Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Eléctrica | Facultad de Ingeniería

2022

Localización óptima de fuentes de generación distribuida en un sistema de distribución utilizando técnicas metaheurísticas

Diana Carolina Martínez Castillo
Universidad de La Salle, Bogotá, dmartinez59@unisalle.edu.co

Miller Adrian Mateus Rodríguez
Universidad de La Salle, Bogotá, mmateus72@unisalle.edu.co

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Martínez Castillo, D. C., & Mateus Rodríguez, M. A. (2022). Localización óptima de fuentes de generación distribuida en un sistema de distribución utilizando técnicas metaheurísticas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/629

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

Localización óptima de fuentes de generación distribuida en un sistema de distribución utilizando técnicas metaheurísticas

Diana Carolina Martínez Castillo
Miller Adrian Mateus Rodríguez

Universidad de la Salle
Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería eléctrica
Bogotá D.C, Colombia
2022

Localización óptima de fuentes de generación distribuida en un sistema de distribución utilizando técnicas metaheurísticas

Diana Carolina Martínez Castillo
Miller Adrian Mateus Rodríguez

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electricista

Director(a):
Ing. Martha Patricia Camargo Martínez, Ph.D

Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería eléctrica
Bogotá D. C., Colombia
2022

Resumen

El presente documento de trabajo de grado en modalidad proyecto de investigativo disciplinar, presenta un método para determinar la correcta ubicación de fuentes de Generación Distribuida (GD) en un sistema de distribución, con el objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa en la red. La optimización se realizó mediante el método de Algoritmo Genético (AG) y se implementó en el software Matlab, utilizando un algoritmo de libre distribución, en combinación con el algoritmo Matpower. La metodología propuesta fue probada en tres sistemas de distribución de diferente tamaño a los cuales se les integró una o más unidades de GD: dos de los casos de prueba corresponden a sistemas IEEE de 10 y 34 barras, y un tercer sistema, un caso real tomado de un ramal del sistema de Arauca, de 18 barras. Tanto en los sistemas de prueba como en el real se ubicaron hasta 2 plantas de GD, teniendo en cuenta la capacidad de GD según la normatividad colombiana, Para el caso real adicionalmente, se dimensionó el sistema de GD, asumiendo como fuente renovable el recurso fotovoltáico, dadas las características de la zona. Los resultados obtenidos demuestran que la ubicación, tamaño y número de plantas de GD implementadas en los sistemas, permiten reducir significativamente las pérdidas activas de potencia. La validación de la metodología propuesta se realzó con el algoritmo PowerWold, tanto en respuesta como tiempo de cálculo. demostrando que el algoritmo Genético es un método capaz de encontrar de manera rápida y correcta la ubicación de la GD.

Palabras clave: Generación Distribuida, ubicación, dimensionamiento, algoritmo génetico, minimizar pérdidas, sistema de distribución.

Abstract

This degree work document in disciplinary research project modality presents a method to determine the correct location of Distributed Generation (DG) sources in a distribution system, with the aim of minimizing active power losses in the network. The optimization was performed using the Genetic Algorithm (GA) method and was implemented in Matlab software, using a free distribution algorithm, in combination with the Matpower algorithm. The proposed methodology was tested in three distribution systems of different sizes to which one or more DG units were integrated: two of the test cases correspond to IEEE systems of 10 and 34 bars, and a third system, a real case. Taken from a branch of the Arauca system, with 18 bars. Both in the test systems and in the real one, up to 2 DG plants were located, taking into account the DG capacity according to Colombian regulations. For the real case, the DG system was additionally dimensioned, assuming the photovoltaic resource as a renewable source, given the characteristics of the area. The results obtained show that the location, size and number of DG plants implemented in the systems significantly allow active power losses. The validation of the proposed methodology was carried out with the PowerWold algorithm, both in response and in calculation time. Demonstrating that the Genetic algorithm is a method capable of quickly and correctly finding the location of the DG.

Keywords: Distributed generation, location, sizing, genetic algorithm, minimize losses, distribution system

Tabla de contenido

Lista de tablas vii

Lista de figuras viii

1 Introducción 1
1.1 Descripción del problema . . . 2
1.2 Objetivos . . . 3
1.2.1 Objetivo general . . . 3
1.2.2 Objetivos específicos . . . 3
1.3 Justificación . . . 3
1.4 Alcance . . . 4

2 Marco Conceptual 5
2.1 Definiciones . . . 5
2.2 Formulación del problema de optimización . . . 6
2.2.1 Ecuaciones de Balance de potencia . . . 7
2.2.2 Límites de potencia de los GD . . . 8
2.2.3 Límites de la magnitud de tensión nodal . . . 8
2.2.4 Límites de flujo de carga . . . 9
2.3 Algoritmos genéticos . . . 9
2.3.1 Diagrama de flujo Algoritmo Genético . . . 11
2.4 Definición del tipo de fuente de generación renovable . . . 12
2.5 Radiación solar . . . 13
2.6 Biomasa . . . 14
2.7 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's) . . . 14
2.8 Fuente eólica . . . 14

3 Descripción de la Metodología 16
3.1 Implementación del método . . . 16
3.1.1 Población . . . 16
3.1.2 Función fitness . . . 17

3.1.3 Selección . . . 17
3.1.4 Cruce . . . 19
3.1.5 Mutación . . . 21

4 Implementación de la Metodología 22
4.1 Sistemas de prueba . . . 22
4.1.1 Sistema de 10 nodos . . . 22
4.1.2 Sistema de 34 nodos . . . 23
4.1.3 Sistema de eléctrico de Arauca . . . 23
4.2 Resultados . . . 25
4.2.1 Sistema de 10 nodos . . . 25
4.2.2 Sistema de 34 nodos . . . 28
4.2.3 Sistema de Arauca . . . 32
4.2.4 Comparación de resultados . . . 34
4.3 Discusión . . . 35

5 Conclusiones 38

Bibliografía 40

6 Anexos 42
6.1 SISTEMA DE 10 BARRAS -23 kV . . . 42
6.2 SISTEMA DE 34 BARRAS - 11 kV . . . 43
6.3 SISTEMA DE ARAUCA - 34,5 Y 13,8 kV . . . 45
6.4 Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico - Caso Arauca . . . 46
6.4.1 Tipo de Panel solar . . . 46
6.4.2 Cálculo del número de paneles . . . 46
6.4.3 Tipo de inversor . . . 47
6.4.4 Tipo de baterías . . . 48

Lista de Tablas

2-1 Conceptos de las partes que integran un Algoritmo Genético 9

4-1 Resultados de la implementación una unidad de GD sistema de 10 nodos . . 26
4-2 Resultados simulación con una unidad de GD sistema de 34 nodos 29
4-3 Resultados simulación con una unidad de GD sistema de 18 nodos 32
4-4 Comparación de resultados de los algoritmos para cada sistema de prueba . 35
4-5 Comparación de resultados en términos de tiempo 35

6-1 Potencia activa y reactiva en cada una de las barras 42
6-2 Impedancias de las líneas 42
6-3 Potencia activa y reactiva en cada una de las barras 43
6-4 Impedancias de las líneas 44
6-5 Potencia activa y reactiva en cada una de las barras 45
6-6 Impedancias de las líneas 45
6-7 Ficha técnica modulo fotovoltaico Policristalino CORA. Tomado de Coradir (sf) 46
6-8 Características técnicas inversor Huawei. Tomado de Solartex (2022) 48

Lista de Figuras

2-1 Elementos que integran una población 10
2-2 Diagrama de flujo algoritmo genético 12
2-3 Radiación solar por días en el departamento de Arauca. Tomado de El tiempo (2022) 13
2-4 Promedio velocidad maxima del viento en el departamento de Arauca. Tomado de IDEAM (sf) 15

3-1 Ejemplo selección por Ruleta González (2018) 18
3-2 Ejemplo selección por torneo Quintero (2017) 19
3-3 Cruce uniforme 19
3-4 Cruce de un punto 20
3-5 cruce de dos puntos 20
3-6 Operador de Mutación 21

4-1 Sistema de 10 barras con 23 kV 22
4-2 Sistema de 34 barras con 11 kV 23
4-3 Diagrama unifilar sistema Enelar E.S.P. año 2017 24
4-4 Parte del sistema de Arauca seleccionado 24
4-5 Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de 10 barras 26
4-6 Gráfico de tensión sistema de 10 nodos 28
4-7 Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de 34 barras 30
4-8 Gráfico de tensión sistema de 34 nodos 31
4-9 Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de Arauca 18 barras 33
4-10 Gráfico de tensión sistema de Arauca nodos 34

1 Introducción

La Generación Distribuida (GD) se define como la generación y el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, que se instala cerca de los puntos de consumo y es interconectada a la red de distribución, con el fin de mejorar la calidad y costo del servicio de energía eléctrica. La GD ha surgido como un apoyo y cambio en el paradigma de la generación de los sistemas convencionales, y han tomado fuerza dado que temas como la preservación de los recursos naturales y crisis energéticas, han influido de manera significativa en el desarrollo de esta industria energética.

En el sistema eléctrico colombiano, el crecimiento de la demanda de energéticos sumado a la necesidad de aumentar la calidad y confiabilidad del servicio a través de la optimización de recursos y sostenibilidad ambiental, hacen necesario re-evaluar la manera en que se genera la energía eléctrica e incentivar a la diversificación de la matriz energética del país para fortalecer el sistema de generación Grisales et al. (2017). Es allí donde la integración de GD presenta gran interés, ya que puede contribuir en la obtención de resultados en materia de una gestión más activa de la red, así como en la reducción de pérdidas de energía, de emisiones y en la integración de fuentes de energías renovables.

En Colombia, La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), estableció la Resolución CREG 030 de 2018 y define la GD como "Persona jurídica que genera energía eléctrica cerca de los centros de consumo, y está conectado al Sistema de Distribución Local y con potencia instalada menor o igual a 0,1 MW"CREG(030) (2018). Con esta resolución se da comienzo a un proceso de adaptación para los usuarios y las empresas que deseen implementar la generación distribuida como alternativa. Este aspecto demuestra la necesidad de generar soluciones para integrar sistemas de GD, empleando fuentes convencionales y no convencionales de energía.

Uno de los aspectos más importantes a la hora de implementar plantas de GD es la reducción de perdidas en el sistema de distribución, ya que, dependiendo de la ubicación, tamaño y número de plantas de GD, el sistema puede llegar a presentar un aumento o reducción en cuanto a las pérdidas de potencia activa. Como objetivo de este trabajo se plantea un método de optimización para la correcta ubicación de la GD en una red de distribución, con

el objetivo de minimizar las pérdidas reales del sistema. Como método de solución se plantea una técnica metaheurística conocida como Algoritmos Genéticos (AG). La metodología fue aplicada a tres sistemas de distribución en forma radial: el sistema IEEE-10 nodos, el sistema IEEE-34 nodos y un ramal del sistema de distribución del departamento de Arauca.

A lo largo del documento se plantea la formulación matemática del problema, es decir, la función de optimización para minimizar pérdidas y las respectivas restricciones, se realiza una revisión del algoritmo propuesto y se plantea la metodología basada en esta técnica en combinación con un flujo de potencia utilizando el software Matlab y el algoritmo Matpower, para cada uno de los sistemas propuestos. Los resultados son validados con los resultados de otros documentos que presentan los casos IEEE-10 nodos, IEEE-34 nodos, aplicando técnicas diferentes. El caso real es validado implementando individualmente los flujos de carga sin optimizar, comparando con el que se obtienen las menores pérdidas.

1.1. Descripción del problema

La aplicación de las nuevas tecnologías como la GD trae consigo grandes beneficios; sin embargo, también puede traer efectos negativos si no se realiza una adecuada ubicación y dimensionamiento. Es importante evaluar los impactos de la implementación de la GD con el fin de garantizar en la red de distribución estabilidad de voltaje, confiabilidad y rentabilidad, puesto que, dependiendo de la ubicación pueden causar, corrientes de falla, perfiles de tensión por fuera de los rangos permitidos, fluctuaciones de tensión y violación de los límites de capacidad en las líneas Khoa et al. (2006).

En los alimentadores con altas pérdidas, una pequeña cantidad de GD asignado estratégicamente (10-20 % de la carga del alimentador) podría causar una reducción significativa de las pérdidas. No obstante, la compañía eléctrica no tiene control de los lugares en donde se instala la GD, ya que por lo regular son propiedad del consumidor Borges and Falcão (2003). Por esta razón es de interés disponer de una metodología de asignación adecuada de las unidades de GD a fin de tener una indicación de los efectos que esta genera.

La localización y dimensionamiento de las unidades de GD para la reducción de pérdidas en un sistema de distribución, se ha desarrollado mediante diferentes técnicas convencionales como lo son técnicas analíticas Gözel and Hocaoglu (2009), Programación lineal de enteros mixtos Gualotuña Cacuango (2019), Técnicas probabilísticas Sánchez (2012). Debido a que algunos problemas resultan ser de carácter complejo se hace necesario hacer aproximaciones o simplificaciones, llegando a modelos poco realistas, por esta razón se recurre a las técnicas metaheurísticas ya que por sus características y simplicidad pueden aplicarse a formulaciones

complejas y que han sido usadas para estas aplicaciones en Khoa et al. (2006)Sookananta et al. (2010)Ganguly and Samajpati (2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar la óptima ubicación y dimensionamiento de generación distribuida en un sistema de distribución para la reducción de pérdidas en el sistema.

1.2.2. Objetivos específicos

- Formular el problema de ubicación y dimensionamiento de la generación distribuida en un sistema de distribución, en términos de minimización de pérdidas de energía en el sistema, considerando restricciones de localización, tamaño y tipo de generación distribuida.
- Adaptar el problema de optimización para la solución del mismo, por medio de herramientas metaheurísticas.
- Implementar el problema de optimización usando algoritmos metaheurísticos propuestos.
- Comparar los resultados obtenidos de la optimización, en términos de tiempo de cálculo y convergencia.

1.3. Justificación

La GD es un tema que hoy en día va cobrando cada vez más fuerza dados los beneficios que esta genera. Además permite disminuir la dependencia de otras redes externas y, al ser un desarrollo de carácter local, la energía producida no tiene que recorrer grandes distancias, por lo que su uso en combinación con la red, disminuye pérdidas en cuanto al transporte y aumentar eficiencia. Finalmente, este tipo de generación implica un crecimiento de las energías renovables, las cuales son las más adecuadas para ubicarse cerca de los puntos de consumo. Así, implementar la GD permite aumentar la calidad de energía.

No obstante, es importante tener en cuenta que los beneficios dependen de su correcta ubicación y dimensionamiento. La implementación de fuentes de GD puede producir un impacto significativo en el flujo de energía a través de la red lo que puede generar problemas

técnicos, como perfiles de tensión por fuera de los rangos permitidos, fluctuaciones de tensión y violación de los límites de capacidad en las líneas Balamurugan et al. (2012). Realizar estudios de operación que permitan mejorar el perfil de tensiones, minimizar pérdidas y mejorar la confiabilidad del sistema, permite que exista un beneficio tanto económico como social, ya que favorece al operador de red al reducir los requisitos de producción de las plantas convencionales y a comunidades donde la red local presenta continuas fallas. En consecuencia, para la realización de este trabajo se buscó identificar un sistema de distribución real, con el fin de evidenciar la metodología planteada y lograr aportar una mejora al futuro del sistema eléctrico.

1.4. Alcance

Existen departamentos alejados al centro del país, donde se suelen presentar condiciones no aptas para un correcto funcionamiento de la red de energía eléctrica, pero que en muchos casos cuentan con recursos importantes para la generación por medio de fuentes renovables ya sea por recurso solar, eólico o hídrico. Un caso que evidencia esta problemática y que sirvió como modelo para localización óptima de fuentes de generación distribuida de GD, es el departamento de Arauca, ya que, a pesar de contar con el sistema eléctrico nacional, la red local presenta continuas fallas por diferentes motivos (sociales, culturales o ambientales), por lo cual es conveniente pensar en la generación distribuida como posible solución.

Se trabajará con un modelo de distribución, teniendo en cuenta una planta de generación fotovoltaicas, ya que resulta ser una las mejores alternativas de generación renovable, dado que en el departamento de Arauca las condiciones son aptas para su implementación y pueden llegar a representar una generación sostenible y eficiente, en concordancia con las políticas de energía del país.

En cuanto a la metodología, se observa que en la literatura existen diferentes métodos que permiten determinar la adecuada ubicación de generación distribuida en la red eléctrica, algunas de ellas son metaheurísticas, técnicas probabilísticas y métodos analíticos.
Para el desarrollo del problema de investigación planteado, se definió una función mono-objetivo de minimización de pérdidas. Se optó por las técnicas metaheurísticas, ya que gracias a su flexibilidad permiten abordar una amplia variedad de casos, a diferencia de los métodos analíticos las técnicas metaheurísticas han demostrado ser eficientes en el desarrollo de problemas, con una configuración de múltiples óptimos locales que corresponden a un sistema no lineal y no convexo. Para comprobar la veracidad en la obtención de resultados mediante el método metaheurístico, se utilizaron diferentes sistemas, ya anteriormente desarrollados por otras técnicas y se comprobaron los resultados obtenidos.

2 Marco Conceptual

2.1. Definiciones

Generación distribuida (GD): Hace referencia a los generadores de energía eléctrica, que se interconectan a la red en niveles de distribución ya que de manera general se encuentra cercanas a los puntos de consumo, usualmente la potencia que se genera es menor a 10 MW, el origen de este tipo de generación se debe a la cogeneración, ya que las zonas industriales por su alta demanda energética utilizan plantas generadoras y por medio de la conexión a la red pueden interactuar de manera eficiente con el recurso energético realizando aportes de energía o directamente consumiendo. La GD trae consigo grandes beneficios para los operadores de red, ya que, por su cercanía con los puntos de consumo, las pérdidas de energía se reducen, también ayuda a descongestionar líneas que usualmente se encuentran en sobrecarga. Gracias a esto, la planeación o ampliación de la red de distribución puede ser postergada y las energías renovables puedan ser implementadas de manera segura para la red. Sánchez (2012)

Optimización: Hace referencia a encontrar la manera más eficiente de resolver un problema que es representado generalmente por medio de una función matemática o por medio de procesos iterativos (programación computacional), busca cumplir los requerimientos impuestos y realiza la selección de resultado más ideal para la solución, comúnmente se buscan los óptimos locales o globales, también minimizar o maximizar la función que modela el problema.

Energías renovables: Hace referencia al tipo de energía que se obtiene de fuentes naturales relativamente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen y otras porque son capaces de regenerase por medios naturales. Por lo tanto, se consideran fuentes energéticas amigables con el medio ambiente. Se puede dividir en dos tipos de categorías, no contaminantes (energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, geotérmica, etc.), y las contaminantes que se obtienen a partir de materia orgánica o biomasa que se pueden usar directamente como combustible o convertir a biodiesel. Úbeda et al. (2008)

Método heurístico: Es un procedimiento que busca brindar la mejor solución factible, aunque no siempre sea la óptima, para el problema bajo los criterios de operación, así como

también no se puede brindar garantía de la calidad de la solución obtenida, pero de manera general un método heurístico bien definido, brinda una solución que se acerca a la solución óptima, a no ser que el problema no tenga solución.

Metaheurística: Hace referencia a el método que busca la solución general que proporciona cierta estructura para el desarrollo de un método heurístico que se ajusta al tipo particular del problema. La metaheurística se ha convertido en una de las técnicas más importantes del paquete de herramientas que utilizan los profesionales de la IO.Hillier and Lieberman (2002)

Función objetivo: Es un criterio expresado a través de las variables que definen el comportamiento del sistema. Esta función puede ser maximizada o minimizada según las necesidades del problema.

Mono-objetivo: Se define desde un criterio que busca maximizar o minimizar una sola función objetivo. Las técnicas más empleadas son: algoritmo genético, enjambre de partículas, recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos inmunes, colonia de hormigas, enjambre de abejas, entre otros.

Multi-objetivo: Se define teniendo en cuenta un criterio que busca maximizar o minimizar dos o más funciones objetivo, siempre en conflicto. Las técnicas más conocidas y empleadas son: algoritmo de ordenamiento no dominado (NSGA, por sus siglas en inglés) y el algoritmo caótico artificial colonia de abejas (CABC, de sus siglas en inglés). Noreña et al. (2017)

Sistema de distribución: Hace referencia, a la etapa en el que el suministro de energía eléctrica es llevado a los usuarios finales. El sistema de distribución toma de la red de alta tensión y la trasporta a los consumidores, comúnmente un sistema de distribución se compone por, las líneas eléctricas, subestaciones, transformadores y el cableado de baja tensión.

2.2. Formulación del problema de optimización

Según Narváez et al. (2015), la función objetivo del sistema para la minimización de pérdidas está sujeta a ciertas consideraciones como lo es: el número de ramas de la red, la corriente por la rama y la resistencia. La reducción de pérdida del sistema se da cuando al instalar la GD se reduce la demanda neta de la red y por lo tanto se presenta una reducción en las corrientes de las diferentes ramas.

La función objetivo para la minimización de pérdidas está dada por:

$$Min \sum_{r=1}^{NR} I_r^2 R_r \tag{2-1}$$

Donde:
NR = Número de ramas de la red
I_r = Es la corriente por la rama r
I_r = Es la resistencia de la rama r

2.2.1. Ecuaciones de Balance de potencia

Existen dos tipos de restricciones para la obtención de la función objetivo, las primeras son las restricciones de igualdad que están dadas por las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva mostradas en las ecuaciones 2-2 y 2-3

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_i(V, \theta) = 0 \tag{2-2}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i(V, \theta) = 0 \tag{2-3}$$

Donde:

P_{Gi} y Q_{Gi} = Son las potencias activa y reactiva, respectivamente, entregadas por una unidad de GD si ésta fuera ubicada en la barra i.
P_{Di} y Q_{Di} = Corresponden a las demandas de potencia activa y reactiva, en la barra i, respectivamente.
$P_i(V, \theta)$ y $Q_i(V, \theta)$ = Corresponden a las inyecciones netas de potencia activa y reactiva, en la barra i, respectivamente, calculadas mediante las expresiones 2-4 y 2-5.

$$P_i(V, \theta) = V_i \sum_{k=1}^{nb} [V_k(g_{ik} cos(\theta_{ik}) + b_{ik} sen(\theta_{ik}))] \tag{2-4}$$

$$Q_i(V, \theta) = V_i \sum_{k=1}^{nb} [V_k(g_{ik} sen(\theta_{ik}) - b_{ik} cos(\theta_{ik}))] \tag{2-5}$$

Donde:
Nb= Número de barras
θ_{ik} = Es la apertura entre las barras i y k.
g_{ik} y b_{ik} = Son las partes real e imaginaria, respectivamente, de la matriz de admitancia nodal.
En las ecuaciones 2-6 y 2-7 se incluyen las expresiones que describen los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas

$$P_{ik} = V_i^2 g_{ik} - V_i V_k g_{ik} cos(\theta_{ik}) - V_i V_k b_{ik} sen(\theta_{ik}) \tag{2-6}$$

$$Q_{ik} = V_i^2 b_{ik} + V_i V_k b_{ik} cos(\theta_{ik}) - V_i V_k b_{ik} sen(\theta_{ik}) \tag{2-7}$$

la magnitud de la potencia aparente se puede expresar en función de las potencias activa y reactiva como se muestra en la ecuación 2-8

$$S_{ik}^2 = P_{ik}^2 + Q_{ik}^2 \tag{2-8}$$

las restricciones de desigualdad corresponden a los límites de potencia inyectada por las unidades de GD, los límites de las tensiónes nodales y los límites de flujo de carga. Los límites mínimos y máximos, se representan mediante los superíndices min y max.

2.2.2. Límites de potencia de los GD

La cantidad máxima y mínima de potencia activa que puede generar la central fotovoltaica esta dada por la ecuación 2-9.

$$P_{Gj}^{min} \leq P_{Gj} \leq P_{Gj}^{max} \tag{2-9}$$

2.2.3. Límites de la magnitud de tensión nodal

Los límites máximos y mínimos de tensión nodal en la red, se expresan mediante la ecuación 2-10.

$$V_i^{min} \leq V_{Gj} \leq V_{Gj}^{max} \tag{2-10}$$

2.2.4. Límites de flujo de carga

El límite de flujo de carga en el sistema de distribución, esta dado por la inyección de la magnitud potencia compleja en la linea, teniendo en cuenta la expresión 2-11.

$$|S_{ik}| \leq S_{ik}^{max} \tag{2-11}$$

2.3. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son técnicas evolutivas, con gran capacidad de resolver problemas de búsqueda y optimización, su operación se basa en la teoría de la evolución natural de los seres vivos formulada por Charles Darwin. La teoría de la evolución biológica consiste en que los individuos de una especie van cambiando y evolucionando para adaptarse al entorno que los rodea, los individuos con mayor capacidad de sobrevivir y buscar un compañero tienen mayor posibilidad de generar descendencia. Para generar vida en las poblaciones existen una serie de procesos: reproducción, mutación y selección, la reproducción consiste en un proceso en el que los genes de los padres se mezclan y se transmiten a los hijos creando cambios genéticos, la mutación modifica al azar los genes de un cromosoma y finalmente la selección es un proceso de competición entre individuos, los más aptos heredan sus genes a la nueva generación.

Los AG usan una analogía con el comportamiento de los seres vivos, el conjunto de soluciones del problema se denomina fenotipo, la información de cada individuo es el cromosoma y al reescribir la información en forma binaria y de cadena se le denomina genotipo, cada componente de la cadena corresponde a un gen. Martínez María Dolores et al. (2010)
Los términos usados para definir las partes de una población se resumen mediante la tabla **2-1**

Término	Descripción
Población	Se constituye mediante un conjunto de posibles soluciones del problema.
Cromosoma	Cadena binaria de genes que representan un individuo o solución.
Gen	Unidad de información dentro de un cromosoma.
Genotipo	Es el conjunto de genes de un organismo.
Fenotipo	Es el conjunto de rasgos observables del individuo.
Alelo	Son los distintos estados en que se puede presentar un gen en una misma posición.

Cuadro **2-1**: Conceptos de las partes que integran un Algoritmo Genético

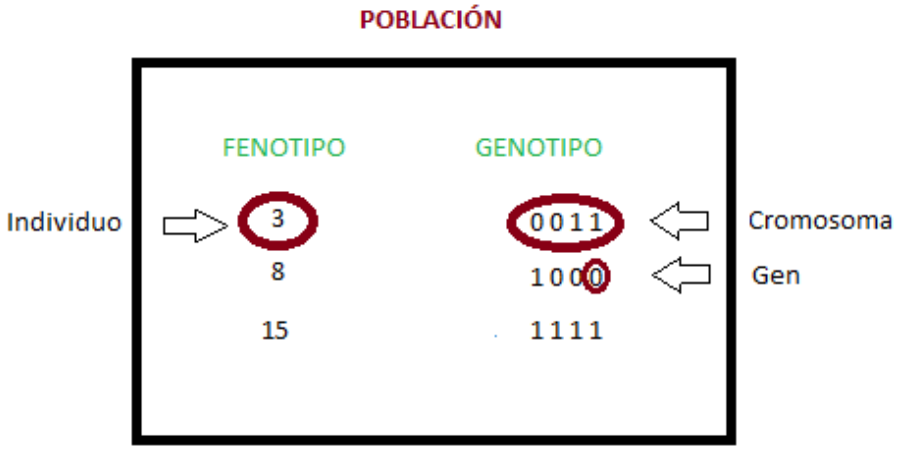

Figura **2-1**: Elementos que integran una población

El proceso de los AG consiste en trabajar sobre una población con soluciones potenciales y de acuerdo a cada iteración ir evolucionando, al trabajar sobre cromosomas se debe definir la codificación del espacio de soluciones, los individuos se codifican mediante valores binarios y cada uno de ellos representa una solución potencial del problema. Se deben definir los parámetros del sistema a trabajar para constituir el cromosoma del AG y posteriormente construir la función aptitud para evaluar que tan buena es la solución, mediante esta función se asignan probabilidades de emparejamiento a aquellas que sean mejores y luego de tener una probabilidad de cada individuo se procede a seleccionar un determinado número de parejas dependiendo de su probabilidad, cada pareja se reproduce y crean hijos sufriendo cambios en los valores de su genotipo. Se pueden realizar cruces o mutaciones para generar nuevos individuos, este proceso se realiza de forma iterativa hasta encontrar un individuo que posea la solución al problema.

El proceso operativo del AG puede describirse mediante las siguientes etapas:

- Inicialización: Se establece la población inicial al azar, constituida por cromosomas para dar solución al problema.
- Evaluación: Se establece un método que determine si los individuos de la población representan una buena solución.
- Selección: El proceso de selección consiste en elegir de acuerdo con la probabilidad, los cromosomas con mayor aptitud para ser cruzados en la siguiente generación. Dentro

de los métodos propuestos se encuentra la selección por ruleta, ranking, estocástica universal y torneo.

- Recombinación: Se cruzan una o dos partes de los padres para crear nuevas soluciones, el cruzamiento se puede realizar mediante el cruce de N puntos o el cruzamiento uniforme. En el proceso de cruce de N puntos se seleccionan uno o más puntos de cruzamiento de los padres de forma aleatoria para generar uno o más hijos, el cruzamiento uniforme se realiza de forma aleatoria, utilizando una probabilidad de intercambio.

- Mutación: Se modifica al azar uno varios rasgos del individuo, para alcanzar un mayor espacio de búsqueda.

- Reemplazo: Se reemplaza la población inicial de padres, por la población generada mediante los procesos de selección, recombinación, y mutación.

Los AG son capaces de resolver una amplia variedad de problemas de diferentes áreas, son una técnica que aunque no garantiza llegar a un óptimo global desarrolla soluciones aceptables comparados con otros algoritmos de optimización, su popularidad se ha dado en problemas en donde las herramientas matemáticas fracasan, el AG posee un amplio rango de búsqueda y es posible aplicarse a funciones discontinuas o no convexas.

2.3.1. Diagrama de flujo Algoritmo Genético

El funcionamiento del AG se describe mediante la figura **2-2**

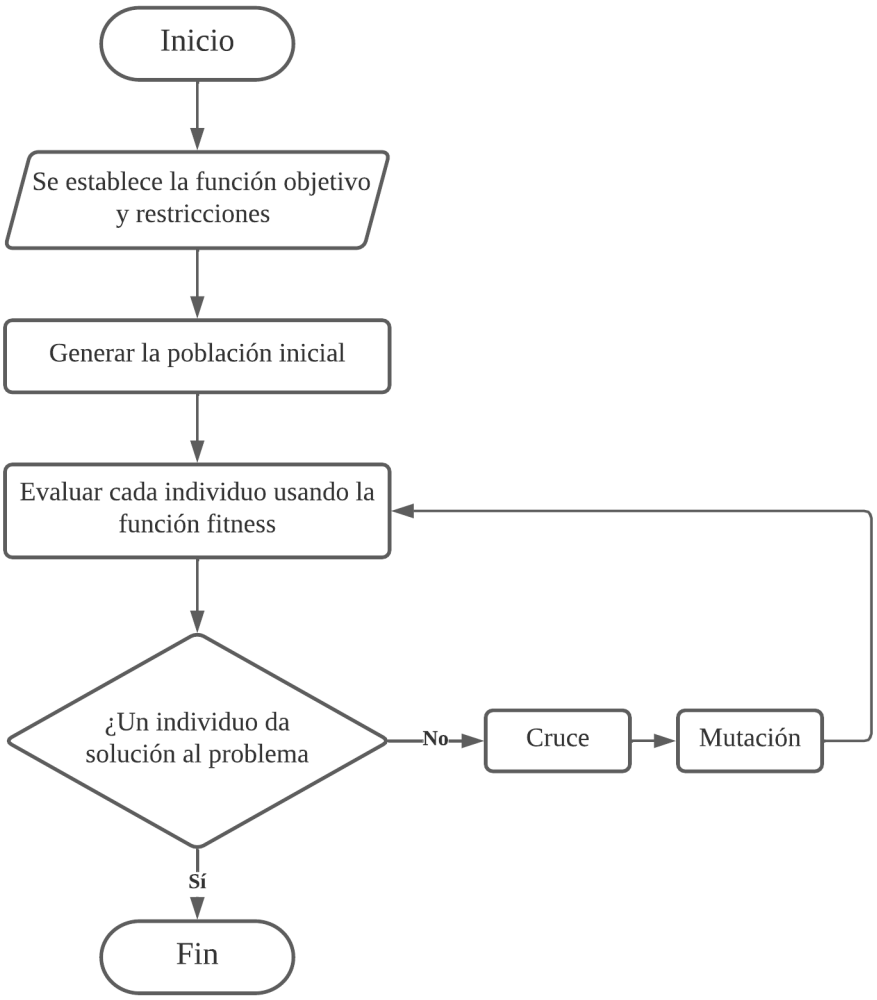

Figura **2-2**: Diagrama de flujo algoritmo genético

2.4. Definición del tipo de fuente de generación renovable

La GD es una alternativa de generación en la que se puede emplear diferentes tipos de energía como puede ser la energía eólica, solar, térmica, hidráulica, biomasa, gas natural, Diesel, biodiesel, etanol, gasolina, entre otras. Sin embargo, una de las ventajas que tiene la GD es el cambio en el paradigma energético al integrar energías renovables, dado que son las más apropiadas para ser ubicadas cerca de los puntos de consumo.

Para el caso real presentado en este documento, se establecieron las principales fuentes de energía, que pueden llegar a ser adecuadas para el sistema. Se realizó un análisis de la fuente

solar, eólica, generación hidráulica a pequeña escala (PCH's) y Biomasa. Obteniendo que el mejor recurso es el solar. A continuación, se presenta el análisis de cada una de las posibles fuentes de generación.

2.5. Radiación solar

Es importante para la modelación de la planta de GD, tener en cuenta la variación de radiación solar en el lugar dado que esta incide en la generación de energía eléctrica. Según el IDEAM una de las zonas con mayor intensidad de radiación solar con valores superiores a los 5,5 KWh/m^2 por día corresponde al departamento de Arauca. La irradiación es algo que cambia constantemente dependiendo de la masa de aire, por esta razón se definió un día solar promedio teniendo en cuenta los datos presentados en El tiempo (2022).

En la figura **2-3** se presentan los datos diarios de radiación solar en el departamento para 15 dias del mes de febrero del presente año, con el objetivo de obtener el modelamiento de la GD que se implementara al sistema.

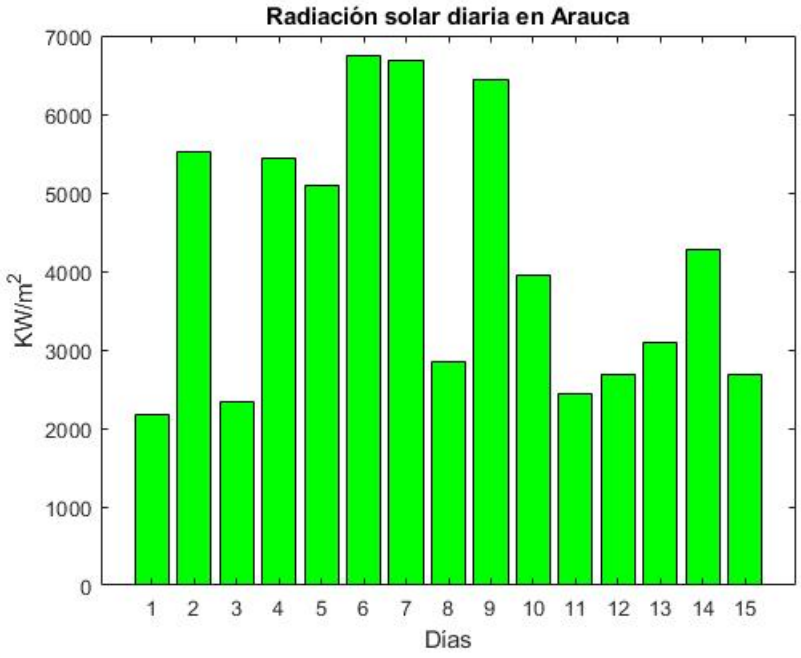

Figura **2-3**: Radiación solar por días en el departamento de Arauca. Tomado de El tiempo (2022)

La energía solar térmica se basa en la conversión de la energía procedente de la radiación solar, pero para saber cuánta electricidad genera un panel solar es necesario conocer ciertas

variables como lo son el tipo, tamaño y potencia de salida del panel fotovoltaico. Para este caso de estudio y en vista de que la radiación solar es alta, se escogió como fuente de GD. Los cálculos se presentan en el anexo 6.4

2.6. Biomasa

Dado el alcance del proyecto y la poca información referente a este tipo de fuentes en el departamento del Arauca, no se realiza el análisis de este recurso.

2.7. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's)

Colombia cuenta con una gran riqueza en cuanto al recurso hídrico se refiere, gran parte del país cuenta con diversas cuencas de ríos con diferentes caudales aptos para la generación de energía eléctrica por medio de PCHs. Arauca no es la excepción, ya que por su territorio circulan diferentes ríos como lo son: Río Arauca, Río Cravo Norte, Río Capanaparo, Río Bojabá, Río Tame, entre otros.

Este tipo de generación tiene un gran potencial en la zona, pero existe una gran desventaja con respecto a su implementación, puesto que la GD debe ser implementada cerca de los puntos de consumo, para este caso en específico no pueden ser ajustados a los puntos requeridos y se limita a zonas aledañas de los ríos, teniendo en cuenta esto podría contemplarse un estudio el cual permita identificar los puntos donde la implementación de este tipo de generación sea viable y que afecte de manera positiva el sistema de distribución regional, por tal motivo no se tiene en cuenta este tipo de generación.

2.8. Fuente eólica

Según la UPME (Unidad de planeación minero energética) en Colombia, el departamento del Arauca no se encuentra dentro de las regiones potenciales para la generación de energía eólica y es uno de los departamentos con menor corrientes de aire. Dicha información se confirma mediante el mapa de vientos en colombia del IDEAM, presentado en la figura **2-4**. Como se evidencia en el mapa, el departamento de Arauca presenta un promedio de la velocidad máxima del viento de aproximadamente 24 (m/s), un valor bajo si se compara con otras regiones en donde se muestra que es viable el aprovechamiento de este recurso. Regiones como La Guajira, gran parte la región Caribe, Santander, Norte de Santander, Risaralda, tolima, el Valle del Cauca, el Huila y Boyacá presentan un promedio de la velocidad máxima del viento superior a 30 (m/s).

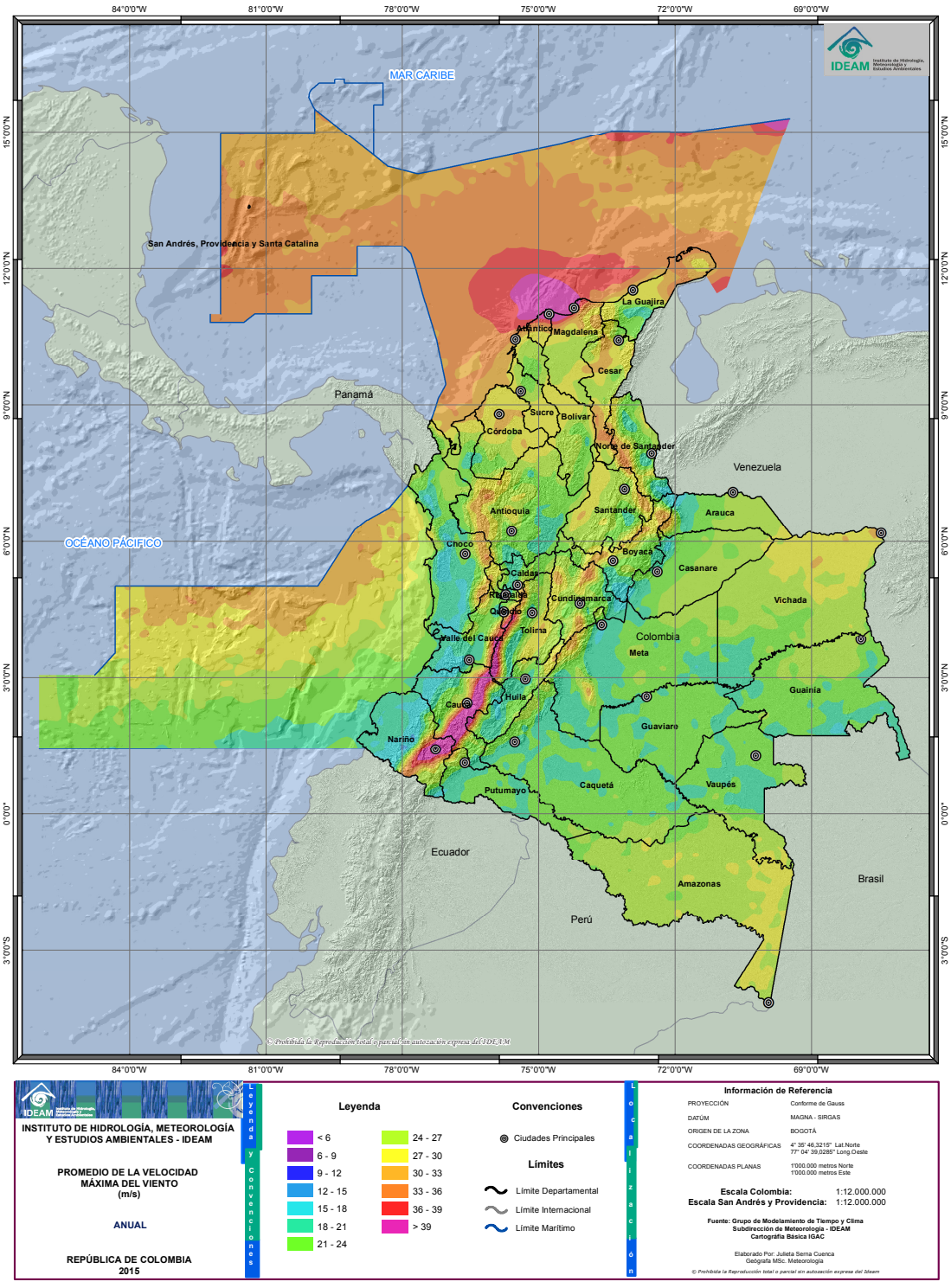

Figura **2-4**: Promedio velocidad maxima del viento en el departamento de Arauca. Tomado de IDEAM (sf)

3 Descripción de la Metodología

3.1. Implementación del método

Al implementar la GD en los tres sistemas de distribución propuestos se tiene en cuenta, primero, la localización de una sola planta y luego de dos plantas de GD, con un tamaño de 1 MW [1]. Al realizar este proceso se observan las potencias obtenidas en cada una de las barras y se elige la barra o barras en donde se presentan menores pérdidas.

Las pérdidas son obtenidas utilizando el software Matlab, en el cuál se implementó un algoritmo basado en un AG de libre acceso en combinación con el algoritmo Matpower usado para resolver el flujo de potencia del sistema. El algoritmo implementado permite encontrar las pérdidas a partir de los valores de potencia activa y reactiva que entran o salen de las barras.

Los datos utilizados para ejecutar el flujo de potencia son utilizados por el AG para dar solución, de esta forma, los valores de potencia en cada barra se codifican en un cromosoma para generar la población inicial y encontrar el individuo apto, esta selección se realiza por medio de un proceso en el que se seleccionan parejas de individuos con el objetivo de reproducirse, por medio de cruces y mutaciones; al realizar este proceso se ajustan los nuevos individuos y se evalúa si se encuentra una solución, de lo contrario, se repite cada uno de los procesos hasta conseguir la solución del problema.

El algoritmo de optimización para la solución a la minimización de pérdidas en el sistema de distribución fue obtenido mediante el software Matlab, este fue modificado y adaptado al problema presentado. En las siguientes secciones se presenta a detalle cada proceso.

3.1.1. Población

La población se conforma mediante un conjunto de individuos, donde cada individuo es definido por n cromosomas, siendo n es el número de nodos donde se va a implementar la

[1] Este valor se estableció teniendo en cuenta el usado en las referencias bibliográficas usadas para la validación, además de considerar los valores convencionales definidos en las normas

GD. Así, cada individuo está representado por n números enteros correspondiente al o a los nodos donde se ubicará la GD. Para la implementación del AG, estos números enteros que se encuentran el el sistema decimal, se escriben con su equivalente en el sistema binario. Cada uno de estos individuos se seleccionaron de forma aleatoria, generando finalmente una matriz de números binarios. El tamaño de la población se determina dependiendo de cada caso y debe garantizar variedad de soluciones.

Para el sistema de potencia se debe tener en cuenta que la cantidad de individuos está sujeta a la cantidad y tipo de barras que se tengan, el tamaño de la población no varía, pero los individuos van cambiando mediante la ejecución del AG.

3.1.2. Función fitness

La función fitness, también conocida como función de aptitud, es importante para evaluar el correcto funcionamiento del AG. Esta función determina qué tan buena es una solución, y compara su aptitud para resolver el problema con los demás individuos de la población, lo que permite distinguir a los mejores individuos de los peores.

El valor de la aptitud del individuo bajo evaluación entregara las pérdidas obtenidas del sistema. Para determinar este valor se calculan los valores de potencia teniendo en cuenta la posición de la planta o plantas de GD en el sistema de distribución, es decir las barras que se encuentran codificadas en el genotipo del individuo. Como consideraciones del problema se tienen en cuenta los datos iniciales del flujo de carga, la potencia entregada por la planta de GD y los efectos sobre la tensión del sistema, de modo que se cumpla con los límites establecidos en las normas. Al realizar este proceso se logra obtener qué tan buena es esta configuración para optimizar el problema, es decir, en este caso la calidad de la evaluación estará dada por la minimización de la misma.

3.1.3. Selección

Luego de saber la aptitud de cada cromosoma se procede a realizar la selección, este paso es muy importante ya que se eligen los cromosomas que serán cruzados, al realizar este proceso se transmite el código genético de los más aptos a las generaciones futuras y como consecuencia se logra una rápida convergencia al óptimo. Existen diferentes métodos para elegir los padres que serán cruzados, los implementados son explicados a continuación:

Selección por Ruleta

Este tipo de selección es la más usada, consiste en asignar un tramo de la ruleta a un individuo teniendo en cuenta su propia aptitud y la aptitud total de la población, es decir, la probabilidad de que el individuo sea seleccionado corresponde a su fitness dividido en la suma fitness de toda la población, esto se representa mediante la ecuación 6-2, donde X corresponde al individuo y Y a la población.

$$Pr(x) = \frac{aptitud(x)}{\sum_y aptitud(y)} \tag{3-1}$$

Se debe asignar a cada individuo un intervalo, basta con generar un número aleatorio en un rango de [0,1], de magnitud igual a su probabilidad de selección, este número permitirá saber cuándo un individuo es apto para ser elegido parte de la nueva generación. Para realizar la selección del cromosoma, se gira la ruleta y se escoge el cromosoma del punto en donde se detenga, los mejores individuos cuentan con una porción mayor y por lo tanto de mayor posibilidad para ser seleccionados.

individuo	Fitness
2	1.0
3	2.0
4	1.333
5	1.333
6	0.667
7	0.667

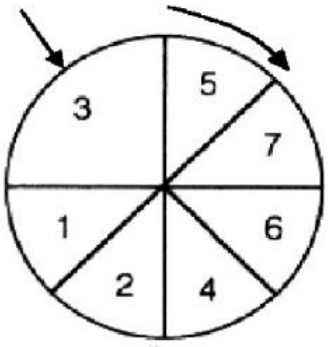

Figura **3-1**: Ejemplo selección por Ruleta González (2018)

Selección por torneo

La selección por torneo tiene dos opciones de selección, probabilística y Determinista, la selección probabilística consiste en generar un número aleatorio en un intervalo de [0,1], luego se selecciona un umbral como por ejemplo de P=0,8, si el valor aleatorio seleccionado es menor que el umbral establecido entonces se selecciona al mejor adaptado, de lo contrario se selecciona al peor adaptado.

La selección determinista consiste en seleccionar un número al azar por ejemplo p=3, de los individuos que se escogen se selecciona el más apto y se pasa a la siguiente generación.

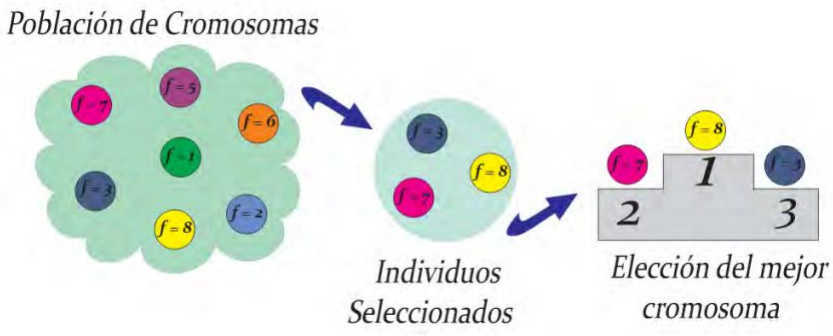

Figura **3-2**: Ejemplo selección por torneo Quintero (2017)

3.1.4. Cruce

El operador genético de cruzamiento, también conocido como recombinación, tiene el objetivo de obtener nuevos individuos (hijos) a partir de dos individuos seleccionados (padres), cada hijo es resultado de una combinación de cromosomas de los padres. El cruce se puede realizar de diferentes maneras, ya sea de forma uniforme, cruce de un punto o de dos puntos.

Cruce uniforme

Consiste en generar una nueva descendencia, copiando los genes de los padres que son escogidos de forma aleatoria, utilizando el criterio de una "máscara de cruce". Cada posición de la descendencia se escogerá dependiendo del valor que de encuentre en la máscara, si el valor corresponde a 1 se tomará el gen del padre, de lo contrario si corresponde a 0, se toma el valor de la madre. En la figura **3-3** se muestra un ejemplo de este operador.

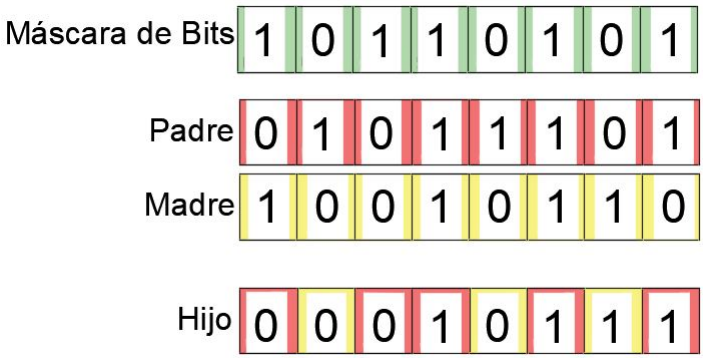

Figura **3-3**: Cruce uniforme

Cruce de un punto

Luego de seleccionar los padres, se procede a cortar sus cromosomas en un solo punto de forma fija o aleatoria, los valores de los genes del primer padre se copian hasta el punto de corte y el resto se copia de los genes de la madre. En la figura **3-4** se muestra un ejemplo del cruce en un punto de los cromosomas.

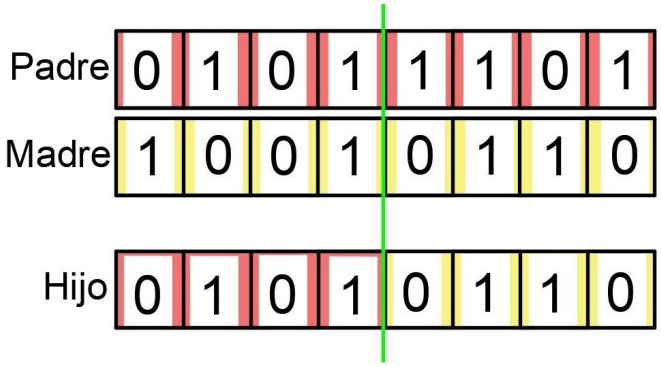

Figura **3-4**: Cruce de un punto

Cruce de dos puntos

El cruce de dos puntos funciona de forma similar al cruce de un punto, solo que en este caso se generan dos cortes en los cromosomas de los padres. La descendencia se genera teniendo en cuenta la parte central de uno de los padres y la sección lateral del otro padre como se muestra en la figura **3-6**

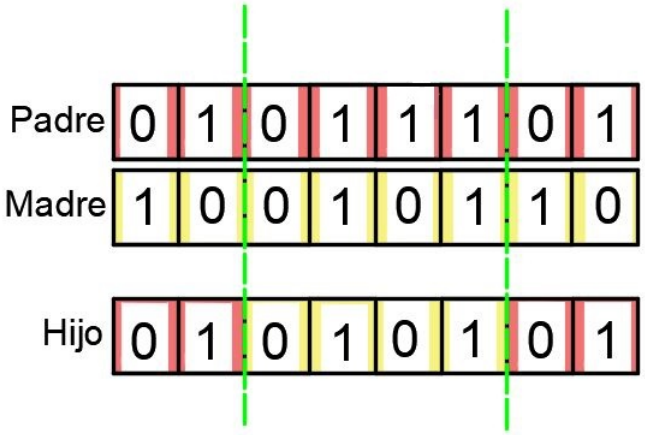

Figura **3-5**: cruce de dos puntos

3.1.5. Mutación

Luego de realizar la función cruce, se seleccionan algunos individuos de forma aleatoria para realizar la mutación, a cada cromosoma se le cambiara la información con una probabilidad dada. El porcentaje de mutación se establece a criterio, pero este debe ser bajo, por ejemplo si se tiene 20 individuos de 8 bits y se establece un porcentaje de 5 % se deberán cambiar 8 genes de forma aleatoria. Al alterar los valores genéticos de los individuos, se pueden presentar soluciones tanto validas como invalidas, por esta razón se debe alterar un gen de individuo para obtener una mejora en la descendencia.

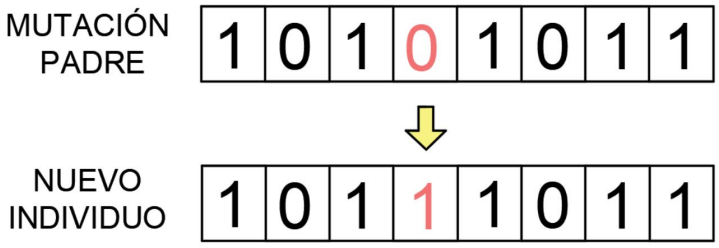

Figura **3-6**: Operador de Mutación

4 Implementación de la Metodología

4.1. Sistemas de prueba

Para validar la metodología propuesta del AG, se proponen tres sistemas de prueba, dos corresponden a sistemas IEEE de 10 y 34 barras, obtenidos de (Prado and Garces (2013)), en el documento se muestra una metodología para la asignación de GD en un sistema de distribución mediante el AG de Chu-Beasley. Los sistemas propuestos se desarrollaron con el objetivo de comparar y validar el funcionamiento de la metodología propuesta y de esta manera tener la seguridad en la resolución del tercer sistema de prueba propuesto correspondiente a una parte del sistema de distribución de Arauca, el cual cuenta con 18 barras cruciales, para el correcto suministro de energía dentro del departamento. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los sistemas de prueba.

4.1.1. Sistema de 10 nodos

La configuración del sistema de 10 barras con 23 kV de tensión base, se muestra en la figura **4-1**, los datos para cada una de las lineas fueron obtenidas mediante (Carvalho (2006).

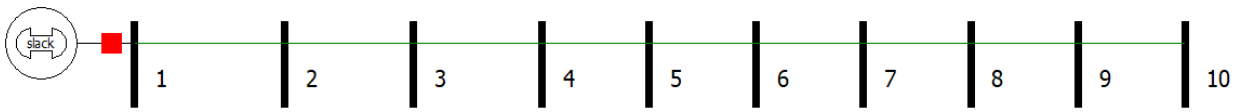

Figura **4-1**: Sistema de 10 barras con 23 kV

Teniendo en cuenta los datos del sistema de distribución (potencia activa y reactiva e impedancia de la línea) establecidos en la tabla **6-1** y **6-2**, se procede a ejecutar el flujo de potencia inicial, el cual sirve como referencia para calcular las pérdidas de los sistemas, de manera tal que puedan ser comparadas con los valores que se obtienen con la implementación de la GD.

4.1.2. Sistema de 34 nodos

La configuración del sistema de 34 barras con 11 kV de tensión base, se muestra en la figura **4-2**, los datos para cada una de las lineas fueron obtenidas mediante (Carvalho (2006), los valores de potencia e impedancia se encuentran establecidos en las tablas **6-3** y **6-4** respectivamente.

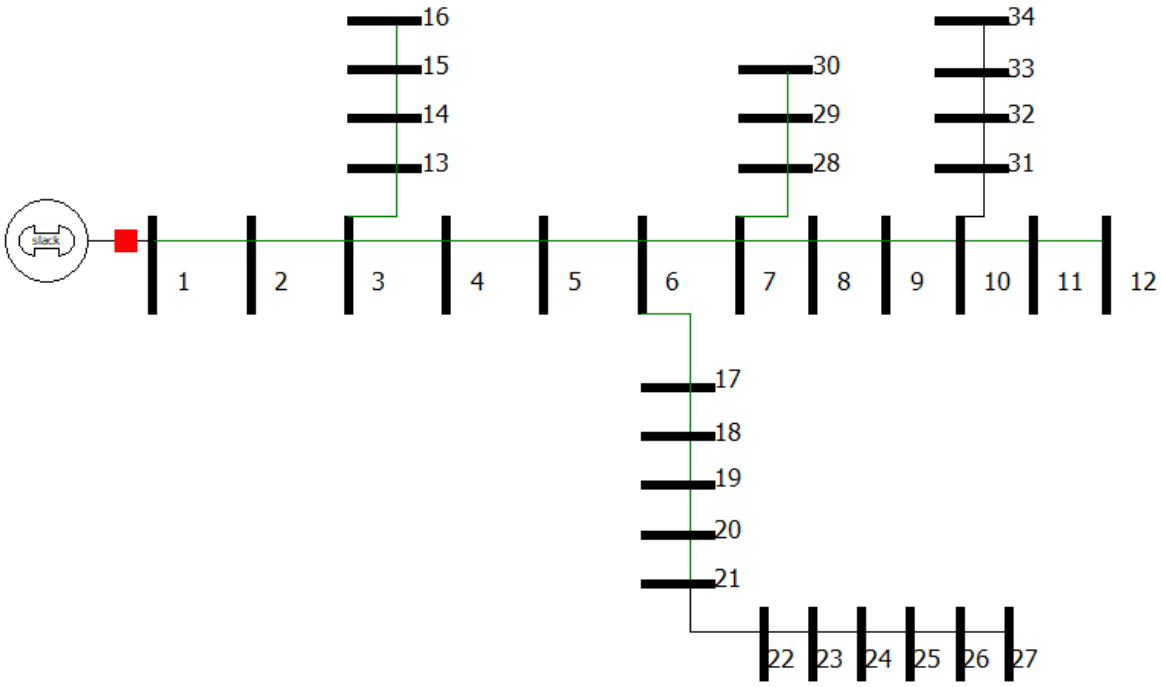

Figura **4-2**: Sistema de 34 barras con 11 kV

4.1.3. Sistema de eléctrico de Arauca

El departamento de Arauca cuenta con dos principales subestaciones (Banadia y Caño Limón), estas se conectan a la red nacional de transporte gestionada por Intercolombia.
En la figura **4-3** se presenta el diagrama del sistema de red prestadora del servicio eléctrico del departamento de Arauca para el año 2017. En vista de que el sistema corresponde a un sistema de trasmisión, en el recuadro rojo se muestra la parte del sistema que se utilizó para lograr el objetivo propuesto, teniendo en cuenta que se estableció para un sistema de distribución.

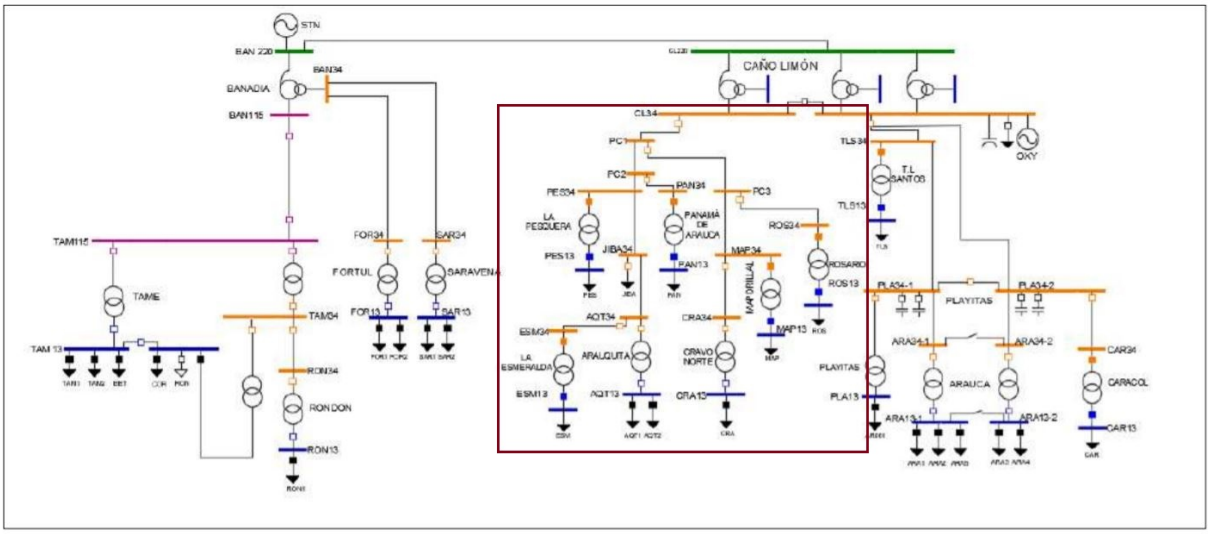

Figura **4-3**: Diagrama unifilar sistema Enelar E.S.P. año 2017

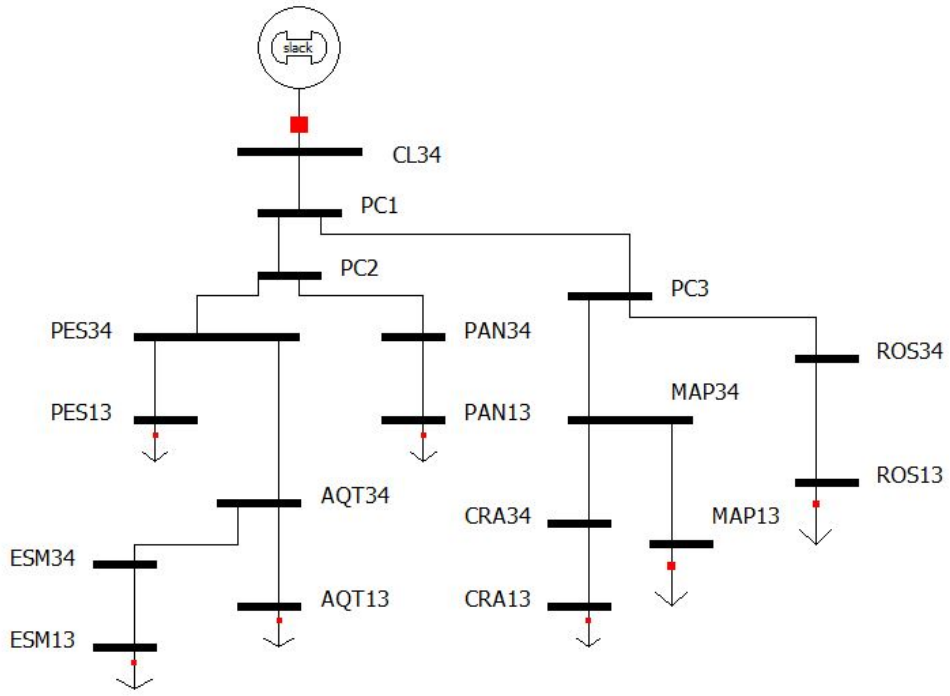

Figura **4-4**: Parte del sistema de Arauca seleccionado

En la figura **4-4** se muestra la parte del sistema que se utiliza como fundamento para el estudio de la correcta ubicación de la GD. La red consiste en un alimentador radial, que alimenta distintas cargas a lo largo de dicho alimentador, la configuración del sistema es de 18 barras con tensiones base de 34,5 y 13,8 kV. Los valores de impedancia del sistema se establecen en la tabla **6-5** y **6-6** respectivamente.

De acuerdo al análisis realizado en la sección 2.4, las plantas de GD se asumieron de tipo fotovoltaico. Es importante mencionar que, de acuerdo a la regulación CREG 030 de 2018, articulo 5 existen ciertos parametros para la conexión de la GD, en el apartado (a) de dice que "La sumatoria de la potencia instalada de los GD o AGPE que entregan energía a la red debe ser igual o menor al 15 % de la capacidad nominal del circuito, transformador o subestación donde se solicita el punto de conexión. La capacidad nominal de una red está determinada por la capacidad del transformador". En consecuencia, teniendo en cuenta la norma se realizó un análisis de la capacidad de cada transformador y se estableció un valor máximo de 1 MW para el caso de estudio propuesto del sistema de distribución del departamento de Arauca. En el anexo 6.4, se detalla el dimensionamiento realizado.

4.2. Resultados

4.2.1. Sistema de 10 nodos

Se establece el flujo de potencia del sistema, con el fin de obtener las pérdidas sin implementar ningún tipo de GD dentro del sistema, el flujo de potencia se resuelve por medio de la herramienta Matpawer 4.1, las pérdidas obtenidas son de aproximadamente 0,784 MW.

Sistema de 10 nodos con una planta de GD

Luego de tener claro los valores nominales del sistema y las pérdidas del mismo, se procede a implementar la GD dentro del sistema, para verificar cada uno de los valores de pérdidas en cada una de las barras implementando la GD con un tamaño 1 MW, ejecutando el flujo de potencia de forma Manual.

Barra	Pérdidas(MW)
2	0,7773
3	0,7765
4	0,7441
5	0,7182
6	0,6569
7	0,6356
8	0,5957
9	0,5327
10	0,4945

Cuadro **4-1**: Resultados de la implementación una unidad de GD sistema de 10 nodos

En la figura **4-5** se muestran las pérdidas de potencia totales obtenidas para cada barra, el lugar óptimo de conexión de GD es la barra 10 donde las pérdidas totales de potencia son mínimas para este sistema de prueba en particular.

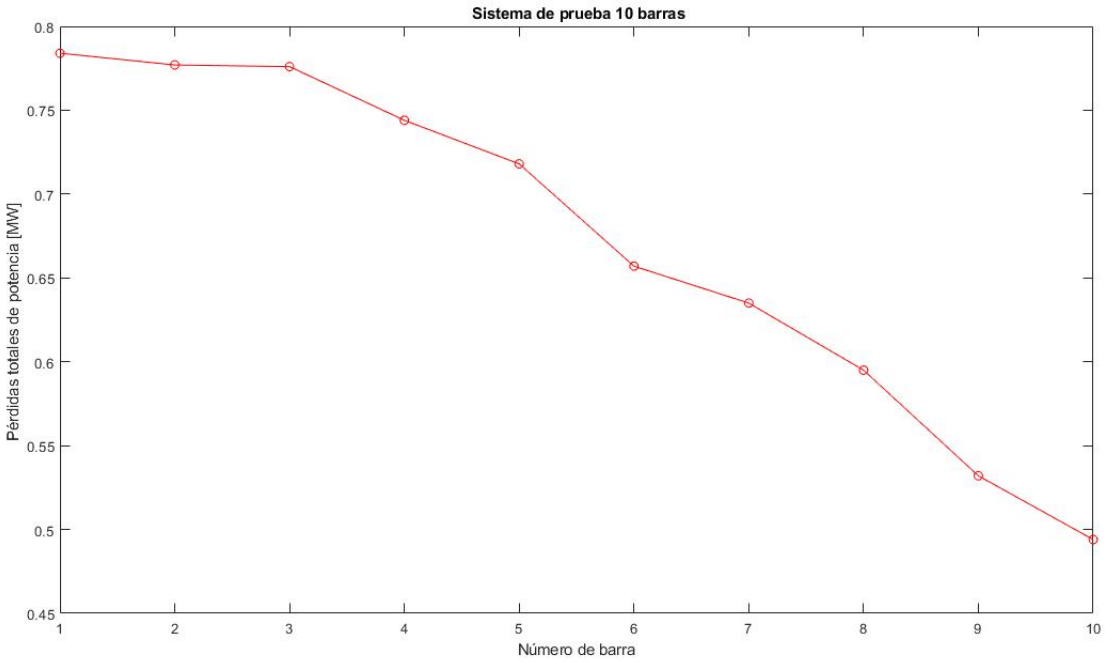

Figura **4-5**: Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de 10 barras

Al ejecutar el AG se obtiene un resultado igual al obtenido de forma manual, es decir que la barra en donde se presentan menores pérdidas corresponde a la número 10, con una potencia activa de 0,49452 MW. Al comparar los resultados obtenidos del sistema implementando una planta de GD, se evidencia una reducción de pérdidas de potencia activa aproximadamente de 36,9234 %, del valor inicial. Para validar los resultados obtenidos se realiza una comparación con los datos presentados en el artículo Prado and Garces (2013), quienes reportan una disminución del 36,91 % en la cantidad de pérdidas en el sistema después de haber sido implementada una unidad de GD en la barra número 10. Se evidencia que los resultados son aproximados y llegan a la misma solución.

Para la implementación del AG es importante realizar una serie iteraciones, con el objetivo de observar cómo es su comportamiento y convergencia, dado que no siempre se garantiza llegar a un óptimo global y existen ciertas diferencias entre una simulación y otra, en algunos casos la convergencia termina siendo cercana pero no la solución real del sistema. Con el fin comprobar la efectividad del algoritmo se realizó una serie de 1000 iteraciones obteniendo que 890 de ellas dieron el resultado correcto. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es del 89 %.

$$E = \frac{890}{1000} * 100 = 89\,\% \tag{4-1}$$

Sistema de 10 nodos con dos plantas de GD

Al implementar dos plantas de GD en el sistema de 10 nodos se obtuvo que las barras en donde se presentan menores pérdidas corresponden a las barras 10 y 9, con una potencia activa de 0.32663 MW. Si se realiza una comparación con el sistema sin GD se tiene una reducción en pérdidas de potencia activa de aproximadamente el 58,35 %.

Utilizando la técnica de AG Chu-Beasley, la respuesta obtenida es similar, la asignación de unidades de GD corresponden a las barras 9 y 10 y se produce una reducción de aproximadamente el 58,33 % del valor de pérdida de potencia activa desde el valor inicial.
Para verificar la eficiencia del algoritmo Génetico se obtuvo que de las 1000 iteraciones realizadas por el algoritmo se obtuvo que 900 de ellas dieron el resultado correcto. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es del 90 %.

$$E = \frac{900}{1000} * 100 = 90\,\% \tag{4-2}$$

Perfil de tensión para cada caso en el sistema de 10 nodos

Al reducir las pérdidas de potencia activa en el sistema, existe un cambio en el nivel de tensión en las barras del sistema. En la figura **4-6** se muestran los cambios obtenidos para el perfil de tensiones en cada uno de los casos propuestos. Se evidencia que para este caso en específico los valores de tensión inicialmente sin GD son muy bajos, pero que al implementar una o dos plantas de GD de forma adecuada, los valores aumentan considerablemente en los nodos 9 y 10.

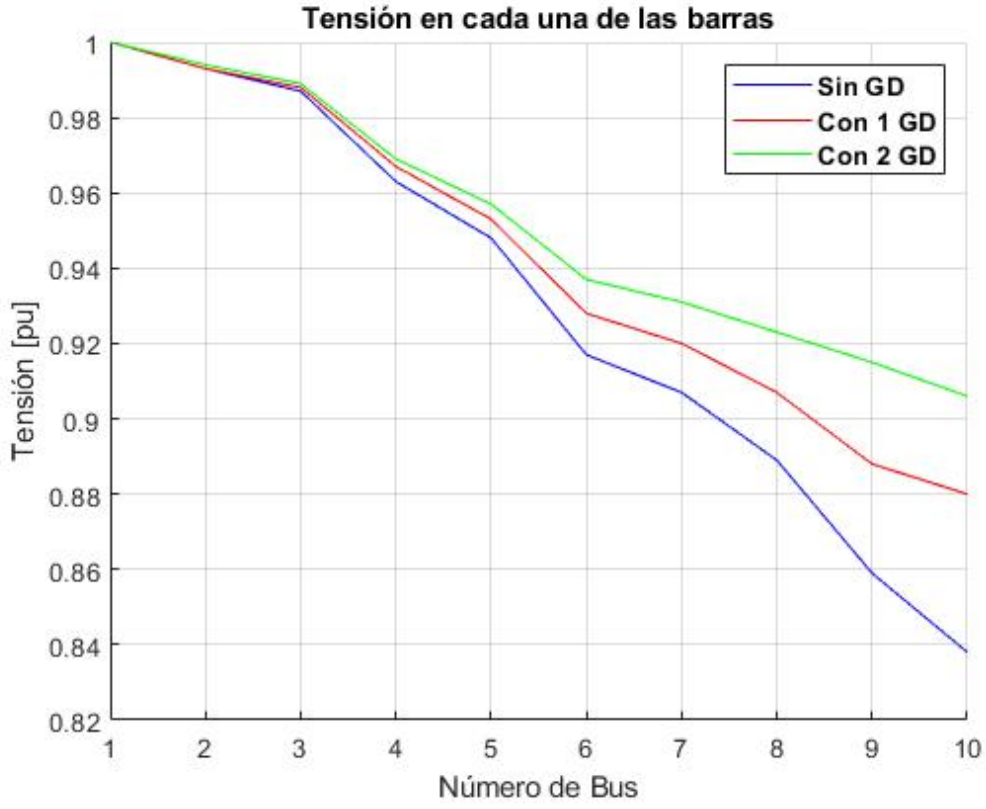

Figura **4-6**: Gráfico de tensión sistema de 10 nodos

4.2.2. Sistema de 34 nodos

Al resolver el flujo de potencia del sistema sin implementar la GD, mediante el software Matpower 4.1 se obtuvo que las pérdidas de potencia activa corresponden aproximadamente a 0,222 MW, este resultado se verificó mediante el documento Carvalho (2006)

Sistema de 34 nodos con una planta de GD

Luego de conocer las pérdidas obtenidas del sistema sin GD, se procede a implementar una planta de GD con un tamaño de 1 MW, los resultados obtenidos al ejecutar el flujo de potencia para cada una de las barras se presentan mediante la tabla 4.2.2.

Barra	Pérdidas(MW)	Barra	Pérdidas(MW)
2	0,213	19	0,157
3	0,206	20	0,153
4	0,194	21	0,149
5	0,184	22	0,145
6	0,175	23	0,142
7	0,171	24	0,141
8	0,169	25	0,140
9	0,167	26	0,141
10	0,166	27	0,142
11	0,167	28	0,172
12	0,167	29	0,173
13	0,206	30	0,174
14	0,207	31	0,167
15	0,208	32	0,168
16	0,209	33	0,169
17	0,169	34	0,170
18	0,163		

Cuadro **4-2**: Resultados simulación con una unidad de GD sistema de 34 nodos

En la tabla 4.2.2 se muestran los resultados de las pérdidas de potencia totales obtenidas para cada barra, el lugar óptimo de conexión de DG es la barra 25 donde las pérdidas totales de potencia son mínimas para este sistema de prueba en particular.Si se compara este resultado con el obtenido inicialmente sin DG, mostrado en la figura 4.2.2 en la barra 1, se considera una reducción de pérdidas de potencia activa de aproximadamente 36,93 %. Estos resultados fueron obtenidos al ejecutar el flujo de potencia de forma manual, sin implementar el AG, con el objetivo de verificar que los resultados del método propuesto son verídicos.

Mediante la implementación del AG se obtuvo que luego de 1000 iteraciones la respuesta con menores pérdidas de potencia activa es de 0,13968 MW, valor muy cercano al obtenido de forma manual, pero que si se compara con el método Chu-Beasley difiere en un gran porcentaje dado que se tiene una reducción del 80,75 %. De las 1000 iteraciones realizadas

por el algoritmo se obtuvo que 870 de ellas dieron el resultado correcto. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es de 87 %.

$$E = \frac{870}{1000} * 100 = 87\,\% \tag{4-3}$$

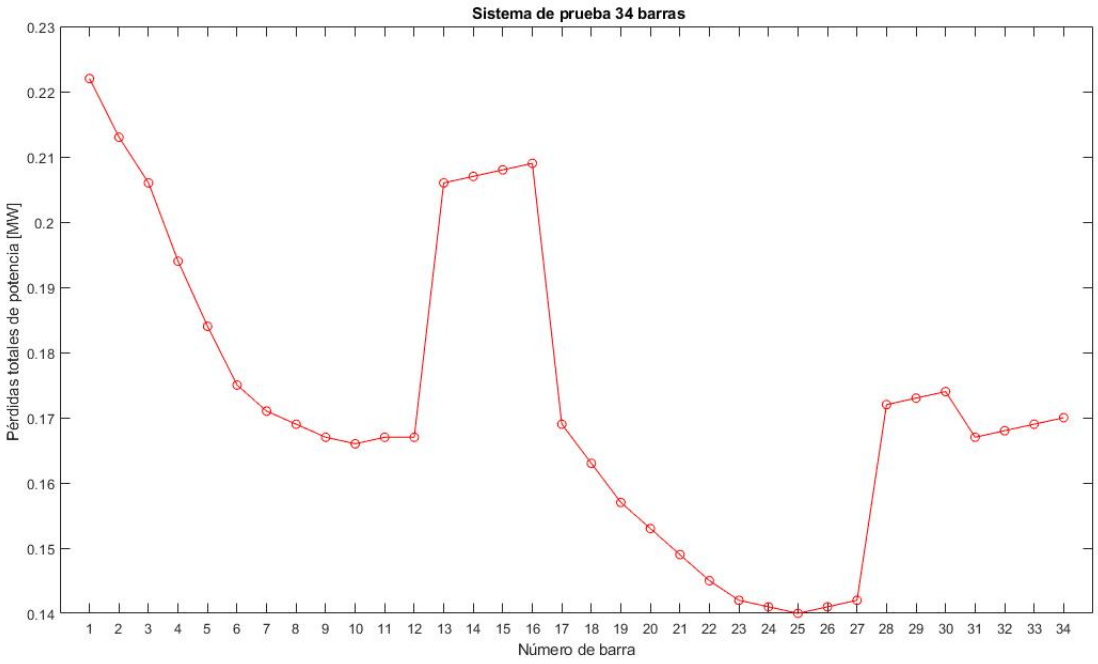

Figura **4-7**: Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de 34 barras

Sistema de 34 nodos con dos planta de GD

Se obtuvo que al realizar la conexión de dos plantas de GD de un 1 MW cada una, en el sistema de 34 nodos, las barras en donde se presentan menores pérdidas corresponden a las barras 10 y 25, con una potencia activa de 0,0977 MW. De los resultados que se obtuvieron luego de realizar una serie de 1000 repeticiones del algoritmo obteniendo la mejor respuesta, es decir la de menor pérdida activa en el sistema, se obtuvo que 950 de ellas dieron el resultado correcto. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es del 95 %.

$$E = \frac{950}{1000} * 100 = 95\,\% \tag{4-4}$$

Al comparar este resultado con el obtenido inicialmente sin GD, se obtiene una reducción de pérdidas activas de aproximadamente del 56 %. Pero si se compara esta información con la del documento guía se evidencia una gran diferencia en los resultados obtenidos dado que se presenta una reducción de aproximadamente el 86,01 % con una asignación de GD en los nodos 9 y 10.

Perfil de tensión para cada caso en el sistema de 34 nodos

En la figura **4-8** se muestran los cambios obtenidos para el perfil de tensiones en cada uno de los casos propuestos. Con la asignación adecuada de unidades de GD no solo se reducen las pérdidas si no que se obtiene una ganancia de tensión. Los nodos en donde se presentan los niveles más bajos, son los más adecuados para instalar la GD como lo es el nodo 10 y 25.

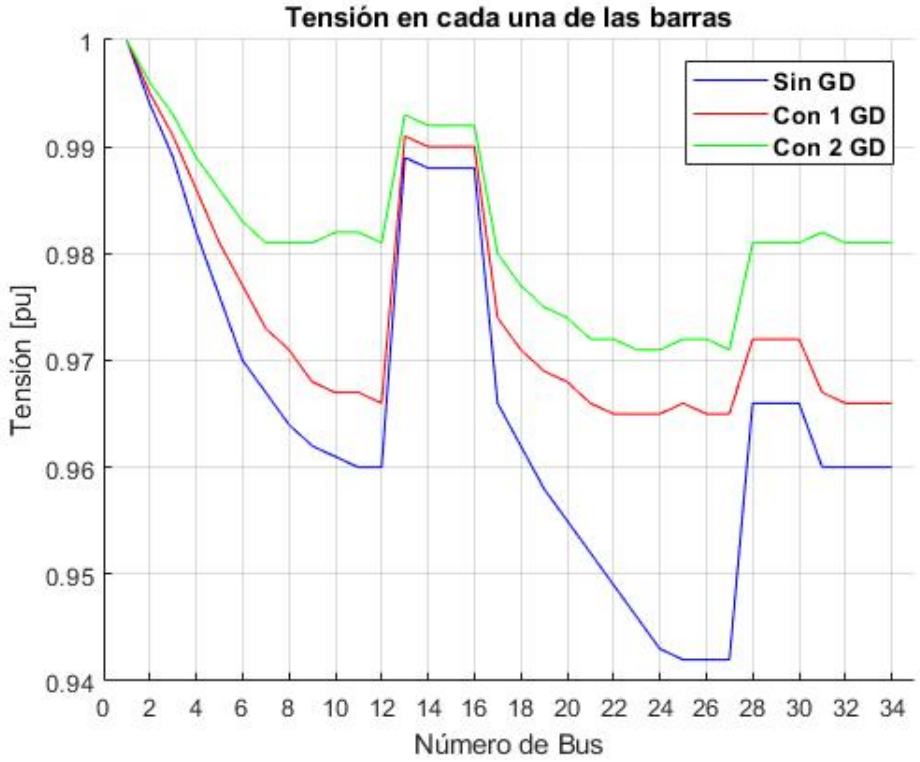

Figura **4-8**: Gráfico de tensión sistema de 34 nodos

4.2.3. Sistema de Arauca

Al resolver el sistema de potencia sin la implementación de GD mediante el software Matpower 4,1, se obtuvo que las pérdidas de potencia activa son de 0,296 MW.

Sistema de Arauca con una planta de GD

Para la conexión de GD en el sistema de Arauca se estableció un tamaño de 1MW, ya que como se mostró en los casos anteriores, permite evidenciar una reducción significativa en cuanto a las pérdidas de potencia activa. Los resultados obtenidos al ejecutar el flujo de potencia para cada una de las barras al conectar una planta de GD se presentan mediante la tabla **4-3**.

N° de Barra	Barra	Pérdidas (MW)
2	PC1	0,283
3	PC2	0,279
4	PES34	0,276
5	PES13	0,280
6	PAN34	0,278
7	PAN13	0,271
8	ESM34	0,265
9	ESM13	0,246
10	AQT34	0,268
11	AQT13	0,245
12	CRA34	0,286
13	CRA13	0,291
14	MAP34	0,286
15	MAP13	0,297
16	PC3	0,286
17	ROS34	0,287
18	ROS13	0,292

Cuadro **4-3**: Resultados simulación con una unidad de GD sistema de 18 nodos

Conforme a los resultados obtenidos al ejecutar el flujo de potencia de forma manual, se muestra que el lugar en donde se presentan menores pérdidas de potencia activa corresponde a la barra 11 (AQT13) con una potencia de 0,245 MW. Al comparar este resultado con las pérdidas obtenidas sin GD en el sistema, se considera un porcentaje de reducción de pérdidas del 17,23 %.

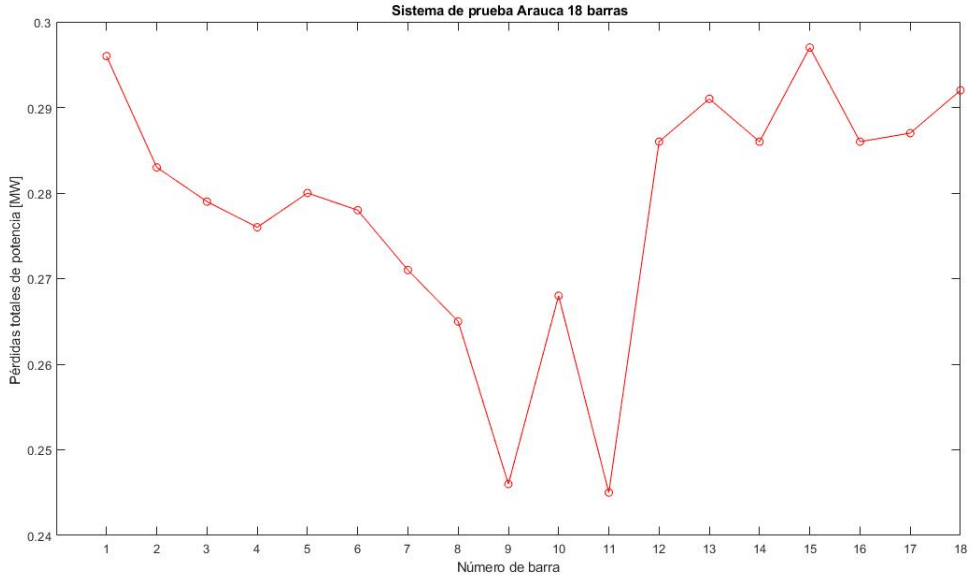

Figura **4-9**: Pérdida de potencia total para cada una de las ubicaciones de GD en el sistema de Arauca 18 barras

Mediante la implementación del AG se obtuvo que luego de realizar 1000 iteraciones, 830 de ellas dieron que el resultado es igual al obtenido de forma manual. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es de 83 %.

$$E = \frac{830}{1000} * 100 = 83\,\% \tag{4-5}$$

Sistema de Arauca con dos plantas de GD

Luego de conectar dos plantas de GD con un tamaño de 1MW cada una mediante el AG , se obtuvo una reducción de pérdidas de potencia activa del 31,08 % en comparación con el sistema sin GD. Se obtuvo que las barras aptas para la conexión de GD corresponden a las barras 9 (ESM13) y 11 (AQT13) con pérdidas de potencia activa de 0,204 MW.

El resultado fue comprobado de forma manual, al igual que en los anteriores casos y se obtuvo que de 1000 iteraciones mediante el Algoritmo Génetico 910 de ellas dieron el resultado correcto. Comprobando de esta manera que la eficiencia del algoritmo propuesto es de 91 %.

$$E = \frac{910}{1000} * 100 = 91\,\% \tag{4-6}$$

Perfil de tensión para cada caso en el sistema de Arauca

En la figura **4-8** se muestran los cambios obtenidos para el perfil de tensiones en cada uno de los casos propuestos, se evidencia que en los nodos 9 y 11 en donde se implementa la GD, los valores de tensión inicialmente son muy bajos, pero al implementarla se presenta una ganancia de tensión.

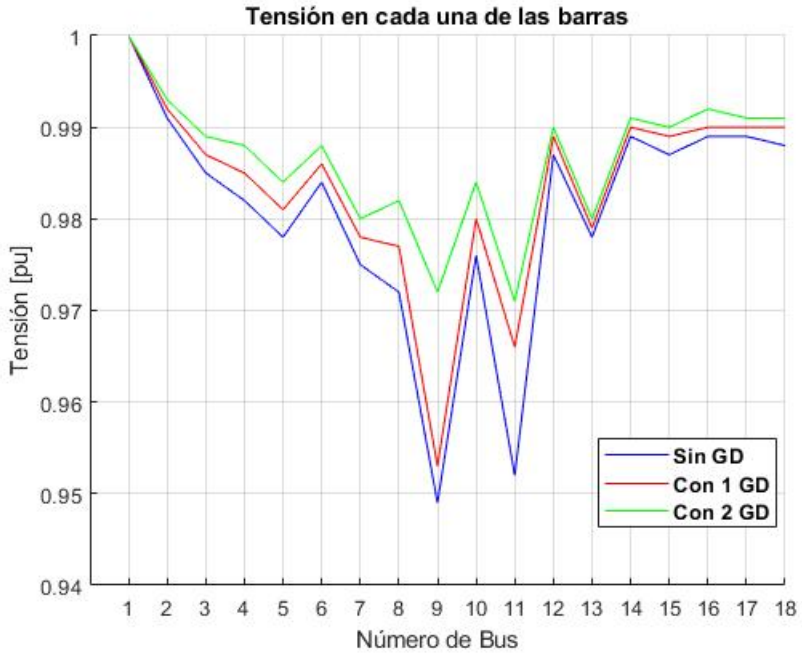

Figura **4-10**: Gráfico de tensión sistema de Arauca nodos

4.2.4. Comparación de resultados

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron dos sistemas de prueba de 10 y 34 nodos con el objetivo de comparar los resultados obtenidos. En la tabla **4-4** se muestran los resultados del procedimiento de optimización para los dos métodos, Pérdidas de potencia activa con y sin GD, lugar óptimo y tiempo de cálculo. Para el primer sistema de 10 nodos se evidencia una reducción significativa, además de presentar resultados similares en cuanto a ubicación y pérdidas al implementar una y dos plantas de GD en el sistema. Por otro lado, para el sistema de 34 nodos los resultados de pérdidas difieren hasta en un 40 % pero se presentan resultados similares en cuanto a la ubicación. En cuanto al tiempo de cálculo el algoritmo propuesto presenta un mayor tiempo de convergencia.

Sistema de prueba	N°plantas de (GD)	Pérdidas sin GD (MW)	Método	Lugar óptimo (N° de barra)	Pérdidas (MW)	Tiempo(s)
10 nodos	1	0,784	Propuesto	10	0,4944	0.1159
			Chu Beasley	10	0,4945	0.0688
	2		Propuesto	9 y 10	0,3266	0,8069
			Chu Beasley	9 y 10	0,3267	0,1109
34 nodos	1	0,222	Propuesto	25	0,1396	0,1390
			Chu Beasley	25	0,0427	0,1129
	2		Propuesto	10 y 25	0,0977	0,3665
			Chu Beasley	9 y 25	0,0311	0,1729

Cuadro **4-4**: Comparación de resultados de los algoritmos para cada sistema de prueba

Luego de hacer una comparación de los resultados con el algoritmo Chu Beasly, se procede a hacer la comparación en términos de tiempo de cálculo y convergencia de forma manual y mediante el AG propuesto, para cada uno de los casos.

Sistema de Prueba	N°plantas de (GD)	Método	Tiempo(s)
10 nodos	1	Manual	2,0963
		Algoritmo Propuesto	0,1159
	2	Manual	2,4700
		Algoritmo Propuesto	0,8069
34 nodos	1	Manual	1,2030
		Algoritmo Propuesto	0,1390
	2	Manual	4,7409
		Algoritmo Propuesto	0.3665
Arauca(18 nodos)	1	Manual	1,7121
		Algoritmo Propuesto	0,6930
	2	Manual	2,4260
		Algoritmo Propuesto	1,0090

Cuadro **4-5**: Comparación de resultados en términos de tiempo

4.3. Discusión

Para evaluar el algoritmo propuesto, determinando la óptima ubicación y dimensionamiento de la GD, se dispusieron tres sistemas de prueba de diferente tamaño, a cada uno de

ellos se les realizaron pruebas al utilizar una o dos plantas de GD y se buscó ver el comportamiento de las pérdidas de potencia activa para cada una de ellas, los sistemas IEEE de 10 y 34 nodos se utilizaron con el objetivo de verificar los resultados del algoritmo propuesto, por otro lado el sistema de Arauca se utilizó para observar un ejemplo más realista del comportamiento de un sistema de distribución ante posibles variaciones en su generación.

El tamaño de las plantas de GD para los sistemas IEEE de 10 Y 34 nodos se establecieron del tamaño de 1 MW, dado que este tamaño se fijó en el artículo utilizado para la validación del AG presentado. Para el caso de Arauca se buscó determinar un tamaño con en el que fuera significativa la reducción de perdidas en el sistema y cumpliera con la norma CREG 030 en donde se establece que la sumatoria de la potencia instalada de los GD debe ser igual o menor al 15 % de la capacidad nominal del circuito, transformador o subestación donde se solicita el punto de conexión. Al realizar pruebas con el tamaño establecido por la CREG 030 de 0,1 MW se observó que, aunque si se presentaba una reducción en las pérdidas de potencia activa, eran poco significativas para el sistema, además, estas pruebas también fueron realizadas hasta para tres plantas del mismo tamaño, presentando resultados similares. Por otro lado, al establecer un tamaño de hasta 1MW considerando 10 plantas de 0,1MW es posible evidenciar los efectos de implementar GD en un sistema.

Se logró conseguir resultados significativos en cuanto a la reducción de pérdidas en cada uno de los sistemas de potencia propuestos, en el sistema de 10 barras se obtuvo que al realizar la conexión de una sola planta de GD existe una reducción de hasta el 36,92 % ubicándose en el nodo 10. Al observar la figura **4-5** se evidencia que, al ir ubicando la GD en cada nodo, entre más lejano sea este del nodo de generación menores pérdidas se obtienen, esto también es posible verificarlo mediante el sistema de 34 nodos, ya que como se muestra en la figura **4-7** el nodo donde se presentan menores perdidas es el nodo 25, si se observa el diagrama unifilar se aprecia que este nodo es uno de los que se encuentra más alejado del nodo de generación. En cuanto a la reducción de pérdidas se obtiene un porcentaje de 63,99 %, un dato aún más significativo que el caso de 10 nodos. Por otro lado para el caso de Arauca con 18 nodos se obtuvo una reducción del 17,23 % un dato menor a los casos anteriormente presentados, esto se puede deber a que si se observa el diagrama unifilar, este sistema no es tan lineal como en los anteriores casos, es decir, que de cada nodo se desprenden otros nodos y no existen cargas tan alejadas del nodo de generación, de acuerdo a los resultados presentados en la tabla **4-3** el nodo en donde se presenta menores pérdidas corresponde a AQT13 (Arauquita).

Los lugares óptimos para la conexión de dos plantas de GD para los sistemas de prueba de distribución de 10, 18, y 34 nodos corresponden a las barras 9 y 10, 9 y 11, 10 y 25 respectivamente, en donde las pérdidas totales de potencia alcanzan el valor mínimo. Para cada

uno de los sistemas se presenta una mayor reducción que al solo implementar una planta de GD, para cada caso se obtuvo una reducción del 58,35 %, 31,08 % y 56 % respectivamente, a medida que se van implementando plantas de GD las pérdidas disminuyen, por ejemplo, si para el caso de Arauca de 18 barras se le implementa otra planta de GD es decir 3 plantas las pérdidas obtenidas son de 0,188 MW con una reducción del 36,48 %.

Los resultados mostraron que la GD no solo reduce las pérdidas de potencia activa, si no que además contribuye al mejoramiento del perfil de tensiones. En los tres casos propuestos se puede observar que inicialmente el perfil de tensiones presenta valores bajos llegando hasta 0,84 pu, pero que al implementar las unidades de GD de manera adecuada se obtiene una ganancia de tensión y los datos mejoran considerablemente. Se observa que las graficas de pérdidas y tensión son similares, pues los datos presentan la misma tendencia y los lugares en donde se obtienen los datos más bajos de tensión, son los más adecuados para asignar las plantas de GD según los resultados obtenidos.

Aunque la GD trae consigo beneficios, si no se realiza la correcta ubicación se pueden ocasionar aumentos en los niveles de pérdidas, como se muestra en la figura **4-9** si se implementa la GD en el nodo 15 (MAP13) las pérdidas en lugar de disminuir, aumentan en un 1 %.

En cuanto a los tiempos de convergencia, la simulación propia toma un poco más de tiempo en comparación con los tiempos del artículo chu Beasly, esta diferencia puede ser relativamente insignificante puesto que los resultados son del orden de milisegundos, esta diferencia puede ser ocasionada por la capacidad computacional, puesto que los sistemas no se simularon en igualdad de condiciones. Así mismo también se puede afirmar que la convergencia del algoritmo es rápida, ya que si se realiza una comparación con otro método como por ejemplo el Búsqueda de cuadricula Gözel and Hocaoglu (2009), para un sistema de 34 nodos se pueden llegar a presentar tiempos de hasta 133.640(s).

5 Conclusiones

- El algoritmo genético es un método que permite determinar la ubicación y el tamaño óptimo de la GD de una forma fácil y rápida. Mediante los resultados que se obtuvieron para cada uno de los casos presentados se demostró que el algoritmo posee gran potencial para la solución de todo tipo de sistemas. A pesar de que este tipo de algoritmos tiene ciertas limitaciones, como converger prematuramente y quedar atrapado en óptimos locales, además de tardar mucho en converger o no hacerlo, para el caso propuesto de optimización se presentaron soluciones eficientes, dado que de acuerdo a la eficiencia obtenida supera el 83 %, los datos son verificados mediante el software Matpower, por lo cual se garantiza confiabilidad.

- Aunque los resultados de pérdidas de potencia activa para los sistemas de 10 y 34 nodos fueron comprobados mediante el algoritmo genético Chu Beasly, los resultados para el sistema de 34 barras difieren considerablemente, al buscar verificar estos datos se encuentra que en el documento de referencia no se indica la información necesaria para validarlos, pues los resultados solo se comparan en cuestión de rendimiento con un algoritmo de búsqueda exhaustivo, pero no se muestra una comparación en cuanto a las pérdidas de potencia.

- Se realizó una comparación en términos de tiempo de cálculo y convergencia con el algoritmo Chu Beasley y con la optimización realizada de forma manual, se obtuvo que el algoritmo propuesto y el algoritmo Chu Beasley presentan resultados similares, pero este segundo lo supera en un tiempo de aproximadamente 0,2s, si se confrontan estos datos con los obtenidos de forma manual se presenta una diferencia de 2s.

- Se logró demostrar que el implementar GD en el departamento de Arauca si es factible, no solo en términos económicos si no que implica una mejora en la calidad del servicio minimizando las pérdidas en el sistema y mejorando el perfil de tensiones, además de que es viable el uso de la energía solar, dado que el departamento de Arauca es una de las zonas con mayor potencial de irradiación solar.

- Al asignar plantas de GD de forma adecuada, no solo se presenta una reducción de pérdidas, si no que también existe una mejora en los perfiles de tensión, en los sistemas de distribución propuestos. Se evidencia que las gráficas presentadas de pérdidas y

perfiles de tensión, son similares ya que los datos presentan una misma tendencia, los nodos en donde se presentan los niveles más bajos de tensión, son los más adecuados para instalar las unidades de GD.

- Se realizó un análisis del comportamiento de la tensión para cada uno de los sistemas, pero no se efectuó un estudio de los valores permitidos según la norma. Para trabajos futuros se recomienda hacer una optimización multiobjetivo, donde se contemple la integración de nuevas variables como puede ser mejorar el perfil de tensión o tener en cuenta factores económicos.

Bibliografía

Balamurugan, K., Srinivasan, D., and Reindl, T. (2012). Impact of distributed generation on power distribution systems. *Energy Procedia*, 25:93–100.

Borges, C. L. and Falcão, D. M. (2003). Impact of distributed generation allocation and sizing on reliability, losses and voltage profile. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,*, volume 2, pages 5–pp. IEEE.

Carvalho, M. (2006). *Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. 2006. 94f.* PhD thesis, Dissertação de mestrado (Dissertação em engenharia elétrica)-USP, São Carlos.

Coradir (s.f). `https://onx.la/e00cd`.

CREG(030) (2018). `https://www.creg.gov.co/sites/default/files/consolidado_conceptos_al_22_de_junio_de_2018.pdf`.

El tiempo (2022). `https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/arauca.html`.

Ganguly, S. and Samajpati, D. (2015). Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm. *IEEE transactions on sustainable energy*, 6(3):688–697.

González, F. (2018). Algoritmo genético simple. *Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia*.

Gözel, T. and Hocaoglu, M. H. (2009). An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems. *Electric power systems research*, 79(6):912–918.

Grisales, L. F., Restrepo Cuestas, B. J., et al. (2017). Location and sizing of distributed generation: A review. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2):157–176.

Gualotuña Cacuango, V. H. (2019). Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución utilizando un algoritmo multiobjetivo considerando despacho. B.S. thesis.

Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2002). *Investigación de operaciones.* McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA.

IDEAM, Instituto de Hidrología, M. y. E. A. (s.f). Atlas de viento de colombia.

Khoa, T. Q. D., Binh, P., and Tran, H. (2006). Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems. In *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pages 725–732. IEEE.

Martínez María Dolores, S. M., Bernal García, J. J., Sánchez García, J. F., et al. (2010). Algoritmos genéticos. un ejemplo con hoja de cálculo.

Narváez, P. A., López-Lezama, J. M., and Velilla, E. (2015). Ubicación de generación distribuida para minimización de pérdidas usando un algoritmo genético híbrido. *Información tecnológica*, 26(3):123–132.

Noreña, L. F. G., Cuestas, B. J. R., and Ramirez, F. E. J. (2017). Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: Una revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2):157–176.

Prado, I. and Garces, L. (2013). Chu-beasley genetic algorithm applied to the allocation of distributed generation. In *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pages 1–7. IEEE.

Quintero, I. M. (2017). Ajuste de funciones mediante metaheurísticas aplicado a la detección de fase en arreglos de metrología óptica. *Centro de investigaciones en óptica, A.C.*

Sánchez, L. G. G. (2012). *Localización óptima de generación distribuida en sistemas de distribución trifásicos con carga variable en el tiempo utilizando el método de Monte Carlo.* PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Universitària d'Enginyeria ....

Solartex (2022). `https://n9.cl/d9cgz`.

Sookananta, B., Kuanprab, W., and Hanak, S. (2010). Determination of the optimal location and sizing of distributed generation using particle swarm optimization. In *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Confernce on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pages 818–822. IEEE.

Úbeda, J. M. C., López, F. G., Tarí, E. J., Peña, A. M., Navarro, J. Á. P., Sánchez, I. T., and Boix, F. V. (2008). *Educación medioambiental.* Editorial Club Universitario.

6 Anexos

6.1. SISTEMA DE 10 BARRAS -23 kV

Barra	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
1	0	0
2	1840	460
3	980	340
4	1790	446
5	1598	1840
6	1610	600
7	780	110
8	1150	60
9	980	130
10	1640	200

Cuadro **6-1**: Potencia activa y reactiva en cada una de las barras

Línea	Barra de origen	Barra de destino	R(Ω)	X(Ω)	Capacidad (A)
1	1	2	0,1233	0,4127	130
2	2	3	0,0140	0,6051	80
3	3	4	0,7463	1,2050	65
4	4	5	0,6984	0,6084	65
5	5	6	1,9831	1,7276	65
6	6	7	0,9053	0,7886	65
7	7	8	2,0552	1,1640	130
8	8	9	4,7953	2,7160	65
9	9	10	5,3434	3,0264	65

Cuadro **6-2**: Impedancias de las líneas

6.2. SISTEMA DE 34 BARRAS - 11 kV

Barra	Potencia activa (kW)	Potencia reactiva (kVAr)
1	0	0
2	230	142,5
3	0	0
4	230	142,5
5	230	142,5
6	0	0
7	0	0
8	230	142,5
9	230	142,5
10	0	0
11	230	142,5
12	137	84
13	72	45
14	72	45
15	72	45
16	13,5	7,5
17	230	142,5
18	230	142,5
19	230	142,5
20	230	142,5
21	230	142,5
22	230	142,5
23	230	142,5
24	230	142,5
25	230	142,5
26	230	142,5
27	137	85
28	75	48
29	75	48
30	75	48
31	57	37,5
32	57	37,5
33	57	37,5
34	57	37,5

Cuadro **6-3**: Potencia activa y reactiva en cada una de las barras

Línea	Barra origen	Barra destino	R(Ω)	X(Ω)	Comp(km)	I (A)
1	1	2	0,1950	0,0800	0,6000	100
2	2	3	0,1950	0,0800	0,5500	100
3	3	4	0,2990	0,0830	0,5500	100
4	4	5	0,2990	0,0830	0,5000	100
5	5	6	0,2990	0,0830	0,5000	100
6	6	7	0,5240	0,0900	0,6000	100
7	7	8	0,5240	0,0900	0,4000	100
8	8	9	0,5240	0,0900	0,6000	100
9	9	10	0,5240	0,0900	0,4000	100
10	10	11	0,5240	0,0900	0,2500	100
11	11	12	0,5240	0,0900	0,2000	65
12	3	13	0,5240	0,0900	0,3000	80
13	13	14	0,5240	0,0900	0,4000	65
14	14	15	0,5240	0,0900	0,2000	65
15	15	16	0,5240	0,0900	0,1000	130
16	6	17	0,2990	0,0830	0,6000	130
17	17	18	0,2990	0,0830	0,5500	130
18	18	19	0,3780	0,0860	0,5500	65
19	19	20	0,3780	0,0860	0,5000	80
20	20	21	0,3780	0,0860	0,5000	65
21	21	22	0,5240	0,0900	0,5000	65
22	22	23	0,5240	0,0900	0,5000	130
23	23	24	0,5240	0,0900	0,6000	130
24	24	25	0,5240	0,0900	0,4000	65
25	25	26	0,5240	0,0900	0,2500	80
26	26	27	0,5240	0,0900	0,2000	65
27	7	28	0,5240	0,0900	0,3000	65
28	28	29	0,5240	0,0900	0,3000	130
29	29	30	0,5240	0,0900	0,3000	130
30	10	31	0,5240	0,0900	0,3000	65
31	31	32	0,5240	0,0900	0,4000	65
32	32	33	0,5240	0,0900	0,3000	130
33	33	34	0,5240	0,0900	0,2000	130

Cuadro **6-4**: Impedancias de las líneas

6.3. SISTEMA DE ARAUCA - 34,5 Y 13,8 kV

Barra	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva(MVAR)	Tensión (KV)
CL34	0	0	34,5
PC1	0	0	34,5
PC2	0	0	34,5
PES34	0	0	34,5
PES13	0,28	0,35	13,8
PAN34	0	0	34,5
PAN13	1,15	1,45	13,8
ESM34	0	0	34,5
ESM13	1,17	1,48	13,8
AQT34	0	0	34,5
AQT13	1,53	1,93	13,8
CRA34	0	0	34,5
CRA13	0,37	0,46	13,8
MAP34	0	0	34,5
MAP13	0,06	0,08	13,8
PC3	0	0	34,5
ROS34	0	0	34,5
ROS13	0,06	0,08	13,8

Cuadro **6-5**: Potencia activa y reactiva en cada una de las barras

Barra de origen	Barra de destino	R(Ω)	X(Ω)
CL34	PC1	1,332	0,684
PC1	PC2	0,999	0,513
PC2	PES34	0,666	0,342
PES34	PES13	1,665	0,745
PC2	PAN34	0,999	0,513
PAN34	PAN13	0,832	0,3725
AQT34	ESM34	1,998	1,026
ESM34	ESM13	2,331	1,043
PES34	AQT34	1,665	0,855
AQT34	AQT13	1,764	0,789
MAP34	CRA34	2,514	1,068
CRA34	CRA13	3,352	1,240
PC3	MAP34	0,765	0,393
MAP34	MAP13	2,397	1,072
PC1	PC3	2,863	1,470
PC3	ROS34	1,532	0,786
ROS34	ROS13	1,065	0,476

Cuadro **6-6**: Impedancias de las líneas

6.4. Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico - Caso Arauca

A continuación se describe el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el caso real del sistema de Arauca:

6.4.1. Tipo de Panel solar

Para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico es necesario conocer la potencia del panel requerida, esta se calcula teniendo en cuenta la potencia total del sistema (P_OT) y la radiación media diaria de la zona (R_m) como se muestra en la ecuación 6-1

$$P_p = \frac{Po_T}{R_m} = \frac{1MW}{4,16KW} = 240,38W \tag{6-1}$$

De esta forma se seleccionó un panel de 250W de tipo policristalino debido a su eficiencia, la ficha técnica del panel se presenta mediante la tabla **6-7**

Característica técnica	Medida
Potencia máxima	250 Watts
Voltaje	30.65 V
Amperaje	8.17 A
Voltaje a circuito abierto (Voc)	37.8 V
Corriente a corto circuito (Isc)	8.74 A
Máximo voltaje del sistema	1000 V
Eficiencia del módulo	15,30 %

Cuadro **6-7**: Ficha técnica modulo fotovoltaico Policristalino CORA. Tomado de Coradir (sf)

6.4.2. Cálculo del número de paneles

Considerando que se desea instalar una potencia de 1 MW, es importante tener en cuenta los siguientes parámetros del panel solar para realizar los respectivos cálculos:

Vmp = Tensión máxima de potencia
Vcc = Máxima tensión de entrada de corriente continua en vacío
Pp = Potencia pico de cada panel

Pi = Potencia de cada instalación

El número de paneles a instalar se calcula teniendo en cuenta la siguiente ecuación

$$N_p = \frac{P_i}{P_p} = \frac{1MW}{250W} = 4000\,paneles \tag{6-2}$$

El número máximo de paneles en serie, es determinado por la tensión de máxima potencia y la tensión máxima de corriente continua en vacío, pero para garantizar que no se supere los 1000 se tomara un valor de 600 de tensión máxima de entrada de DC como se muestra en la ecuación 6-3

$$Ns_{max} = \frac{Vcc}{Vmp} = \frac{600}{30,65} = 19,67 \tag{6-3}$$

Se toma el valor de 20 como el número de paneles.

Una vez determinado el número de paneles en serie se determinará el número de ramas a colocar en paralelo:

$$Np = \frac{P_T}{P_s} = \frac{4000\,paneles}{20\,series} = 200\,ramas \tag{6-4}$$

Con dicha configuración definida se obtiene un sistema de 1MW, que consta de una instalación de 4000 paneles, 200 ramas en paralelo y 20 en serie.

6.4.3. Tipo de inversor

En total la planta fotovoltaica contará con 200 ramas, estas se dividirán en 12 entradas al inversor, con lo que se tendrá 17 ramas asociadas a cada seguidor y caja de conexión correspondiente. El tipo de inversor se selecciona teniendo en cuenta la potencia del arreglo de paneles, tensión de entrada y salida que la instalación.
La tensión en cada rama se determina de acuerdo a la tensión en punto de máxima potencia por módulo y los 20 paneles conectados en serie:

$$V_{rama} = 30,65V \cdot 20 = 613V \tag{6-5}$$

La suma de las tensiones de circuito abierto de todos los módulos de la rama, se obtiene teniendo en cuenta la tensión en circuito abierto de 37,8 V y las 20 unidades de panel en serie:

$$V_{ms} = 37,8 \cdot 20 = 756V \tag{6-6}$$

La potencia de conexión del inversor deben contener la suma de las potencias máximas de cada rama, es decir:

Potencia de cada rama: $250 \cdot 20 = 5000$ W
Potencia del sistema: $5000 \cdot 200 = 1$ MW

La instalación contará con 17 inversores de marca HUAWEI modelo SUN2000-60KTL-M0, con una potencia de cada inversor de 60 kW para suplir la potencia instalada de 1MW, este modelo se ajusta a las características de los paneles fotovoltaicos escogidos.

Especificaciones	SUN2000-60KTL-M0
Eficiencia máxima	98,9 %
Rango operativo de tensión de entrada	200-1000 Vcc
Tensión máxima de entrada	1100 Vcc
Potencia nominal de salida	50/60 kW
N° de entradas	12

Cuadro **6-8**: Características técnicas inversor Huawei. Tomado de Solartex (2022)

6.4.4. Tipo de baterías

Las baterías tienen como función principal brindar un respaldo energético cuando el sistema lo requiere, en plantas solares aisladas de la red, el uso de estas es fundamental, pues la producción de energía durante las horas nocturnas no es suficiente para suplir las necesidades energéticas y resulta conveniente hacer uso del sistema de baterías para abastecerlo. Cabe recalcar que, para los sistemas conectados a la red, no es prescindible que cuenten con un banco de batería pues implica mayores costos y el beneficio que estas representan se remplaza de manera inteligente por la misma red supliendo las necesidades de la carga en la zona horaria de menor generación, por ende, no se establece un dimensionamiento de baterías.
También es necesario aclarar que, en casos específicos el mejor sistema de respaldo no son las baterías, puesto que estas también están definidas con una cantidad de horas de respaldo, por tal motivo se limitan a un evento donde el fallo del sistema no dure mucho tiempo, por esta razón se acude a sistemas de respaldo que perduren con mayor facilidad en el tiempo, como puede ser una planta de transferencia automática.