

**MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA
UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO
ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**



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

**MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA
UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO
ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

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

AUTOR: DAVID ALEJANDRO CALVACHI PAZ

TUTOR: LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA

Quito -Ecuador

2022

David Alejandro Calvachi Paz

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022
Carrera de Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



David Alejandro Calvachi Paz (Y'1999 – J'12). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Instituto Tecnológico Superior “Sucre” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo está basado en el mejoramiento del perfil de voltaje en sistemas de distribución mediante la implementación de un algoritmo genético enfocado en la ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.
dcalvachip@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Luis Fernando Tipán Vergara (Y'1982-J'21). Nació en Quito, Ecuador, el 21 de junio de 1982. Se graduó de la Facultad de Ingeniería Eléctrica Como Ingeniero en Electrónica en Control en la Escuela Politécnica Nacional. sus estudios de postgrado los hizo en la Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica, obteniendo el grado de Magister en Eficiencia Energética. La mayor parte de su vida profesional la dedico al sector industrial y petrolero. Actualmente está involucrado en las áreas de Energías Alternativas y Eficiencia Energética en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus intereses de investigación incluyen los métodos de GD con Energías alternativas, el IoT basándose en controladores de bajo consumo, Electrónica de Potencia, entre otros.
ltipan@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

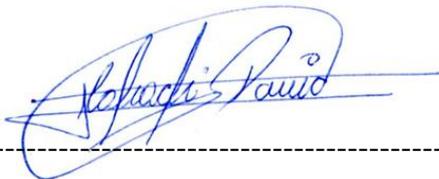
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, David Alejandro Calvachi Paz con documento de identificación N° 1729042448 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, 07 de septiembre del año 2022

Atentamente,



David Alejandro Calvachi Paz
1729042448

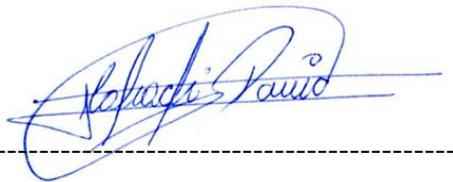
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, David Alejandro Calvachi Paz con documento de identificación No. 1729042448, 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 “Mejoramiento del perfil de voltaje en sistemas de distribución mediante la implementación de un algoritmo genético enfocado en la ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida”, 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, 07 de septiembre del año 2022

Atentamente,



David Alejandro Calvachi Paz
1729042448

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara con documento de identificación N° 1717329005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA, realizado por David Alejandro Calvachi Paz con documento de identificación N° 1729042448, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc
1717329005

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Sistemas de distribución (SD)	3
2.2	Perfil de Voltaje.....	4
2.3	Generación Distribuida (GD)	5
2.4	Integración de la GD en el sistema eléctrico	6
2.5	Métodos para realizar una integración óptima de GD	7
2.6	Algoritmo Genético (AG).....	7
2.7	Desarrollo de la Función Objetivo (FO)	10
2.8	Restricciones de la FO	10
3	Formulación del problema	11
3.1	Sistemas IEEE de prueba.....	11
3.2	Desarrollo del Pseudocódigo	12
3.3	Desarrollo del flujo de potencia sistemas sin GDF	13
4	Casos de estudio	14
4.1	Sistema IEEE de 9 barras con y sin GDF	14
4.2	Sistema IEEE de 14 barras con y sin GDF	14
5	Análisis de resultados.....	14
5.1	Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 9 barras con GDF	15
5.2	Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras con GDF	16
6	Conclusiones	17
6.1	Trabajos futuros.....	18
7	Referencias.....	18
7.1	Matriz de Estado del Arte	22
7.2	Resumen de Indicadores	27
8	Anexos.....	29
8.1	Datos del Sistema IEEE de 9 barras	29
8.2	Datos del Sistema IEEE de 14 barras	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación de un AG para asignar GD en el SD.	3
Figura 2. Representación de un SD simplificado.....	4
Figura 3. Integración de GD a los diferentes sistemas del SEP.	5
Figura 4. Punto de cruce de un esquema codificado.	8
Figura 5. Mutación de una cadena binaria	9
Figura 6. Diagrama de flujo que representa el funcionamiento de un AG.....	9
Figura 7. Diagrama unifilar Sistema IEEE de 9 barras.	12
Figura 8. Diagrama unifilar Sistema IEEE de 14 barras	12
Figura 9. Perfil de voltaje – Sistema IEEE de 9 barras con GDF óptimo	15
Figura 10. Perfil de voltaje – Sistema IEEE de 14 barras con GDF óptimo	17
Figura 11. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	27
Figura 12. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	27
Figura 13. Indicador de solución - Estado del arte.....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rango admisible para las variaciones de voltaje.....	4
Tabla 2: Generación máxima dependiendo del tipo de Central de GD.....	5
Tabla 3: Potencia nominal de una CGD, establecida por la ARCERNNR – Ecuador.....	6
Tabla 4: Pseudocódigo aplicado en la solución.....	12
Tabla 5: Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 9 barras sin integración de GDF	13
Tabla 6: Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras sin integración de GDF	13
Tabla 7: Ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF - Sistema de 9 barras.....	15
Tabla 8: Comparación Perfil de voltaje - Sistema IEEE de 9 barras con GDF 1-2	15
Tabla 9: Ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF-Sistema de 14 barras.....	16
Tabla 10: Comparación Perfil de voltaje - Sistema IEEE de 14 barras con GDF 1-2-3..	16
Tabla 11: Matriz de estado del arte.	22
Tabla 12: Datos de los generadores del Sistema IEEE de 9 barras	29
Tabla 13: Datos de las barras perteneciente al Sistema IEEE de 9 barras	29
Tabla 14: Datos en las líneas del Sistema IEEE de 9 barras	29
Tabla 15: Datos de los generadores del Sistema IEEE de 14 barras	29
Tabla 16: Datos de las barras del Sistema IEEE de 14 barras.....	29
Tabla 17: Datos en las líneas del Sistema IEEE de 14 barras.....	30

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Resumen

El enfoque planteado para el desarrollo de este trabajo investigativo se basó en la integración de Generación de Energía Distribuida (GD) a una red de distribución de energía, mejorando el perfil de voltaje al establecer una ubicación y dimensionamiento óptimo de Centrales de GD, para lo cual, se recurrió al uso de un método de optimización heurístico conocido como Algoritmo Genético (AG), el cual, cuenta con varias restricciones para limitar su funcionamiento y así conseguir una solución óptima al problema de optimización planteado.

El desarrollo de un flujo de potencia permitió disponer de la medición del voltaje en las barras de la red antes de incorporar GD, permitiendo comprobar que las fluctuaciones de voltaje presentan una mejoría luego de realizar la incorporación una por una de cada Central de GD definida por el AG.

Los sistemas en los cuales se realizó la medición del voltaje, así como la comprobación de sus fluctuaciones con y sin GD una vez empleado el AG, fueron los sistemas IEEE de 9 y 14 barras, siendo este último el utilizado para demostrar la escalabilidad del AG para ubicar y dimensionar GD sin considerar la cantidad de barras con las que cuenta un sistema.

Palabras Clave: Algoritmo Genético, Escalabilidad, Fluctuaciones de Voltaje, Generación de Energía Distribuida, Medición de Voltaje, Métodos de Optimización y Red de Distribución de Energía.

Abstract

The approach proposed for the development of this research work was based on the integration of Distributed Energy Generation (DG) to a power distribution network, improving the voltage profile by establishing an optimal location and sizing of DG Power Plants, for which we resorted to the use of a heuristic optimization method known as Genetic Algorithm (GA), which has several restrictions to limit its operation and thus achieve an optimal solution to the optimization problem posed.

The development of a power flow allowed having the voltage measurement in the bars of the network before incorporating DG, allowing to verify that the voltage fluctuations present an improvement after the incorporation one by one of each DG Central defined by the GA.

The systems in which the voltage measurement was performed, as well as the verification of its fluctuations with and without DG once the AG was used, were the IEEE systems of 9 and 14 busbars, being the latter the one used to demonstrate the scalability of the AG to locate and dimension DG without considering the number of busbars in a system.

Keywords: Genetic Algorithm, Scalability, Voltage Fluctuations, Distributed Power Generation, Voltage Measurement, Optimization Methods and Power Distribution Network.

1 Introducción

Debido al crecimiento y sofisticación con el que cuentan las cargas del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) a causa del crecimiento gradual de la población durante los últimos años se puede identificar varios problemas referentes a la generación y a la carga del sistema [1] estableciendo que, por el deterioro de las centrales de generación convencionales no se puede cubrir con la demanda actual requerida [2], [3].

Al considerar que el sistema cuenta con un mantenimiento deficiente y por el hecho de estar lejos del usuario, la generación tradicional está provocando que en los últimos años el voltaje del sistema se encuentre sobre los límites de operación idóneo, presentando una reducción en la calidad y confiabilidad del sistema [4], [5].

Considerando el alto costo de instalar nuevas líneas y la gran contaminación causada por conservar y construir centrales eléctricas convencionales [2], [6] se ha implementado en la actualidad el uso de nuevas técnicas y tecnologías enfocadas en: satisfacer la demanda del usuario, mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas en las líneas, sin generar mayor contaminación del ambiente [1], [7], [8].

Como en [1], en donde se plantea la reconfiguración a la red de distribución a través de la modelación de un algoritmo de enjambre de partículas binarias reduciendo la carga que pasa por los alimentadores, mejorando durante este proceso el perfil de voltaje a lo largo de las barras del sistema.

Por el contrario, al considerar que el control, monitoreo y comunicación de los elementos del SEP se ha vuelto más avanzado, el uso de una generación más económica y eficiente es más conveniente, ya que, presenta una mayor confiabilidad, beneficios técnicos (perfil de voltaje adecuado) y ambientales (reducción de la contaminación) a los obtenidos por otro tipo de tecnologías y por la generación convencional [9], [10].

Cuando se analiza usar GD se debe poner énfasis en la utilización de varias fuentes de energías de origen natural o con emisiones de dióxido de carbono muy reducidas [11] resolviendo temas que no tendrían solución inmediata al considerar generación convencional.

Al considerar el uso de Centrales de GD se consideran varias restricciones como el dimensionamiento, la ubicación, el tipo y la variabilidad de la GD buscando una adecuada integración de las centrales que ingresan al sistema, evitando durante este proceso las fluctuaciones inadecuadas de voltaje [12].

Como lo desarrollado en [3], donde a través de un AG se encuentra el sitio y la capacidad óptima de la GD para mejorar el perfil de voltaje, modelando las fuentes renovables y estableciendo las restricciones que limiten las fluctuaciones de voltaje y la capacidad de cada Central de GD (CGD) a instalar.

O como lo desarrollado en [7] en donde, se considera el control de potencia reactiva para cada CGD a instalar, proceso que es desarrollado a través de una estación remota permitiendo decidir la central a utilizar y que cantidad de potencia inyectar previniendo fluctuaciones irregulares en el voltaje.

Sin embargo, para este estudio el enfoque se basó en los planteamientos establecidos en [13], en donde, se verifica el perfil de voltaje en el sistema luego de incorporar varias Centrales de GD que inyectan solo potencia activa al contar con un factor de potencia unitario, haciendo referencia a una Generación Distribuida Fotovoltaica (GDF).

Conociendo todas estas premisas mediante la Figura 1 se establece el procedimiento mediante el cual, se realiza la integración de la GD al sistema, a través de la aplicación de un AG, para lo cual se debe tomar en cuenta la normativa existente que regula la instalación de GD en el Ecuador, consiguiendo de esta manera una

integración idónea que permita contar con un sistema estable.

Por último, con la finalidad de obtener una mejor organización y comprensión de la temática de este artículo, se procede a su segmentación en diferentes secciones, las mismas que son especificadas a continuación: en la Sección II se encuentra detallado las definiciones del SD, GD y Perfil de Voltaje, así como los valores máximos de voltaje y potencia tanto para las barras, como para las Centrales de GD respectivamente, la Sección III contiene la formulación del problema, así como los

sistemas de prueba, el pseudocódigo y el flujo de potencia del caso base, es decir, sin GD, la Sección IV se definen los casos de estudio que conforman este trabajo en base a la integración de GD, la Sección V en donde se presenta el análisis y comparación de los resultados del perfil de voltaje luego de incorporar GD.

Finalizando el documento con la Sección VI donde se establecen las conclusiones obtenidas al resolver el problema establecido, así como los trabajos a futuro relacionados con la temática del presente artículo.

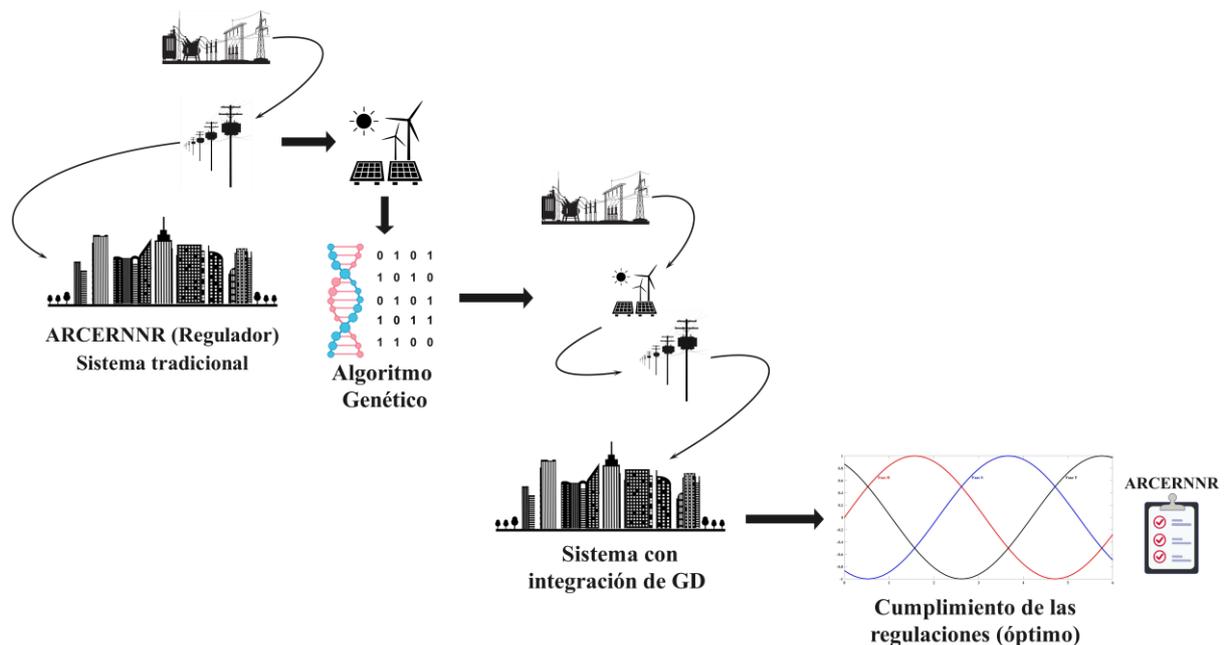


Figura 1. Aplicación de un AG para asignar GD en el SD [autor].

2 Marco teórico

Para desarrollar este trabajo, se debe realizar varias aportaciones teóricas enfocadas en la integración de GD al SD, además de contar con términos que permitan definir los conceptos necesarios para la aplicación del modelo de optimización buscando mejorar el perfil de voltaje presente en las barras del sistema cuando se establecen ciertos límites para el correcto funcionamiento de los sistemas analizados durante el desarrollo de este estudio.

2.1 Sistemas de distribución (SD)

El SD es una de las partes más importantes del SEP, siendo el encargado de llevar el suministro de energía eléctrica en Media Tensión (MT) desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales conectados al SEP [1], [14], siendo conformado por diferentes elementos como: líneas de distribución primarias y secundarias, transformadores de distribución, acometidas y cargas [15].

Todos estos elementos especificados previamente se encuentran establecidos dentro de un sistema mallado o un sistema

radial, teniendo en cuenta que el sistema radial es el más utilizado para representar al SD, debido a que, permite tener una mejor gestión sobre las protecciones del sistema [16].

Si se consideran las premisas establecidas con anterioridad el SD se pueden representar de una manera sencilla a través de un diagrama unifilar que especifique la ubicación y la conexión de cada uno de los elementos antes mencionados independientemente de su configuración.

Se puede realizar una representación de manera sencilla y simplificada, mediante la cual se establezcan los principales elementos que conforman el SD, dicho proceso se encuentra establecido en la Figura 2.

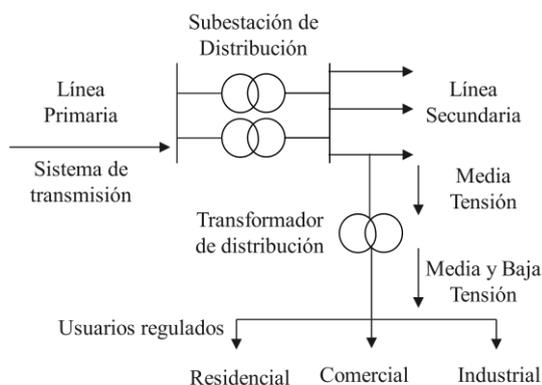


Figura 2. Representación de un SD simplificado [autor].

2.2 Perfil de Voltaje

Al referirnos al perfil de voltaje es inevitable no hacer referencia a la estabilidad de voltaje, ya que, contar con una adecuada estabilidad implica conservar el voltaje de las barras dentro de los límites establecidos por una regulación después de la aparición de una falla, buscando que el sistema tenga un comportamiento más eficiente, económico y confiable [17].

Cuando se analiza el perfil de voltaje se debe tener en cuenta que su alteración se produce por: la variación de las cargas, los cambios en la estructura de la red debido a la presencia de varias fallas, a la realización

de un mantenimiento dentro de la red y por el hecho de presentar un cambio en la generación que proporciona energía el sistema [18].

Mejorar el perfil de voltaje en el SD es indispensable para garantizar un voltaje idóneo para el usuario, es decir, el sistema debe contar con un proceso que permita reducir la inestabilidad de voltaje aumentando al mismo tiempo la calidad y confiabilidad del sistema [7].

2.2.1 Límites de perfil de voltaje

Cada país define sus límites de voltaje para poder trabajar sin inconvenientes, a través de una normativa, considerando dentro de su análisis los diversos factores técnicos que caracterizan al sistema de dicho país, sin embargo, de manera internacional se establece que para un correcto funcionamiento del SEP el perfil de voltaje se debe encontrar entre el 0.95 [p.u] y el 1.05 [p.u], mientras que para el SD los valores se deben encontrar entre el 0.9 [p.u] y 1.1 [p.u] [19].

En el Ecuador de acuerdo a lo establecido por la regulación No. ARCONEL 005/18 las variaciones de voltaje dependen del nivel de voltaje presente en los sistemas del SEP [20], en ese sentido, de acuerdo al análisis de esta regulación, en la Tabla 1 se cuantifica el rango admisible permitido para las variaciones de voltaje dentro del SEP.

Tabla 1. Rango admisible para las variaciones de voltaje [19].

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje	± 5%
Medio voltaje	± 6%
Bajo voltaje	± 8%

2.2.2 Técnicas para conservar el perfil de voltaje.

La aplicación de varias técnicas permite conservar el perfil de voltaje dentro de los límites establecidos por una normativa, entre las que podemos encontrar [1], [7]:

- i. Reconfiguración del SD.
- ii. Utilización de controladores y reguladores de voltaje.
- iii. Instalación de cambiadores de tomas bajo carga.
- iv. Instalación de bancos de compensación capacitiva (condensadores de derivación).
- v. Instalación de FACS.
- vi. El diseño e integración de GD.

Considerando a las dos últimas como las técnicas que presentan mayores beneficios cuando se las desarrolla en el SD.

2.3 Generación Distribuida (GD)

Hablar sobre GD es una tarea desafiante, ya que, de forma internacional no existe una definición general para categorizarla dentro de una sola definición, teniendo que recurrir al criterio establecido por varios autores para llegar a una definición certera y de común uso dentro de varios textos [12], [21].

Considerando esta premisa, se define a la GD como una generación eléctrica renovable y pequeña que se puede conectar al sistema de transmisión y con mayor frecuencia al SD [6], siendo la generación adecuada para reducir la contaminación del ambiente y la más idónea para realizar su instalación cerca de los consumidores [8], [9].

La energía obtenida por medio de una generación fotovoltaica, eólica, biomasa, geo-térmica e hidráulica (a pequeña escala), son las más referenciadas cuando se plantea el desarrollo e instalación de GD dentro de un sistema, sin embargo, en la actualidad se ha optado por usar tecnologías provenientes de fuentes no renovables de poca contaminación para utilizarlas como fuentes de GD, las mismas que son obtenidas

mediante micro-turbinas, turbinas de combustión entre otras [11], [12], [21].

Mediante la Figura 3, se presenta un diagrama que permite identificar los diferentes sistemas del SEP más comunes para incorporar GD.

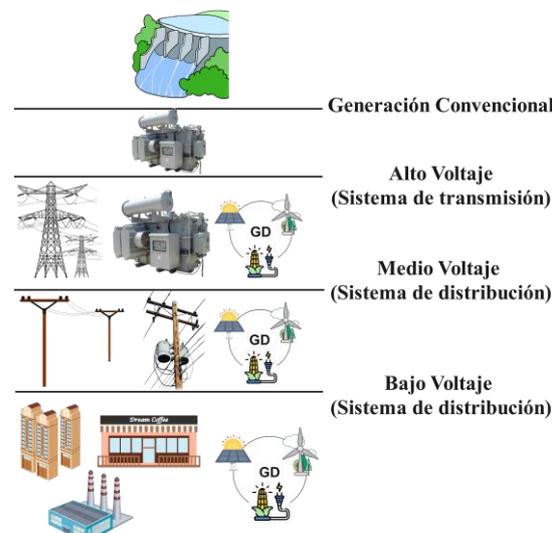


Figura 3. Integración de GD a los diferentes sistemas del SEP [autor].

La generación máxima que puede ofrecer la GD depende de la fuente de donde se extraiga la energía, es por ello que no todas las Centrales de GD presentan la misma capacidad, por lo cual, a continuación, en la Tabla 2 se establece el dimensionamiento máximo que puede ofrecer las principales Centrales de GD [22].

Tabla 2. Generación máxima dependiendo del tipo de Central de GD [22].

Centrales de GD	Rango de generación
Generador Diésel o Gas Natural	30 [kW] - 6 [MW]
Micro-turbina	30 [kW] - 400 [kW]
Fotovoltaica	1 [kW] - 1 [MW]
Eólica	600 [kW] - 2.5 [MW]

En el Ecuador según la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables

(ARCERNNR) se han desarrollado diversas regulaciones con respecto a la instalación de una CGD, la más actual y de uso común es la regulación ARCERNNR 002/21, la cual, establece una regulación tanto para una CGD desarrollada para el autoabastecimiento, como para una CGD desarrollada por una Empresa de Generación Distribuida Habilitada (EGDH) [23].

Al usar la regulación especificada con anterioridad, se puede definir el valor máximo de potencia activa que puede entregar una Central de GD en el Ecuador, dichos límites se encuentran determinados mediante la Tabla 3.

Tabla 3. Potencia nominal de una CGD, establecida por la ARCERNNR – Ecuador

Regulaciones	Potencia Nominal
ARCERNNR 002/21 (Autoabastecimiento)	< 1 [MW]
ARCERNNR 002/21 (EGDH)	Entre 100 [kW] y 10 [MW]

2.4 Integración de la GD en el sistema eléctrico

Para obtener una integración idónea de GD, se debe tomar en cuenta tanto su ubicación, dimensionamiento, tipo y su forma de instalación [11], en este caso, cuando se considera tanto la ubicación como el dimensionamiento se llega a maximizar la capacidad de la GD sin provocar una disminución en el rendimiento del sistema, manteniendo el perfil de voltaje dentro de los rangos admisibles establecidos por normativa [7], [8].

Por falta de conocimiento previo al instalar GD, se busca una instalación de manera aleatoria, es decir, sin desarrollar antes un estudio previo que muestre sus beneficios, alcances y dificultades, incurriendo en una instalación inadecuada de las Centrales de GD [8], lo cual, hace que se deba definir varias restricciones para que

la integración de la GD al SD se desarrolle de manera adecuada [12].

En este sentido, existen varias estrategias que buscan solucionar de manera óptima el problema de la ubicación y dimensionamiento óptimo de GD, mejorando durante este proceso el perfil de voltaje [24], [25].

Si se realiza una integración de forma inadecuada de GD existirán varios impactos negativos dentro del sistema, ya que, no se está considerando dentro del estudio la intermitencia de la GD durante el día [3], además, de considerar que si se instala una GD de alta potencia también se pueden provocar apagones en toda la red [26].

Si los problemas de integración no se resuelven, el sistema sufrirá de: fluctuaciones de voltaje, afectaciones (daños) en sus protecciones, generación de armónicos, necesidad de mayor potencia reactiva y disminución en la confiabilidad del sistema [21], [27].

2.4.1 Desafíos de la integración de GD en el sistema

Debido al aumento de la instalación de GD es esencial analizar los principales desafíos que debe superar la GD para maximizar su uso sin dañar el sistema [21], [27]. Una correcta planificación y el desarrollo de un diseño idóneo permite obtener la integración óptima entre el SD y la GD, disminuyendo la aparición de los problemas especificados con anterioridad [12].

Tratar de cumplir con los diferentes desafíos que produce la instalación de GD son de vital importancia al diseñar un proyecto, es por ello que a continuación, se presentan los principales desafíos que se deben superar para que la GD pueda contar con una integración óptima [21], [28]–[31].

a) Desafíos técnicos

- i. Calidad de energía: aparición y propagación de armónicos al utilizar inversores por todo el sistema, lo cual, afecta la calidad de energía, sin embargo, el desarrollo de nuevas

tecnologías reduce la aparición de este problema [29].

- ii. Aumento de voltaje: se produce cuando el factor de potencia es elevado o cuando la potencia generada a través de la GD es superior a la carga, produciendo un voltaje fuera de los rangos establecidos, siendo una de las limitaciones principales al integrar GD [29].
- iii. Protección del sistema: por la aparición del flujo bidireccional al integrar GD, se produce que durante una falla la corriente de cortocircuito aumente al ser suministrada por los dos tipos de generaciones presentes en el sistema (convencional y GD), provocando que la capacidad de las protecciones no sea suficiente para proteger al sistema ante una falla [21], [28].

b) Desafíos ambientales

- i. El uso de fuentes no renovables dentro de la GD, causan la contaminación del medio ambiente, sin embargo, el utilizar aerogeneradores provoca de igual manera contaminación al ambiente, además de producir ruidos, impactos visuales, cambio climático, entre otros [28], [30].

c) Desafíos de regulación

- i. Crear una regulación en donde se presenten incentivos a las EGDH, ya que, estas empresas disminuyen la contaminación del medio ambiente sin perjudicar el consumo del usuario [28], [31].

2.5 Métodos para realizar una integración óptima de GD

Es crucial encontrar varios métodos matemáticos cuando se busca integrar de forma óptima GD, lo cual, permite identificar la mejor barra para instalar la GD establecida, de manera general, existen dos métodos que permiten buscar este tipo de

integración, los mismos que se encuentran especificados a continuación [24], [28], [31]–[33].

a) Métodos clásicos

Método matemático que es utilizado para realizar una búsqueda específica con programación convexa, es por ello que, se utilizan para solucionar de manera matemática el problema de asignación y dimensionamiento de GD [31], [33].

b) Métodos heurísticos

Métodos de búsqueda inteligente que utiliza diferentes tipos de algoritmos basados en la naturaleza, considerados como técnicas evolutivas que permiten obtener una solución casi óptima a la búsqueda de la barra más idónea, en la cual, se procede a conectar la GD [28], [31], [33].

- i. El Algoritmo Genético (AG): este algoritmo ha sido desarrollado hace varios años, por su nombre hace referencia a la teoría desarrollada por Charles Darwin [31].
- ii. El Recorrido Simulado (SA): permite el desarrollo de una función de probabilidad, mediante el cual, se asume o se desecha la solución establecida por este método [33].
- iii. Algoritmo de optimización de alimentación bacteriana (BFOA): desarrollado en base al comportamiento de una bacteria, su modelamiento permite buscar una mejor convergencia a través de un camino más eficaz [28].

2.6 Algoritmo Genético (AG)

Este tipo de algoritmo es conocido por ser un método heurístico sencillo, rápido y preciso, fundamentado en la selección natural y herencia [34], [35].

Al aplicar la adaptación del individuo dentro de una población, se consigue que los individuos mejor adaptados a un entorno, evolucionen a través de las generaciones, por lo cual, se puede decir que este algoritmo se fundamenta en la

teoría de selección natural creada por Charles Darwin [31], [36].

Para obtener las mejores soluciones (individuos), a través de la evolución de las generaciones futuras, se realiza un proceso que permite asignar un único valor de aptitud (fitness), siendo este valor siempre positivo y diferente para cada individuo, debido a que se define a través de una función objetivo especificada para cada individuo [34].

Una población dentro del AG, se representa como un conjunto de cromosomas [34], [37], donde, la primera población se obtiene de manera aleatoria, siendo esta la base para la evolución de generaciones futuras influenciadas por una mutación, es por ello que, la selección se realiza hasta encontrar una solución acorde al problema analizado o hasta cumplir con las iteraciones especificadas [31].

Para realizar la representación de un cromosoma existen diferentes procesos, uno de los más comunes es la representación del cromosoma a través de una cadena binaria, mediante la cual se establece la posición de cada cromosoma (locus), el cual, cuenta con dos posibles genes variantes (alelos) representados por los valores 0 y 1 [34], [37].

2.6.1 Procesos de un AG

Para comprender de mejor manera el funcionamiento con el que cuenta un AG, se han desarrollado varios procesos que permiten determinar una solución al problema de optimización en el cual se utiliza el AG. En este sentido, a continuación, se identifican cada uno de los procesos fundamentales dentro del análisis y aplicación de un AG.

a) Esquema de codificación

El AG al ser un método de búsqueda inteligente y al estar basado en genética, es crucial que para su análisis se deba obtener la información codificada de cada uno de los cromosomas establecidos, proceso que se puede desarrollar mediante una cadena

de bits, la misma que puede ser binaria, octal o hexadecimal [34].

Cuando se utilizan varias cadenas de codificación dentro del AG, se busca solucionar problemas con números más complejos, considerando que la cadena binaria no lo puede realizar, a pesar de ser la más utilizada cuando se utiliza un AG [37].

b) Selección de individuos

Al realizar el proceso de selección dentro de un AG, se determina la posible participación de la cadena dentro de la procreación de los individuos, es por ello que, para una mejor convergencia del AG, se necesita contar con una mejor presión en la selección, es decir, que no todos los individuos establecidos se pueden considerar como la mejor opción para entrar en el proceso de cruce, solo los mejores individuos pueden participar de este proceso, sobre todo cuando se busca que las futuras generación cuenten con mejores características a las presentadas por las generaciones anteriores [37].

c) Cruce de generaciones

Para producir una nueva generación, es necesario realizar un cruce entre dos o más padres, utilizando para ello una parte de la información codificada ofrecida por los cromosomas de estos padres, por consiguiente, si la codificación no es tan compleja, la elección del cruce será sencilla [34]. Al existir varios tipos de cruce, se establece al cruce de un solo punto como el más sencillo, ya que, permite escoger un punto de cruce aleatorio, en donde, se puede intercambiar la información codificada de dos padres presentes después del punto escogido [37], en la Figura 4 se representa el cruce mencionado anteriormente.

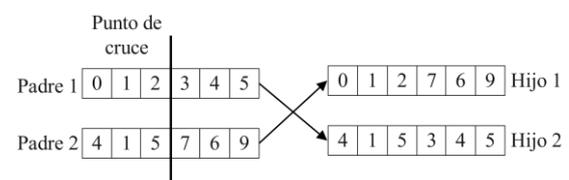


Figura 4. Punto de cruce de un esquema codificado [autor].

Por el contrario, dentro de (1) se encuentra especificado la fórmula de cruce para dos generaciones, la cual, está fundamentada en el proceso que desarrolla la generación actual para obtener diversas generaciones futuras [37].

$$R = \frac{(G + 2\sqrt{g})}{3G} \quad (1)$$

Donde:

- g*** Representa la cantidad de generaciones involucradas dentro del cruce.
- G*** Representa la cantidad total de futuras generaciones establecidas por medio de una generación actual especificada en el estudio.

Al contar con un esquema genético establecido por varias generaciones anteriores se busca mantener un orden, para ello se plantea que al iniciar la simulación la cuantificación del valor de R no debe ser muy alto, sin embargo, al transcurrir con la simulación el valor de R seguirá en aumento hasta que concluya la simulación realizada, donde se presente un valor de R muy elevado, causado por la gran similitud con la que cuentan los individuos al terminar la simulación [37].

d) Mutación de generaciones

La mutación es un proceso mediante el cual, la generación anterior se ve modificada, debido a la presencia de una alteración repentina, causando la creación de una nueva generación [34], [35].

Para ello, como lo establecido para el proceso de selección, la mutación requiere de igual manera, de la codificación establecida para que el cromosoma pueda desarrollarse [34].

Cuando se analiza el proceso de mutación, se debe tener en cuenta que puede aumentar o reducir el espacio donde se encuentra la solución de un problema, contando dentro de sus operadores con una

mutación codificada e inversión simple [37], teniendo en cuenta esto, se desarrolla la Figura 5, mediante la cual se busca presentar la alteración que ejerce una mutación al ser aplicada dentro de una cadena binaria.

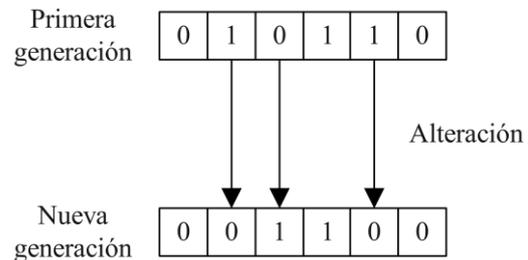


Figura 5. Mutación de una cadena binaria [autor].

El desarrollo de un AG está fundamentado en la aplicación de los procesos antes mencionados con un orden específico, en este sentido, en la Figura 6 se representa el diagrama de flujo que establece los diferentes procesos de una manera ordenada al aplicar un AG.

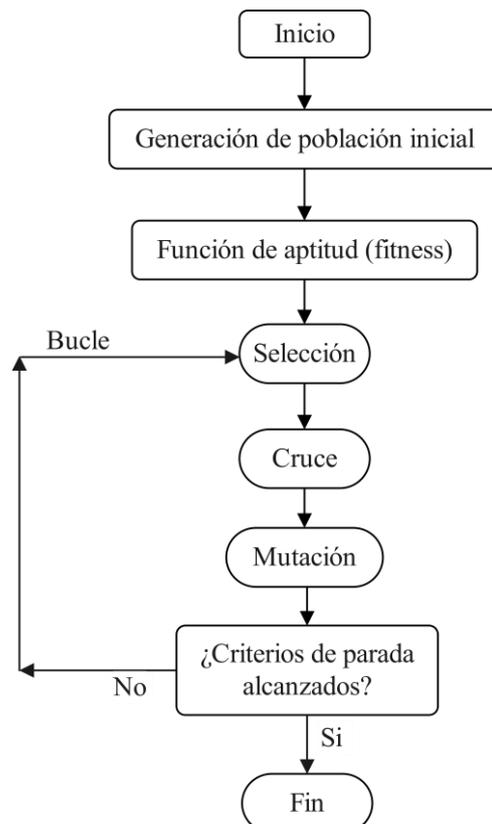


Figura 6. Diagrama de flujo que representa el funcionamiento de un AG [autor].

2.7 Desarrollo de la Función Objetivo (FO)

El desarrollo de una FO es primordial para analizar un sistema, por lo cual, en (2) se expresa la FO, la cual, se encuentra fundamentada en la disminución de las caídas de voltaje presentes dentro de cada barra del sistema analizado, en este caso, en [38], se encuentran tanto la FO como con las restricciones adaptadas a ser implementadas en este documento.

$$FO = \sum_{i=1}^n (V_i [p.u] - V_{ref} [p.u])^2 \quad (2)$$

Donde:

- V_i Representa el voltaje definido en una barra en particular.
- V_{ref} Representa el voltaje de referencia establecido en el sistema, mediante el cual se puede desarrollar el análisis.
- n Representa el número de barras del sistema IEEE analizado.

2.8 Restricciones de la FO

Dentro del análisis que conlleva la ubicación y dimensionamiento óptimo de GD, no solo se debe definir una FO, sino también se debe detallar diversas restricciones que permitan limitar el funcionamiento del algoritmo.

Para este trabajo solo se contará con dos tipos de restricciones, una para el voltaje de las barras y la otra para la inyección de potencia activa, siendo esta última fundamentada en el uso de centrales con factor de potencia unitario, conocidas como Centrales de GDF. Ambas restricciones se encuentran especificadas a continuación.

2.8.1 Límite de Voltaje establecido para las barras de un sistema

Para buscar el cumplimiento de los límites establecidos para el correcto funcionamiento del sistema luego de incorporar GD se debe plantear una

restricción de voltaje, con lo cual, mantener una adecuada calidad del sistema. Cabe recalcar que los valores en esta restricción se encuentran especificados en [p.u] y se encuentran expresados en (3).

$$V_{Lmin} \leq V_i \leq V_{Lmax} \quad (3)$$

Donde:

- V_{Lmin} Representa el límite mínimo de voltaje establecido por la regulación antes citada, cuenta con un valor de 0.9 [p.u] o 0.95 [p.u].
- V_{Lmax} Representa el límite máximo de voltaje establecido por la regulación antes citada, cuenta con un valor de 1.05 [p.u] o 1.1 [p.u].

Los diferentes voltajes en [p.u] presentados en esta restricción, dependen del tipo de sistema analizado, ya que, en varios casos desde el sistema sin GDF el rango definido ya se encuentra superado [19].

En base a esto, la variable V_i se analiza con GDF cuando se quiere verificar que las fluctuaciones de voltaje no superen los límites y sin GDF para establecer que límites utilizar en el sistema.

2.8.2 Límite de Potencia Activa de las Centrales de GDF

Para definir los límites mínimos y máximos en esta restricción se consideró el valor mínimo que puede generar la tecnología fotovoltaica, mientras que para el máximo se estableció aproximar el valor a los resultados presentados en [13], en el cual, se utilizan de igual manera Centrales de GDF.

Además, como guía para visualizar la cantidad de paneles que conforman una Central de GDF a incorporar en cada sistema, se utiliza un panel solar monocristalino bifacial de doble vidrio TSM-DEG20C.20, el cual, cuenta con una

potencia máxima de 600 [w] con 120 células [39],

Considerando la potencia que puede entregar este panel y al tener en cuenta que la generación fotovoltaica no puede producir menos de 1 [kW], el límite mínimo para este sistema será de 1.2 [kW] o dos paneles TSM-DEG20C.20 en paralelo.

De acuerdo, al artículo guía la potencia máxima para un sistema de 33 barras es de 300 [kW], es por ello, que para los sistemas utilizados en este trabajo como potencia máxima inicial para cada Centrales de GDF se estima un valor de 260 [kW], el cual, se mantiene dentro del rango establecido por la regulación ARCERNR 002/21 y estaría conformado por casi 434 paneles TSM-DEG20C.20 en paralelo.

Sin embargo, por el hecho de que en este trabajo se utilizan dos sistemas diferentes, la potencia máxima podría presentar variaciones, teniendo en cuenta, el número de barras con el que consta el sistema.

Considerando las premisas establecidas anteriormente, dentro de (4) se presenta la restricción que hace referencia a los límites de Potencia Activa que puede inyectar las Centrales de GDF a utilizar dentro del trabajo.

$$PGDF_{Lmin} \leq PGDF \leq PGDF_{Lmax} \quad (4)$$

Donde:

- $PGDF$** Representa la Potencia Activa obtenida por una Central de GDF a instalarse dentro del sistema.
- $PGDF_{Lmin}$** Representa la potencia activa mínima que puede inyectar la Central de GDF, cuenta con un valor de 1.2 [kW].
- $PGDF_{Lmax}$** Representa la potencia activa máxima que puede inyectar la Central de GDF dependiendo del sistema, en un inicio será de 260 [kW].

3 Formulación del problema

Por el hecho de que año a año la generación convencional presenta mayor deterioro, conservar el perfil de voltaje en un sistema se ha vuelto un reto, a pesar de que existen varias técnicas que pueden llegar a mejorar de forma significativa el voltaje en las barras del sistema.

En este caso, al buscar una técnica que no solo ofrezca beneficios técnicos, sino también beneficios ambientales durante su utilización en un sistema, se presenta un incremento en el uso de GD considerando que su uso se enfoca en la obtención de energía mediante fuentes renovables.

La inyección de potencia por parte de una Central de GDF puede ser establecida de acuerdo al tipo de tecnología utilizada, lo cual, hace que esta técnica sea una de las más destacadas para satisfacer la demanda del usuario y mejorar el perfil de voltaje.

Para este documento lo primero que se debe buscar son dos sistemas con diferente número de barras como lo son: el sistema de 9 y 14 barras de la IEEE, para lo cual, como primer punto se realiza la simulación del flujo de potencia, obtenido de esta manera el perfil de voltaje de cada sistema sin GDF.

Por último, luego de implementar un AG se obtiene la ubicación y dimensionamiento óptimo para cada Central de GDF estableciendo la potencia activa a inyectar al sistema buscando mejorar el perfil de voltaje de cada sistema estudiado, comprobando tanto el funcionamiento del AG, como su escalabilidad.

3.1 Sistemas IEEE de prueba

Los sistemas utilizados para realizar la integración óptima de GDF y por ende la correcta incorporación de GD al SD luego de la aplicación de un AG se van a desarrollar a través del Sistema IEEE de 9 barras como caso principal, para luego verificar su escalabilidad dentro de un Sistema IEEE de 14 barras, por lo cual, en las siguientes sub-secciones se encuentran especificados cada uno de los sistemas.

3.1.1 Sistema IEEE de 9 barras

El modelo que es tomado como base para el desarrollo de este estudio es el Sistema IEEE de 9 barras, por lo cual, es necesario contar con su diagrama unifilar, mientras que todos sus datos están definidos en las Tablas 12, 13 y 14 presente en la sección de Anexos, su diagrama unifilar se encuentra desarrollado en la Figura 7.

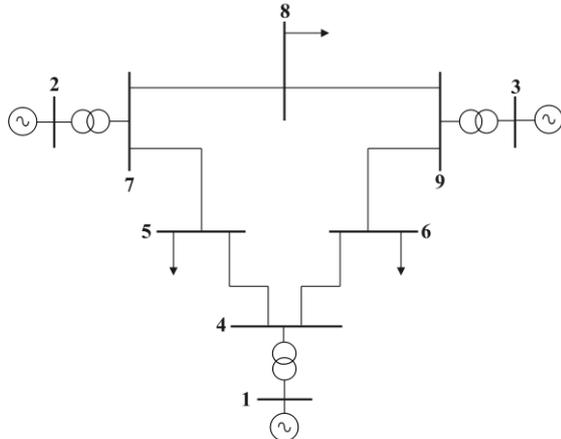


Figura 7. Diagrama unifilar Sistema IEEE de 9 barras [40].

3.1.2 Sistema IEEE de 14 barras

Para demostrar la escalabilidad del AG, se propone su aplicación dentro de un Sistema IEEE de 14 barras, el cual, cuenta con mayor cantidad de elementos, los cuales, están especificados en las Tablas 15, 16 y 17 de la sección de Anexos, mientras que en la Figura 8 se presenta su diagrama unifilar.

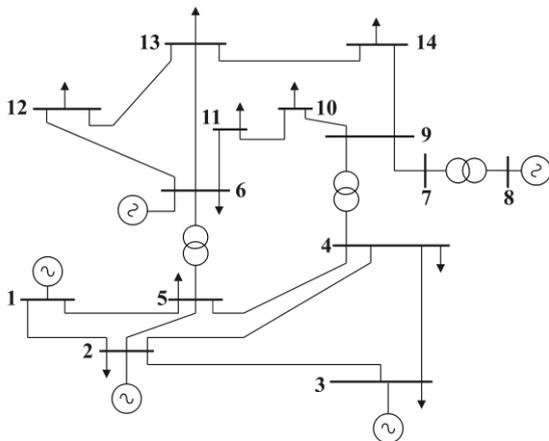


Figura 8. Diagrama unifilar Sistema IEEE de 14 barras [41].

3.2 Desarrollo del Pseudocódigo

Para entender la aplicación del AG en busca de integrar GDF de forma óptima al SD a través de su codificación en Matlab, se debe establecer de forma ordenada las diferentes etapas presentes en este proceso, el cual, está centrado en mejorar el perfil de voltaje luego de incorporar Centrales de GDF al sistema.

El pseudocódigo que presenta el desarrollo del AG al contar con varias restricciones se encuentra desarrollado en la Tabla 4.

Tabla 4. Pseudocódigo aplicado en la solución [autor].

Aplicación del AG, para ubicar y dimensionar GDF de manera óptima

Inicio

Paso 1: Se definen los modelos, en los cuales se aplicará el AG.

Paso 2: Especificación de los datos de los elementos pertenecientes a los modelos utilizados.

Paso 3: Toma del voltaje en las barras del modelo inicial, para comparar al final del estudio.

Paso 4: Algoritmo para ubicación y dimensionamiento óptimo de GDF.

Paso 5: Asignación de las variables dentro del algoritmo.

$n, V_{ref}, PGDF$.

- Ingreso de la función objetivo

$$FO = \min \sum_{i=1}^n (V_i [p.u] - V_{ref} [p.u])^2$$

- Ingreso de restricciones.

$$V_{Lmin} \leq V_i \leq V_{Lmax}$$

$$PGDF_{Lmin} \leq PGDF \leq PGDF_{Lmax}$$

Paso 6: Aplicación de los resultados del AG al modelo inicial.

Paso 7: Se realiza nuevamente el procedimiento para un modelo con mayor cantidad de elementos.

Paso 8: Verificación de la escalabilidad del AG para el nuevo modelo.

Paso 9: Análisis de resultados en ambos modelos, centrándose en voltaje de las barras.

Paso 10: Conclusiones.

Fin

3.3 Desarrollo del flujo de potencia sistemas sin GDF

Obtener el flujo de potencia de los sistemas de 9 y 14 barras sin GDF se considera como los casos base dentro de este trabajo, ya que, permiten cuantificar las fluctuaciones de voltaje causadas por incorporar GDF de manera óptima.

3.3.1 Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 9 barras sin GDF

La simulación del flujo de potencia de este sistema se encuentra desarrollado a través de un simulador de modelos de prueba de la IEEE como lo es el DIGSILENT Power Factory, obteniendo el voltaje en [p.u] de cada una de sus barras sin la influencia de GDF.

La cuantificación de los voltajes obtenidos se encuentra detallados mediante la Tabla 5.

Tabla 5. Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 9 barras sin integración de GDF [autor].

Barras	Voltaje [p.u] Sin GDF
1	1.0400
2	1.0108
3	1.0225
4	1.0100
5	1.0402
6	0.9885
7	1.0147
8	1.0100
9	1.0305

Los valores representados mediante la Tabla 5 permiten establecer los límites de voltaje que debe tener el sistema luego de incorporar GDF, para este sistema el rango ideal de voltaje se encuentra entre el 0.95 [p.u] y el 1.05 [p.u].

3.3.2 Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras sin GDF

Como en el sistema anterior, la obtención del perfil de voltaje en [p.u] es fundamental para verificar las fluctuaciones que pueden presentarse en el sistema, es por ello, que se realiza nuevamente el flujo de potencia considerando en esta ocasión las características con las que cuenta este sistema.

La cuantificación de los voltajes obtenidos se encuentra detallado mediante la Tabla 6.

Tabla 6. Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras sin integración de GDF [autor].

Barras	Voltaje [p.u] Sin GDF
1	1.0600
2	1.0450
3	1.010
4	1.0203
5	1.0244
6	1.0600
7	1.0623
8	1.0800
9	1.0419
10	1.0405
11	1.0540
12	1.0573
13	1.0504
14	1.0272

A diferencia del sistema de 9 barras, este sistema de acuerdo a los valores establecidos en la Tabla 6 permite definir los límites de voltaje que debe tener el sistema luego de incorporar GDF, en este caso, el rango ideal de voltaje se encuentra entre el 0.9 [p.u] y el 1.1 [p.u].

4 Casos de estudio

La aplicación del algoritmo de optimización utilizado para ubicar y dimensionar de forma óptima GDF es puesto a prueba dentro de los siguientes casos especificados a continuación:

4.1 Sistema IEEE de 9 barras con y sin GDF

Para el Sistema IEEE de 9 barras establecido como un caso base del estudio lo primero que se realizó fue su construcción ingresando los valores tomados de la información brindada por la IEEE, para luego obtener sus perfiles de voltaje antes de establecer la ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF.

La potencia mínima que se podría incorporar a este sistema se encuentra definida en 1.2 [kW], mientras que por contar con menor cantidad de barras se puede establecer un valor máximo de potencia activa de 120 [kW], considerando de igual manera, que existen voltajes muy cercanos al definido para este sistema.

Al determinar el valor máximo de potencia activa que puede inyectar una Central de GDF y usando el panel solar TSM-DEG20C.20 como guía, se puede establecer el uso de 200 paneles en paralelo, lo cual, durante la simulación del AG podría sufrir varios cambios, ya que, la potencia entregada por la GDF podría ser menor a este valor previamente definido.

Como primer caso se realiza la incorporación de GDF con la potencia activa establecida buscando incrementar los valores de perfil de voltaje del sistema de 9 barras hasta conseguir un valor muy cercano al 1.05 [p.u].

4.2 Sistema IEEE de 14 barras con y sin GDF

Para el Sistema IEEE de 14 barras una vez establecido sus voltajes en las barras se considera el uso de un límite entre el 0.9 al 1.1 [p.u] para poder realizar su análisis, ya que, el sistema sin GDF supera el 1.05 [p.u]

establecido por el rango utilizado en el sistema anterior.

Como en el caso anterior la potencia mínima es de 1.2 [kW], mientras que por ser el sistema con mayor cantidad de barras se establece que la potencia máxima a inyectar por parte de cada una de las Centrales de GDF es de 260 [kW], contemplando el uso de 434 paneles TSM-DEG20C.20 en paralelo.

Como segundo caso se realiza la incorporación de GDF con la potencia activa establecida buscando incrementar los valores de perfil de voltaje del sistema de 14 barras hasta conseguir un valor muy cercano al 1.1 [p.u] definido para este sistema.

Por último, si los resultados obtenidos permiten obtener una mejora en el perfil de voltaje luego de incorporar GDF, se puede comprobar la escalabilidad del AG para sistemas con mayor cantidad de barras a las establecidas dentro del sistema de 9 barras.

5 Análisis de resultados

Luego de realizar la simulación del AG en Matlab, se obtiene la ubicación y el dimensionamiento de cada una de las Centrales de GDF enfocadas en mejorar el perfil de voltaje de cada sistema utilizado, lo cual, se encuentra establecido en las siguientes sub-secciones de este trabajo.

De igual manera, dentro del análisis se debe especificar el tiempo de simulación que toma el AG desarrollado en Matlab para encontrar una solución óptima, utilizando durante este proceso un computador portátil, que presenta las siguientes características: un procesador AMD Ryzen 3 3300U con Radeon Vega Mobile Gfx 2.10 GHz, un disco duro de 930 GB y una memoria RAM de 8 GB.

5.1 Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 9 barras con GDF

Como primer punto para establecer el perfil de voltaje del sistema con GDF, se procede a simular el AG en Matlab obteniendo mediante este proceso la ubicación y el dimensionamiento de cada una de las Centrales de GDF establecidas como la solución óptima de este sistema.

En este sentido, las soluciones para la ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF proporcionadas por la simulación del AG se establecen en la Tabla 7.

Tabla 7. Ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF - Sistema de 9 barras [autor].

Centrales de GDF	Ubicación	P. Activa [kW]
GDF 1	Barra 4	100
GDF 2	Barra 6	57.38

La solución propuesta establece la ubicación de dos centrales de GDF en las Barras 4 y 6 del sistema, con un dimensionamiento para ambas centrales que no es menor a 1.2 [kW] ni superior a 120 [kW], determinando que cada central se encuentra dentro del rango de potencia definido para el sistema de 9 barras.

Al utilizar el panel solar guía para la primera Central de GDF se puede estimar que su conformación consta de 167 paneles TSM-DEG20C.20 en paralelo, mientras que para la segunda Central de GDF la cantidad de paneles con el que pueden contar es 97 en paralelo.

Con la ubicación y dimensionamiento de las dos Centrales de GDF, se procede al ingreso una por una de cada central al sistema, buscando verificar la validez de las soluciones establecidas por el AG.

En la Tabla 8 se cuantifican los perfiles de voltaje luego de realizar esta incorporación, lo cual, permitirá compararlos con el perfil de voltaje establecido por el flujo de potencia de este sistema sin GDF.

Tabla 8. Comparación Perfil de voltaje - Sistema IEEE de 9 barras con GDF 1-2 [autor].

Barra	GDF 1	GDF 1 GDF 2
1	1.0400	1.0400
2	1.0148	1.0149
3	1.0250	1.0411
4	1.0100	1.0100
5	1.0465	1.0467
6	1.0130	1.0416
7	1.0147	1.0188
8	1.0100	1.0100
9	1.0320	1.0496

Al revisar las Barras 2, 3, 5, 6, 7 y 9 se puede establecer que existe un aumento en su voltaje luego de incorporar cada una de las Centrales de GDF definidas, sin embargo, para conseguir un voltaje más cercano al 1.05 [p.u] establecido para este sistema, se requiere incorporar ambas Centrales de GDF de manera simultánea.

La comparación del perfil de voltaje del sistema con y sin integración de las dos Centrales de GDF establecidas, se encuentra representado a través de la Figura 9.

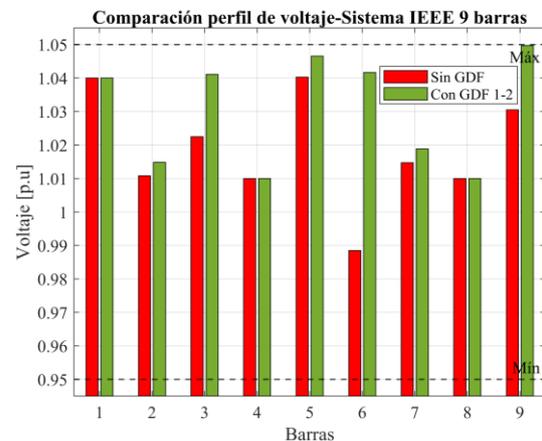


Figura 9. Perfil de voltaje – Sistema IEEE de 9 barras con GDF óptimo [autor].

Al realizar la revisión de la Figura 9, se puede afirmar que los resultados que determinan la ubicación y dimensionamiento para ambas Centrales de GDF son óptimos, sobre todo cuando se quiere conseguir un incremento en el perfil de voltaje.

Finalmente, por el hecho de realizar varios procesos entre los cuales se encuentran: el dimensionamiento y la ubicación de las Centrales de GDF, el perfil de voltaje al incorporar una por una las Centrales establecidas y la gráfica comparativa de los voltajes del sistema con y sin integración de GDF, la simulación del AG en Matlab por medio del computador antes mencionado toma un tiempo de 304.24145 segundos o 5.07069 minutos.

5.2 Perfil de voltaje del Sistema IEEE de 14 barras con GDF

El procedimiento aplicado a este sistema es muy similar a lo desarrollado para el sistema anterior, por lo cual, luego de realizar la simulación del AG en Matlab se obtiene la ubicación y el dimensionamiento de cada una de las Centrales de GDF establecidas como la solución óptima para este sistema.

Con lo cual, las soluciones aportadas por la simulación del AG para la ubicación y dimensionamiento de las Centrales de GDF para este sistema se encuentran establecidas mediante la Tabla 9.

Tabla 9. Ubicación y dimensionamiento de Centrales de GDF-Sistema de 14 barras [autor].

Centrales de GDF	Ubicación	P. Activa [kW]
GDF 1	Barra 3	253.4
GDF 2	Barra 7	140
GDF 3	Barra 10	48.2

La solución propuesta establece la ubicación de tres centrales de GDF en las Barras 3, 7 y 10, mientras que el dimensionamiento para cada central no

superó los 260 [kW] establecidos para este sistema, además de ser superior al 1.2 [kW] especificado como potencia mínima.

Utilizando el panel solar guía para la primera Central de GDF se puede estimar que consta de 423 paneles paralelo, para la segunda central se establece el uso de 234 paneles en paralelo, finalmente para la tercera central el valor aproximado sería de 81 paneles en paralelo.

Considerando la ubicación y el dimensionamiento de las tres centrales se procedió a realizar su ingreso al sistema de 14 barras, con lo cual, a través de la Tabla 10 se cuantificaron los perfiles de voltaje luego de realizar esta incorporación.

Tabla 10. Comparación Perfil de voltaje - Sistema IEEE de 14 barras con GDF 1-2-3 [autor].

Bus	GDF 1	GDF 1 GDF 2	GDF 1 GDF2 GDF3
1	1.0600	1.0600	1.0600
2	1.0450	1.0450	1.0450
3	1.0100	1.0100	1.0100
4	1.0180	1.0180	1.0232
5	1.020	1.0190	1.0268
6	1.0600	1.0600	1.0600
7	1.062	1.061	1.0730
8	1.0800	1.0800	1.0800
9	1.056	1.056	1.0587
10	1.051	1.051	1.0635
11	1.057	1.057	1.0666
12	1.055	1.055	1.0584
13	1.0500	1.0500	1.0530
14	1.0360	1.0360	1.0377

Al incorporar solo una central se puede visualizar que en varias barras el voltaje presenta un incremento, sin embargo, esta solución no es la establecida por el AG, además este incremento no presenta

demasiada cercanía al valor establecido para este sistema.

En el momento de incorporar dos de las tres centrales se puede visualizar que no existe mayor diferencia entre la incorporación de una o dos centrales, además de presentar una reducción en el voltaje de varias barras, por lo cual, si solo colocásemos dos centrales la solución presentada sería errónea, ya que, lo que se busca es mejorar el perfil de voltaje.

Al revisar las Barras 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 se puede verificar un incremento en el perfil de voltaje durante todo el proceso, teniendo en cuenta esto, la incorporación de tres Centrales de GDF establecidas por el AG permite contar con un perfil de voltaje más cercano al 1.1 [p.u] definido para el este sistema.

La comparación del perfil de voltaje del sistema con y sin integración de las Centrales de GDF establecidas para mejorar el voltaje se encuentra desarrollado mediante la Figura 10.

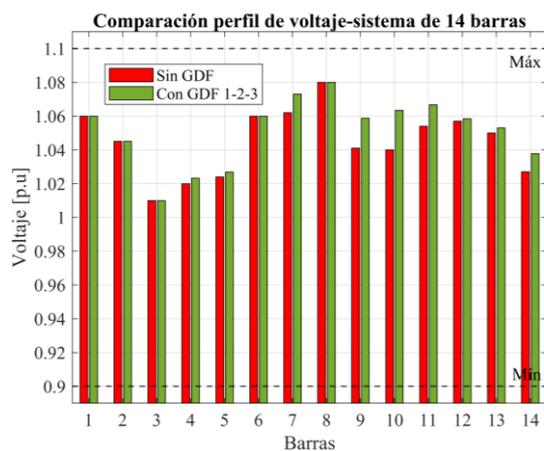


Figura 10. Perfil de voltaje – Sistema IEEE de 14 barras con GDF óptimo [autor].

Al enfocarse en los resultados obtenidos en la simulación, la escalabilidad del AG se encuentra totalmente comprobada, ya que, presentó una mejora en el perfil de voltaje tanto del sistema IEEE de 9, como en el sistema IEEE de 14 barras sin considerar que ambos sistemas cuentan con un número diferente de barras.

Por último, para finalizar el análisis de los resultados presentados en este trabajo, se considera que para la simulación del AG dentro de un sistema de 14 barras en Matlab ocupando el computador antes mencionado, el tiempo de simulación fue de 4664.1609 segundos o 77.736015 minutos.

6 Conclusiones

De acuerdo a los resultados analizados durante la resolución de la problemática planteada en este estudio, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Siendo este estudio enfocado en la ubicación y dimensionamiento de GDF en los dos sistemas IEEE, para el caso referente al sistema de 9 barras en un principio se planteaba la inyección de una potencia máxima de 120 [kW], sin embargo, al simular el AG se establece la incorporación de dos Centrales de GDF en las barras 4 y 6, con una potencia de 100 [kW] y 57.38 [kW] respectivamente, dando cuenta de una mejora en el perfil de voltaje del sistema analizado.

Para el caso perteneciente al sistema de 14 barras, en un principio se planteaba la inyección de una potencia máxima de 260 [kW], sin embargo, el AG establece la incorporación de tres Centrales de GDF en las barras 3, 7 y 10, con una inyección de potencia activa de 253.4 [kW], 140 [kW] y 48.2 [kW] respectivamente, permitiendo determinar no solo un incremento del voltaje en las barras del sistema, sino también comprobar la escalabilidad del AG.

La implementación de GDF al sistema de 9 barras permite encontrar una mejoría en su perfil de voltaje, en tal virtud al contar con valores iniciales de 1.0108, 1.0225, 1.0402, 0.9885, 1.0147, 1.0305 en [p.u] pertenecientes a las Barras 2, 3, 5, 6, 7 y 9 en ese orden; luego de incorporar dos Centrales de GDF se obtienen valores de 1.0148, 1.0411, 1.0467, 1.0416, 1.0188, 1.0496 en [p.u] en las barras antes mencionadas, presentando un incremento

significativo del perfil de voltaje no superior al límite establecido.

Mientras que, para el sistema de 14 barras al contar con valores iniciales de 1.020, 1.024, 1.062, 1.041, 1.040, 1.054, 1.057, 1.050, 1.027 en [p.u] pertenecientes a las Barras 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 en ese orden; luego de incorporar tres Centrales de GDF se obtienen valores de 1.0232, 1.0268, 1.0730, 1.0587, 1.0635, 1.0666, 1.0584, 1.0530, 1.0377 en [p.u] presentando un incremento significativo del perfil de voltaje no superior al límite establecido.

Al poner a prueba la escalabilidad del AG en sistemas con un número diferente de barras se logra verificar que su funcionamiento no se encuentra limitado por el tamaño del sistema, considerando su uso dentro de varios tipos de sistemas, siempre y cuando existan restricciones que establezcan una solución óptima.

6.1 Trabajos futuros

Debido al desarrollo de este trabajo, se presentan varias opciones para el desarrollo de varios trabajos futuros, fundamentados en el dimensionamiento óptimo de múltiples unidades de GD para su incorporación al SD con variaciones en la carga del sistema.

De manera general, la asignación de GD dentro de un sistema se realiza a plena carga, sin embargo, la carga a través de los años presenta una variación por el incremento de los usuarios, provocando que las Centrales de GD antes incorporadas se deban repotenciar, considerando que el tamaño de la GD debe aumentar para suplir con la demanda requerida, sobre todo cuando existe un límite de voltaje que se debe cumplir sin considerar la variación de las cargas.

7 Referencias

[1] M. Kannan, S. Pattabiraman, K. Sampath, G. Ganesan R, and K. Narayanan, “Voltage Profile

Enhancement in Radial Distribution System Through Network Reconfiguration,” in *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICESIP46348.2019.8938240.

[2] M. Bhattacharya and D. Das, “Multi-objective placement and sizing of DGs in distribution network using genetic algorithm,” in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/NPSC.2016.7858906.

[3] K. Moloi, J. A. Jordaan, and Y. Hamam, “Optimal Power Grid Integration With Distributed Generation Using Genetic Algorithm,” in *2021 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA52254.2021.9377023.

[4] J. S. Patel, R. R. Patel, and S. K. Rathor, “A novel approach to minimize distribution losses while improving voltage profile in primary distribution network by incorporating distributed generation in system,” in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 2016, pp. 3949–3954. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755455.

[5] O. AlAhmad and M. AlDahmi, “Voltage Profile Improvement Analysis of 11 kV Feeders Using Capacitor Banks,” in *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2021, pp. 83–87. doi:

- 10.1109/ICOECS52783.2021.9657351.
- [6] M. M. Gidd, S. L. Mhetre, and I. M. Korachagaon, "Optimum Position and Optimum Size of the Distributed Generators for Different Bus Network Using Genetic Algorithm," in *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697595.
- [7] D. Han, J. Hwang, M. Choi, and S. Lim, "Decentralized Voltage Control Method to Regulate Voltage Profile in Distribution Network," in *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 2019, pp. 1848–1853. doi: 10.1109/APAP47170.2019.9225186.
- [8] K. Moloi, Y. Hamam, and J. A. Jordaan, "Optimal Location of DGs Into the Power Distribution Grid for Voltage and Power Improvement," in *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219938.
- [9] Z. Ye, R. Lin, H. Zou, B. Wu, and N. Guo, "The Location and Capacity of Distributed Generation Based on Genetic Algorithm," in *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)*, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ES.2017.7.
- [10] B. R. Pereira, G. R. M. da Costa, J. Contreras, and J. R. S. Mantovani, "Optimal Distributed Generation and Reactive Power Allocation in Electrical Distribution Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 975–984, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2015.2512819.
- [11] A. Alhamali, M. E. Farrag, G. Bevan, and D. M. Hepburn, "Determination of optimal site and capacity of DG systems in distribution network based on genetic algorithm," in *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2017.8231996.
- [12] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Ó. Gallachóir, and V. Bertsch, "A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems," *Energy*, vol. 163, pp. 822–836, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.022>.
- [13] A. S. Addurat and J. Pasupuleti, "The impacts of number of solar photovoltaic units on distribution network losses and voltage profile," in *2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 2020, pp. 249–253. doi: 10.1109/SCORED50371.2020.9250971.
- [14] D. Kumar, A. Singh, and S. Kansal, "To Improve the Voltage Profile of Distribution System with the Optimal Placement of Capacitor," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 31, pp. 1–7, 2017, doi: 10.17485/ijst/2017/v10i31/113897.
- [15] D. H. Cárdenas Villacrés, C. F. Chávez Córdova, and N. R. Layedra Quinteros, "Voltage Stability in Medium Voltage Single-Phase Electrical Distribution Networks, Applying Quick Drive Tap Regulators in Steady State," *Ingenio*, vol. 4, no. 1, pp. 17–26, 2021, doi: 10.29166/ingenio.v4i1.3067.
- [16] V. J. Shetty and S. G. Ankaliki, "Electrical Distribution System Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement by Network Reconfiguration Using PSO," in *2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2019, pp. 1–4. doi:

- 10.1109/ICEES.2019.8719292.
- [17] I. A. Nassar, M. A. Omara, and M. M. Abdella, "Enhancement of Voltage Profile in Power Systems by Using Genetic Algorithm," in *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2019, pp. 459–464. doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9007979.
- [18] A. Cervera and G. Caicedo-Delgado, "Expert system for regulating voltage in Distribution Network," *Ing. Y Compet.*, vol. 17, no. 1, pp. 23–34, 2015, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v17n1/v17n1a03.pdf>
- [19] C. Vásquez and S. Espinosa, "Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado en el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica," 2016, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13262>
- [20] ARCONEL, "RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-053/18," *Arconel*, pp. 1–40, 2018.
- [21] P. Paliwal, N. P. Patidar, and R. K. Nema, "Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 557–570, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.200>.
- [22] F. H. Guan, D. M. Zhao, X. Zhang, B. T. Shan, and Z. Liu, "Research on distributed generation technologies and its impacts on power system," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1–6. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241
- [23] ARCERNNR, "REGULACIÓN Nro. ARCERNNR-002/21," pp. 1–46, 2021.
- [24] P. D. Huy, V. K. Ramachandaramurthy, J. Y. Yong, K. M. Tan, and J. B. Ekanayake, "Optimal placement, sizing and power factor of distributed generation: A comprehensive study spanning from the planning stage to the operation stage," *Energy*, vol. 195, p. 117011, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117011>.
- [25] Y. Xiang, Y. Wang, Y. Su, W. Sun, Y. Huang, and J. Liu, "Reliability correlated optimal planning of distribution network with distributed generation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 186, p. 106391, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106391>.
- [26] O. Tuttokmagi and A. Kaygusuz, "Transient Stability Analysis of a Power System with Distributed Generation Penetration," in *2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*, 2019, pp. 154–158. doi: 10.1109/SGCF.2019.8782325.
- [27] S. Essallah, A. Khedher, and A. Bouallegue, "Integration of distributed generation in electrical grid: Optimal placement and sizing under different load conditions," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 79, p. 106461, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106461>.
- [28] R. H. A. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, "Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 1177–1198, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.036.
- [29] P. Khetrapal, "Distributed generation: A critical review of technologies, grid integration issues,

- growth drivers and potential benefits,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 9, no. 2, pp. 189–205, 2020, doi: 10.14710/ijred.9.2.189-205.
- [30] M. S. Nazir, A. J. Mahdi, M. Bilal, H. M. Sohail, N. Ali, and H. M. N. Iqbal, “Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 683, pp. 436–444, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.274>.
- [31] Z. Abdmouleh, A. Gastli, L. Ben-Brahim, M. Haouari, and N. A. Al-Emadi, “Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources,” *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 266–280, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>.
- [32] R. Sanjay, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, V. Ramesh, and N. Mithulananthan, “Optimal Allocation of Distributed Generation Using Hybrid Grey Wolf Optimizer,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14807–14818, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2726586.
- [33] M. Pesaran H.A, P. D. Huy, and V. K. Ramachandaramurthy, “A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. May, pp. 293–312, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.071.
- [34] A. Lambora, K. Gupta, and K. Chopra, “Genetic Algorithm- A Literature Review,” in *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, 2019, pp. 380–384. doi: 10.1109/COMITCon.2019.8862255.
- [35] P. Gopu, S. Naaz, and K. Aiman, “Optimal Placement of Distributed Generation using Genetic Algorithm,” in *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICAECT49130.2021.9392496.
- [36] A. Shukla, H. M. Pandey, and D. Mehrotra, “Comparative review of selection techniques in genetic algorithm,” *2015 1st Int. Conf. Futur. Trends Comput. Anal. Knowl. Manag. ABLAZE 2015*, no. February, pp. 515–519, 2015, doi: 10.1109/ABLAZE.2015.7154916.
- [37] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- [38] M. López Ceballos, R. A. Gallego R, and R. A. Hincapie Isaza, “Improvement of voltage profile in distribution systems using distributed generation,” *Sci. Tech.*, vol. 44, pp. 310–315, 2010.
- [39] Vertex, “Bifacial de doble vidrio,” *Trinasolar*, p. 2, 2020.
- [40] P. CAD, “IEEE 09 Bus System,” no. Manitoba, 2018.
- [41] IEEE, “Data Sheets for IEEE 14, 30, 62 Bus System,” 2017.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 11: Matriz de estado del arte.

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA																								
ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Generación Distribuida (GD)	Sistema de Distribución (SD)	Algoritmo Genético	Heurística sobre ubicación de GD en Sistemas de Distribución	Incorporación de GD al Sistema de Distribución	Métodos para la ubicación de GD al Sistema de Distribución	Máxima potencia que puede producir la GD según su tecnología	Análisis de perfil de voltaje en sistemas de distribución	Voltajes normalizados por límites	Máxima potencia entregada por un Central de GD	Pérdidas de energía en Sistemas de Distribución	Incertidumbre de condiciones climáticas para la GD	Reconfiguración del SD	Compensación Capacitiva	Algoritmo de enjambre de partículas	Integración de GD mediante Algoritmo Genético	Ubicación y dimensionamiento óptimo de GD	Mejora del perfil de voltaje con integración de GD	Mejoramiento de pérdidas en líneas por incorporación de GD	Algoritmo Genético aplicado al Sistema de Distribución
1	2021	A review on genetic algorithm: past, present, and future	37	378	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2021	Optimal Placement of Distributed Generation using Genetic Algorithm	35	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	2021	REGULACIÓN Nro. ARCERNR-002/21	23		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2021	Voltage Stability in Medium Voltage Single-Phase Electrical Distribution Networks, Applying Quick Drive Tap Regulators in Steady State	15	23	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2021	Optimal Power Grid Integration With Distributed Generation Using Genetic Algorithm	3	13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	2021	Voltage Profile Improvement Analysis of 11 kV Feeders Using Capacitor Banks	5	18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2020	Distributed generation: A critical review of technologies, grid integration issues, growth drivers and potential benefits	29	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Generación Distribuida (GD)	Sistema de Distribución (SD)	Algoritmo Genético	Heurística sobre ubicación de GD en Sistemas de Distribución	Incorporación de GD al Sistema de Distribución	Métodos para la ubicación de GD al Sistema de Distribución	Máxima potencia que puede producir la GD según su tecnología	Análisis de perfil de voltaje en sistemas de distribución	Voltajes normalizados por límites	Máxima potencia entregada por un Central de GD	Pérdidas de energía en Sistemas de Distribución	Incertidumbre de condiciones climáticas para la GD	Reconfiguración del SD	Compensación Capacitiva	Algoritmo de enjambre de partículas	Integración de GD mediante Algoritmo Genético	Ubicación y dimensionamiento óptimo de GD	Mejora del perfil de voltaje con Integración de GD	Mejoramiento de pérdidas en líneas por incorporación de GD	Algoritmo Genético aplicado al Sistema de Distribución
8	2020	Reliability correlated optimal planning of distribution network with distributed generation	25	9	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒
9	2020	Optimal placement, sizing and power factor of distributed generation: A comprehensive study spanning from the planning stage to the operation stage	24	40	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	
10	2020	Optimal Location of DGs Into the Power Distribution Grid for Voltage and Power Improvement	8	31	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	
11	2020	The impacts of number of solar photovoltaic units on distribution network losses and voltage profile	13	118	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	
12	2019	Genetic Algorithm- A Literature Review	34	1737	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	
13	2019	Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review	30	85	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
14	2019	Enhancement of Voltage Profile in Power Systems by Using Genetic Algorithm	17	57	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒
15	2019	Electrical Distribution System Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement by Network Reconfiguration Using PSO	16	246	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Generación Distribuida (GD)	Sistema de Distribución (SD)	Algoritmo Genético	Heurística sobre ubicación de GD en Sistemas de Distribución	Incorporación de GD al Sistemas de Distribución	Métodos para la ubicación de GD al Sistema de Distribución	Máxima potencia que puede producir la GD según su tecnología	Análisis de perfil de voltaje en sistemas de distribución	Voltajes normalizados por límites	Máxima potencia entregada por un Central de GD	Perdidas de energía en Sistemas de Distribución	Incertidumbre de condiciones climáticas para la GD	Reconfiguración del SD	Compensación Capacitiva	Algoritmo de enjambre de partículas	Integración de GD mediante Algoritmo Genético	Ubicación y dimensionamiento óptimo de GD	Mejora del perfil de voltaje con Integración de GD	Mejoramiento de pérdidas en líneas por incorporación de GD
16	2019	Integration of distributed generation in electrical grid: Optimal placement and sizing under different load conditions	27	0	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
17	2019	Transient Stability Analysis of a Power System with Distributed Generation Penetration	26	250	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
18	2019	Decentralized Voltage Control Method to Regulate Voltage Profile in Distribution Network	7	44	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒
19	2019	Voltage Profile Enhancement in Radial Distribution System Through Network Reconfiguration	1	71	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
20	2018	A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems	12	92	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
21	2018	Optimum Position and Optimum Size of the Distributed Generators for Different Bus Network Using Genetic Algorithm	6	188	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒
22	2018	RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-053/18	20		☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
23	2017	A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms	33	198	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

ITEM	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Generación Distribuida (GD)	Sistema de Distribución (SD)	Algoritmo Genético	Herrística sobre ubicación de GD en Sistemas de Distribución	Incorporación de GD al Sistema de Distribución	Métodos para la ubicación de GD al Sistema de Distribución	Máxima potencia que puede producir la GD según su tecnología	Análisis de perfil de voltaje en sistemas de distribución	Voltajes normalizados por límites	Máxima potencia entregada por un Central de GD	Perdidas de energía en Sistemas de Distribución	Incertidumbre de condiciones climáticas para la GD	Reconfiguración del SD	Compensación Capacitiva	Algoritmo de enjambre de partículas	Integración de GD mediante Algoritmo Genético	Ubicación y dimensionamiento óptimo de GD	Mejora del perfil de voltaje con Integración de GD	Mejoramiento de pérdidas en líneas por incorporación de GD	Algoritmo Genético aplicado al Sistema de Distribución
24	2017	Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources	31	259	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐
25	2017	Optimal Allocation of Distributed Generation Using Hybrid Grey Wolf Optimize	32	3398	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒
26	2017	Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review	28	97	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐
27	2017	To Improve the Voltage Profile of Distribution System with the Optimal Placement of Capacitor	14	175	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
28	2017	Determination of optimal site and capacity of DG systems in distribution network based on genetic algorithm	11	373	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒
29	2017	The Location and Capacity of Distributed Generation Based on Genetic Algorithm	9	139	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒
30	2016	Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado en el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica	19	218	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐
31	2016	Multi-objective placement and sizing of DGs in distribution network using genetic algorithm	2	185	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO ENFOCADO EN LA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Generación Distribuida (GD)	Sistema de Distribución (SD)	Algoritmo Genético	Heurística sobre ubicación de GD en Sistemas de Distribución	Incorporación de GD al Sistema de Distribución	Métodos para la ubicación de GD al Sistema de Distribución	Máxima potencia que puede producir la GD según su tecnología	Análisis de perfil de voltaje en sistemas de distribución	Voltajes normalizados por límites	Máxima potencia entregada por un Central de GD	Pérdidas de energía en Sistemas de Distribución	Incertidumbre de condiciones climáticas para la GD	Reconfiguración del SD	Compensación Capacitiva	Algoritmo de enjambre de partículas	Integración de GD mediante Algoritmo Genético	Ubicación y dimensionamiento óptimo de GD	Mejora del perfil de voltaje con Integración de GD	Mejoramiento de pérdidas en líneas por incorporación de GD	Algoritmo Genético aplicado al Sistema de Distribución
32	2016	A novel approach to minimize distribution losses while improving voltage profile in primary distribution network by incorporating distributed generation in system	4	170	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐
33	2016	Optimal Distributed Generation and Reactive Power Allocation in Electrical Distribution Systems	10	218	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐
34	2015	Expert system for regulating voltage in Distribution Network	18	35	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
35	2015	Comparative review of selection techniques in genetic algorithm	36	1980	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
36	2014	Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques	21	156	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐
37	2010	Improvement of voltage profile in distribution systems using distributed generation	38	100	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐
38	2009	Research on distributed generation technologies and its impacts on power system	22	1289	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CANTIDAD					28	34	14	24	17	8	14	16	26	22	26	10	12	8	9	12	19	15	8	10

7.2 Resumen de Indicadores

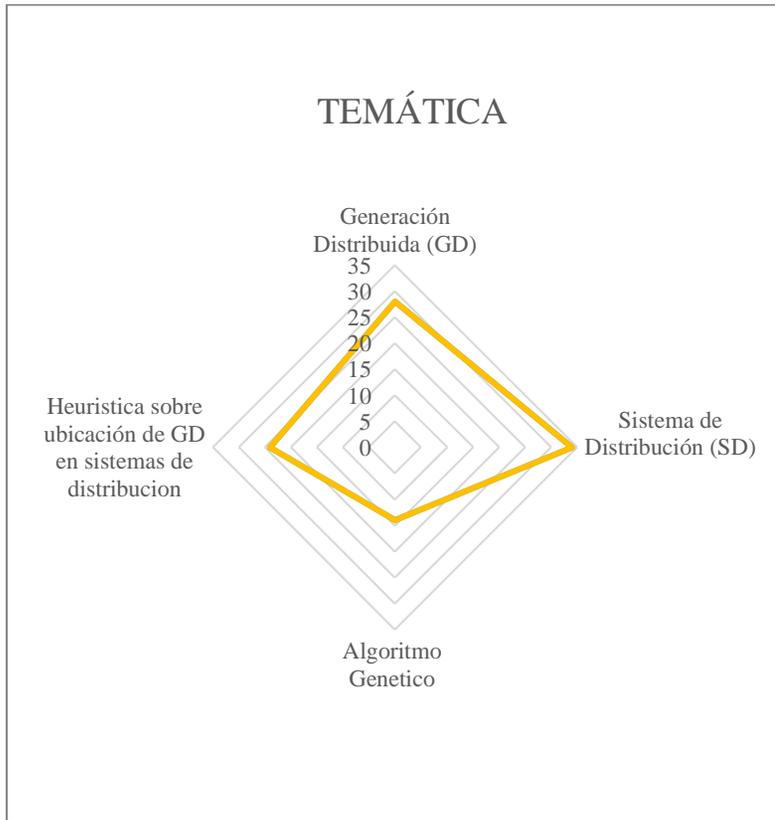


Figura 11. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

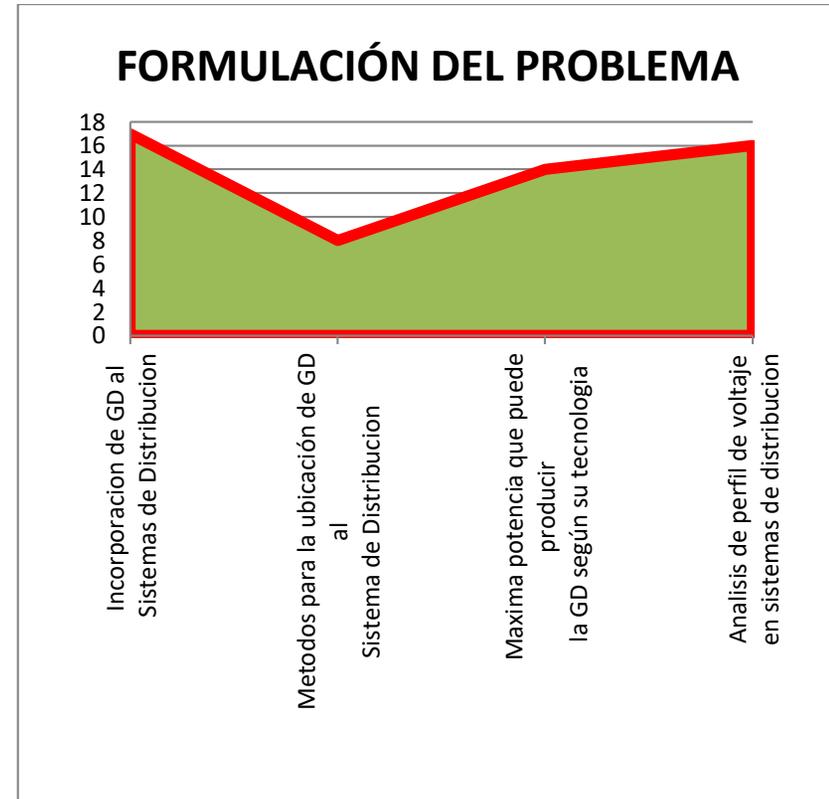


Figura 12. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

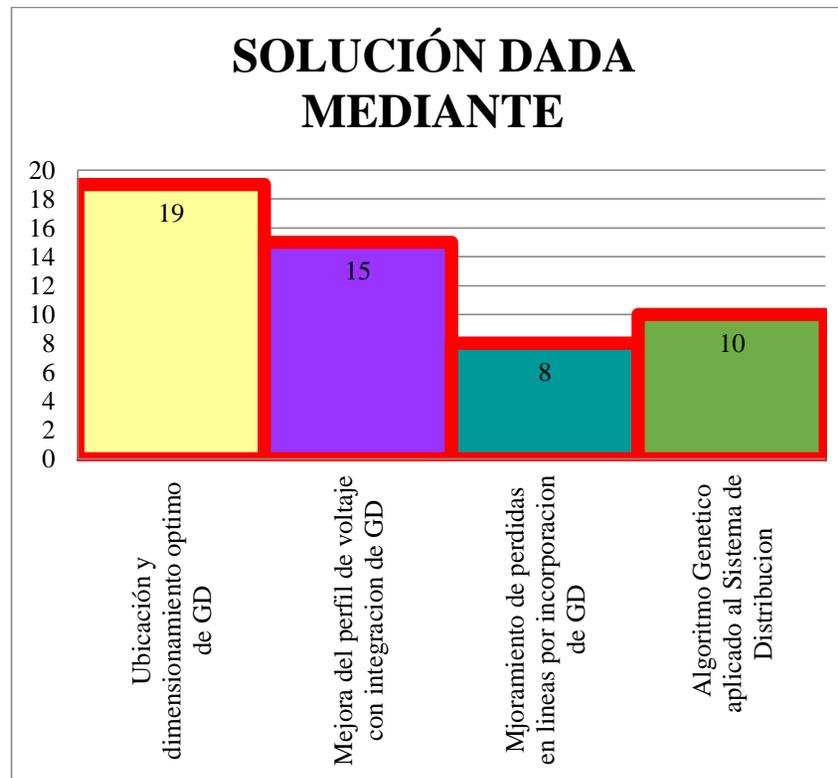


Figura 13. Indicador de solución - Estado del arte.

8 Anexos

8.1 Datos del Sistema IEEE de 9 barras

Tabla 12. Datos de los generadores del Sistema IEEE de 9 barras [40].

Generadores	Nodo	P. Activa [MW]	P. Reactiva [MVar]
G1	1	200	87.2
G2	2	130	97.5
G3	3	50	31

Tabla 13. Datos de las barras perteneciente al Sistema IEEE de 9 barras [40].

Barras	Tipo	V. nominal [kV]	Carga [MW]	Carga [MVar]
1	Slack	16.5	0	0
2	PQ	18	0	0
3	PQ	13.8	0	0
4	PQ	230	0	0
5	PQ	230	125	50
6	PQ	230	90	30
7	PQ	230	0	0
8	PQ	230	100	35
9	PQ	230	0	0

Tabla 14. Datos en las líneas del Sistema IEEE de 9 barras [40].

Barra i	Barra j	R [p.u]	X [p.u]	B [p.u]	Tap
4	1	0	0.0576	0	1
2	7	0	0.0625	0	1
9	3	0	0.0586	0	1
5	4	0.01	0.068	0.176	1
6	4	0.017	0.092	0.158	1
7	5	0.032	0.161	0.306	1

9	6	0.039	0.1738	0.358	1
7	8	0.0085	0.0576	0.149	1
8	9	0.0119	0.1008	0.209	1

8.2 Datos del Sistema IEEE de 14 barras

Tabla 15. Datos de los generadores del Sistema IEEE de 14 barras [41].

Generadores	Nodo	P. Activa [MW]	P. Reactiva [MVar]
G1	1	232.4	-16.9
G2	2	40	42.4
G3	3	0	23.4
G4	6	0	12.2
G5	8	0	17.4

Tabla 16. Datos de las barras del Sistema IEEE de 14 barras [41].

Barras	Tipo	V. nominal [kV]	Carga [MW]	Carga [MVar]
1	Slack	138	0	0
2	PQ	138	21.7	0
3	PQ	138	94.2	0
4	PQ	138	47.8	0
5	PQ	138	7.6	0
6	PQ	138	11.2	0
7	PQ	69	0	0
8	PQ	13.8	0	0
9	PQ	69	29.5	0
10	PQ	69	9	0
11	PQ	69	3.5	0
12	PQ	69	6.1	0
13	PQ	69	13.5	0
14	PQ	69	14.9	0

Tabla 17. Datos en las líneas del Sistema IEEE de 14 barras [41].

Barra i	Barra j	R [p.u]	X [p.u]	B [p.u]	Tap
1	2	0.0193	0.0591	0.052	1
1	5	0.0540	0.2230	0.049	1
2	3	0.0469	0.1979	0.043	1
2	4	0.0581	0.1763	0.037	1
2	5	0.0569	0.1738	0.034	1
3	4	0.0670	0.1710	0.034	1
4	5	0.0133	0.0421	0.012	1
4	9	0	0.0556	0	0.97
5	6	0	0.2520	0	0.96
6	11	0.0949	0.1989	0	0.93
6	12	0.1229	0.2558	0	1
6	13	0.0661	0.1302	0	1
7	8	0	0.1761	0	1
7	9	0.0971	0.1103	0	1
9	10	0.0318	0.0814	0	1
9	14	0.1271	0.2703	0	1
10	11	0.0820	0.1920	0	1
12	13	0.2209	0.1998	0	1
13	14	0.1709	0.3480	0	1