Voltaje	Pérdidas de Potencias Menores	Estabilidad de Voltaje	
46	2021	Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm	1					☒										☒							
47	2017	Antlion Optimizer for Effective Integration Of Distributed Generation In Radial Electrical Distribution Networks	1					☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
48	2019	Multi Objective Optimization for Sizing and Placement of Distributed Generators Using a Modified Ant Lion Optimizer Algorithm	2					☒			☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒
49	2018	Crisscross optimization with comprehensive vertical crossover to solve combined economic emission dispatch	6												☒										
50	2019	Voltage-Loss Sensitivity Based Approach for Optimal DG Placement in Distribution Networks	3					☒			☒	☒		☒	☒			☒			☒	☒	☒	☒	☒
51	2020	REGULACIÓN-No.-ARCERNR-002/20-Calidad de servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica	0												☒										
52	2021	REGULACIÓN Nro. ARCERNR-002/21-Marco normativo para la participación en generación distribuida de empresas habilitadas para realizarla actividad de generación	0															☒							
CANTIDAD:				18	11	20	17	6	6	17	9	17	16	11	5	5	15	4	2	4	17	19	16	11	

6.2 Resumen de Indicadores

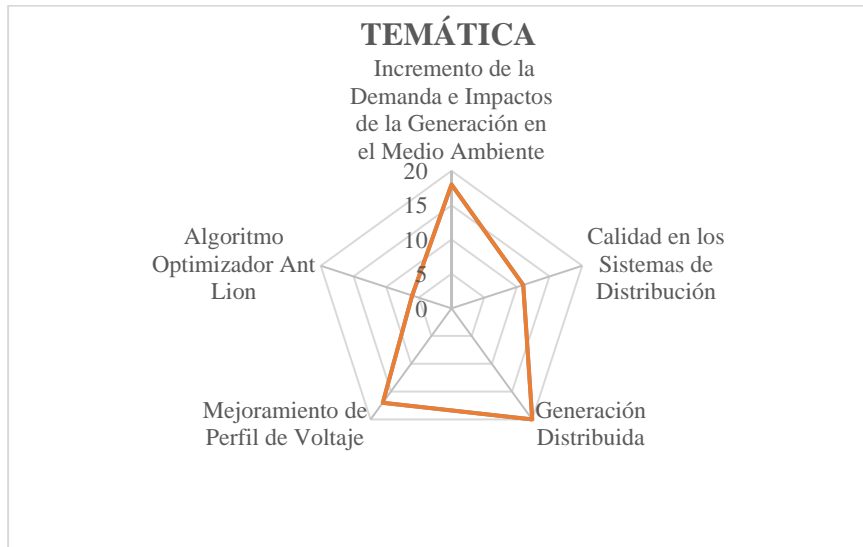


Figura 22.- Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

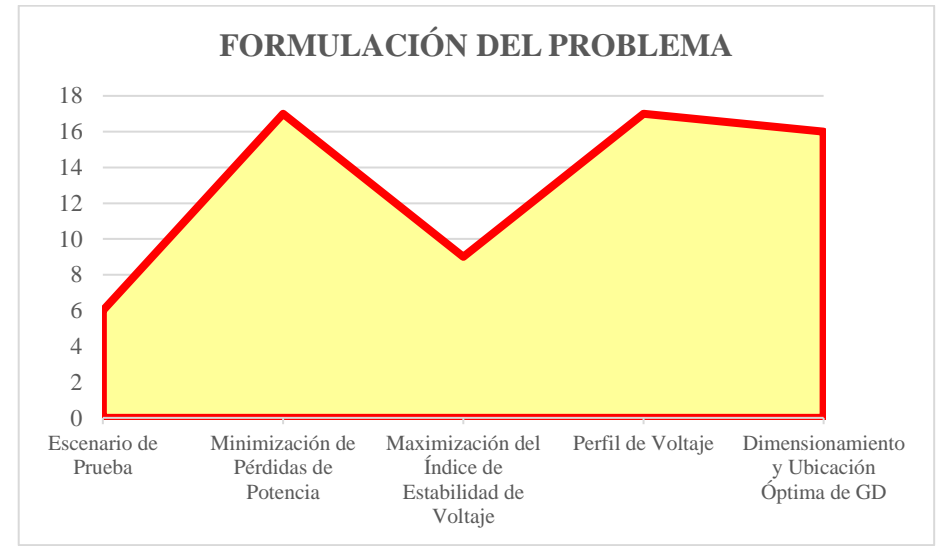


Figura 23.- Indicador de formulación del problema - Estado del arte

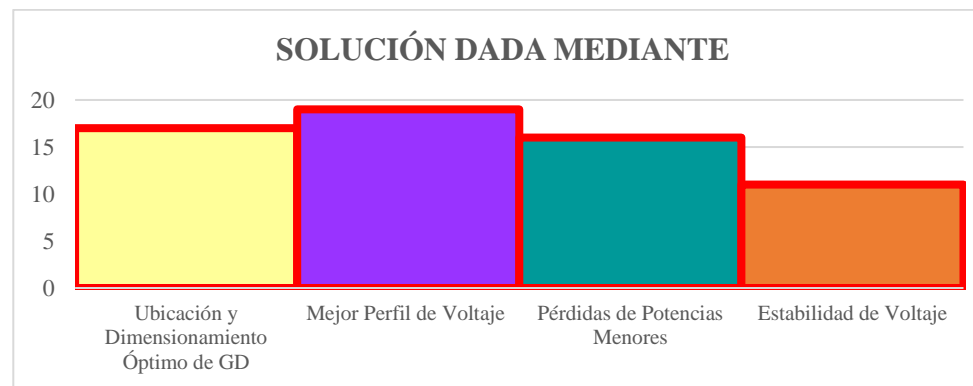


Figura 24.- Indicador de solución - Estado del arte.

7 Anexos

Tabla 13. Datos de líneas del sistema IEEE de 14 barras.

Datos de Líneas				
Nº Línea	Bus inicial	Bus final	R [ohm]	X [ohm]
1	1	2	0.01938	0.05917
2	1	5	0.05403	0.22304
3	2	3	0.04699	0.19797
4	2	4	0.05811	0.17632
5	2	5	0.05695	0.17388
6	3	4	0.06701	0.17103
7	4	5	0.01335	0.04211
8	4	7	0	0.20912
9	4	9	0	0.55618
10	5	6	0	0.25202
11	6	11	0.09498	0.19890
12	6	12	0.12291	0.25581
13	6	13	0.06615	0.13027
14	7	8	0	0.17615
15	7	9	0	0.11001
16	9	10	0.03181	0.08450
17	9	14	0.12711	0.27038
18	10	11	0.08205	0.19207
19	12	13	0.22092	0.19988
20	13	14	0.17093	0.34802

Tabla 14. Datos de cargas del sistema IEEE de 14 barras

Datos de Cargas		
Nº Barra	P [kW]	Q [kvar]
1	0	0
2	21.7	12.7
3	94.2	19.0
4	47.8	-3.9
5	7.6	1.6
6	11.2	7.5
7	0	0
8	0	0
9	29.5	16.6
10	9.0	5.8
11	3.5	1.8
12	6.1	1.6
13	13.5	5.8
14	14.9	5.0