

**UBICACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADO EN FLUJOS DE
POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
UBICACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADO EN FLUJOS DE
POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS**

**AUTOR:
DIEGO LUIS GONZÁLEZ SAMUEZA**

**TUTOR:
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

Quito, Julio 2018

Diego Luis González Samueza

UBICACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADO EN FLUJOS DE POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Diego Luis González Samueza (A'1993-M'12). Realizó sus estudios de secundaria en el Colegio Técnico Salesiano “Don Bosco” en la especialidad de Eléctrico-Electrónico. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en ubicación de generación distribuida en sistemas de distribución eléctrica.

dgonzalezs1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila Téllez (A'1981-M'09). Recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador.

aaguila@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

©2018 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación "*Ubicación de recursos distribuidos basado en flujos de potencia usando optimización por enjambre de partículas*" realizado por Diego Luis González Samueza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2018



.....
Alexander Águila Téllez

C.C: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Diego Luis González Samueza, con documento de identificación N° 1721031852, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Ubicación de recursos distribuidos basado en flujos de potencia usando optimización por enjambre de partículas*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Julio 2018



.....

Diego Luis González Samueza

C.C: 1721031852

1. **ÍNDICE GENERAL**

1.	Introducción	2
2.	Marco Teórico.....	3
2.1.	Recursos Distribuidos	3
2.2.	Generación Distribuida	3
2.2.1.	Definiciones	3
2.2.2.	Ventajas y Desventajas	4
2.2.3.	Características y tipos	4
2.2.4.	Generación fotovoltaica	4
2.2.5.	Comparación de Métodos y Resultados de ubicación de generación distribuida	5
3.3.	Almacenamiento de energía.....	5
3.3.1.	Importancia y técnicas de almacenamiento.....	5
3.3.2.	Tipos.....	5
3.4.	Redes de distribución	6
3.4.1.	Partes y tipos	6
3.5.	Flujo óptimo de Potencia	7
3.5.1.	Métodos.....	7
3.5.2.	Características	7
3.6.	Perfil de voltaje	7
3.7.	Pérdidas de potencia.....	8
3.8.	Factor de potencia	8
4.	Formulación del problema	8
4.1.	Función objetivo	8
4.1.1.	Pérdidas de potencia.....	9
4.2.	Restricciones	9
4.2.1.	Balance de potencias	9
4.2.2.	Límites de capacidad de potencia de la generación distribuida	9
4.2.3.	Límites de voltajes	10
4.3.	Indicadores	10
4.3.1.	Desviación promedio de voltaje.....	10
4.3.2.	Máxima desviación de voltaje.....	10
4.3.3.	Factor de potencia en cada nodo	10
5.	Sistema propuesto de distribución radial	10
5.1.	Voltajes iniciales obtenidos en Matlab y DIGSILENT.....	11
5.2.	Pseudocódigo del flujo de potencia.....	12
6.	Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)	13

6.1.	Pseudocódigo de optimización por enjambre de partículas	14
7.	Análisis de Resultados	15
7.1.	Minimización de costos.....	15
7.2.	Ubicación óptima de GD.....	15
7.3.	Dimensionamiento de las GD	16
7.4.	Análisis de Pérdidas de Potencia.....	16
7.5.	Análisis de voltajes	17
7.6.	Análisis de desviaciones de voltaje.....	18
7.7.	Análisis de potencia reactiva en las líneas	18
7.8.	Análisis de factor de potencia en los nodos	19
8.	Conclusiones	20
9.	Trabajos futuros	20
10.	Referencias.....	21
10.1.	Matriz del estado del arte.....	26
10.2.	Indicadores de la matriz del estado del arte	28
11.	Anexos	29
11.1.	Comparación artículos de resultados de ubicación de GD.....	29

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Generación distribuida en el Sistema de Distribución Eléctrica.....	3
Figura 2.	Sistema de Distribución Radial de 15 nodos.	11
Figura 3.	Movimientos de las partículas de selección del nodo.....	15
Figura 4.	Movimiento de las partículas de capacidad de GD.	15
Figura 5.	Función de costos en función de las iteraciones.....	15
Figura 6.	Sistema de Distribución Radial de 15 nodos con ubicación de GD.	16
Figura 7.	Potencia activa en cada línea, comparación con GD.....	17
Figura 8.	Perfil de voltajes, comparación con GD.....	17
Figura 9.	Desviaciones de voltaje, comparación con GD.....	18
Figura 10.	Potencia reactiva en cada línea, comparación con GD.....	19
Figura 11.	Factor de potencia en cada nodo, comparación con GD.....	19
Figura 12.	Indicadores del estado del arte.....	28

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Tipos de Generación Distribuida	4
Tabla 2:	Valores reales de potencias del sistema de 15 nodos.....	11
Tabla 3:	Valores reales de entrada de líneas del sistema de 15 nodos	11
Tabla 4:	Valores en por unidad de entrada de líneas del sistema de 15 nodos	11
Tabla 5:	Valores en por unidad de voltajes comparación Matlab y DIGSILENT	12
Tabla 6:	Comparación resultados con la implementación de GD.....	16
Tabla 7:	Potencia Activa en cada línea	16
Tabla 8:	Voltajes en cada nodo.....	17

Tabla 9: Desviaciones de voltajes en cada nodo.....	18
Tabla 10: Potencia reactiva en cada línea	19
Tabla 11: Factor de potencia en cada nodo.....	19
Tabla 12: Matriz de estado del arte.....	26
Tabla 13: Resultados de documentos de ubicación de GD	29

UBICACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADO EN FLUJOS DE POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.

Resumen

Este artículo presenta un análisis de ubicación, selección y dimensionamiento óptimo de generación distribuida en redes de distribución eléctrica, obteniendo un flujo óptimo de potencia con compensación de potencia activa, mediante la implementación del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO). El PSO permitió resolver el problema seleccionando los nodos óptimos y la capacidad de la generación distribuida a instalar, cumpliendo con el objetivo de mejorar los parámetros de calidad y eficiencia al menor costo posible. La simulación y análisis se realizaron en un sistema típico de distribución radial de 15 nodos, con la herramienta computacional Matlab, consiguiendo un flujo de potencia que cumple con condiciones técnicas, económicas y ambientales. La inyección de potencia activa mediante generación distribuida, permitió obtener valores de voltajes mejorados en cada nodo, minimizando índices de desviación promedio de voltaje y de máxima desviación. Los resultados propuestos se lograron, aumentando los niveles de voltaje, reduciendo pérdidas de potencia en las líneas y cumpliendo con un criterio de mínimo costo.

Palabras Clave: Generación de energía distribuida, Almacenamiento de energía, Optimización de enjambre de partículas, flujo de carga.

Abstract

This article presents an analysis of the location, selection and optimal sizing of distributed generation in electrical distribution networks, obtaining an optimal power flow with active power compensation, through the implementation of the particle swarm optimization algorithm (PSO). The PSO allowed to solve the problem selecting the optimal nodes and the capacity of the distributed generation to install, fulfilling the objective of improving the parameters of quality and efficiency at the lowest possible cost. The simulation and analysis were made in a typical system of radial distribution of 15 nodes, with the Matlab computational tool, achieving a power flow that meets technical, economic and environmental conditions. The injection of active power by means of distributed generation allowed to obtain values of improved voltages in each node, minimizing indexes of average voltage deviation and maximum deviation. The proposed results were achieved by increasing the voltage levels, reducing power losses in the lines and complying with a minimum cost criterion.

Keywords: Distributed power generation, Energy storage, Particle swarm optimization, load flow.

1. Introducción

Los sistemas de distribución de energía eléctrica buscan entregar este servicio a los consumidores con las mejores condiciones de calidad [1], pero un inconveniente a cumplir estas condiciones es una generación centralizada, este tipo de generación se encuentra lejos de los usuarios, y puede presentar dificultades para abastecer la demanda en su totalidad [2], dando paso a buscar una vía de solución en la generación distribuida, que utilizar energías renovables y amigables con el medio ambiente.

Un flujo de potencia en redes de distribución que tenga pérdidas mínimas contribuye a entregar energía de calidad al usuario, por lo cual un óptimo flujo de potencia ha sido un importante tema de estudio realizado por varios autores [3]. Conocer en detalle su geometría, sus metodologías de aplicación por ejemplo un método predictivo [4], una programación lineal mixta (MILP) [5], el algoritmo por optimización colonia de hormigas (ACO) [6], ayuda a la optimización de flujos de potencia con objetivos de obtener niveles de voltaje adecuados, un factor de potencia apropiado, reducir pérdidas de potencia tanto activa como reactiva y maximizar beneficios económicos.

La generación distribuida (GD) es de gran apoyo en obtener flujos de potencia mejorados, dado que incorporada a los sistemas de distribución eléctrica minimiza el impacto ambiental que produce la generación convencional, busca la implementación de energía renovable, la cual complementada con un almacenamiento de energía brinda un suministro eléctrico más seguro, y menos costoso [7].

Siendo necesario optimizar su tamaño y ubicación, para obtener abastecimiento de energía con

apropiadas condiciones técnicas, y aumentando la confiabilidad del sistema.

Los varios beneficios de la GD al conectarse al sistema de distribución son minimizar costos, mejorar la eficiencia energética y elevar la calidad del servicio. Por lo cual una adecuada ubicación es importante para maximizar estos beneficios, estudiando y utilizando los métodos, modelos y las aplicaciones para la óptima ubicación de GD [8]. Pero esto, debe ser añadido un dimensionamiento de la GD apropiado, que aproveche la mayor inyección de potencia activa y/o reactiva al sistema y así poder maximizar beneficios técnicos y económicos [9]–[13].

El funcionamiento de una red de distribución con GD óptimo, requiere una complementación con utilización de almacenamiento de energía (AE), porque la generación con energías renovables utilizan recursos energéticos de producción intermitente, y el AE guarda esta energía generada para poder utilizarla en periodos que no haya producción, por eso también se tiene en cuenta una óptima selección, ubicación y dimensionamiento de AE para minimizar el uso de baterías, aplicando métodos respectivos de optimización de sus parámetros, por ejemplo un método multi-objetivo híbrido [14], [15].

La GD con recursos fotovoltaicos son muy importantes en la de reducción del impacto ambiental también apropiada al inyectar potencia activa al sistema, pero existen diferentes tipos de recursos distribuidos, que utilizan diferentes recursos energéticos. Para optimizar el flujo de potencia se utiliza tipos de compensación activa [13], y de igual manera se emplea una metodología aplicada a compensación de potencia reactiva, para elevar el uso eficiente de la energía de calidad [16].

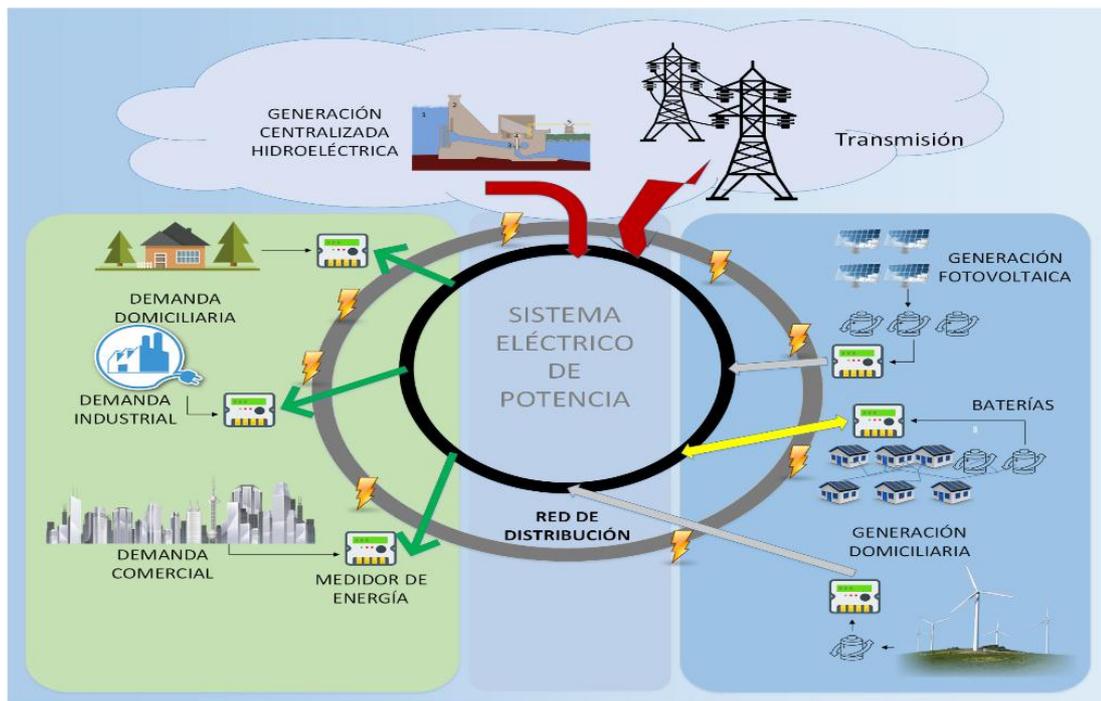


Figura 1. Generación distribuida en el Sistema de Distribución Eléctrica

El presente trabajo, considera la problemática de mejorar los parámetros de calidad de abastecimiento de energía, por lo cual se realiza un análisis e implementación de optimización del flujo de potencia en bases a restricciones de ubicación y dimensionamiento de recursos distribuidos. Se utiliza una metodología aplicada mediante el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) por medio de la herramienta de software matemático MATLAB, también cumpliendo con una minimización de pérdidas de potencia en el sistema, sujeto a restricciones de límites de voltaje, balance de potencias e inyección de potencia activa.

2. Marco Teórico

2.1. Recursos Distribuidos

Los recursos distribuidos tienen una gran implementación cerca de la demanda en sistemas de distribución eléctrica, para ayudar a cumplir niveles de confiabilidad, por lo cual se considera la adecuada integración de generación distribuida y almacenamiento de energía, más aun

por ser recursos que ayudan a optimizar el flujo de potencia del sistema [17].

Estos recursos distribuidos tienen importantes beneficios tanto para los usuarios como los proveedores de energía eléctrica, puesto que nos ayudan a elevar la confiabilidad, flexibilidad y reducir costos de la energía, por eso es importante estudiar el comportamiento de la GD complementada con un AE, para aprovechar al máximo la generación producida disponible al sistema y la excedente se pueda guardar en una tecnología de almacenamiento [18].

2.2. Generación Distribuida

2.2.1. Definiciones

La generación distribuida tiene varias definiciones en diferentes documentos. Así también sus niveles de potencia pueden variar según las regulaciones que tiene cada país, por ejemplo, el Consejo Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) define la generación distribuida con una capacidad máxima entre 50 MW a 100 MW, y no diseñarse ni despacharse de forma centralizada [19].

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) define la generación distribuida como instalaciones pequeñas que generan electricidad en comparación con las plantas generadoras centrales, permitiendo la interconexión muy cercana a la carga en un sistema de potencia [20].

2.2.2. Ventajas y Desventajas

Los beneficios de la GD en sistemas de distribución son confiabilidad, reducción de pérdidas, aumento de calidad del suministro de energía, minimizar interrupciones del servicio, tecnologías modulares, tiempos mínimos de instalación, control de energía activa, generación de energía limpia, utilización de fuentes renovables, regulación de niveles de voltaje, ayuda a restablecer el sistema cuando se presenta un colapso [21].

Las condiciones contrarias de la GD serían el alto costo de inversión, barreras técnicas y tecnológicas, falta de normas y estándares para su conexión a la red, potencias fluctuantes y bajas, vacíos en las regulaciones de cada país, escasos beneficios para proyectos grandes, en lo técnico conflicto en la coordinación de protecciones, y también falta de investigación y desarrollo [22].

2.2.3. Características y tipos

Algunas características principales que tiene la GD son:

- Pequeñas unidades de generación.
- Generación conectada en diferentes nodos de la red de distribución.
- Se encuentra cerca de los puntos de carga.
- No tiene despacho centralizado.
- Amigables con el medioambiente.
- Aprovechan fuentes de energía renovable [23].

Según la fuente de energía podemos distinguir dos tipos de GD como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1: Tipos de Generación Distribuida

Generación Distribuida	
Convencionales	Renovables
Turbinas de gas	Fotovoltaica
Motores de combustión interna	Eólica
Micro turbinas	Mini hidráulica
Ciclo combinado	Biomasa
-	Geotérmicas
-	Solar térmica
-	Marinas

2.2.4. Generación fotovoltaica

La energía solar tiene muchas maneras de aprovechamiento, por ejemplo, convertir la energía fotovoltaica en energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos están compuestos por varios elementos principalmente por paneles de células fotovoltaicas [24].

Existe dos tipos de utilización de sistemas fotovoltaicos primero el aislado que cubre una carga particular, su energía es almacenada en baterías y son de potencias bajas, segundo es el conectado a la red, genera potencias mayores y tiene un inversor para entregar corriente alterna, dentro de límites permitidos de calidad de voltaje y frecuencia [25].

Las ventajas de la generación fotovoltaica son utilizar una fuente renovable de energía prácticamente inagotable, no produce emisiones de gases y minimiza el impacto ambiental en el suelo y la naturaleza alrededor de los sistemas instalados, en el aspecto social mejora la calidad de vida, y en la parte técnica aumenta las condiciones de calidad del suministro eléctrico [26], [27].

Los costos de implementar y suministrar energía fotovoltaica es el inconveniente más notable comparada

con otros tipos de energía, así pues su tecnología sigue en desarrollo para poder minimizar sus costos de implementación [28], el objetivo de este trabajo es minimizar los costos al seleccionar y ubicar este tipo de generación, utilizando una adecuada inyección de potencia activa al sistema.

2.2.5. Comparación de Métodos y Resultados de ubicación de generación distribuida

La generación distribuida es un gran tema de estudio en su implementación para mejorar flujos de potencia, se utilizan diferentes métodos y herramientas matemáticas que llegan a una óptima ubicación aprovechando al máximo sus beneficios. Entre algunos métodos utilizados tenemos:

- Programación no lineal entera mixta (MINLP) [29].
- Meta heurística de optimización colonia de hormigas (ACO) [30].
- Algoritmo genético (GA) [31], [32].
- Optimización de hormiga león (ALO) [33], [34].
- Algoritmo de optimización de ballenas (WOA) [35].
- Métodos híbridos [36]–[38].

En este documento se utiliza una complementación con una función objetivo de minimización de costos al ubicar GD con el método de optimización de enjambre de partículas (PSO).

Se presenta en la tabla 13 que se encuentra en los anexos, una comparación de resultados de diferentes estudios de ubicación óptima de GD, los sistemas de distribución utilizados para su implementación, el resultado de su función objetivo que en el caso de los estudios presentados está referida a minimización de pérdidas, el tamaño de la GD y los nodos escogidos.

3.3. Almacenamiento de energía

3.3.1. Importancia y técnicas de almacenamiento

Las tecnologías de almacenamiento de energía (AE) son importantes por su capacidad de reserva de energía; la energía producida por generación renovable tiene fluctuaciones horarias por estaciones o condiciones de recursos de la naturaleza, ahora bien la demanda necesita entregarse a lo largo del día, razón por lo cual se aprovecha las características del AE, por ejemplo, puede guardarse la energía producida en el día por un sistema fotovoltaico para emplearla en picos de demanda en la noche y así reducir costos para el usuario [15].

Las técnicas de almacenamiento de energía pueden ser de forma, mecánica, térmica o química, con diferentes aplicaciones, por lo cual podemos distinguir AE de bajas y medias potencia, así mismo de pequeña escala y también existen las de sistemas de gran escala [39].

3.3.2. Tipos

Algunos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía que tenemos son:

- Superconductores Magnéticos. - almacena la energía en una bobina superconductora en forma electromagnética, tiene un sistema de refrigeración criogénica para evitar pérdidas por efecto Joule, poseen una gran velocidad de respuesta con una descarga completa, deben tener un inversor bidireccional con pérdidas entre 2 y 3% [15].
- Supercondensadores. – son sistemas parecidos a los condensadores, pero con mayor capacidad de almacenamiento y utilizados para elevar la calidad de potencia, almacenan energía en su forma electrostática

respondiendo a cargas y descargas de manera muy rápida, por lo cual se utilizan cuando hay cortos periodos de interrupciones de energía.

- Baterías eléctricas. – transforma energía química en energía eléctrica, esta constituidas por varias celdas de diferentes materiales como plomo-acido, níquel-cadmio, ion de litio, litio – polímero, las tecnologías se diferencian por el peso, tamaño, número de ciclos de carga y descarga, nivel de contaminación, costos y desarrollo técnico [40]. El sistema está conformado por bancos de baterías acompañadas de un convertidor de electrónica de potencia para conectarlas a la red, donde su utilización tiene un sistema de control para saber la potencia a inyectarse a la red. Los aspectos a considerar y estudiar de una batería es su capacidad de almacenamiento, energía disponible, profundidad de descarga, eficiencia, durabilidad y autonomía.
- Aire comprimido. - esta tecnología comprime aire y lo almacena en depósitos, el aire puede venir de un parque eólico y ser utilizado para el funcionamiento de turbinas de combustión, con un proceso de ciclo combinado para una alta eficiencia, tienen la gran ventaja de utilizarse en sistemas de gran escala y proporciona tiempos de arranque muy rápidos y gran vida útil [41].

3.4. Redes de distribución

El sistema eléctrico de potencia está compuesto por varias etapas como son generación, transmisión y distribución,

con el fin de entregar energía eléctrica a los usuarios cumpliendo con niveles de calidad y al menor costo posible.

Las cargas son las que necesitan tener la energía eléctrica con niveles de calidad máximos, por lo cual algunas son consideradas como cargas sensibles que al presentarse alguna anomalía por ejemplo ferro resonancia en el transformador [42], presenta una interrupción del servicio tienen graves consecuencias por ejemplo un hospital, también se tienen cargas menos sensibles que permiten un tiempo menor de interrupción sin causar daños a sus equipos, y por ultimo las cargas normales que en un tiempo de interrupción considerable no sufren daños importantes [43], [44].

3.4.1. Partes y tipos

La etapa de distribución es la encargada de repartir la energía a los centros de consumo, la cual está constituido por maquinas, barras y líneas formando un circuito [45].

Las partes principales de una red de distribución se pueden considerar como:

- a) Subestación de potencia.
- b) Sistema de subtransmisión.
- c) Subestación de distribución.
- d) Alimentadores primarios.
- e) Transformadores de distribución.
- f) Cargas, usuarios.

La configuración de un sistema de distribución se lo puede clasificar por su estructura en dos grupos:

- Radial. - tiene una alimentación por un solo camino hacia los puntos de carga, sus ventajas son de simple diseño y mínimos costos constructivos.
- Mallada. - tiene más de un trayecto para el flujo de potencia, por eso es más compleja en su diseño y planificación [3].

3.5. Flujo óptimo de Potencia

El sistema de potencia en la parte de distribución busca minimizar pérdidas tanto técnicas como económicas y cumplir con parámetros de calidad al entregar el servicio al consumidor, utilizando métodos que alcancen este objetivo de la manera más sencilla posible [46].

El flujo óptimo de potencia (FOP) obtiene las características técnicas de un sistema de distribución para mejorarlas mediante utilización de compensadores activos y reactivos, reconfiguraciones, adición de elementos de generación, adecuado uso de transformadores [6].

3.5.1. Métodos

Existen varios métodos analizados para un FOP, desde los tradicionales hasta los que se realizan computacionalmente, con el objetivo de tener soluciones más rápidas, ser más robustos y poseer menor complejidad de cálculo, obteniendo como resultado un óptimo flujo de potencia, que tenga como objetivo elevar las condiciones de calidad, medioambientales, y de seguridad[3].

Por lo cual un FOP debe ser lo más exacto y preciso para explotar al máximo sus beneficios, existen muchas metodologías que se diferencian por su enfoque y resultados, entre estos métodos tenemos:

- Programación lineal entera mixta (MILP).
- Algoritmos genéticos (GA).
- Métodos de Newton-Raphson (NR).
- Software computacional.
- Método del Gradiente.
- Programación cuadrática (QP).
- Aproximaciones por descomposición P-Q.
- Redes neuronales.
- Programación Evolutiva (PE).

- Búsqueda Tabú (TS).
- Métodos híbridos.

3.5.2. Características

El FOP tiene una función objetivo y sus restricciones para llegar a la solución del problema, entre los objetivos principales pueden estar enfocados en minimizar costos, minimizar pérdidas de potencia, minimizar emisiones contaminantes [25].

Para llegar a cumplir esta función objetivo debe estar sujeto a restricciones, como límites de potencia generada, niveles de voltaje, posición de tap de transformadores, potencia de compensadores activos y reactivos, factor de potencia, límites de capacidad de líneas, entre otros [47].

Como una forma general se puede presentar a un FOP de manera matemática como:

$$\begin{array}{ll} \min & fo(x, u) \\ s. a & h(x, u) = 0 \\ & y \quad g(x, u) < 0 \end{array}$$

Donde fo es la función objetivo, x es un vector de m variables de estado, u es un vector de n variables de control, $h(x, u)$ representa un número k restricciones de igualdad, $g(x, u)$ representa un número k de restricciones de desigualdad [27].

3.6. Perfil de voltaje

En una red de distribución radial es muy importante tener un adecuado perfil de voltajes en los nodos y mantener un valor aceptable en el punto más lejano a la subestación. La ubicación de GD realiza beneficios en el perfil de voltaje, existen tecnologías que pueden inyectar reactivos al sistema para elevar los voltajes, también así existe GD que inyectan potencia activa con un factor de potencia constante que tienen la

característica de aumentar la generación de potencia reactiva al inyectar más la potencia activa generada, por lo cual ayuda a aumentar los niveles de voltaje [22], [49], [50].

3.7. Pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia en el sistema están relacionadas al consumo de energía de las cargas, al ubicar generación distribuida en la red puede disminuir estas pérdidas, porque en un sistema de distribución radial con una sola generación tiene mayor cantidad de pérdidas en las líneas, pero al tener otras generaciones varían los flujos de corriente en las líneas, porque las cargas pasan a consumir potencia activa de una generación más cercana, entonces las líneas no manejen grandes cantidades de corrientes disminuyendo así las pérdidas causadas por efecto Joule, sin embargo si la inyección de potencia de la GD es demasiado alta puede llegar a aumentar las pérdidas del sistema [49], [51], [52].

3.8. Factor de potencia

El factor de potencia (FP) en una demanda residencial como el sistema empleado en este artículo es un componente a mejorar, pero al integrar GD al sistema de distribución con una inyección solo de potencia activa, produce un bajo factor de potencia, por esta razón se debe inyectar generación de activos al sistema para corregir el factor de potencia, porque solo inyectar potencia activa y mantener la potencia reactiva casi constante produce un aumento en el ángulo del triángulo de potencias, lo cual equivale a tener un factor de potencia bajo, siendo esto una gran cuestión para futuros artículos, porque el FP es un aspecto de gran importancia en un sistema de distribución que se puede mejorar [22], [53].

4. Formulación del problema

El problema de una óptima ubicación y dimensionamiento de GD es obtener el valor de potencia activa a inyectar en el sistema y los nodos escogidos permitan mejorar los parámetros propuestos para alcanzar un flujo óptimo de potencia, resolviéndolo primero aplicando una solución de flujo de potencia por Newton Raphson para determinar valores de pérdidas de potencia y voltajes a mejorar. Segundo aplicando una optimización PSO para escoger los óptimos nodos y tamaños de la GD a ubicar en el sistema que con las iteraciones asumidas cumpla con la optimización de la función objetivo de minimización de costos.

4.1. Función objetivo

El objetivo principal de este artículo es tener una óptima ubicación de GD fotovoltaica con una adecuada de inyección de potencia activa, logrando minimizar costos. Teniendo en cuenta las condiciones de operación del sistema de distribución como pérdidas, márgenes de voltaje para tener un flujo óptimo de potencia mediante PSO [54].

La función objetivo es minimizar costos al implementar la GD al sistema teniendo:

minimizar FO

$$FO = \sum_{i=1}^n (k_{inst} * P_{DGi} + k_{O\&M} * P_{DGi}) + k_{perd} * P_{perdidas} \quad (1)$$

Dónde:

n : Número de nodos del sistema
 k_{inst} : Factor de costos de instalación de GD en (\$/KW).
 $k_{O\&M}$: Factor de costos de operación y mantenimiento de GD en (\$/KW).
 k_{perd} : Factor de costos de pérdidas del sistema en (\$/KW h).

P_{DGi} : Potencia a ser instalada de la GD dada en (kW).

$P_{perdidas}$: Potencia total de pérdidas del sistema en (kW).

Los factores de costos de pérdidas k_{perd} se obtienen de [32], los costos de capacidad, operación y manteamiento de la GD se encuentran en [33], las potencias de la GD, P_{DGi} son las de los nodos escogidos, por lo cual se minimizara costos tendiendo una múltiple ubicación de GD, y además minimizar el costo de pérdidas dado por la multiplicación de las pérdidas totales del sistema por un factor de costos referido a pérdidas [32].

4.1.1. Pérdidas de potencia

$$P_{perdidas} = \sum_{j \neq i}^n I_{ij}^2 * R_{ij} \quad (2)$$

Dónde:

$P_{perdidas}$: Potencia total de pérdidas del sistema, en (kW).

I_{ij} : Corriente de línea entre el nodo i y el nodo j en (kA).

R_{ij} : Resistencia de línea entre el nodo i y el nodo j en (ohm).

La potencia de pérdidas totales en el sistema es la sumatoria del cuadrado de la corriente por la resistencia en cada línea, estas pérdidas se buscan minimizar, siendo un factor influyente en la función objetivo, además al reducir las pérdidas el sistema satisface las condiciones técnicas en un óptimo flujo de potencia [55], [56].

4.2. Restricciones

Las restricciones ayudan a cumplir con condiciones técnicas y de calidad en el flujo de potencia, poniendo márgenes que faciliten lograr la optimización.

4.2.1. Balance de potencias

El flujo de potencia debe satisfacer con restricciones de igualdad al ubicar la GD teniendo así,

$$\sum_{i=1}^n PGD_i + P_{subestacion} = P_{carga} + P_{perdidas} \quad (3)$$

Dónde:

PGD_i : Potencia de generación distribuida en el nodo i en (kW).

$P_{subestacion}$: Potencia de generación activa en (kW).

P_{carga} : Potencia activa total de carga en (kW).

$P_{perdidas}$: Potencia total de pérdidas del sistema en (kW).

La potencia generada asumiendo también la potencia de generación distribuida, debe ser igual a la potencia consumida más las pérdidas en las líneas, esto por el principio de equilibrio [57].

4.2.2. Límites de capacidad de potencia de la generación distribuida

Las restricciones de desigualdad vienen dadas por:

$$PGD_{min} \leq \sum_i^n PGD_i \leq PGD_{max} \quad (4)$$

Dónde:

PGD_i : Potencia activa de generación distribuida en el nodo i en (kW).

PGD_{min} : Potencia activa mínima de generación distribuida en (kW).

PGD_{max} : Potencia activa máxima de generación distribuida en (kW).

La capacidad a instalar de la GD dada entre un valor mínimo PGD_{min} asumido como un 30% de la carga total del sistema, y un valor máximo PGD_{max} asumido como la suma de la carga total del sistema más las pérdidas totales.

4.2.3. Límites de voltajes

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (5)$$

Dónde:

V_i : Voltaje en el nodo i .

V_{min} : Límite mínimo de voltaje en (p.u).

V_{max} : Límite máximo de voltaje en (p.u).

Los voltajes en cada nodo V_i deben estar de un margen establecido del $\pm 10\%$ del valor nominal, teniendo un valor mínimo V_{min} de 0,9 p.u. y un valor máximo de V_{max} de 1,1 en p.u [58], [59].

4.3. Indicadores

Los indicadores son variables de decisión a minimizar, por ejemplo, sirven para seleccionar los nodos más vulnerables del sistema a ubicar GD, así también muestran el comportamiento de cada uno de los nodos.

4.3.1. Desviación promedio de voltaje

$$DPV = \sum_{i=1}^n \frac{|V_{nom} - V_i|}{n} \quad (6)$$

Dónde:

DPV : Desviación promedio de voltaje en (p.u).

V_{nom} : Voltaje nominal en (p.u)

V_i : Voltaje en el nodo i en (p.u)

n : Número de nodos del sistema.

La desviación promedio de voltaje nos indica un valor medio de como los voltajes están alejados del valor nominal 1 en p.u, por lo cual este indicador es reducido para que no exista mayor diferencia entre el DPV y el valor nominal de voltaje.

4.3.2. Máxima desviación de voltaje

$$MDV = \max |V_{nom} - V_i|; i = 1 \dots n \quad (7)$$

Dónde:

MDV : Máxima desviación de voltaje en (p.u).

V_{nom} : Voltaje nominal en (p.u).

V_i : Voltaje en el nodo i en (p.u).

n : Número de nodos del sistema.

La máxima desviación de voltaje nos muestra el valor de desviación más alejado del valor de voltaje nominal 1 p.u, al reducir este valor se demuestra que los voltajes en los nodos tienen niveles satisfactorios.

4.3.3. Factor de potencia en cada nodo

$$FDP_i = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Q_i}{P_i} \right); i = 1 \dots n \quad (8)$$

Dónde:

FDP_i : Factor de potencia en el nodo i .

Q_i : Potencia reactiva en el nodo i en (kVAr).

P_i : Potencia activa en el nodo i en (kW).

n : Número de nodos del sistema.

El factor de potencia es un importante indicador de calidad en un sistema de distribución, este valor para su mejoramiento debe tener una inyección de reactivos al sistema, al tener una inyección solo de potencia activa, reduce este factor.

5. Sistema propuesto de distribución radial

El flujo de potencia se lo realiza en un sistema de distribución radial de 15 nodos, simulados en los programas computacionales DIgSILENT Power Factory y Matlab.

El sistema de distribución tiene un factor de potencia de 0,7 en el punto de conexión a la subestación, los valores reales son utilizados en la simulación de DIgSILENT Power Factory y para Matlab son utilizados valores en por unidad, con una base de 500 kVA y un voltaje de 11 kV del sistema [60].

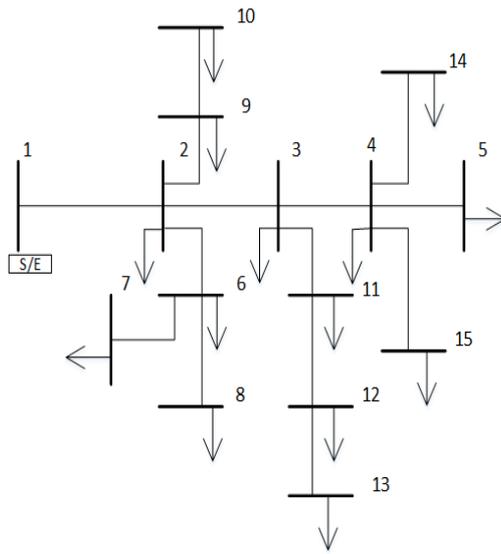


Figura 2. Sistema de Distribución Radial de 15 nodos.

Tabla 2: Valores reales de potencias del sistema de 15 nodos

N° Nodo	S [kVA]	P [kW]	Q [kVAr]	FP
1	0	0	0	-
2	63	44,1	44,99	0,79
3	100	70	71,41	0,79
4	200	140	142,82	0,79
5	63	44,1	44,99	0,79
6	200	140	142,82	0,79
7	200	140	142,82	0,79
8	100	70	71,41	0,79
9	100	70	71,41	0,79
10	63	44,1	44,99	0,79
11	200	140	142,82	0,79
12	100	70	71,41	0,79
13	63	44,1	44,99	0,79
14	100	70	71,41	0,79
15	200	140	142,82	0,79

Tabla 3: Valores reales de entrada de líneas del sistema de 15 nodos

N° Rama	Barra inicial	Barra final	R [Ω]	X [Ω]
1	1	2	1,353	1,323
2	2	3	1,170	1,144
3	3	4	0,841	0,822
4	4	5	1,523	1,027
5	2	9	2,013	1,357
6	9	10	1,686	1,137
7	2	6	2,557	1,724
8	6	7	1,088	0,734
9	6	8	1,251	0,844
10	3	11	1,795	1,211
11	11	12	2,448	1,651
12	12	13	2,013	1,357
13	4	14	2,230	1,504
14	4	15	1,1970	0,807

Tabla 4: Valores en por unidad de entrada de líneas del sistema de 15 nodos

N° Rama	Barra inicial	Barra final	r p.u	x p.u
1	1	2	0,005	0,005
2	2	3	0,004	0,004
3	3	4	0,003	0,003
4	4	5	0,006	0,004
5	2	9	0,008	0,005
6	9	10	0,007	0,004
7	2	6	0,010	0,007
8	6	7	0,004	0,003
9	6	8	0,005	0,003
10	3	11	0,007	0,005
11	11	12	0,010	0,006
12	12	13	0,008	0,005
13	4	14	0,009	0,006
14	4	15	0,004	0,003

5.1. Voltajes iniciales obtenidos en Matlab y DIgSILENT.

En la tabla 5 se presenta una comparación de resultados de una corrida flujo inicial realizado en los programas Matlab y DIgSILENT Power Factory que obtienen valores de voltajes

en los nodos similares dando validez al desarrollo del flujo de potencia por NR realizado en Matlab.

Tabla 5: Valores en por unidad de voltajes comparación Matlab y DIgSILENT

N° Nodo	V p.u MATLAB	V p.u DIgSILENT
1	1,000	1,000
2	0,971	0,971
3	0,957	0,957
4	0,951	0,951
5	0,950	0,950
6	0,958	0,958
7	0,956	0,956
8	0,957	0,957
9	0,968	0,968
10	0,967	0,967
11	0,950	0,950
12	0,946	0,946
13	0,945	0,945
14	0,949	0,949
15	0,948	0,948

5.2. Pseudocódigo del flujo de potencia

El flujo de potencia resuelto por el método de Newton-Raphson (NR) completo, fue implementado en Matlab para obtener los valores de voltajes en cada nodo, potencias activas y reactivas, factor de potencia, pérdidas de cada línea y complementar con PSO para la implementación de GD.

Pseudocódigo Algoritmo Flujo de Potencia por Newton-Raphson

Paso 1: Asignación de recursos impedancia y resistencia de líneas, generación y carga, tipos de barra.

Paso 2: Cálculo de la matriz Ybarra

Paso 3: Cálculo ΔP y ΔQ

$$\Delta P = p^{neta} - p^{calc}$$

$$\Delta Q = q^{neta} - q^{calc}$$

$$P_i^{calc} = G_{ii} * V_i^2 + \sum_j^n V_i * V_j [G_{ij} * \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} * \sen(\theta_{ij})]$$

$$Q_i^{calc} = -B_{ii} * V_i^2 + \sum_j^n V_i * V_j [G_{ij} * \sen(\theta_{ij}) - B_{ij} * \cos(\theta_{ij})]$$

Paso 4: Formar la Matriz Jacobiana.

$$J = \begin{bmatrix} J11 & J12 \\ J21 & J22 \end{bmatrix}$$

$$J11 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix}$$

$$J12 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{pqn}} |V_{pq1}| \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_{pqn}} |V_{pq1}| \end{bmatrix}$$

$$J21 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix}$$

$$J22 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial Q_{pq1}}{\partial V_{pqn}} |V_{pq1}| \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial V_{pq1}} |V_{pq1}| & \dots & \frac{\partial Q_{pqn}}{\partial V_{pqn}} |V_{pqn}| \end{bmatrix}$$

Paso 7: Cálculo de los elementos de la matriz Jacobiana.

Elementos fuera de la diagonal

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i (G_{ij} \sen \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) V_j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sen \theta_{ij}) V_j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| = -\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j}$$

Elementos de la diagonal

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| = Q_i - B_{ii} * V_i^2$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| = P_i + G_{ii} * V_i^2$$

Paso 8: Cálculo del vector de correcciones

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} V * \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{(k)} * \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(k+1)} = - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(k)}$$

Paso 9: Cálculo de los nuevos δ y V

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(k)}$$

Paso 10: Comparación con los errores si cumple sigue al paso 11 sino repite el paso 5.

$$|\Delta P_i^k| \leq \varepsilon = 0,001 \text{ y } |\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon = 0,001.$$

Paso 11: Fin

El flujo de potencia por NR primero realiza el cálculo de la matriz Y de barra, importante para seguir con los pasos hasta llegar a los valores calculados de potencias, voltajes y ángulos en cada nodo que facilitan el cálculo de pérdidas en cada línea y totales del sistema tanto activa como reactiva, factores de potencia en cada nodo, además con los valores de voltajes se calcula la desviación promedio de voltajes y la máxima desviación de voltaje, este proceso es importante para acompañarlo con la ubicación de GD.

6. Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

La optimización por enjambre de partículas es una Meta heurística que se basa en el comportamiento de un grupo de partículas que exploran un espacio de búsqueda para encontrar una solución óptima en un máximo número de iteraciones ($iter_{max}$), teniendo en cuenta tanto su experiencia individual, como la experiencia de un líder que se convierte en la mejor experiencia del

grupo, se puede iniciar como un grupo aleatorio de valores en su posición $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{in})$ y velocidad $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{in})$.

La función de vuelo mostrada en la ecuación 9, es la ecuación para obtener la velocidad de las partículas, considerando límites para que la exploración no se demasiado extensa, o al contrario el espacio de búsqueda este siempre cerca de un resultado considerado como óptimo desde el inicio de la búsqueda [61].

$$v_i^{k+1} = \omega * v_i^k + c_1 r_1 * (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 * (gbest_i - x_i^k) \quad (9)$$

Dónde:

v_i^k : Velocidad de la partícula.

v_i^{k+1} : Velocidad de la partícula actualizada.

c_1 y c_2 : Constantes de aprendizaje.

r_1 y r_2 : Valores aleatorios.

Para cumplir lo mencionado anteriormente, se debe considerar una inercia que vaya cambiando con el número de iteraciones, hasta llegar a la iteración máxima, aplicando la ecuación 10 y asumiendo valores de peso de inercia máximo y mínimo de 0,9 y 0,4 respectivamente [62].

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (10)$$

Dónde:

ω : El peso de la inercia

ω_{max} : Peso de inercia máximo

ω_{min} : Peso de inercia mínimo

$iter_{max}$: Iteración máxima

$iter$: Iteración actual

Al tener la velocidad de la partícula podemos actualizar su posición mediante la siguiente ecuación:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

Dónde:

x_i^{k+1} : Posición de la partícula actualizada

x_i^k : Posición de la partícula.

6.1. Pseudocódigo de optimización por enjambre de partículas

El PSO permite implementar la ubicación y capacidad de GD, cumpliendo con la función de minimizar costos de una manera efectiva y satisfactoria, permite manejar variables múltiples en este caso los nodos a seleccionar y la capacidad de GD fotovoltaica de inyección solo de potencia activa, el PSO permite evaluar cada partícula en la función objetivo y satisfacer con las restricciones para seleccionar la mejor, hasta realizar un número máximo de iteraciones y todo esto combinado con un flujo de potencia por Newton-Raphson realizado en Matlab.

Pseudocódigo Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas

Paso 1: Asignación de valores datos de impedancias de líneas y potencias en cada nodo.

Paso 2: Cálculo de flujo inicial de potencia por Newton-Raphson.

Paso 3: Cálculo de pérdida total de potencia.

$$P_{perdidas} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n I_{ij}^2 * R_{ij}$$

Paso 4: Inicializar el tamaño de la población y el número de iteraciones máximo ($iter_{max}$).

Paso 5: Generar la población con una posición y velocidad aleatoria para el tamaño y ubicación de las GD.

$$\text{Posición } x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{in})$$

$$\text{Velocidad } v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{in})$$

Paso 6: Evaluar cada partícula en la función objetivo.

Paso 7: Inicializar cada partícula como la mejor partícula individual (Pmejor).

Paso 8: Asigna la mejor partícula grupal (Gmejor) a la mejor de las Pmejor.

Paso 9: Considerar valores máximos y mínimos de potencia de inyección de GD.

$$PGD_{min} \leq PGD_i \leq PGD_{max}$$

Paso 10: Actualizar la velocidad de cada partícula y su posición.

$$\text{Velocidad } v_i^{k+1} = \omega * v_i^k + c_1 r_1 * (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 * (gbest_i - x_i^k)$$

$$\text{Posición } x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

Paso 11: Evaluar la partícula en la función objetivo mediante el flujo de potencia por NR.

Paso 12: Considerar límites de voltajes y minimización de pérdidas.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$$

$$P_{perdidas} < P_{perdidas} \text{ } i-1$$

Paso 13: Actualiza la Pmejor y Gmejor.

Si $iter < iter_{max}$ regresa al paso 4, sino pasa al paso número 15.

Paso 14: Visualizar la solución óptima.

Se presenta valores de Costo, $P_{perdidas}$, V_i , DPV, MDV, PGD, nodos óptimos.

Paso 15: Fin

El algoritmo PSO con implementación de GD primero crea un grupo de partículas aleatorias para encontrar los nodos óptimos a ubicar la GD, también el tamaño óptimo de la misma, después evalúa cada partícula en la función objetivo de costos hasta llegar a tener la partícula óptima es decir la Gmejor que es la mejor de un grupo de partículas individuales mejores Pmejor, luego este proceso se realiza con una función de vuelo y actualización de las partículas ayudando a explorar en un espacio de búsqueda hasta alcanzar la mejor solución al problema, por ultimo cumpliendo con la minimización de la función objetivo, dentro de los márgenes propuestos de las restricciones y satisfaciendo un número máximo de iteraciones del proceso, para presentar valores óptimos de costos, pérdidas de potencia, voltajes mejorados en cada nodo calculados mediante NR y mostrando reducción de

máxima desviación de voltajes y desviación promedio de voltaje.

7. Análisis de Resultados

El PSO utiliza un buen espacio de exploración tanto para el tamaño de la GD como para la selección del nodo, por lo cual utilizamos varias combinaciones de poblaciones y número máximo de iteraciones llegando a valores aconsejables que no incurran en una búsqueda demasiado extensa y redundante, en este caso se utilizó una población de 50 partículas con un número de iteraciones máximo de 30, como valores más adecuados para tener una apropiada ejecución en Matlab.

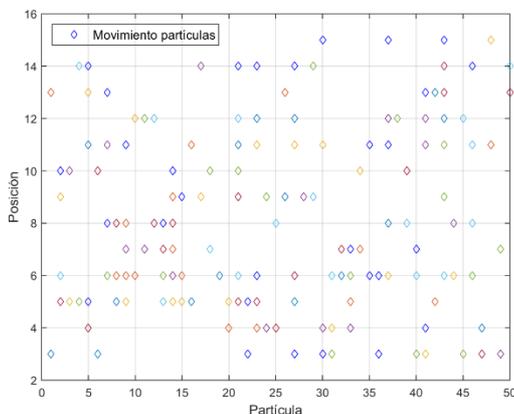


Figura 3. Movimientos de las partículas de selección del nodo.

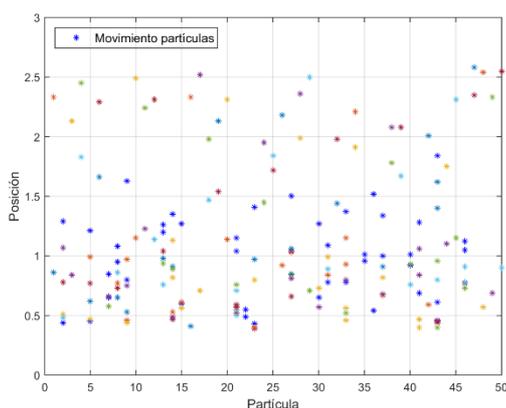


Figura 4. Movimiento de las partículas de capacidad de GD.

El movimiento de partículas del PSO inicializado con una posición aleatoria en el espacio de búsqueda, y en cada iteración las partículas suman una

velocidad hasta llegar a un punto óptimo, como podemos apreciar en las figuras 3 y 4 respectivamente, esto sucede tanto al escoger una ubicación en los nodos del sistema y la capacidad de la GD.

7.1. Minimización de costos

El costo mínimo al implementar generación distribuida en el sistema de distribución es el enfoque principal y contribución de este documento, en el algoritmo en cada iteración busca llegar a optimizar este objetivo como podemos observar en la figura 5, donde para alcanzar la función objetivo de costos desde un inicio y en cada iteración el valor va cambiando hasta encontrar el óptimo, así observamos que alcanza un costo de \$ 1172615,8636 en la iteración 26 y se mantiene como el costo óptimo hasta la iteración máxima, dando solución al problema planteado.

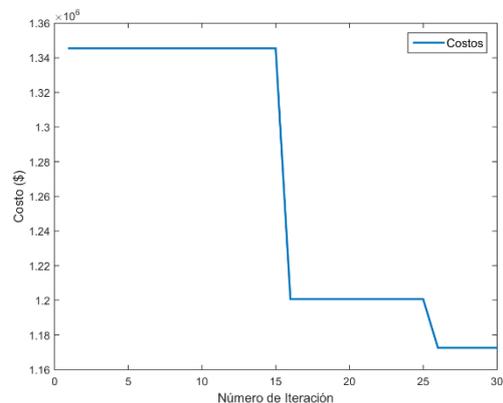


Figura 5. Minimización de costos en función de las iteraciones del PSO.

7.2. Ubicación óptima de GD

El número de GD máximo que se utilizó es de 2, por estar colocadas en un sistema de distribución relativamente pequeño, en la solución obtenida son los nodos 4 y 8 que están presentados en la tabla 6, se eligió ese valor máximo de GD, porque se pudo observar que al tener una colocación de una sola GD existió una reducción considerable de costos, pero no una notable reducción de pérdidas en el sistema, y al contrario al aumentar un mayor número de GD a

3, se reducía gran porcentaje las pérdidas, pero con costos muy elevados lo cual no es el objetivo de esta implementación.

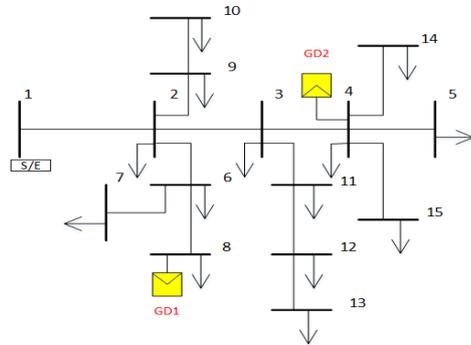


Figura 6. Sistema de Distribución Radial de 15 nodos con ubicación de GD.

7.3. Dimensionamiento de las GD

Las capacidades de GD resultantes son de 265 y 350 kW respectivamente mostradas en la tabla 6, no toma valores muy altos que representaría una sobredimensión con perjuicios económicos, sin embargo, tampoco escoge valores demasiados pequeños que causaría un incumplimiento de mejorar los objetivos propuestos.

Tabla 6: Comparación resultados con la implementación de GD

Caso	Nodos ubicación GD	Capacidad de la GD (kW)	Costos (\$)	Pérdidas (kW)	Reducción de Pérdidas (%)	Tiempo de ejecución(s)
Caso base	0	0	-	61,8027	-	-
2 GD	8;4	265, 350	117261,8636	39,3998	36,2490	5,158110

7.4. Análisis de Pérdidas de Potencia

Las pérdidas totales de potencia en el sistema iniciales son de 61,8027 kW sin la implementación de GD, y tener una solución óptima con GD tenemos un valor de 39,3998 kW en pérdidas, es decir que existe reducción de 36,2490 %, mostrados en la tabla 6, este valor de reducción de pérdidas se debe a tener una solución óptima de minimización de costos, pero con un valor significativo en reducción de pérdidas.

Tabla 7: Potencia Activa en cada línea

Línea	Potencias Activas [kW]	
	Sin GD	Con GD
1	37,7673	23,3086
2	11,2072	6,9826
3	2,4614	1,2343
4	0,0554	0,0539
5	0,4712	0,4640
6	0,0595	0,0586
7	5,7877	3,0395
8	0,3940	0,3832
9	0,1136	0,4737
10	2,1707	2,1205
11	0,6005	0,5866
12	0,0739	0,0721
13	0,2044	0,1987
14	0,4358	0,4235

Las pérdidas en cada nodo disminuyen al implementar GD en el sistema que podemos observar en la tabla 7, donde hay una mayor reducción de pérdidas son en las ramas 1, 2, 3 y 7 con valores de reducción de su valor inicial en 38,2837%, 37,6947%, 49,8509% y 47,4842% respectivamente.

Esto debido a que la generación no solo se concentra en un solo nodo disminuyendo las pérdidas totales del sistema, esto se puede apreciar en la Figura 7 en la gráfica de barras de las líneas con la implementación de GD.

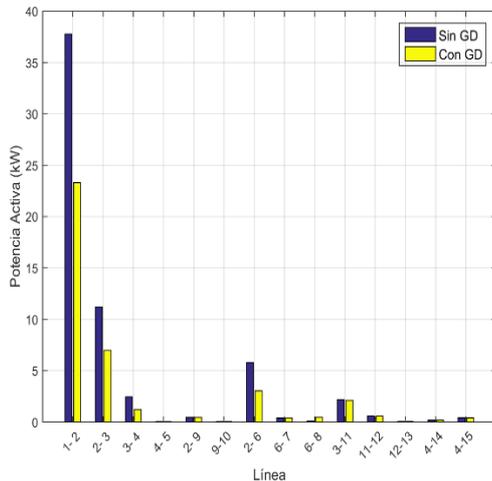


Figura 7. Potencia activa en cada línea, comparación con GD.

7.5. Análisis de voltajes

El perfil de voltaje en el sistema de distribución al implementar GD los niveles de voltajes se ven mejorados como muestra la tabla 8, con valores dentro de los rangos establecidos de 0,91 y 1,1 en p.u, El valor de voltaje mínimo se encuentra en el nodo 13 con un valor de 0,9557 p.u.

Tabla 8: Voltajes en cada nodo

Voltajes p.u		
Nodo	Sin GD	Con GD
1	1,0000	1,0000
2	0,9711	0,9786
3	0,9566	0,9677
4	0,9508	0,9646
5	0,9498	0,9636
6	0,9581	0,9715
7	0,9559	0,9693
8	0,9568	0,9730
9	0,9678	0,9753
10	0,9668	0,9742
11	0,9499	0,9611
12	0,9458	0,9570
13	0,9445	0,9557
14	0,9485	0,9623
15	0,9484	0,9621

Existe un aumento de niveles de voltajes en los nodos donde se ubican la GD nodos 4 y 8, a valores de 0,9646 y 0,9730 respectivamente, de igual manera los nodos más alejados de la red como son los nodos 5 y 15 que tenían valores iniciales de 0,9498 y 0,9484, suben a valores de 0,9636 y 0,9621 respectivamente, constatando que se incrementan considerablemente los voltajes en los nodos del sistema al incluir GD.

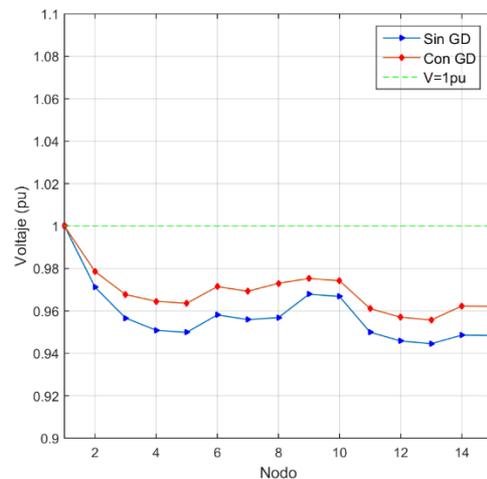


Figura 8. Perfil de voltajes, comparación con GD.

En la figura 8 se aprecia una comparación, donde la línea de los voltajes sin GD muestra los voltajes en el caso inicial, y al tener una compensación estos niveles de voltajes se elevan, pero manteniéndose dentro de los límites propuestos como se distingue en la línea con GD, que presenta valores superiores a la línea sin GD en cada uno de los nodos del sistema.

7.6. Análisis de desviaciones de voltaje

En la tabla 9 distinguimos que las desviaciones de voltajes con implementación de GD son reducidas, puesto que van de la mano con el aumento del perfil de voltajes, en el sistema sin GD se tiene una máxima desviación de voltaje de 0,0555 en el nodo 11 y al implementar GD existe un valor menor de desviación máxima de 0,0443 en el nodo 12, un ejemplo de la disminución se tiene en el nodo 7 con un valor inicial de 0,0441, y con la implementación de GD pasa a un valor de 0,0307 teniendo una reducción considerable de 37,4933%.

Tabla 9: Desviaciones de voltajes en cada nodo

Desviaciones de voltajes		
Nodo	Sin GD	Con GD
1	0	0
2	0,0288	0,0214
3	0,0433	0,0323
4	0,0491	0,0354
5	0,0501	0,0364
6	0,0419	0,0285
7	0,0441	0,0307
8	0,0432	0,0270
9	0,0321	0,0247
10	0,0332	0,0258
11	0,0500	0,0389
12	0,0542	0,0430
13	0,0555	0,0443
14	0,0514	0,0377
15	0,0516	0,0379

La desviación promedio de voltaje que se tiene sin tener GD en el sistema es de 0,0419, podemos ver en la figura 9 donde existe una diferencia entre la curva sin GD donde las desviaciones en cada nodo forman un área mayor al área que forman las desviaciones de voltaje con GD por estar disminuidas en cada nodo, obteniendo un valor reducido de desviación promedio de 0,0309 resultado de la disminución de desviación en cada nodo.

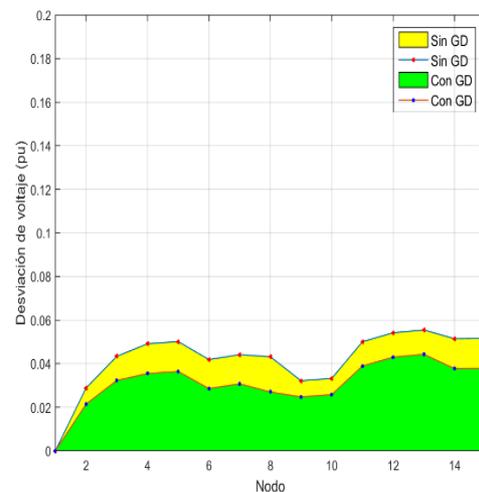


Figura 9. Desviaciones de voltaje, comparación con GD.

7.7. Análisis de potencia reactiva en las líneas

La potencia reactiva en este caso no cuenta con una inyección al haber por tipo de GD seleccionado. Pero la inyección de potencia activa causa flujos de corrientes más cortos en las líneas ayudando a minimizar las pérdidas de potencia reactiva, teniendo en las ramas 1, 2, 3 y 7 valores de reducción mas significativos en 38,2837%, 37,6947% y 49,8509% de su valor original respectivamente como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10: Potencia reactiva en cada línea

Potencias Reactivas [kVAr]		
Línea	Sin GD	Con GD
1	37,0929	22,8924
2	10,9737	6,8372
3	2,3910	1,1991
4	0,0370	0,0359
5	0,3179	0,3131
6	0,0399	0,0393
7	3,8767	2,0359
8	0,2627	0,2555
9	0,0764	0,3188
10	1,4667	1,4328
11	0,4043	0,3949
12	0,0498	0,0487
13	0,1378	0,1339
14	0,2935	0,2852

En la figura 10 se observa que la gráfica de barras con GD tienen valores reducidos de potencias reactivas en las líneas en comparación a la gráfica de barras iniciales sin GD, resultado de haber liberados flujos en estas líneas y por no concentrar toda la generación en un solo nodo.

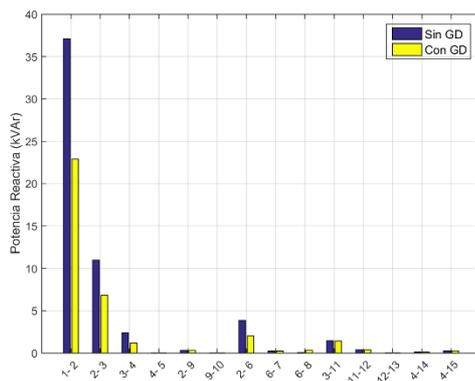


Figura 10. Potencia reactiva en cada línea, comparación con GD.

7.8. Análisis de factor de potencia en los nodos

El factor de potencia en el sistema es de gran importancia como un indicador de confiabilidad en el suministro de

energía, al implementar solo generación de potencia activa por medio de GD como son el tipo fotovoltaico, el factor de potencia en el nodo de conexión a la subestación se reduce en un valor considerable de 0,7015 a 0,4511 mostrado en la Tabla 11, debido a una potencia inyectada solo de activa.

Tabla 11: Factor de potencia en cada nodo

Factor de potencia		
Nodo	Sin GD	Con GD
1	0,7015	0,4511
2	0,6999	0,6999
3	0,7001	0,7001
4	0,6999	0,8268
5	0,6999	0,6999
6	0,6999	0,6999
7	0,6999	0,6999
8	0,7001	0,9390
9	0,7001	0,7001
10	0,6999	0,6999
11	0,6999	0,6999
12	0,7001	0,7001
13	0,6999	0,6999
14	0,7001	0,7001
15	0,6999	0,6999

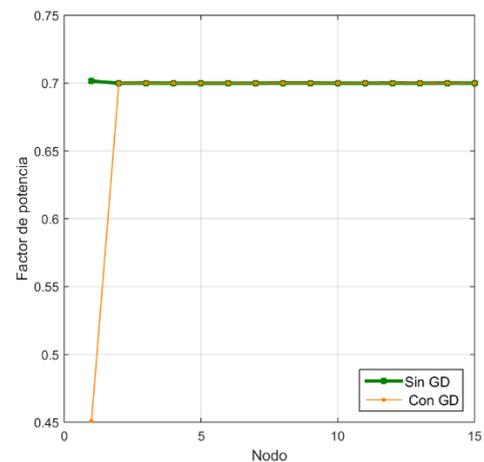


Figura 11. Factor de potencia en cada nodo, comparación con GD.

En la figura 11 tenemos los factores de potencia en cada nodo, apreciamos que en la línea sin GD tiene un valor

promedio de 0,7 en cada nodo, en la línea con GD, existe una reducción en el nodo 1, este valor bajo de factor de potencia se debe a tener una inyección solo de potencia activa al sistema y mantener una variación de potencia reactiva no considerable manteniéndose casi constante. En el triángulo de potencias, al tener una potencia menor del nodo 1 porque la GD inyecta potencia activa al sistema en los nodos óptimos escogidos, y mantener la misma potencia reactiva se obtiene un ángulo mayor por lo cual el factor de potencia disminuye apreciable en el primer nodo.

8. Conclusiones

La metodología utilizada para el cálculo del flujo de potencia mediante NR fue verificada con una comparación con el software DIGSILENT Power Factory obteniendo valores similares de voltajes en cada nodo, facilitando la implementación del PSO ubicando óptimamente GD en el sistema de distribución.

La implementación de múltiple generación distribuida mediante PSO optimiza el flujo de potencia de un sistema radial, cumpliendo de gran manera con las condiciones propuestas en tiempos adecuados de programación, demostrando ser un método versátil y práctico para cumplir con el problema de optimización propuesto.

La GD ubicada en función de un objetivo principal de minimizar costos realizado en este trabajo, tiene la ventaja con otros trabajos estudiados que se enfocan solamente en minimización de pérdidas, y contribuye a trabajos que quieran implementar múltiple GD con inyección de potencia reactiva.

El sistema de distribución presentó un valor alto de pérdidas de potencia, pero al implementar GD se reduce de manera considerable las pérdidas sin salirse de la minimización de costos, por lo cual incluir un factor de costos valorando las pérdidas fue de gran importancia para lograr este objetivo, así como la capacidad de la GD no extremarla a valores que aumenten los costos de implementación.

Los niveles de voltaje fueron elevados cumpliendo los límites permitidos y esto se observó con los indicadores de DPV Y MDV reducidos en la optimización, así el perfil de voltajes fue mejorado demostrando que es de gran importancia la inclusión de GD al sistema de distribución.

9. Trabajos futuros

Este trabajo da paso a los siguientes trabajos. Implementación y selección de tecnología de generación distribuida con inyección de potencia reactiva por ejemplo generación eólica que a diferencia de la generación fotovoltaica permite tener una inyección de potencia activa y reactiva en el sistema.

Mejorar el factor de potencia inyectando reactivos cumpliendo con márgenes adecuados de un sistema de distribución.

Realizar una combinación de ubicación óptima de generación distribuida fotovoltaica con banco de capacitores mejorando perfiles de voltaje, minimizar pérdidas y mejorar el factor de potencia cumpliendo con una minimización de costos.

Complementar la generación distribuida con una óptima ubicación y dimensionamiento de tecnologías de almacenamiento, que guarde la generación producida y utilizarla en horas de demanda pico, elevando condiciones de eficiencia energética.

10. Referencias

- [1] J. Vasco and A. Aguila, "Design of Automatic Reclosing scheme in distribution feeders," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2587–2593, 2015.
- [2] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, "Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador," *Proc. 2015 IEEE Thirty Fifth Cent. Am. Panama Conv.*, no. Concapan XXXV, pp. 373 – 378, 2015.
- [3] J. Lavaei, D. Tse, and B. Zhang, "Geometry of Power Flows and Optimization in Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 572–583, Mar. 2014.
- [4] T. Morstyn, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "Dynamic Optimal Power Flow for DC Microgrids with Distributed Battery Energy Storage Systems," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, pp. 1–6.
- [5] G. Liu, M. Starke, X. Zhang, K. Tomsovic, C. Max, and P. D. Max, "A MILP-Based Distribution Optimal Power Flow Model for Microgrid," *Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2016.
- [6] S. K. Joshi and V. H. Ghanchi, "SOLUTION OF OPTIMAL POWER FLOW SUBJECT TO SECURITY CONSTRAINTS BY AN ANT COLONY OPTIMIZATION," in *Third International Conference on Computational Intelligence and Information Technology (CIIT 2013)*, 2013, pp. 590–597.
- [7] C. Bustos, D. Watts, and H. Ren, "MicroGrid Operation and Design Optimization with Synthetic Wind and Solar Resources," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 10, no. 2, pp. 1550–1562, 2012.
- [8] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, Aug. 2013.
- [9] M. Dixit, P. Kundu, and H. R. Jariwala, "Optimal placement and sizing of DG in Distribution system using Artificial Bee Colony Algorithm," in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1–6.
- [10] S. Sarfaraz, A. Bansal, and S. Singh, "OPTIMAL ALLOCATION AND SIZING OF DISTRIBUTED GENERATION FOR POWER LOSS REDUCTION," in *International Conference & Workshop on Electronics & Telecommunication Engineering (ICWET 2016)*, 2016, p. 6 .–6 .
- [11] M. Sriramulu and M. R. Rahul, "Optimal Placing and Sizing of DG in a Distribution System for Voltage Stability Improvement," in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 2016, pp. 1469–1475.
- [12] P. Thota and M. Venkata Kirthiga, "Optimal Siting & Sizing of Distributed Generators in Micro-grids," in *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2012,

- pp. 730–735.
- [13] M. Bazrafshan and N. Gatsis, “Placing and Sizing distributed Photovoltaic Generators for Optimal Reactive Power Compensation,” *2015 IEEE Glob. Conf. Signal Inf. Process. Glob. 2015*, pp. 1136–1140, 2016.
- [14] L. F. Grisales, A. Grajales, O. D. Montoya, S. Member, R. A. Hincapié, and M. Granada, “Optimal Location, Sizing and Operation of Energy Storage in Distribution Systems Using Multi-objective Approach,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 6, pp. 1084–1090, 2017.
- [15] G. Carpinelli, G. Celli, S. Mocci, F. Mottola, F. Pilo, and D. Proto, “Optimal Integration of Distributed Energy Storage Devices in Smart Grids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 985–995, Jun. 2013.
- [16] M. Piumetto, J. C. Gomez, and J. Pucheta, “Dynamic Programming for the Control of Power Quality in Inbalanced Medium Voltage Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, no. 7, pp. 1221–1227, Oct. 2014.
- [17] V. Villa and A. Águila, “Óptima Gestión Y Regulación De Voltaje En Microredes De Distribución Con Generación Distribuida Y Almacenamiento De Energía,” 2017.
- [18] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Energy storage systems—Characteristics and comparisons,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1221–1250, Jun. 2008.
- [19] B. Mahdad and K. Srairi, “Adaptive differential search algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 1266–1282, 2016.
- [20] S. Jain, S. Kalambe, G. Agnihotri, and A. Mishra, “Distributed generation deployment: State-of-the-art of distribution system planning in sustainable era,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. April, pp. 363–385, 2017.
- [21] 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. October 2016, pp. 293–312, 2017.
- [22] F. Castillo and A. Águila, “Análisis de estabilidad de tensión en redes de distribución con generación distribuida,” 2016.
- [23] D. T. Trebelle, “LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN ESPAÑA,” 2006.
- [24] O. Babacan, W. Torre, and J. Kleissl, “Siting and sizing of distributed energy storage to mitigate voltage impact by solar PV in distribution systems,” *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 199–208, 2017.
- [25] A. Bayat, A. Bagheri, and R. Noroozian, “Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 360–371, 2016.
- [26] M. Zeraati, M. E. Hamedani Golshan, and J. Guerrero, “Distributed Control of Battery

- Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks with High PV Penetration,” *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2016.
- [27] D. Torres Riascos, E. Inga Ortega, and A. Aguila Tellez, “Advanced metering infrastructure for microgeneration in rural zones using TV white spaces based on spectrum opportunistic,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3813–3819, 2015.
- [28] M. Jamil and A. S. Anees, “Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economical benefits,” *Energy*, vol. 103, pp. 231–239, 2016.
- [29] S. Kaur, G. Kumbhar, and J. Sharma, “A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 609–617, 2014.
- [30] A. A. Abou El-Ela, M. T. Mouwafi, A.-M. Kinawy, and R. A. El-Sehiemy, “Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 5, pp. 1209–1221, Apr. 2016.
- [31] M. Farasat, S. Mehraeen, A. Arabali, and A. Trzynadlowski, “GA-based optimal power flow for microgrids with DC distribution network,” in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 3372–3379.
- [32] A. Uniyal and A. Kumar, “Comparison of optimal DG placement using CSA, GSA, PSO and GA for minimum real power loss in radial distribution system Ankit,” *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [33] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, “Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations,” *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1311–1324, Feb. 2017.
- [34] Y. Li, B. Feng, G. Li, J. Qi, D. Zhao, and Y. Mu, “Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage,” *Appl. Energy*, no. April, pp. 0–1, 2017.
- [35] P. D. Prasad, V. C. V. Reddy, and T. G. Manohar, “Optimal renewable resources placement in distribution networks by combined power loss index and whale optimization algorithms,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2017.
- [36] S. Chen, Z. Chen, X. Zhang, C. Su, and W. Hu, “Optimal reactive power and voltage control in distribution networks with distributed generators by fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimisation method,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 11, pp. 1096–1103, 2015.
- [37] M. Martinez, M. G. Molina, and P. E. Mercado, “Optimal Storage Technology Selection and Sizing for Providing Reserve to Power Systems with High Penetration of Wind Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 9, pp. 2983–2990, 2015.

- [38] P. V. Babu and S. P. Singh, "Optimal Placement of DG in Distribution network for Power loss minimization using NLP & PLS Technique," *Energy Procedia*, vol. 90, no. December 2015, pp. 441–454, 2016.
- [39] G. Liu, B. Xiao, M. Starke, B. Ollis, D. King, P. Irminger, and K. Tomsovic, "Advanced Energy Storage Management in Distribution Network," *Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2016.
- [40] D. Wu, T. Yang, A. A. Stoorvogel, and J. Stoustrup, "Distributed Optimal Coordination for Distributed Energy Resources in Power Systems," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 414–424, Apr. 2017.
- [41] Y. Zhang, K. Meng, F. Luo, Z. Y. Dong, K. P. Wong, and Y. Zheng, "Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 8, pp. 1105–1113, 2016.
- [42] R. E. Perez Pineda, R. Rodrigues, and A. Aguila Tellez, "Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 460–466, 2018.
- [43] R. Perez, E. Inga, A. Aguila, C. Vásquez, L. Lima, A. Vilorio, and M.-A. Henry, "Fault Diagnosis on Electrical Distribution Systems Based on Fuzzy Logic," in *Advances in Swarm Intelligence*, 2018, pp. 174–185.
- [44] P. Quintana-Quiros and H.-G. Yeh, "Power Flow Optimization Methods for Distribution Systems," in *2015 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC)*, 2015, pp. 18–23.
- [45] M. F. J. De Medeiros and M. C. P. Filho, "Optimal power flow in distribution networks by Newton's optimization methods," *ISCAS '98. Proc. 1998 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (Cat. No.98CH36187)*, vol. 3, pp. 505–509, 1998.
- [46] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez, R. C. Hincapié-Reyes, and J. W. González-Sánchez, "Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, 2017.
- [47] H. R. E. H. Boucekara, A. E. Chaib, M. A. Abido, and R. A. El-Sehiemy, "Optimal power flow using an Improved Colliding Bodies Optimization algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 42, pp. 119–131, 2016.
- [48] S. N. Chaphekar, P. R. Karad, and A. A. Dharme, "Optimal power flow for power management in Microgrid," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1–5.
- [49] M. Viracocha and A. Águila, "Óptimo Dimensionamiento Y Ubicación De Bancos De Capacitores En Redes De Distribución Usando Algoritmo De Colonia De Hormigas," 2018.
- [50] E. M. García Torres, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, "Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlo algorithms and Markov Chains (MCMC)," *Power Eng. Conf.*

- (UPEC), 2016 51st Int. Univ., no. Mcmc, pp. 1 – 6, 2016.
- [51] J. Rojas and A. Águila, “Óptima Compensación De La Potencia Reactiva En Redes De Distribución Eléctrica Basado En Simulated Annealing,” 2017.
- [52] F. A. Castillo Munoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, Nov. 2016.
- [53] J. Inachonta and A. Águila, “Óptimo Flujo De Potencia Reactiva En Redes Eléctricas De Distribución Con Generación Distribuida,” 2017.
- [54] O. Amanifar and M. E. H. Golshan, “Optimal DG allocation and sizing for mitigating voltage sag in distribution systems with respect to economic consideration using Particle Swarm Optimization,” *2012 Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib. EPDC 2012*, 2012.
- [55] J. and S. Z. Xi, “Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012018, 2017.
- [56] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [57] G. Niazi and M. Lalwani, “PSO Based Optimal Distributed Generation Placement and Sizing in Power Distribution Networks : A Comprehensive Review,” no. 1, pp. 305–311, 2017.
- [58] K. Muthukumar and S. Jayalalitha, “Optimal placement and sizing of distributed generators and shunt capacitors for power loss minimization in radial distribution networks using hybrid heuristic search optimization technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 299–319, 2016.
- [59] R. Pérez, A. Aguila, and C. Vásquez, “Classification of the status of the voltage supply in induction motors using Support Vector Machines,” *2016 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo.*, pp. 1–5, 2016.
- [60] O. Amanifar, “Optimal Distributed Generation Placement and Sizing for Loss and THD Reduction and Voltage Profile Improvement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization and sensitivity analysis,” *Electr. Power Distrib. Networks (EPDC), 2011 16th Conf.*, pp. 1–7, 2011.
- [61] M. T. A. Y. Mohammadi and M. Faramarzi, “PSO algorithm for Sizing and Sizing of Distributed Generation to Improve Voltage Profile and Decreasing power losses,” *Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib. Networks*, pp. 1–5, 2012.
- [62] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, “Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm,” *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016.

10.1. Matriz del estado del arte

Tabla 12: Matriz de estado del arte

UBCACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADOS EN FLUJOS DE POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR EMJAMBRE DE PARTÍCULAS																															
ITEM	DATOS		TRATAMIENTO DEL TEMA								FUNCIÓN OBJETIVO				MÉTODO MATEMÁTICO																
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	UBICACIÓN GD	SELECCIÓN GD	DIMENSIONAMIENTO GD	UBICACIÓN AE	DIMENSIONAMIENTO AE	COSTOS	PÉRDIDAS DE POTENCIA	FACTOR DE POTENCIA	NIVELES DE VOLTAJE	FLUJOS DE POTENCIA	MINIMIZAR COSTOS	MINIMIZAR PÉRDIDAS	MEJORAR PERFIL DE VOLTAJE	MULTIOBJETIVO	CSA (Cuckoo Search Algorithm)	PSO (Particle Swarm Optimisation)	ACO (Ant Colony Optimization)	GA (Genetic Algorithm)	MÉTODO HÍBRIDO	MSFL (Modified shuffled frog leaping algorithm)	ABC (Artificial Bee Colony)	BA (Bat Algorithm)	FPA (Flower pollination algorithm)	ALO (Ant Lion Optimization)	WOA (Whale optimization algorithm)	TBLO (Teaching learning based optimization)	OPF (optimal power flow)	IWO (Invasive weed optimization)	
1	2016	A teaching learning based optimization technique for optimal location and size of DG in distribution network	✗	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□
2	2016	Adaptive differential search algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system	✗	□	□	□	□	✗	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□
3	2017	Ant Lion optimization algorithm for optimal sizing of renewable energy resources for loss reduction in distribution systems	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□
4	2015	Comparative Performance Study of Various PSO Techniques for Multiple Allocations of DG Units in Radial Distribution System	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
5	2016	Comparison of optimal DG placement using CSA, GSA, PSO and GA for minimum real power loss in radial	✗	□	□	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
6	2016	Distributed Energy Resources Allocation using Flower Pollination Algorithm in Radial Distribution Systems	✗	□	✗	✗	✗	□	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
7	2015	Distributed Generation Allocation on Radial Distribution Networks Under Uncertainties of Load and Generation Using Genetic Algorithm	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
8	2016	Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks	✗	□	□	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
9	2016	MSFL Based Determination of Optimal Size and Location of Distributed Generation in Radial Distribution System	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
10	2016	Multi-objective Placement and Sizing of DGs in Distribution Network using Genetic Algorithm	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

10.2. Indicadores de la matriz del estado del arte

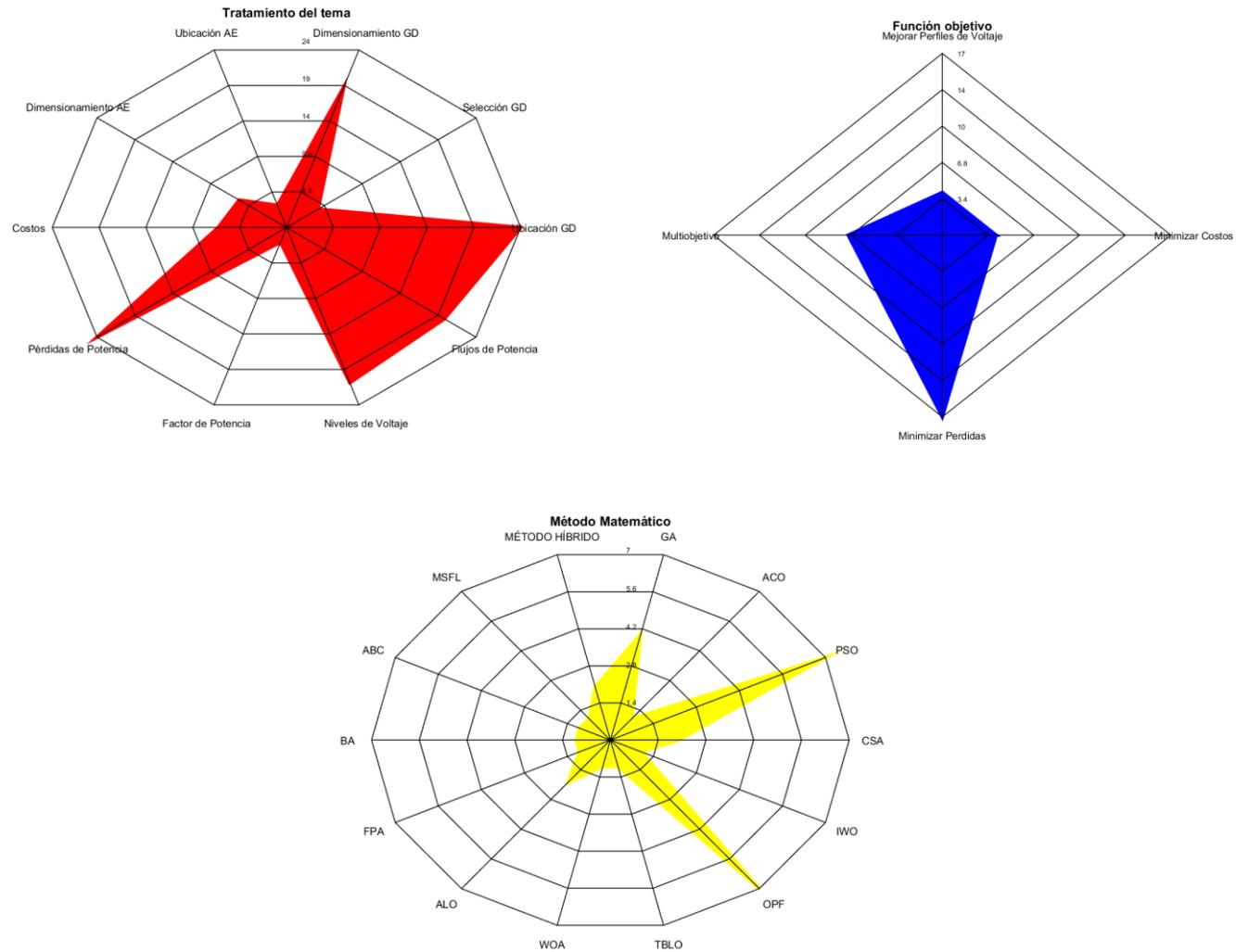


Figura 12. Indicadores del estado del arte.

11. Anexos

11.1. Comparación artículos de resultados de ubicación de GD

Tabla 13: Resultados de documentos de ubicación de GD

Referencia	Sistemas de distribución			Pérdidas (kW)	Tamaño GD (MW)			Nodos escogidos		
[27]	IEEE 33	IEEE 69	-	72.79; 69.67	0.77; 1.04, 1.15	1.72; 0.38; 0.53	-	13; 24; 30	61; 17; 11	-
[28]	IEEE 33	IEEE 69	-	88.68; 77.85	0.59; 0.19; 1.01	0.41; 1.19; 0.23	-	14; 18; 32	65; 61; 27	-
[29]	IEEE 15	IEEE 33	IEEE 69	45.80; 125.16; 83.23	0.68	1.54	1.87	6	30	61
[30]	IEEE 33	IEEE 69	-	72.85; 71.67	1.05; 1.09; 0.80	0.60; 1.17; 0.52	-	31; 20; 10	57; 65; 16	-
[31]	IEEE 33	-	-	69.69	2.79	-	-	6	-	-
[32]	SISTEMA 33	SISTEMA 69	-	72.89; 69.54	0.79; 1.07; 1.01	0.51; 0.38; 1.67	-	13; 24; 30	11; 17; 61	-
[33]	IEEE 33	IEEE 69	-	74.09; 69.89	0.69; 0.99; 1.28	0.50; 0.48; 1.77	-	14; 24; 29	11; 18; 61	-
[34]	IEEE 69	-	-	73.49	0.84; 1.01; 0.50	-	-	62; 61; 13	-	-
[35]	IEEE 33	-	-	130.68	5; 5; 5	-	-	77; 11; 14	-	-
[36]	IEEE 15	-	-	365.50	0.200; 0.250; 0.200	-	-	6; 11; 15	-	-
[37]	IEEE 69	-	-	83.10	0.05; 0.11; 0.17; 1.53	-	-	64; 49; 50; 61	-	-
[38]	IEEE 10	IEEE 33	IEEE 69	161.14; 85.78; 73.55	3.03; 1.53; 0.42	0.60; 0.30; 1.01	0.29; 1.32; 0.44	9; 2; 1	9; 16; 30	17, 60, 63
[39]	IEEE 33	-	-	80.8	0.91; 0.67; 1.42	-	-	9; 23; 30	-	-
[40]	IEEE 33	-	-	58.45	2.53	-	-	6	-	-
[41]	IEEE 33	IEEE 69	-	37.05; 13.64	0.52; 0.11; 1.08	0.38; 0.32; 1.09	-	14; 18; 32	27; 65; 61	-
[42]	IEEE 33	IEEE 69	-	67.8; 23.12	2.53	1.84	-	6	61	-
[43]	IEEE 15	IEEE 33	IEEE 69	42.82; 125.16; 83.23	0.67	1.54	1.87	15	30	61
[24]	SISTEMA 33	SISTEMA 69	-	74.213; 72.626	0.88; 0.93; 0.93	1.41; 0.60; 0.42	-	11; 29; 24	61; 11; 27	-
[44]	IEEE 33	IEEE 69	-	37.85; 12.90	0.68; 0.13; 1.11	0.38; 0.33; 1.34	-	14; 18; 32	27; 65; 61	-
[26]	IEEE 33	IEEE 69	-	89.27; 165.29	1,43; 0.37; 0.34; 0.28; 0.23	0.05; 0.07; 0.14; 0.18; 0.26	-	6,; 18; 28; 16; 9	62; 49; 29; 66; 50	-