

COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL USO DE BANCO DE CAPACITORES

JAIME ANDRES BARRERA HERNANDEZ

Autor

**Trabajo de grado presentado como
requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

VICTOR MANUEL GARRIDO AREVALO

victor.garrido@unipamplona.edu.co

Director



Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería eléctrica

Pamplona – Norte de Santander

2022

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico primeramente a Dios, El que está conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, por su comprensión, compañía y amor, por brindarme salud y fuerza para lograr mis objetivos. a mi madre y mi padre quienes me supieron guiar y apoyar por los caminos de la vida, brindándome un apoyo incondicional. a mi pareja, por brindarme su compañía, apoyo y fuerza y a todas las personas que estuvieron presentes en este largo camino, las cuales estuvieron expuestas a brindarme un apoyo con el fin de lograr mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad de Pamplona, por haberme permitido realizar y culminar mi formación personal, cultural y profesional, a todos los ingenieros de la carrera por haber compartido sus conocimientos necesarios para desempeñarme en mis funciones laborales. Un agradecimiento especial al ingeniero Víctor Manuel Garrido Arévalo, director del Trabajo de Grado, quien guio y contribuyo en este Trabajo de Grado para su elaboración y por la amistad y confianza otorgada.

RESUMEN

En este trabajo, se presenta un objetivo general que es la búsqueda de una técnica de ubicación para la compensación óptima de potencia reactiva utilizando una inteligencia artificial, para así, desarrollar una herramienta de solución al problema de optimización de la ubicación y tamaños de los bancos de capacitores. Se utilizan varios métodos de compensación de potencia reactiva e inclusive la combinación de algunos. Nosotros implementaremos la técnica de algoritmo genético ya que posibilita una formulación más exacta del problema arrojado, que nos brindara soluciones de mayor calidad, para su técnica y su ubicación generando que el sistema de distribución obtenga una mejora en el perfil de tensión de potencia y la reducción de pérdidas de potencia. El programa desarrollado se soporta sobre software MATLAB y se utilizó un sistema de ejemplo (IEEE de 33 Barras) para hacer el estudio en un sistema de distribución.

Esto nos permitió correr el flujo de potencia y conseguir obtener todos los datos del sistema inicial. El algoritmo presentado tiene la técnica de minimizar las pérdidas de potencia activa en el sistema, mejorando los perfiles de voltaje y por consiguiente la confiabilidad del sistema.

Palabras claves: compensación de potencia, potencia reactiva, banco de capacitores, óptima ubicación.

Keywords: power compensation, reactive power, capacitor bank, optimum location.

ABSTRACT

In this work, a general objective is presented, which is the search for a location technique for the optimal reactive power compensation using artificial intelligence, in order to develop a solution tool for the problem of location optimization and capacity estimation. of capacitor banks. Various reactive power compensation methods are used and even a combination of some. We will implement the genetic algorithm technique since it allows a more exact formulation of the problem thrown, which will provide us with higher quality solutions, for its technique and its location, generating that the distribution system obtains an improvement in the power voltage profile and reducing power losses. The developed program is supported on MATLAB software and an example system (IEEE of 33 Bars) was used to carry out the study in a distribution system.

This allowed us to run the power flow and allowed us to get all the data from the initial system. The algorithm has the ability to minimize active power losses in the system, improving voltage profiles and therefore system reliability.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
RESUMEN	4
CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN	9
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	9
<i>1.1.1 Descripción del Problema</i>	<i>9</i>
<i>1.1.2 Justificación</i>	<i>9</i>
1.2 OBJETIVOS.....	11
<i>1.2.1. Objetivo General.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2. Objetivos Específicos</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3. Acotaciones.....</i>	<i>11</i>
1.3 MARCO TEÓRICO	12
<i>1.3.1. Factor de Potencia [FP]</i>	<i>12</i>
<i>1.3.2. Tipos de Potencia.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.3. Triangulo de Potencia.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.4. Banco de Capacitores</i>	<i>14</i>
<i>1.3.5. Compensación de Potencia Reactiva</i>	<i>14</i>
<i>1.3.6. Cargas Resistivas</i>	<i>14</i>
<i>1.3.7. Cargas Inductivas</i>	<i>15</i>
<i>1.3.8 Cargas Capacitivas</i>	<i>15</i>
<i>1.3.9. Resistencia y Reactancia</i>	<i>15</i>
<i>1.3.10 Por Unidad (pu).....</i>	<i>15</i>
1.4 ESTADO DEL ARTE.....	16
CAPÍTULO II - METODOLOGÍA	21
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA.....	21
<i>2.1.1 Flujo de Carga</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2 ALGORITMO GENETICO [AG].....</i>	<i>22</i>
2.2 CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES	26
2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA.....	27

IEEE de 33 BARRAS	27
CAPÍTULO III – RESULTADOS	31
3.1 RESULTADOS	31
3.1.1 Resultados Obtenidos de la Simulación Matlab	31
3.1.2 Análisis Comparativo de los Resultados Obtenidos con los Resultados Disponible en la Literatura.	49
3.2 Análisis del Impacto del Trabajo de Grado	52
• Impactos Económicos	52
• Impactos Empresariales y Sociales	52
• Impactos de Investigación	52
CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTURES	53
4.1 Conclusiones	53
4.2 Referencias	54

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Triangulo de Potencias.	
https://www.infootec.net/factor-de-potencia/	13
Ilustración 2 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético para la solución de la ubicación optima de los capacitores.....	25
Ilustración 3 Modelo de prueba de la IEEE de 33 barras para Sistemas de Distribución.....	27
Ilustración 4 Grafica de los Voltaje en por unidad [pu] de cada una de las barras en el caso base.	35
Ilustración 5 Ciclo para actualizar las cargas reactivas en el flujo de carga.	36
Ilustración 6 Algoritmo Genético utilizado para encontrar el tamaño optimo del capacitor para la barra 18.	37
Ilustración 7 Algoritmo Genético en procesamiento.	38
Ilustración 8 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de colocar el capacitor en la barra 18.	42
Ilustración 9 Algoritmo Genético para la ubicación y tamaño óptimo para 2 capacitores en el sistema de distribución.	43
Ilustración 10 Búsqueda simultanea de lugares y tamaños usando el algoritmo genético.....	43
Ilustración 11 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de utilizar el Algoritmo Genético para la ubicación Optima de los capacitores en las barras 12 y 30. .	47
Ilustración 12 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de colocar el capacitor en la barra 18.	48
Ilustración 13 Resultados del método de polinización de flores.	49
Ilustración 14 Perfiles de Voltaje del Método de Polinización de Flores.....	51
Ilustración 15 Perfiles de voltaje del Método de Algoritmo Genético.....	51

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de los ramales del sistema de 33 barras.....	27
Tabla 2 Descripción de los Tipos de barras.	28
Tabla 3 Datos de nuestro Sistema de Prueba	28
Tabla 4 Datos de nuestro Sistema de prueba.	30
Tabla 5 Resultados del número de iteraciones y la desviación de error máxima.....	31
Tabla 6 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras en caso base.....	33
Tabla 7 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución en el caso base.	34
Tabla 8 Resultado de las pérdidas Totales de potencia Activa y Reactiva en el caso base.....	34
Tabla 9 Resultado del tamaño óptimo de nuestro capacitor y la perdida correspondiente.	38
Tabla 10 Resultados del número de iteraciones y la desviación de error máxima.....	38
Tabla 11 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras para el paso 2 donde colocamos el capacitor en la barra 18.....	40
Tabla 12 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución cuando colocamos un capacitor en la barra 18.	41
Tabla 13 Pérdidas de potencias después de colocar el capacitar en la barra número 18.	41
Tabla 14 Resultado de las pérdidas Totales de potencia Activa y Reactiva en el caso base.	41
Tabla 15 Resultado de la ubicación y tamaño óptimo de dos bancos de capacitores en nuestro sistema de distribución.	44
Tabla 16 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras para el paso 3 donde colocamos los capacitores en las barras 12 y 30.....	45
Tabla 17 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución cuando colocamos dos capacitores en las barras 12 y 30.	46
Tabla 18 Pérdidas de potencias después de colocar el capacitar en la barra número 18.	47
Tabla 19 Pérdidas de las potencias después de utilizar nuestro Algoritmo Genético para encontrar las ubicaciones Optimas.....	47
Tabla 20 Comparación de los resultados obtenidos por distintos métodos.....	50

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

1.1.1 Descripción del Problema

En los distintos componentes que se maneja en la red eléctrica se producen ciertas pérdidas de energía, las cuales están relacionadas a lo que puede ser, la distribución, el transporte. La calidad energética de un sistema eléctrico se basa en su capacidad del factor de potencia, con el cual se haya una eficacia en la compensación de potencia reactiva, es decir, que la forma en la que esta se realiza la distribución se ve reflejado las pérdidas, las cuales se traducen a la diferencia entre la energía que ingresa a la red y la que es entregada para el consumo final, siendo así, este el reflejo y el resultado de un nivel de eficiencia y potencia baja, por ende, en la actualidad se hace mucho más necesario utilizar compensadores de potencia reactiva en sistemas de distribución debido a la variedad de cargas existentes de naturaleza inductiva, ya que, los principales consumidores de carga reactiva son los: los transformadores, los motores, maquinaria industrial. Siendo estos, los más representativos consumidores de potencia reactiva puesto que al energizar un motor o un transformador de grandes capacidades estos requieren una alta potencia reactiva para poder funcionar, entonces, la presencia de transformadores, motores, lámparas etc. Esto genera que la reacción de la instalación eléctrica y las cargas sean muy variables afectando el factor potencia negativamente. La empresa suministradora de energía realizara una penalización debido a las altas potencias reactivas suministradas a la red por esta razón es la necesidad de compensar la energía reactiva y así mismo se corregirá el factor de potencia.

1.1.2 Justificación

La compensación de energía reactiva en los sistemas de producción industrial es muy importante en la actualidad por la cantidad de energía reactiva que se está generando, ya que el incremento de las pérdidas de energía eléctrica es un gran problema visto en la actualidad, el cual afecta de manera notoria las empresas de distribución de energía eléctrica, en el aspecto económico, o, en la parte de racionalización al uso de energía. La importancia del estudio de la técnica de ubicación óptima para un banco de capacitores es para corregir el bajo factor de potencia. Este trabajo se establece en contribuir con una metodología que facilite al lector adaptarse a la teoría de circuitos sobre factor de potencia y como corregirlo en un sistema de distribución a través de un ejemplo práctico, mientras más se logre disminuir las pérdidas de energía eléctrica, esto impactará de manera positiva sobre la evolución de disminución en el precio de facturación eléctrica, y el factor de potencia se corrige ya que este beneficia a la compañía suministradora de energía eléctrica por causas

económicas y también beneficia al usuario de energía eléctrica, por esto se mejora el factor de potencia a una cantidad lo más cercana a la unidad.

La minimización de pérdidas de potencia en un sistema eléctrico y específicamente en una red de distribución es de gran importancia ya que así mejoramos la utilidad de las compañías suministradoras mejorando la calidad del servicio, y la compensación de potencia reactiva es importante ya que dependiendo de los resultados obtenidos sabremos qué tan efectiva sea esta con respecto a los datos iniciales, También se sabe si se realizó una reducción de las pérdidas en la red, que finalmente se ve reflejado en la calidad de la energía, por lo tanto, debido a que no se tiene una metodología definida en la forma de compensación de potencia reactiva en redes de distribución.

Una de las vías, que más se utilizan, para realizar de manera efectiva la compensación del reactivo, es el empleo de bancos de capacitores, los cuales, con una óptima aplicación se reflejan tres aspectos importantes, como los son: el tipo de compensador a utilizar, fijo o variable, la selección de la capacidad más adecuada de los bancos, y, la ubicación en el sistema del suministro eléctrico. Desde el punto de vista técnico, los aspectos importantes de los bancos de capacitores están vinculados y todos poseen una implicación económica, lo que obliga a la necesidad de considerarlos en conjunto para un problema de optimización dado, entonces, obtenemos que, el diseño de un banco de capacitores permitirá tener beneficios como las reducciones de caídas de tensión, incremento de la vida útil de las instalaciones, reducción de las pérdidas de los conductores, aumentando la disponibilidad de potencia en los sistemas de distribución.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Identificar una técnica de ubicación óptima de capacitores para la compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar una técnica para la ubicación de los capacitores en los sistemas de distribución.
- Simular la técnica seleccionada mediante el uso de software especializado.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los resultados disponible en la literatura.

1.2.3. Acotaciones

- Para este trabajo solo se implementará el uso de software especializado para llevar a cabo las simulaciones.

1.3 MARCO TEÓRICO

Es adecuado iniciar esta investigación repasando algunos conceptos básicos ya conocidos y que hacen referencia en los sistemas de distribución. De acuerdo con este criterio, en cualquier sistema eléctrico es conveniente tener claros los siguientes conceptos.

1.3.1. Factor de Potencia [FP]

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (vatios [W]), y la potencia aparente (voltamperios [VA]) y describe como la relación entre la potencia activa y la potencia total consumida.

$$Fp = \cos\theta = \frac{P(Activa)}{S(Aparente)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Es oportuno que en una instalación eléctrica el factor de potencia sea lo más cercano al valor unitario, se exigen valores de más de 0,9. El factor de potencia es dado por la relación de la potencia activa usada en un sistema eléctrico, dado en vatios [W], la potencia aparente que se obtiene de la alimentación de nuestro sistema, dada en voltio amperios [VA]. (Martinez, Gomez, Martinez, & Vargas, 2017).

1.3.2. Tipos de Potencia

Existen tres tipos de potencia, las cuales son:

- **Potencia Activa o Real [P]**

Es la potencia que genera la energía eléctrica en trabajo útil, es decir, es la cantidad de potencia “útil” que consume un equipo eléctrico, la realmente consumida por los circuitos. la potencia activa, Se designa con la letra [P] y se mide en vatios/watts [W] o kilovatios/kilowatts [KW] (Tecnologico de Monterrey).

- **Potencia Aparente [S]**

Es conocida como la potencia compleja de un sistema eléctrico de corriente alterna, pero también recibe el nombre o se conoce como potencia aparente [S], es la suma vectorial de la potencia activa y de la potencia reactiva. También está la podemos calcular a partir del producto de los valores de voltaje y corriente. su unidad es el Voltamperio [VA] (Tecnologico de Monterrey).

- **Potencia Reactiva [Q]**

La potencia reactiva se designa con la letra [Q] y se mide en volt ampere reactivos [VAR], una unidad equivalente al watt. Es la potencia necesaria para crear campos eléctricos y magnéticos para el correcto funcionamiento de los diferentes equipos eléctricos como lo son los motores, transformadores y más.

Como sabemos la energía reactiva es consumida por los transformadores, motores o dispositivos que generan un campo electromagnético generado por una bobina en sistemas eléctricos. Estas bobinas, consumen cargas tanto de potencia activa como de potencia reactiva y la eficacia de su funcionamiento depende del factor de potencia. Mientras más alejado de la unidad sea el factor de potencia mayor será la energía reactiva consumida. Además, esta energía reactiva no genera ningún trabajo útil y perjudica los sistemas de transmisión ya que estos reactivos descompensan la red eléctrica, pero es necesaria para el correcto funcionamiento de algunos aparatos eléctricos es una potencia devuelta por el circuito y está presente en el funcionamiento del mismo, esta potencia no se consume ni se genera, por lo que su consumo está penalizado por la empresa distribuidora de energía eléctrica (Redondo & Redondo , 2017).

1.3.3. Triangulo de Potencia

El nombrado triángulo de potencias es la forma más fácil de analizar y abarcar de forma ilustrativa qué es el factor de potencia ($\cos(\phi)$) y su relación con las diferentes potencias presentadas en un sistema de distribución. Como se puede ver en la ilustración 1, el factor de potencia simboliza el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa [P] y la potencia aparente [S], es decir, la relación que existe entre la potencia Activa y la potencia aparente que es la total consumida en el sistema eléctrico.

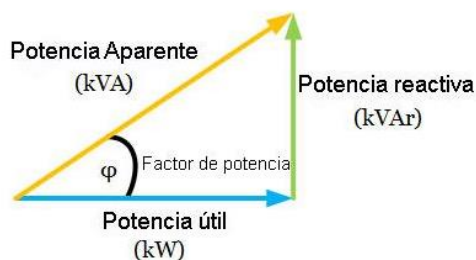


Ilustración 1 Triangulo de Potencias.

<https://www.infootec.net/factor-de-potencia/>

Lo más óptimo es que este factor de potencia sea lo más cercano a la unidad, la potencia activa debe de ser lo más cercana a la potencia aparente, o sea que debemos de reducir al máximo nuestra potencia reactiva. Para disminuir esta energía reactiva utilizamos los bancos de capacitores para así compensar la potencia reactiva, esta compensación es un proceso el cual tratar de reducir o eliminar la mayor cantidad de energía reactiva en el sistema eléctrico, la idea principal de compensar la energía reactiva es conseguir que el factor de potencia sea lo más cercano a la unidad, siendo la unidad donde se utiliza toda la potencia la cual se convierte en energía útil (Grainger & Stevenson, 1996).

1.3.4. Banco de Capacitores

Al aumentar el factor de potencia mediante la tecnología de bancos de capacitores esto se realiza con el objetivo de equilibrar la energía reactiva en el sistema. Un banco de capacitores es una agrupación de capacitores conectados entre sí, estos se utilizan para que realicen o mitiguen una acción frente a la potencia reactiva proveniente de los motores, maquinaria industrial, ascensores, entre otros, que por lo general se encuentran en las grandes industrias de producción. Esta energía reactiva es absorbida por los capacitores los cuales estabilizan la energía y así evadir que sea transmitida al sistema de red del operador, y así evitar los castigos por parte de la empresa proveedora de nuestro sistema de energía eléctrica, esta acción recibe el nombre de compensación de energía. La idea de implementar esta tecnología es que se disminuyan las pérdidas de energía, las caídas de tensión, y que se amplíe la capacidad de transmisión de potencia activa en los conductores de transmisión (M, 2014).

1.3.5. Compensación de Potencia Reactiva

La compensación de potencia reactiva constituye a un procedimiento general para el control de las condiciones de operación de una red eléctrica. Sin embargo, dependiendo del subsistema eléctrico difiere en el propósito principal que se persigue (M, 2014).

1.3.6. Cargas Resistivas

Las cargas resistivas son aquellas donde la electricidad produce calor por el “efecto Joule” y no por movimiento. En este caso, obtenemos un factor de potencia unitario (factor de potencia y sus implicaciones técnicas) (risoul, 2021).

$$F_p = 1$$

1.3.7. Cargas Inductivas

En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje. En este caso se obtiene un factor de potencia retrasado (factor de potencia y sus implicaciones técnicas) (risoul, 2021).

$$0 < F_p < 1$$

1.3.8 Cargas Capacitivas

En las cargas capacitivas como los capacitores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje. En este caso se obtiene un factor de potencia adelantado (factor de potencia y sus implicaciones técnicas) (risoul, 2021).

$$-1 < F_p < 0$$

1.3.9. Resistencia y Reactancia

La resistencia como su nombre lo indica es la que resiste o trata de o posicionarse al paso de la corriente sea esta corriente alterna [CA] o corriente directa [CD]. La reactancia es muy similar a la resistencia ya que se opone al paso de la corriente, pero en este caso solo a la corriente alterna como los son los condensadores (capacitores) y las bobinas (inductores) (Resistencia , 2019).

1.3.10 Por Unidad (pu)

El sistema por unidad de cualquier cantidad como lo pueden ser las impedancias, reactancias, voltajes, corrientes, potencias y más, se define como la relación de estas entre esta cantidad Real y la cantidad Base (Ec. 2). En la Ingeniería Eléctrica, encontramos datos en los sistemas eléctricos de potencia, que se expresan las unidades eléctricas como valores en por unidad.

$$PU = \frac{Cantidad\ (Real)}{Cantidad\ (Base)} \quad (Ec. 2)$$

(Wikipedia, 2020)

1.4 ESTADO DEL ARTE

El propósito principal de esta breve revisión del estado del arte se enfoca en trabajos asociados a la óptima ubicación de bancos de capacitores en los sistemas de distribución, ya que estos sufrieron varias transformaciones en las últimas décadas. Con la creciente demanda, las agencias reguladoras exigen que el servicio prestado por las empresas de servicios públicos presente un estándar de calidad y confiabilidad cada vez más alto. Se vuelve necesario la selección adecuada y la correcta ubicación para la compensación de potencia reactiva utilizando bancos de capacitores (Jahromi, 2021). debido a lo anterior se hacen estudios sobre las diferentes técnicas óptimas para correcta ubicación del equipo ya mencionado que se utiliza para los siguientes propósitos principales: mejora de la estabilidad, mejora del perfil de tensión, corrección del factor de potencia y reducción de pérdidas.

Un sistema de distribución debe operar de manera óptima bajo esta perspectiva, y la ubicación correcta de banco de capacitores en el sistema es una forma de lograr este objetivo. ya que el flujo de potencia reactiva que se generan en sistemas de distribución produce pérdidas de energía, bajo factor de potencia, problemas de regulación de voltaje y además condiciona la capacidad de transporte de la potencia útil reduciendo de esta manera la eficiencia de nuestro sistema de la red (Hadzhiev, Malamov, & Balabosov, 2020).

La ubicación y dimensionamiento óptima de un banco de capacitores es un punto clave para garantizar que los sistemas de distribución funcionen exitosamente. Existen diferentes metodologías para establecer una localización óptima. En algunas de estas técnicas utilizan algoritmos complejos y en otro manipulan enfoques analíticos. Los resultados obtenidos dependerán de la técnica seleccionada con ello se obtendrá mejor exactitud al momento de implementar el banco de capacitores para compensación de potencia reactiva en nuestro sistema de distribución. Se aplican diferentes algoritmos en la optimización de sistemas de distribución y se pueden ver en la literatura como lo son las siguientes técnicas:

- **GENETIC ALGORITHM (AG) - ALGORITMO GENÉTICO:** Este algoritmo es de los más utilizados siendo este el más prometedor para la inteligencia artificial. Este es llamado así debido a que se basa en las evoluciones biológicas, basándose en su genética molecular base (inspiradas en las reproducciones de los seres vivos). Se basa en la evolución biológica para desarrollar problemas de optimización usando los programas computacionales imitando así el funcionamiento de la inteligencia natural.

La idea de este es resolver problemas específicos de optimización el Algoritmo Genético [AG] necesita de un conjunto de soluciones iniciales potenciales para el desarrollo de este problema, Estas soluciones las podemos obtener de manera codificada de alguna manera

o de una función de aptitud que permite evaluar y cuantificar la recopilación y análisis de datos a cada candidata de solución. Estas soluciones candidatas suelen ser porque ya se saben que funcionan con el objetivo de que el algoritmo genético depure las opciones válidas hasta escoger la más optima (Agata Szulka, 2017) (Campolina , Ramos , & Ribeiro, 2022).

- **WHALE ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN (WOA) - EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE BALLENAS:** Es una técnica de optimización inspirada en la naturaleza. Es un algoritmo metaheurístico que se extrajo de la inspiración de como las ballenas atrapan sus presas. Este método de caza llamado alimentación con redes de burbujas es un método de alimentación que solo lo utilizan las ballenas jorobadas y que se puede modelar matemáticamente (M. O. Okelola, 2022).
- **PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) - OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS:** Es una técnica de inteligencia artificial que se puede utilizar para encontrar soluciones aproximadas que permite optimizar un problema a partir de resultados candidatos nombrados como partículas, buscando estas por todo el espacio de búsqueda, cuando se mueve cada partícula esta será influida para encontrar una mejor posición hallada hasta el momento, así que las mejores posiciones globales encontradas serán las encontradas por las otras partículas a medida que recorren el espacio de búsqueda. El soporte teórico de esta optimización es hacer las partículas converja rápidamente hacia las mejores soluciones (Muhammad Junaid Tahir, 2022)..
- **FLOWER POLLINATION ALGORITHM (FPA) - ALGORITMO POLINIZACIÓN DE FLORES:** Es una técnica inspirada por la tarea de polinización de las plantas con flores. La polinización de las flores está correlacionada con la transferencia de polen, que a menudo se asocia con polinizadores. la polinización se puede ejecutar por autopolinización que es la polinización de una flor a partir del polen de la misma flor y/o otras flores de la misma planta o polinización cruzada es la polinización a partir del polen de una flor de otras plantas.

El propósito principal de esta técnica es la supervivencia del más apto y la reproducción óptima de las plantas más adecuada. Todos estos factores y tareas de la polinización floral generaron una reproducción óptima de las plantas con flores esto demostrando su capacidad para resolver varios problemas en el sistema de potencia (A.Y. Abdelaziz, 2015).

- **THE ARTIFICIAL ELECTRIC FIELD ALGORITHM (AEFA) - ALGORITMO DE CAMPO ELÉCTRICO ARTIFICIAL:** Es un novedoso algoritmo de optimización metaheurística que se deduce de las leyes de Coulomb. Donde la primera ley de Coulomb describe la relación de fuerza

electrostática entre dos cargas en un espacio. La segunda ley de coulomb describe los factores que tienen efectos sobre el valor de la fuerza electrostática.

Las partículas de carga son los agentes en los algoritmos metaheurísticos y los valores de carga son las fuerzas. La fuerza electrostática controla el movimiento de estas cargas o agentes en el espacio de búsqueda y la posición final de estas cargas es la solución del problema. En esta técnica propuesta, la fuerza de atracción solo se considera al resolver el algoritmo de optimización donde la carga de mayor valor atrae a las otras cargas de menor valor y se mueve lentamente en el espacio de búsqueda (Abdelazeem A. Abdelsalam, 2019).

- **HBB-BC ALGORITHM - ALGORITMO HBB-BC:** El algoritmo BB-BC está inspirado en el fenómeno del principio y el final del universo, llamado Big Bang, este está relacionado con el surgimiento del universo y la gran destrucción que se relaciona con el colapso del universo y el final de su vida. Consta de dos etapas, la primera se denomina Big Bang es en la que la población se distribuye aleatoriamente en todo el espacio de búsqueda. Luego pasa a la segunda etapa que se denomina Big Crunch, que en realidad es un operador convergente (Kouhsari, 2021).
- **SINE COSINE ALGORITHM (SCA) - ALGORITMO DE SENO COSENO:** Es un algoritmo de optimización estocástica que basa sus reglas en las funciones seno y coseno. El algoritmo inicia aleatoriamente con un conjunto de soluciones de búsqueda en el espacio de búsqueda del problema de optimización. Los agentes de búsqueda son guiados hacia un punto en el espacio de búsqueda a través de la función de aptitud que evalúa cada agente de búsqueda en cada iteración del algoritmo (Mansour, 2019) (Shankar, 2018).
- **BACTERIAL FORAGING ALGORITHM (BFO) - OPTIMIZACIÓN DE ALGORITMO FORRAJEO BACTERIANA:** Es una técnica probabilística que modela el comportamiento buscando comida y reproducción de las bacterias comunes para resolver problemas de optimización numérica donde no hay ningún efectivo enfoque determinista (Sani, 2019).
- **MOTH FLAME OPTIMIZATION (MFO) - OPTIMIZACIÓN DE LLAMA DE POLILLA:** La técnica de optimización de llama de polilla (MFO) es un algoritmo eficiente que se conceptualiza a partir del comportamiento de navegación de las polillas en natural (orientación transversal) donde las polillas navegan en un camino recto con respecto a la luz de la luna, pero estas polillas quedan atrapadas en un camino espiral mortal debido a luz artificial. Naturalmente, el movimiento de la trayectoria recta de las polillas en largas distancias se logra manteniendo un ángulo fijo con respecto a la luna, pero cuando las polillas intentan mantener el ángulo fijo con la luz artificial, esto conducirá a una trayectoria en espiral alrededor de la luz (Upper, 2017).

- **HARMONY SEARCH ALGORITHM (HS) - ALGORITMO DE BÚSQUEDA DE ARMONÍA:** Es un algoritmo metaheurístico basado en la población inspirado en el proceso musical de búsqueda de un estado perfecto de armonía. En optimización, la solución fundamental se provoca aleatoriamente a partir de variables de decisión en un período del rango posible. Si el valor de la función objetivo de la variable de decisión es excelente para hacer una solución auspiciosa se eleva el tiempo más cercano. En el algoritmo de búsqueda de armonía (HS), cada solución se denomina "armonía" y se representa mediante un vector real de n dimensiones. Se crea aleatoriamente una población inicial de vectores de armonía para formar una memoria de armonía (HM). El proceso anterior se repite hasta que se cumple un cierto criterio (Karthikaikannan, 2018).
- **MINE BLAST ALGORITHM (MBA) - ALGORITMO DE EXPLOSIÓN DE MINAS:** Desarrollaron un optimizador inspirado en la explosión de una bomba de mina basado en la población llamado "Algoritmo de explosión de mina" (MBA). La idea detrás del algoritmo implementado se basa en la observación de una explosión de bomba de mina, en la que los fragmentos dispersos de la bomba de mina chocan con muchas otras bombas de mina en las cercanías de la explosión, dando como resultado en sus explosiones. Para comprender mejor la condición, considere un campo de minas cuyo objetivo principal es limpiar el campo de minas de las minas. El objetivo, por tanto, es localizar las minas explosivas, siendo necesario localizar la más explosiva colocada en el lugar óptimo que puede generar el máximo de bajas. El algoritmo comienza a través de un valor inicial al igual que los otros algoritmos, este algoritmo también requiere una población inicial (Mohsin Shahzad, 2021).

Todas estas técnicas son diferentes medios para reducir las pérdidas de potencia del sistema de distribución que merecen ser investigadas. Pero solo seleccionaremos una técnica de la ya presentadas y realizamos una metodología para encontrar los nodos óptimos para ubicar la compensación capacitiva. Es empleada la técnica para determinar la capacidad óptima de potencia reactiva y las ubicaciones de los Banco de capacitores (Ruiz , Barrera, & Valenzuela , 2020).

Esta investigación presenta un estudio de compensación de potencia reactiva en redes eléctricas de distribución, con caso de estudio en un sistema de la IEEE de 33 barras, Esta consta de 32 líneas de Distribución, 32 cargas y una sola fuente de alimentación conectada a esta que se la nombra la Red Externa conectada a la barra Slack (Oscar Danilo Montoya, 2022). Mediante la óptima selección y ubicación de bancos de capacitores implementando un algoritmo que sea capaz de proporcionar los mejores resultados para su solución, para dicho algoritmo se propone la formulación de un modelo en Matlab para este problema.

El colapso de voltaje se asocia principalmente con una demanda eléctrica extremadamente alta en un punto del sistema, que produce una reducción del nivel de tensión en una o más barras del sistema de potencia. Un banco de capacitores debe ser capaz de resolver estos problemas que ocurren durante períodos de máxima demanda y perturbaciones drásticas. Para encontrar los límites de estabilidad es necesario saber el estado de funcionamiento de las barras colectoras. La metodología consiste de utilizar un método para averiguar las condiciones de funcionamiento de la potencia del sistema eléctrico (Amiel, Rajput, & Averbukh, 2021).

El objetivo principal es lograr una configuración de pérdida mínima de la red de sistema de distribución. Hay necesidades por cubrir hoy que incentivan el desarrollo de herramientas para diversas aplicaciones en sistemas de distribución y el presente trabajo es mostrar que, a pesar de las diferentes condiciones el método propuesto tiene como objetivo determinar las regiones óptimas para la asignación de banco de capacitores en sistemas de distribución desequilibrado. Como se vio en esta sección, la mayoría de los artículos aplican análisis a través de enfoques diferentes, sin embargo, este documento propone el uso de un algoritmo modelado en Matlab para lograr este objetivo.

CAPÍTULO II - METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA.

2.1.1 Flujo de Carga

Para resolver el problema principal de esta investigación que es la compensación de potencia reactiva mediante bancos de capacitores, necesitamos un sistema de distribución radial de prueba con el fin de realizar una metodología para una solución óptima de la ubicación y el tamaño de dichos bancos de capacitores.

El primer paso para una metodología de dicha compensación es necesario realizar un flujo de carga en nuestro sistema de distribución el cual consiste en obtener las tensiones en todos los nodos y los flujos de potencia en las líneas para distintas condiciones de carga.

El algoritmo genético es implementado utilizando el programa Matlab ya que este es capaz de manejar grandes cantidades de datos y realizan operaciones que, aunque no son tan complicadas, se repiten de manera iterativa y también se requiere el manejo de matrices algunas de dimensiones muy grandes lo que hace que el desarrollo manual sea muy tedioso y en ocasiones imposible. De este modo se obtendría repuesta de una forma rápida y segura.

lo podemos realizar por diferentes métodos, los métodos clásicos para hallar nuestros flujos de carga son los métodos de Gauss Seidel, Newton Raphson y el método de desacoplamiento rápido. En nuestro caso utilizaremos el Método de Suma de Potencias Y de barrido hacia adelante/hacia atrás ya que presentan ventajas importantes sobre los métodos tradicionales, tales como Newton Raphson y Gauss-Seidel (Gutierrez, Villaroel, & Carter , 2018).

Utilizaremos este método de suma de potencia y de barrido hacia adelante/hacia atrás ya que el problema de Flujos de Potencia es no lineal, y estos métodos se desarrollan de manera iterativa. Estos métodos se basan básicamente en dos procesos. El primero nombrado como aguas arriba, este determina de forma simultánea la potencia equivalente en los nodos y las pérdidas de potencia. El segundo es nombrado aguas abajo, este se encarga de que las tensiones en los nodos a través de una ecuación de cuarto orden para el modelo y una ecuación explícita para el ángulo. Pero para esto debemos de suponer que el voltaje de todas las barras es 1 y el ángulo es 0 en por unidad [PU] estos son los parámetros que podemos obtener de la red en la primera iteración (Raheem, Kamel , Ebeed, & Yu, 2018).

2.1.2 ALGORITMO GENÉTICO [AG]

Los Algoritmos Genéticos [AG] es una inteligencia artificial de modelos computacionales inspirados en la evolución de la naturaleza, son basados en los individuos de una población los cuales compiten entre sí por los recursos naturales. los miembros que se encuentran mejor preparados para la subsistencia son aquellos que tendrán una mejor descendencia y los individuos que se encuentran con menores logros tendrían una descendencia menor o incluso nula. La combinación genética ocurrirá durante la reproducción sexual este cruce ocurrido entre los padres genéticos de un individuo aportándole cualidades de los padres. las mejores herencias genéticas tendrán los genes más adaptados hasta convertirse en individuos de una mejor clase y más adaptada a su entorno por lo que estará a una constante evolución esta es la idea principal de este algoritmo (Borges & Concepcion, 2017).

- ***Funcionamiento del Algoritmo Genético***

El algoritmo genético inicia su funcionamiento a partir de unos datos iniciales llamados la población inicial esta se puede obtener aleatoriamente o usando algoritmos heurísticos constructivos. En cada iteración obtenemos nuevos datos de las configuraciones de las nuevas poblaciones a partir de la población inicial utilizando los operadores de selección, recombinación y mutación. A la hora de realizar las nuevas iteraciones son obtenidos los datos con mejor calidad y, eventualmente, en este proceso iterativo encontramos la solución óptima global del sistema implementado. En otras palabras, El algoritmo genético realiza una búsqueda utilizando las mejores soluciones dadas y a través del proceso iterativo se encontrarán nuevas soluciones candidatas.

Para la propuesta de solución se verifica la factibilidad y calidad de la solución encontrada. Nosotros podemos encontrar nuestra factibilidad a través de lo obtenido del problema del flujo de carga que además de eso calcula las pérdidas del sistema eléctrico. La propuesta de solución para analizar el sistema eléctrico es resolver nuestro flujo de carga y nuestra función objetivo puede que sea fácilmente obtenida teniendo en cuentas las pérdidas por barras en los niveles de cargas obtenidos de la solución del flujo de carga, para proponer la solución que especifica el número de barras agregando los bancos de capacitores y el tamaño de los bancos que deben operar en cada una de las barras para cada nivel de carga. (M G. , 2005)

- ***Estructuración del Algoritmo Genético***

Sabemos que nuestro algoritmo genético es un modelo computacional que cada día va en constante evolución por lo que veremos la estructura base de este:

- Función Objetivo: Esta es la que utilizamos para obtener a los miembros de una población.
- Criterios de convergencia: Es el más utilizado para establecer el final de los Algoritmos Genéticos son:
 - ✓ El valor arrojado por la función objetivo es más grande (o más pequeño) que un valor predeterminado.
 - ✓ Al cumplirse un número dado de iteraciones.
 - ✓ La función objetivo no selecciona miembros diferentes en un número predeterminado de iteraciones.
- Operadores Genéticos: Este es el encargado de realizar la selección, el cruce y la mutación.
 - ✓ Selección: Esta es la encargada de comunicar y conservar aquellas particularidades de las soluciones que se consideran útiles a lo largo de las generaciones, Consiste en determinar el número de descendientes que debe generar cada una de las configuraciones candidatas de población actual. Este sería el principal medio para que la información valiosa se transmita y que aquellos individuos mejores adaptados (son los mejores valores de la función objetivo) tengan mayores probabilidades de que se propagasen, esto es realizado tomando en cuenta el valor de la función objetivo, o su equivalente, de las configuraciones de población actual. Sin embargo, es necesario también incorporar un valor aleatorio que permitan propagasen a miembros que, aunque no estén muy bien adecuados, puedan contener algunos datos valiosos para posteriores generaciones, con el objetivo de mantener una cierta variedad en cada población. Sin embargo, la selección puede ser realizada de varias formas diferentes y constituye uno de los dos operadores o funciones más importantes de algoritmo genético.
 - ✓ Cruzamiento o Recombinación: Culminada la selección se debe proceder a la recombinación o cruce. Un cruzamiento consiste en escoger configuraciones con derecho a generar descendientes y proceder a cruzar, en otro caso la pareja produce “hijos” producto del cruce y son estos los persisten en la etapa de mutación, esas configuraciones para producir dos nuevas configuraciones candidatas.
 - ✓ Mutación: cuando culmina la recombinación, se realiza la mutación con las configuraciones candidatas para constituir una nueva población. este

operador genera aleatoriedad de los miembros de la población. El propósito de la mutación es generar nuevos resultados a partir de la variedad de un cierto número de miembros de una solución presente, con la intención de impulsar la variación dentro de la población. se escoge aleatoriamente una posición para mutación y, también aleatoriamente, se decide aumentar o disminuir el número de bancos.

- Población Inicial: En los algoritmos genéticos es muy común que se utilicen un método aleatorio para originar los miembros de la primera iteración o generación. Cuando esta población inicial no se origina de manera aleatoria puede apresurar la convergencia del Algoritmo Genético. La temprana convergencia de este método lleva a la convergencia de una ubicación óptima local.

Esta población inicial la podemos establecer de varias formas: aleatoriamente controlada, totalmente aleatoria o usando algoritmos heurísticos constructivos rápidos

- ✓ Aleatoriamente controlada: Esta dificultad de ubicación de capacitores, los mejores resultados son obtenidos con la ubicación de capacitores en un número pequeño de barras.
- ✓ Totalmente aleatoria: Esta se obtiene seleccionando para cada una de las barras de los sistemas, Entonces debemos colocar una cantidad de bancos de capacitores entre 0 y la cantidad máxima de bancos de capacitores admitidos para nuestro sistema.
- ✓ Algoritmo heurístico constructivo rápido: Los análisis sobre el manejo de algoritmos combinatorios los cuales originan una población inicial con planteamiento diferente del aleatoriamente.
- Tamaño de la Población: Este es seleccionado teniendo en cuenta la dimensión del problema del sistema y la ubicación de los capacitores están relacionadas con la cantidad de barras del sistema o la cantidad de barras aspirantes a la ubicación de los capacitores.
- Número Máximo de Generaciones: La ideología planteada por los algoritmos genéticos genera las variaciones más grandes generando respuestas con calidad en las primeras generaciones, así que, debemos señalar la cantidad máxima de generaciones a considerar. (M G. , 2005) (M H. , 2008)

- **Esquema General de Nuestro Algoritmo Genético**

Para visualizar de mejor manera los procesos que sigue el algoritmo se lo muestra en la siguiente ilustración 2:

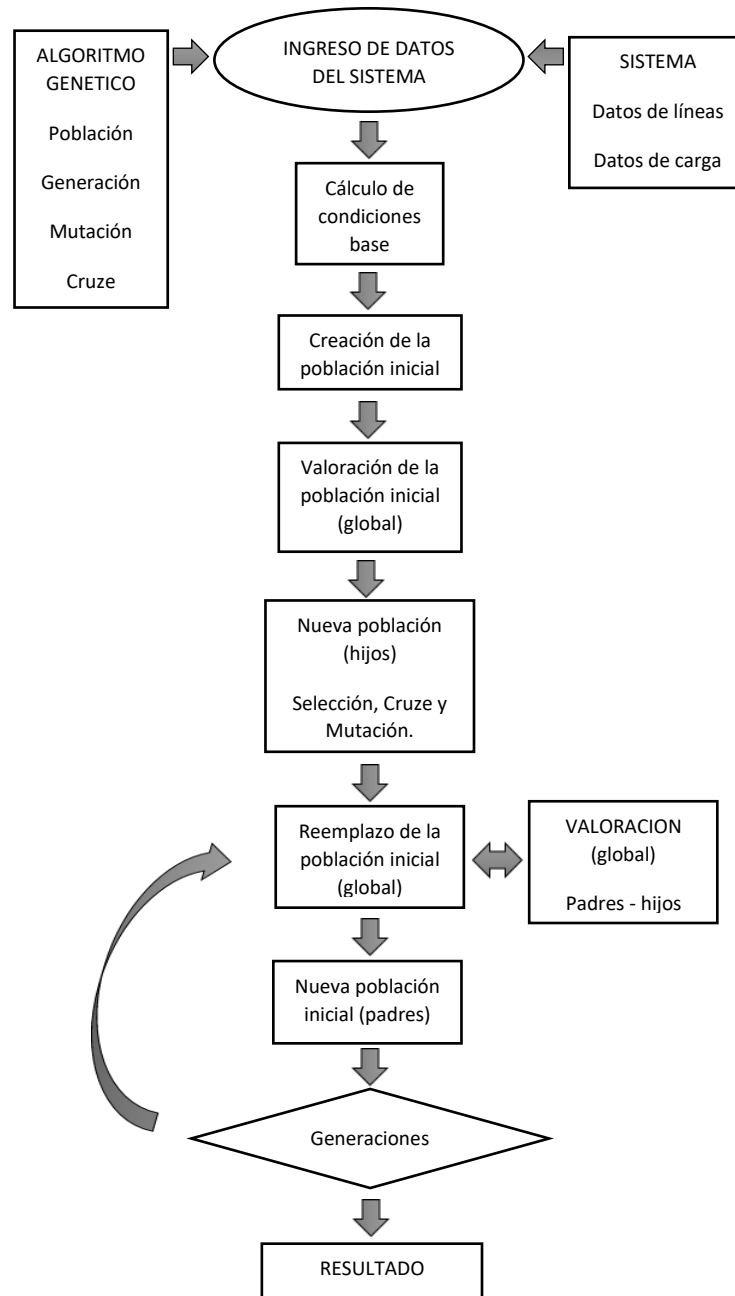


Ilustración 2 Diagrama de flujo del Algoritmo Genético para la solución de la ubicación óptima de los capacitores.

(G, 2011)

2.2 CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES

Las consideraciones o restricciones que se implementan en esta investigación es el uso de un software especializado para llevar a cabo la simulación planteada. La aplicación de software Matlab son utilizados por ingenieros para estimar, ejecutar y desarrollar nuevos sistemas. Este método contribuye al crecimiento ya que ejecuta todos los datos del sistema y también permite interactuar con partes del sistema sin la necesidad de disponer en la totalidad del mismo implementado físicamente.

El sistema sobre el cual se hará la prueba será un sistema de distribución de la IEEE de 33 nodos Ilustración 3, totalmente balanceado, ya que este hace parte de una limitación del programa establecido para la solución de la investigación planteada. Se diseña y evalúa el esquema en hardware-software, pero desarrollar la simulación para comprobar la funcionalidad de compensación utilizando bancos de capacitores.

Al ir desarrollando esta investigación se realiza una metodología para realizar la comparación de la compensación de potencia reactiva utilizando bancos de capacitores. esto ha sido posible al utilizar la herramienta Matlab, y la facilidad que ofrece tanto su interfaz software. La realización se llevó a cabo mediante el uso del software Matlab R2019a®.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA

IEEE de 33 BARRAS

La Ilustración 3 nos muestra el diagrama unifilar de un sistema de distribución radial de la IEEE de 33 barras seleccionado como caso de estudio para la solución de esta investigación, el cual está conformado por líneas de conexión, por barras, por cargas y por un alimentador encargado de suministrar la potencia activa y reactiva requerida de este sistema.

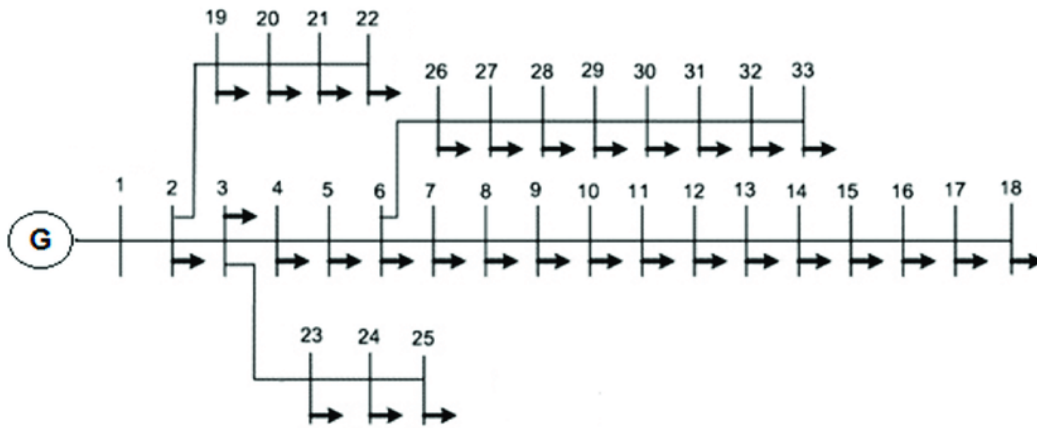


Ilustración 3 Modelo de prueba de la IEEE de 33 barras para Sistemas de Distribución.

Se obtiene este sistema de la IEEE de 33 Barras que está formado básicamente por 4 ramales distintos como se observa en la Tabla 1, este sistema consta de 32 líneas de distribución, 32 cargas y solo una fuente de alimentación conectada a nuestra barra Slack que es la barra número 1 que es la conectada a la Red Externa.

Numero de Rama	Barras que la constituye
Ramal 1	1 – 18
Ramal 2	19 – 22
Ramal 3	23 – 25
Ramal 4	26 - 33

Tabla 1 Descripción de los ramales del sistema de 33 barras.

Cada Barra de nuestro sistema dependiendo de nuestros parámetros conocidos y desconocidos sabremos que barra es, ya que, existen cuatro variables [P], [Q], [V], [θ] las cuales dependiendo los parámetros se clasificarán en los siguientes grupos:

- Barras de Carga o tipo [PQ]: En esta clase de barra los datos conocidos son la potencia activa [P] y la potencia reactiva [Q] que se suministran a la barra y los datos no conocidos serían el voltaje [V] y su ángulo [θ].
- Barra de Tensión controlada o tipo [PV]: En esta clase de barra los datos conocidos serán normalmente la potencia activa [P] y el voltaje [V] y los datos no conocidos serían la potencia reactiva [Q] y el ángulo del voltaje [θ].
- Barra de Referencia o tipo [Slack]: En esta clase de Barra se dan a conocer el voltaje [V] y su ángulo [θ] y los datos no conocidos serían la potencia activa [P] y la potencia reactiva [Q]. En esta barra debe existir por lo menos un generador.

(F, 2006)

Teniendo en cuenta estos tipos de barras en nuestro sistema de distribución sabemos que está constituido por las siguientes barras como podemos observar en la Tabla 2.

Tipo de Barra	N.º de Barra que pertenece
Barra de Referencia [Slack]	1
Barra de Carga [PQ]	2 hasta 33

Tabla 2 Descripción de los Tipos de barras.

Esta red externa ya mencionada es la misma que se encuentra conectada a nuestra barra de referencia o (Slack) la cual está conectada a un nivel de tensión y a una potencia descritas en la Tabla 3.

Información General del Sistema	
Voltaje Base	12.66 [kV]
Potencia Base	1000 [kVA]

Tabla 3 Datos de nuestro Sistema de Prueba

La información del sistema se encuentra detallado en la Tabla 4. la cual nos muestra los parámetros de los datos de líneas de transmisión de la Resistencia [R] Y Reactancia [X], y los parámetros de los datos de carga de cada barra de Potencia Activa [P] y potencia Reactiva [Q] del sistema de prueba

de 33 barras. Los datos se encuentran en por unidad [PU]. Con estos datos se calcula el flujo de carga, teniendo en cuenta que alfa para todos los casos es 0.

			DATOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN		DATOS DE CARGA	
Nº de Línea	Barra de envío (emisor)	Barra de entrega (receptor)	Resistencia R (ohm)	Reactancia X (ohm)	Potencia Activa P (kW)	Potencia Reactiva Q (kVAR)
1	1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	2	3	0.4930	0.2511	90	40
3	3	4	0.3660	0.1864	120	80
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	5	6	0.8190	0.7070	60	20
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	7	8	1.7114	1.2351	200	100
8	8	9	1.0300	0.7400	60	20
9	9	10	1.0440	0.7400	60	20
10	10	11	0.1966	0.0650	45	30
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	12	13	1.4680	1.1550	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.5910	0.5260	60	10
15	15	16	0.7463	0.5450	60	20
16	16	17	1.2890	1.7210	60	20
17	17	18	0.7320	0.5740	90	40
18	2	19	0.1640	0.1565	90	40
19	19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	23	24	0.8980	0.7091	420	200
24	24	25	0.8960	0.7011	420	200
25	6	26	0.2030	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25

27	27	28	1.0590	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9744	0.9630	150	70
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.3410	0.5302	60	40

Tabla 4 Datos de nuestro Sistema de prueba.

Normalmente los sistemas de distribución son sistemas trifásicos desbalanceados por lo general, para el proceso de esta investigación utilizamos un sistema trifásico balanceado. Los resultados obtenidos del sistema son calculados a partir de un flujo de carga óptimo, simulado en un software computacional llamado Matlab en el cual en este procedimiento se obtendrán los valores de voltaje con su ángulo para cada barra y también sus respectivas potencias activa y reactiva por barras y las pérdidas de estos valores serán comparadas con los datos obtenidos al aplicar la optimización del algoritmo genético (F, 2006).

CAPÍTULO III – RESULTADOS

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Resultados Obtenidos de la Simulación Matlab.

los resultados obtenidos de nuestra simulación en Matlab para la compensación de potencia reactiva en nuestro sistema de distribución utilizando el algoritmo genético para la óptima ubicación de nuestro banco de capacitores y el tamaño de estos mismos serán dados por este mismo algoritmo. Estos resultados se explicarán por medio de 3 pasos dando resultados para una comparación al momento de irse desarrollando. Este algoritmo es suministrado por el sitio web (Solutions, 2009)

Paso 1. En este paso analizaremos el flujo de carga.

Una vez que hallamos calculado la suma de potencia, actualizamos el voltaje del nodo de inicio al voltaje de todas las otras barras y después de la actualización nuevamente calculamos las pérdidas. luego vendrá un nuevo flujo de carga, para este flujo de carga también, nuevamente tenemos que actualizar los voltajes y calcular el error, observaremos cuanta diferencia proviene del valor anterior actualizado al valor actual obtenido y si el error está dentro del rango permisible, entonces concluimos que el flujo de carga es convergente, eso lo que quiere decir que si el valor no cambia el valor es este. En este flujo de carga base se realizaron 4 iteraciones y el error máximo es de 0.0000038 como se observa en la Tabla 5.

Número total de Iteraciones	4
Desviación de error Máxima	0.0000038

Tabla 5 Resultados del número de iteraciones y la desviación de error máxima.

El resultado de nuestro flujo de carga lo podemos observar en nuestra Tabla 6 donde esta nos muestra el voltaje en por unidad [pu] de cada una de las barras del sistema con sus respectivos ángulos dados en radianes. Se observa que la barra con un menor voltaje es la barra número 18.

RESULTADO QUE MUESTRA EL PERFIL DE VOLTAJE EN EL CASO BASE		
Número de Barra	Magnitud de Voltaje [pu]	Ángulo del Voltaje [rad]
1	1	0
2	0.9970	0.0001
3	0.9829	0.0007
4	0.9754	0.0014
5	0.9680	0.0021
6	0.9495	0.0011
7	0.9460	-0.0065
8	0.9323	-0.0127
9	0.9260	-0.0168
10	0.9201	-0.0205
11	0.9192	-0.0200
12	0.9177	-0.0192
13	0.9115	-0.0268
14	0.9092	-0.0349
15	0.9078	-0.0422
16	0.9064	-0.0473
17	0.9044	-0.0695
18	0.9038	-0.0737
19	0.9965	-0.0010
20	0.9929	-0.0105
21	0.9922	-0.0147
22	0.9916	-0.0234
23	0.9793	-0.0004
24	0.9726	-0.0042
25	0.9693	-0.0079
26	0.9475	0.0018
27	0.9450	0.0028
28	0.9335	0.0044
29	0.9253	0.0059
30	0.9218	0.0082

31	0.9176	0.0013
32	0.9167	-0.0015
33	0.9164	-0.0048

Tabla 6 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras en caso base.

En la Tabla 7 observamos los resultados de las pérdidas correspondientes de cada una de las barras en este sistema de distribución.

RESULTADO QUE MUESTRA LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LAS BARRAS EN EL CASO BASE			
Número de Barra	SBARRA-RBARRA SBN - RBN	PÉRDIDAS EN LAS BARRAS	
		POT. ACTIVA [KW]	POT. REACTIVA [KVAR]
1	1 – 2	12.300	6.270
2	2 - 3	52.076	26.524
3	3 – 4	20.053	10.213
4	4 – 5	18.850	9.600
5	5 – 6	38.565	33.291
6	6 – 7	1.946	6.433
7	7 - 8	11.873	8.569
8	8 - 9	4.266	3.065
9	9 - 10	3.634	2.576
10	10 – 11	0.565	0.187
11	11 - 12	0.899	0.297
12	12 - 13	2.721	2.141
13	13 - 14	0.744	0.980
14	14 - 15	0.364	0.324
15	15 - 16	0.287	0.210
16	16 - 17	0.257	0.343
17	17 - 18	0.054	0.043
18	2 – 19	0.161	0.154
19	19 – 20	0.832	0.750
20	20 – 21	0.101	0.118

21	21 – 22	0.044	0.058
22	3 – 23	3.182	2.174
23	23 – 24	5.144	4.062
24	24 – 25	1.288	1.007
25	6 – 26	2.602	1.325
26	26 – 27	3.330	1.696
27	27 – 28	11.305	9.968
28	28 – 29	7.836	6.827
29	29 – 30	3.897	1.985
30	30 – 31	1.594	1.576
31	31 – 32	0.213	0.249
32	32 - 33	0.013	0.020

Tabla 7 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución en el caso base.

En la Tabla 8 se observa cómo hemos calculado las pérdidas totales de la potencia activa que es casi de 211 [KW] y de la potencia reactiva que son 143 [KVAR] por lo que esta es la iterabilidad local de una carga de 33 barras.

Pérdida de Potencia Activa [KW]	210.998
Pérdida de Potencia Reactiva [KVAR]	143.033

Tabla 8 Resultado de las pérdidas Totales de potencia Activa y Reactiva en el caso base.

En la ilustración 4 se observa cómo se evidenciará mejor lo que decíamos anteriormente sobre nuestro voltaje en por unidad [pu] más bajo que se representa en la barra número 18.

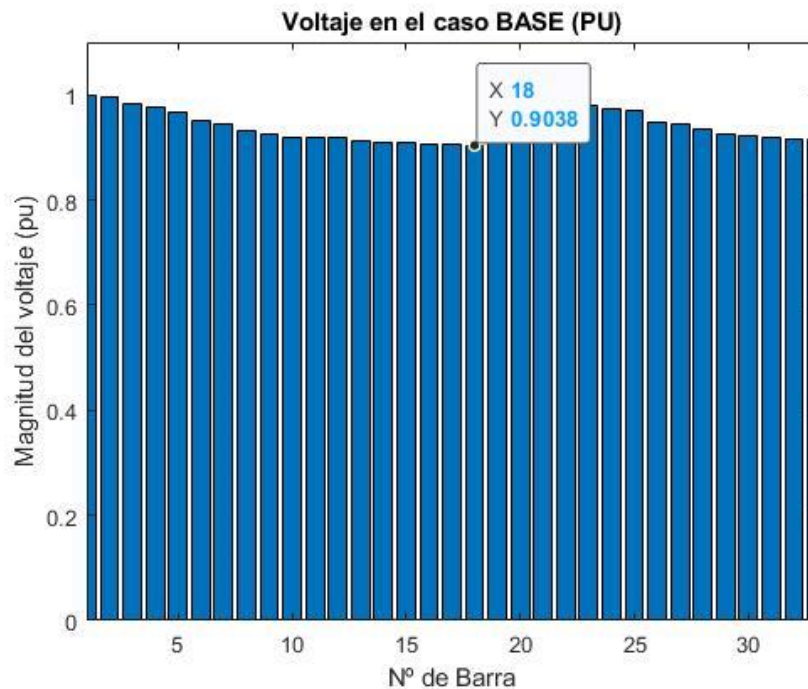


Ilustración 4 Grafica de los Voltaje en por unidad [pu] de cada una de las barras en el caso base.

Paso 2. Para este paso analizaremos el tamaño óptimo del capacitor en la barra más afectada que como observamos es la numero 18.

En este caso vamos a ver como obtuvimos el tamaño óptimo para nuestro capacitor ya que como vimos que la barra numero 18 tiene la magnitud del voltaje más bajo, como es el perfil de voltaje más bajo colocaremos en esta barra un capacitor por lo que debemos calcular ahora es el tamaño óptimo.

En este caso utilizaremos un solo capacitor ($n_{cap} = 1$) ya que solo vamos a utilizar un capacitor en la barra 18. A la hora de plantear nuestro algoritmo genético tenemos que ir antes al flujo de carga, ya que tenemos que actualizar la carga reactiva, que es la carga reactiva equivalente después de colocar el capacitor, será la carga reactiva real menos carga reactiva suministrada por el capacitor (En este tipo de modelado se supone que el capacitor tiene una carga negativa, es decir, está suministrando potencia reactiva así que si se coloca en cualquier barra entonces la carga reactiva equivalente será la diferencia de esa carga). Después de esto todo será similar, es decir, tenemos que ejecutar este flujo de carga y calcular todos los voltajes y las pérdidas.

```

for tt=1:ncap
    bqpu(capplc(tt))=bqpu(capplc(tt))-capsz(tt);
end

```

Ilustración 5 Ciclo para actualizar las cargas reactivas en el flujo de carga.

Donde:

- Ncap número de capacitores que se implementaran
- Capplc(tt) esto corresponde al lugar de ese capacitor
- Bqpu(capplc(tt)) este es el valor real que se actualiza
- Capsz(tt) la potencia reactiva suministrada por el capacitor

Después de esto todo será igual, tenemos que ejecutar ese flujo de carga y calcular todo el voltaje y las pérdidas.

Utilizaremos nuestro algoritmo genético para calcular el tamaño optimo aproximado, es decir aumentaremos el tamaño del capacitor desde 0 con un pequeño incremento cada vez que ejecutemos el flujo de carga y luego, en primer lugar obtendremos la perdida en orden decreciente después de un tiempo veremos que después de un tamaño particular habrá un incremento en las pérdidas, de modo que el tamaño correspondiente a la pérdida mínima será el tamaño óptimo para esa barra y después de tener esos tamaños óptimos para cada barra podemos obtener el tamaño optimo global. que es para que barra la pérdida es mínima, esa barra será el lugar optimo global del capacitor y el tamaño correspondiente será el tamaño optimo global del capacitor. La principal selección de este algoritmo es por su eficiencia a la hora de minimizar un problema ahora aquí nuestra función objetivo (fval) es la minimización de las pérdidas de nuestro sistema.

NUMERO DE POBLACION

El algoritmo genético pronostico el tamaño y luego cuantos tamaños va a pronosticar en una generación ese es el número de población que son 50 tamaños diferentes que el algoritmo genético calculara y ejecutara en el flujo de carga y en consecuencia, obtendrá el valor de la función objetivo (fval) aquí nuestra función objetivo como habíamos dicho antes se encarga de la minimización de las pérdidas, por lo que la perdida de potencia activa se usa fdist_loadflow_cap_plcsz porque el primer valor que se devuelve de este flujo de carga es la perdida de potencia activa (Ploss), por lo que desde el algoritmo genético minimiza la función objetivo (fval), por lo que minimiza las pérdidas de potencia activa (Ploss) que es nuestro objetivo.

GENERACIÓN

En este caso se ingresó 500 generaciones por lo que en una generación de 50 es el total de cuantos tamaños ejecutara el flujo de carga para obtener los valores correspondientes al valor funcional que es el valor de la función objetivo (fval), por lo que la generación 500 se ejecutara en un conjunto durante 500 de esas generaciones y entre las cuales obtendrá el valor optimo global para el cual obtener esos valores diferentes aquí el algoritmo genético es el concepto de selección cruce o recombinación y mutación.

```
ncap=1;
capplc={18};
options = gaoptimset;
options = gaoptimset('PopulationSize', 50,'Generations', 500,'StallGenLimit',100,'TimeLimit', 500,'StallTimeLimit', 50,'PlotFcn',@gaplotbestf);

[x fval]= ga(fun,nvars,A,b,Aeq,Beq,lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
[capaz_opt,fval]=ga(@fdist_loadflow_cap,1,[],[],[],[],{0},{0.5},[],[],options);
capaz_opt*1000
fval*1000
```

Ilustración 6 Algoritmo Genético utilizado para encontrar el tamaño óptimo del capacitor para la barra 18.

En este caso tenemos que calcular el tamaño óptimo para la barra número 18 el valor optimo del tamaño es la función objetivo de la perdida mínima, nuevamente utilizando el algoritmo genético después de esto la función loadflow luego de que no haya desigualdades ni restricciones de igualdad, pero el límite inferior se da a 0 y el límite superior se da a 0.5 no hay ninguna restricción no lineal así como restricciones de números enteros y supongamos que tenemos que calcular el tamaño y el lugar optimo, entonces el lugar debe ser un numero entero porque el lugar es el numero de la barra entonces en ese caso también habrá una implementación de restricciones de enteros porque el número de barra no puede ser un numero decimal. ya que estos valores están en por unidad [pu] por lo que el kilovatio [KW] y el kilovar [KVAR] se calculan multiplicando por mil. también podemos calcular las pérdidas de suministro de voltaje para después de colocar este capacitor podamos comparar esos resultados también cuantas son las pérdidas de nuestras potencias.

En la ilustración 7 observamos como el algoritmo genético está funcionando o se está ejecutando para la solución óptima para el tamaño del capacitor de barra 18.

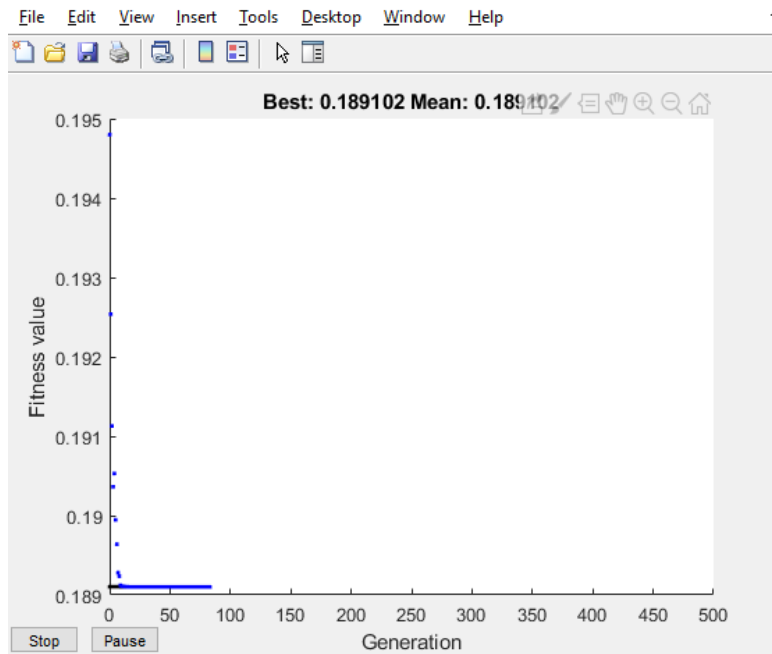


Ilustración 7 Algoritmo Genético en procesamiento.

En la Tabla 9 observamos los primeros resultados después de correr el programa, es el tamaño óptimo para nuestro capacitor en la barra 18 es de 479.7335 [KVAR] y la perdida total de potencia Activa es de 189.1020 [KW] esta es la perdida correspondiente despues de haber realizado el flujo de carga.

Tamaño del capacitor Nbarra = 18	479.7335 [KVAR]
Pérdidas de Pot. Activa	189.1020 [KW]

Tabla 9 Resultado del tamaño óptimo de nuestro capacitor y la pérdida correspondiente.

En la Tabla 10 observamos que este flujo de carga base se realizaron 4 iteraciones y el error máximo es de 0.0000038.

Número total de Iteraciones	4
Desviación de error Máxima	0.0000038

Tabla 10 Resultados del número de iteraciones y la desviación de error máxima.

En la Tabla 11 observamos el resultado de nuestro flujo de carga, El cual nos muestra el voltaje en por unidad [pu] de cada una de las barras del sistema con sus respectivos ángulos dados en radianes. En este flujo analizaremos como cambian nuestros voltajes después de añadir el capacitor en la barra 18. observamos que la barra con un menor voltaje ya no es la barra número 18 si no que es la barra 33.

RESULTADO QUE MUESTRA EL PERFIL DE VOLTAJE CUANDO SE COLOCA EL CAPACITOR EN LA BARRA 18		
Número de Barra	Magnitud de Voltaje [pu]	Ángulo del Voltaje [rad]
1	1	0
2	0.9971	-0.00001
3	0.9838	-0.00005
4	0.9769	-0.00005
5	0.9702	-0.00009
6	0.9540	-0.0041
7	0.9524	-0.0921
8	0.9427	0.0888
9	0.9388	0.1196
10	0.9353	0.1457
11	0.9347	0.1485
12	0.9336	0.1531
13	0.9311	0.1780
14	0.9312	0.1885
15	0.9314	0.1955
16	0.9318	0.2029
17	0.9353	0.2164
18	0.9365	0.2225
19	0.9966	-0.0011
20	0.9930	-0.0106
21	0.9923	-0.0148
22	0.9917	-0.0235
23	0.9803	-0.0012
24	0.9736	-0.0050
25	0.9703	-0.0087
26	0.9521	-0.0034
27	0.9495	-0.0024
28	0.9381	-0.0008
29	0.9299	0.0006
30	0.9264	0.0028
31	0.9223	-0.0039

32	0.9214	-0.0067
33	0.9211	-0.0100

Tabla 11 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras para el paso 2 donde colocamos el capacitor en la barra 18.

En la Tabla 12 observamos los resultados de las pérdidas correspondientes de cada una de las barras en este sistema de distribución cuando colocamos el capacitor en la barra 18.

RESULTADO QUE MUESTRA LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LAS BARRAS CUANDO COLOCAMOS EL CAPACITOR EN LA BARRA 18			
Número de Barra	SBARRA-RBARRA SBN - RBN	PÉRDIDAS EN LAS BARRAS	
		POT. ACTIVA [KW]	POT. REACTIVA [KVAR]
1	1 – 2	10.955	5.585
2	2 - 3	45.621	23.236
3	3 – 4	16.515	8.411
4	4 – 5	15.373	7.830
5	5 – 6	31.266	26.990
6	6 – 7	1.566	5.176
7	7 - 8	9.596	6.925
8	8 - 9	3.638	2.614
9	9 - 10	3.154	2.235
10	10 – 11	0.504	0.167
11	11 - 12	0.865	0.286
12	12 - 13	2.957	2.327
13	13 - 14	0.970	1.277
14	14 - 15	0.951	0.847
15	15 - 16	1.086	0.793
16	16 - 17	1.823	2.434
17	17 - 18	1.049	0.043
18	2 – 19	0.161	0.154
19	19 – 20	0.832	0.750
20	20 – 21	0.101	0.118
21	21 – 22	0.044	0.058
22	3 – 23	3.175	2.170

23	23 – 24	5.133	4.054
24	24 – 25	1.285	1.005
25	6 – 26	2.576	1.312
26	26 – 27	3.297	1.678
27	27 – 28	11.191	9.867
28	28 – 29	7.757	6.758
29	29 – 30	3.858	1.965
30	30 – 31	1.578	1.560
31	31 – 32	0.211	0.246
32	32 - 33	0.013	0.020

Tabla 12 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución cuando colocamos un capacitor en la barra 18.

En la Tabla 13 observamos las pérdidas correspondientes de la potencia Activa en kilovatios es de 189.102 [KW] y la perdida de potencia reactiva es de 129.668 [KVAR].

Pérdida de Potencia Activa [KW]	189.102
Pérdida de Potencia Reactiva [KVAR]	129.668

Tabla 13 pérdidas de potencias después de colocar el capacitor en la barra número 18.

Por lo que en el caso base Tabla 8, antes de colocar el capacitor la perdida es de casi 211 [KW] entonces despues de la colocacion disminuye a 189.102 [KW] asi que esto ahora es para la barra numero 18 solo si desea encontrar el valor optimo global, es decir, sera el tamaño y el lugar del tamaño del capacitor optimo global que se puede encontrar usando este metodo.

Pérdida de Potencia Activa [KW]	210.998
Pérdida de Potencia Reactiva [KVAR]	143.033

Tabla 8 Resultado de las pérdidas Totales de potencia Activa y Reactiva en el caso base.

En la Ilustración 8 se evidenciará como se mejora nuestro voltaje en por unidad [pu] con respecto al resultado de la gráfica anterior, donde se evidencia que el capacitor compensa las pérdidas de potencia generando una mejor optimización del sistema.

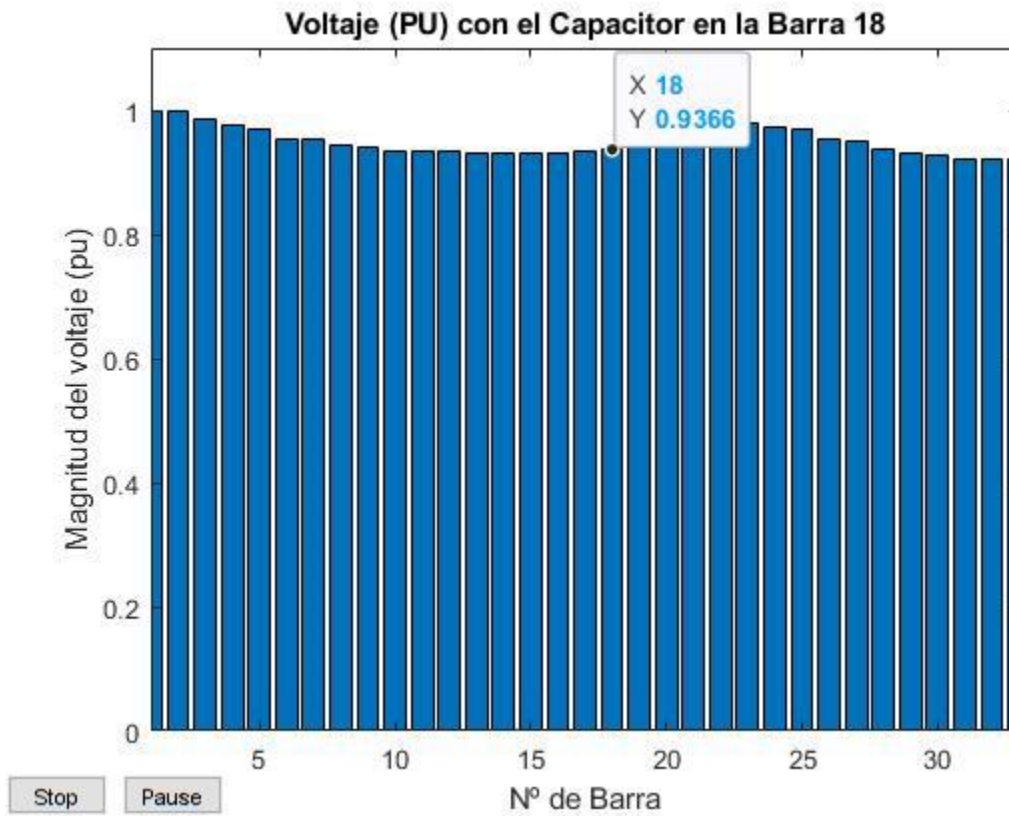


Ilustración 8 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de colocar el capacitor en la barra 18.

Ahora lo que tenemos que calcular es de la barra 2 a la 33 para que podamos calcular fácilmente el tamaño óptimo y las pérdidas correspondientes después de eso, la ubicación y el tamaño corresponden a la pérdida mínima que será el valor óptimo global tanto en el caso de ubicación como en el tamaño.

Paso 3. En este paso el Algoritmo Genético me dará como resultado la ubicación y el tamaño óptimo de los capacitores en 2 ubicaciones de nuestro sistema de distribución.

Para calcular el valor óptimo global para el lugar y el tamaño para los capacitores, para eso tenemos que obtener el lugar y el tamaño. No hay mucha diferencia con respecto al paso anterior, la diferencia en nuestro algoritmo genético es que en este paso vamos a encontrar que vamos a dar el número de capacitores que en este caso se realizara con 2 ($N_{cap} = 2$). no sabemos dónde tenemos que guardar esos capacitores entonces utilizaremos el algoritmo genético para saber cuáles serán las barras y los tamaños correspondientes, esto significa que habrá 2 lugares y por ende dos tamaños y para cada capacitor tendremos 2 variables el lugar y el tamaño década uno.

En la Ilustración 9 observamos las pequeñas diferencias de este límite de flujo de carga de distribución serán el lugar y el tamaño de los capacitores ya que en el paso anterior elegimos el lugar en este caso todo será pronosticado por el algoritmo genético.

```
ncap=2;
options = gaoptimset;
options = gaoptimset('PopulationSize', 50, 'Generations', 500, 'StallGenLimit', 100, 'TimeLimit', 500, 'StallTimeLimit', 50, 'PlotFcn', @gaplotbestf);

%[x fval]= ga(fun,nvars,A,b,Aeq,Beq,lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
[capplcsz_opt,fval]=ga(@fdist_loadflow_cap_plcsz,2*ncap,[],[],[],[],[2 0 2 0],[33 2 33 2],[],[1 3],options);
capplcsz_opt([1 3])
capplcsz_opt([2 4])
fval
```

Ilustración 9 Algoritmo Genético para la ubicación y tamaño óptimo para 2 capacitores en el sistema de distribución.

En la Ilustración 10 observamos también que el flujo de carga también se está ejecutando con el algoritmo genético nuestro motivo es encontrar la ubicación optima, así como el tamaño para este sistema de 33 barras. Esto también se denomina búsquedas simultanea de lugares y tamaños usando el algoritmo genético.

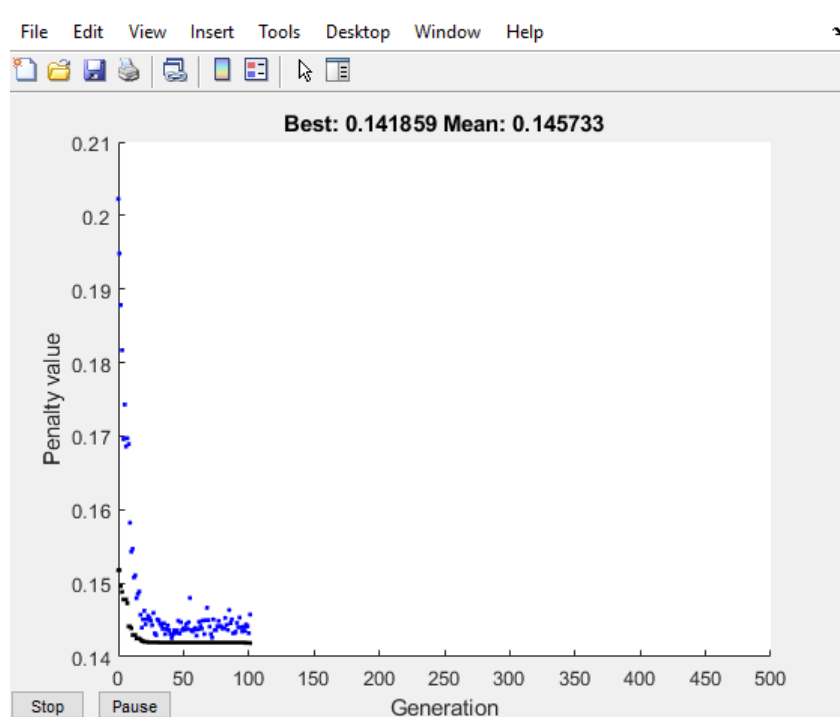


Ilustración 10 Búsqueda simultanea de lugares y tamaños usando el algoritmo genético.

En la Tabla 15 observamos los primeros resultados arrojados por nuestro programa al que corresponde a la ubicación óptima de nuestros capacitores. así que ahora si vamos a colocar dos capacitores, entonces debe colocar uno en la barra 12 y otro en la barra número 30 y los tamaños correspondientes son de 0.4651 [KVAR] y 1.0634 [KVAR].

Ubicación Óptima	Tamaño Óptimo del capacitor
Barra 12	0.4651 [KVAR]
Barra 30	1.0634 [KVAR]

Tabla 14 Resultado de la ubicación y tamaño óptimo de dos bancos de capacitores en nuestro sistema de distribución.

En la Tabla 16 observamos el resultado de nuestro flujo de carga el cual nos muestra el voltaje en por unidad [pu] de cada una de las barras del sistema con sus respectivos ángulos dados en radianes. En este flujo analizaremos como cambian nuestros voltajes después de añadir los capacitores en las barras 12 Y 30. observamos que la barra con un menor voltaje es la barra número 18 pero vemos que todos los voltajes tienen una compensación generando voltajes óptimos para nuestro sistema de distribución de prueba.

RESULTADO QUE MUESTRA EL PERFIL DE VOLTAJE CUANDO SE COLOCAN LOS CAPACITORES EN LAS BARRAS 12 Y 30.		
Número de Barra	Magnitud de Voltaje [pu]	Ángulo del Voltaje [rad]
1	1	0
2	0.9975	-0.0007
3	0.9860	-0.0061
4	0.9805	-0.0260
5	0.9752	-0.0941
6	0.9641	0.9767
7	0.9625	0.9043
8	0.9529	1.1227
9	0.9490	1.1542
10	0.9456	1.1807
11	0.9449	1.1835
12	0.9438	1.1881

13	0.9378	1.1809
14	0.9356	1.1732
15	0.9342	1.1663
16	0.9329	1.6115
17	0.9309	1.1405
18	0.9303	1.1366
19	0.9969	-0.0019
20	0.9934	-0.0113
21	0.9927	-0.0155
22	0.9920	-0.0242
23	0.9825	-0.0072
24	0.9758	-0.0110
25	0.9725	-0.0148
26	0.9629	0.9845
27	0.9615	0.9931
28	0.9568	1.0340
29	0.9537	1.0597
30	0.9521	1.0676
31	0.9481	1.0611
32	0.9472	1.0584
33	0.9469	10553

Tabla 15 Resultados de los perfiles de voltajes en todas las barras para el paso 3 donde colocamos los capacitores en las barras 12 y 30.

En la Tabla 17 observamos los resultado de las pérdidas correspondientes de cada una de las barras en este sistema de distribucion cuando colocamos los capacitores en las barras 12 y 30.

RESULTADO QUE MUESTRA LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LAS BARRAS CUANDO COLOCAMOS LOS CAPACITORES EN LAS BARRAS 12 Y 30.			
Número de Barra	SBARRA-RBARRA SBN - RBN	PÉRDIDAS EN LAS BARRAS	
		POT. ACTIVA [KW]	POT. REACTIVA [KVAR]
1	1 – 2	8.990	4.583
2	2 - 3	36.731	18.708

3	3 – 4	12.638	6.459
4	4 – 5	11.840	6.030
5	5 – 6	24.056	20.766
6	6 – 7	1.520	5.023
7	7 - 8	9.276	6.694
8	8 - 9	3.491	2.508
9	9 - 10	3.017	2.139
10	10 – 11	0.481	0.159
11	11 - 12	0.822	0.272
12	12 - 13	2.569	2.021
13	13 - 14	0.703	0.925
14	14 - 15	0.344	0.306
15	15 - 16	0.271	0.198
16	16 - 17	0.242	0.324
17	17 - 18	0.051	0.040
18	2 – 19	0.161	0.153
19	19 – 20	0.831	0.749
20	20 – 21	0.101	0.118
21	21 – 22	0.044	0.058
22	3 – 23	3.161	2.160
23	23 – 24	5.110	4.035
24	24 – 25	1.279	1.001
25	6 – 26	1.203	0.613
26	26 – 27	1.488	0.758
27	27 – 28	4.874	4.297
28	28 – 29	3.227	2.812
29	29 – 30	1.571	0.800
30	30 – 31	1.493	1.476
31	31 – 32	0.200	0.233
32	32 - 33	0.012	0.019

Tabla 16 Resultado de las pérdidas de potencia Activa y Reactiva en este sistema de distribución cuando colocamos dos capacitores en las barras 12 y 30.

En la Tabla 13 observamos como las pérdidas de potencia pasan de 189.102 [KW] en el paso 2 donde se calculan estas pérdidas en la barra 18.

Pérdidas de Potencia Activa [KW]	189.102
Pérdidas de Potencia Reactiva [KVAR]	129.668

Tabla 13 Pérdidas de potencias después de colocar el capacitor en la barra número 18.

En la Tabla 19 observamos como pasan estas pérdidas a 141.842 [KW] utilizando nuestro algoritmo genético para la óptima ubicación y tamaño de nuestros capacitores eso quiere decir que cuando utilizamos 2 capacitores hay una reducción de la pérdida de energía mayor.

Pérdida de Potencia Activa [KW]	141.842
Pérdida de Potencia Reactiva [KVAR]	96.4364

Tabla 17 Pérdidas de las potencias después de utilizar nuestro Algoritmo Genético para encontrar las ubicaciones Optimas.

En la Ilustración 11 observamos los perfiles de voltajes mejorados después de la compensación utilizando nuestro algoritmo genético.

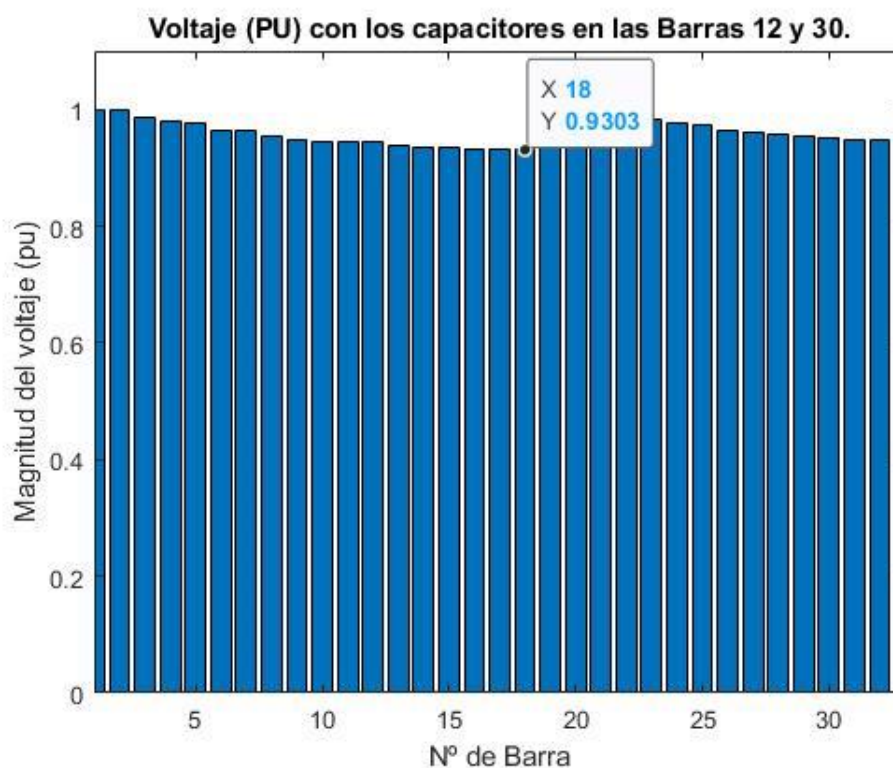


Ilustración 11 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de utilizar el Algoritmo Genético para la ubicación Optima de los capacitores en las barras 12 y 30.

Si comparamos los resultados de las graficas de la compensación cuando colocamos el capacitor en la barra 18 y la compensación utilizando el algoritmo genético para encontrar el lugar y tamaño óptimo para nuestros capacitores en las barras 12 y 30. podemos observar el cambio en el voltaje en por unidad [pu] de la barra 18 el cual en el paso 2 tenemos un perfil de voltaje de 0.9366 [V] y en el paso 3 un perfil de voltaje de 0.9303 [V], Esto no significa que cuando colocamos el capacitor en la barra 18 esta sea una compensación óptima solo por el hecho de obtener un mejor voltaje [pu] que el voltaje en el paso 3 ya que si observamos con atención las tablas de nuestras pérdidas de potencia podemos observar que tenemos una mayor compensación de estas potencias en el paso 3 ya que la compensación de todo nuestro sistema es mucho mejor. Así que hemos calculado la ubicación óptima del capacitor simultáneamente tanto el lugar como el tamaño usando el algoritmo genético.

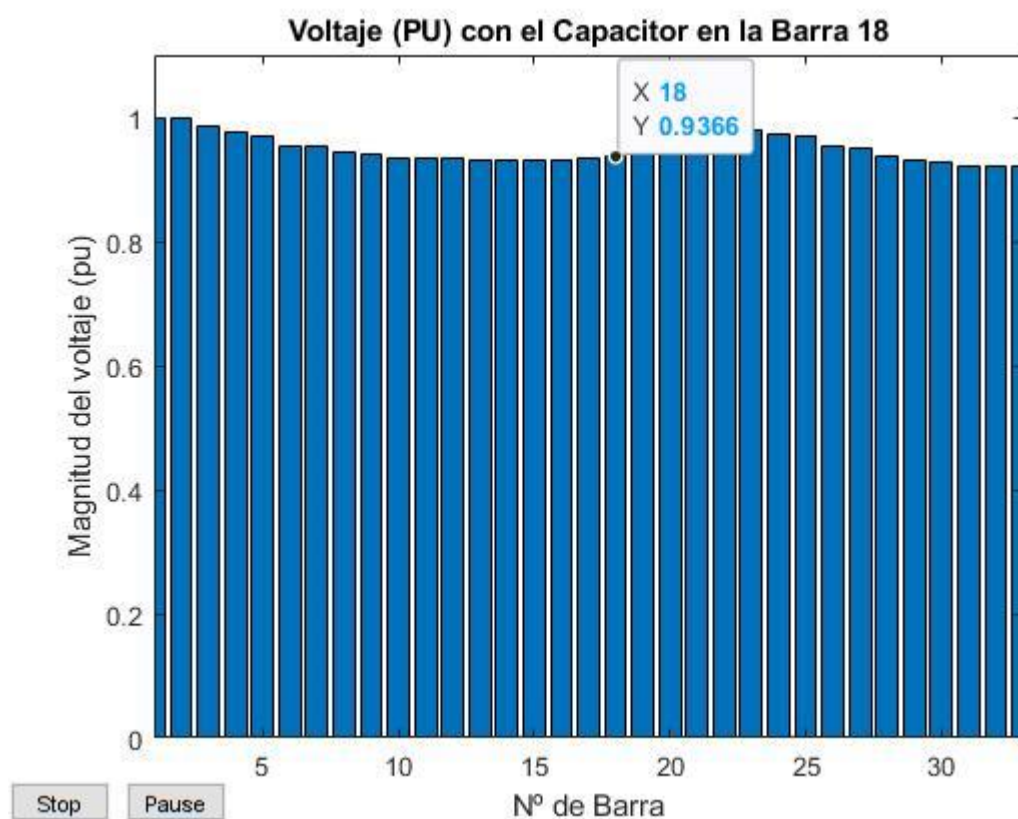


Ilustración 12 Grafica de los Voltajes en por unidad [pu] de cada una de las barras después de colocar el capacitor en la barra 18.

3.1.2 Análisis Comparativo de los Resultados Obtenidos con los Resultados Disponible en la Literatura.

Se realizó una comparación con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación con respecto a los resultados obtenidos en un artículo de investigación nombrado como Colocación óptima de capacitores en sistemas de distribución radial utilizando el algoritmo de polinización de flores. Este artículo implementa la técnica para la óptima ubicación utilizando el algoritmo de polinización de flores donde está inspirado en el proceso de polinización de las plantas con flores. La reproducción de las plantas se debe a la polinización de las flores. Esta polinización puede ser causada por el polen de una flor de la misma planta o de alguna otra planta. Se clasifica en dos grupos, el grupo (a) es nombrado polinización local, este poliniza usando polen de la misma flor, y el grupo (b) es nombrado polinización cruzada, este poliniza usando polen de una flor de alguna otra planta de la misma especie. La polinización local se produce en la propia planta sin la ayuda de ningún insecto. La polinización cruzada ocurre con la ayuda de polinizadores como los insectos (V, Jayabarathi, Raghunathan, & Yang, 2018).

Table 2 Results and comparison for 33-bus RDS with and without OCP.

Description	Base case	Analytical method (IP*) [7]	Two stage method [15]	FRCGA [9]	FPA
Total loss (kW)	210.97	171.78	144.04	141.24	139.075
C _{Location} (bus no.)	–	9, 29, 30	7, 29, 30	28, 6, 29, 8, 30, 9	30, 13, 24
C _{Size} (in kVAR)	–	450, 800, 900	850, 25, 900	25, 475, 300, 175, 400, 350	900, 450, 450
V _{min} (p.u)	0.9089	0.9501	0.9251	0.934	0.9327
Total kVAR	–	2150	1775	1725	1800
kVAR/kW loss reduction	–	54.86	26.52	24.74	25.04
Cost of kW loss (A) (\$)	35442.96	28859.04	24198.72	23728.32	23364.6
Cost of capacitor (B) (\$/(kVAR-year))	–	499.35	507.15	492.86	392.4
Total cost (C = A + B) (\$)	35442.96	29358.39	24705.87	24221.18	23757.0
Net savings (\$) (D = 35442.96 – C)	0.0	6084.57	10737.09	11221.78	11685.96
% Savings (E = D/35442.96)	0.0%	17.17%	30.29%	31.66%	32.97%
Best power loss (kW)	NA**	NA	NA	NA	139.075
Worst power loss (kW)	NA	NA	NA	NA	140.046
Mean power loss (kW)	NA	NA	NA	NA	139.57
Standard deviation	NA	NA	NA	NA	0.07793
Average computational time (s)	NA	NA	2.94	NA	7.75

* IP = interior point.
** NA = not available.

Ilustración 13 Resultados del método de polinización de flores.

De la Ilustración 13 podemos ver la información necesaria para realizar la comparación de los resultados obtenidos de los diferentes métodos para la ubicación óptima de capacitores. En el caso base o pérdida de potencia no compensada para este sistema es de 210,998 [KW]. La optimización utilizando el enfoque del Algoritmo de polinización de flores (FPA) propuesto proporciona las ubicaciones óptimas en las barras [30, 13, 24] y los tamaños óptimos será respectivamente de [900, 450, 450] [kVAR]. Estos resultados se muestran en la Tabla 2. También se muestran los resultados obtenidos utilizando el método analítico de Búsqueda Gravitacional, el método de dos etapas y el enfoque del Algoritmo genético codificado real para el capacitor (FRCGA) con los que se ha

comparado el método del Algoritmo de polinización de flores (FPA) propuesto. Después de la compensación, el mejor resultado para la pérdida de potencia Activa es 139,075 [kW] para el método de Algoritmo de polinización de flores (FPA), que es el menor de todos los métodos. Pero este método y los otros utilizan más de dos capacitores, y en nuestro método de ubicación optima utilizando el algoritmo Genético se obtiene una pérdida de potencia Activa de 141.842 [KW] Ubicándola como la mejor técnica ya que tiene compensación muy aceptable teniendo en cuenta que solo se utilizaron 2 capacitores y en el algoritmo de polinización de flores se utilizan 3 Generando más costos por una compensación de potencia muy parecidas. Después de la compensación, el voltaje mínimo se observa en la barra 18 como 0.9327 [pu] en el método de polinización de flores y en nuestro Algoritmo Genético es de 0.9303 [pu] obteniendo un mejor voltaje que en el otro método. Esto es mejor que el voltaje mínimo del caso base de 0.9038 [pu]. En la tabla también se muestra la compensación de [kVAR] requerida por reducción de pérdida de [kW]. En la tabla 20 se observa la comparación de los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

Descripción	Caso Base	Método de búsqueda Gravitacional	Método de dos etapas	Algoritmo genético codificado real para el capacitor	Algoritmo de polinización de flores	Algoritmo genético
Voltaje min (pu)	0.9038	0.9501	0.9251	0.934	0.9327	0.9303
Pérdidas de potencia Activa (kW)	210.998	171.78	144.04	141.24	139.075	141.842
Locación Optima del capacitor	-	9, 29, 30	7, 29, 30	28, 6, 29, 8, 30, 9	30, 13, 24	12, 30
Tamaño del capacitor (kVAR)	-	450, 800, 900	850, 25, 900	25, 475, 300, 175, 400, 350	900, 450, 450	465, 1065
Potencia Reactiva total suministrada por los capacitores (kVAR)	-	2150	1775	1725	1800	1530

Tabla 18 Comparación de los resultados obtenidos por distintos métodos.

Las Ilustraciones 14 y 15 muestran la magnitud del voltaje del sistema de distribución de 33 barras con y sin la ubicación óptima de los capacitores. Se ve que el perfil de voltaje en todas las barras mejora después de la compensación. Se Observa como estas dos técnicas obtienen resultados similares con la diferencia del número de capacitores que utilizan estas técnicas

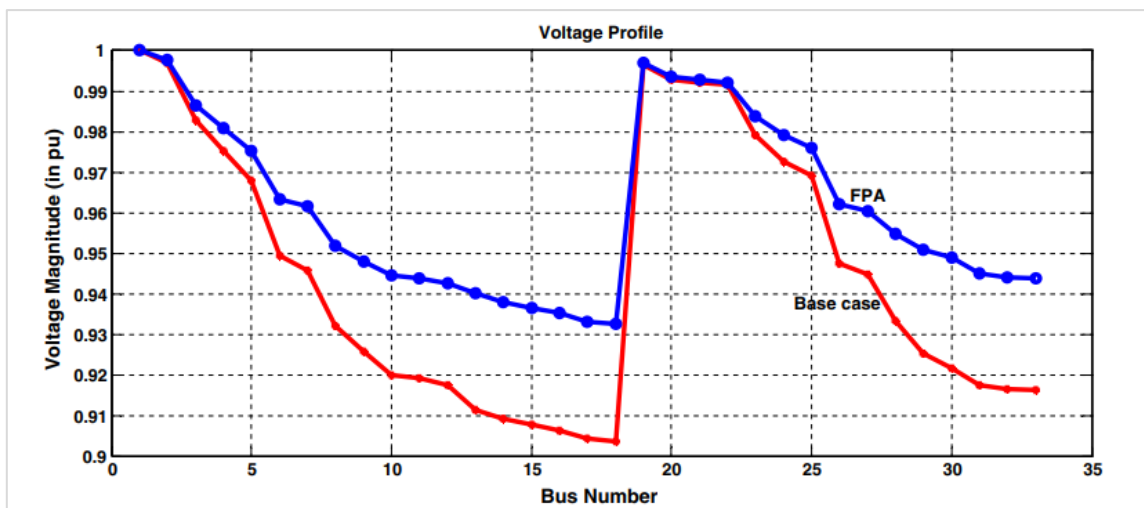


Ilustración 14 Perfiles de Voltaje del Método de Polinización de Flores.

Se observa como las magnitudes de lo voltaje en cada barra son muy similares para los dos métodos de ubicación óptima.

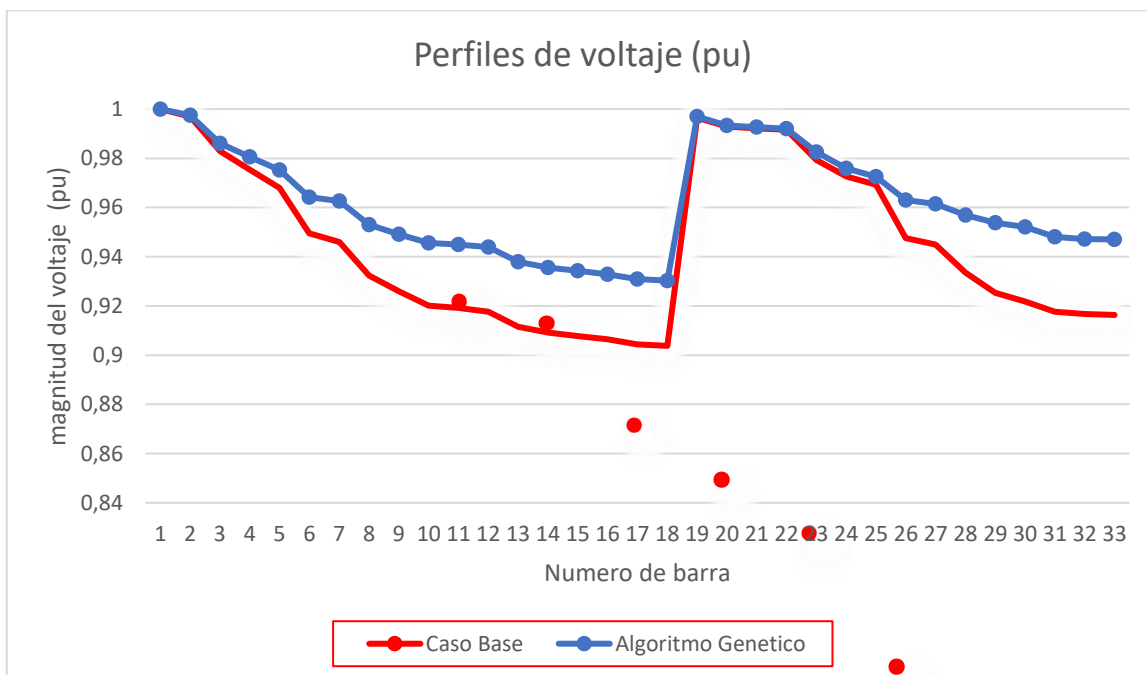


Ilustración 15 Perfiles de voltaje del Método de Algoritmo Genético.

3.2 Análisis del Impacto del Trabajo de Grado

- ***Impactos Económicos***

En el momento en que los sistemas inductivos ingresan potencia reactiva a la red y ya que esta potencia no es útil, pero a la hora de ver la factura genera un incremento en esta, generando que la compañía tenga que sobredimensionar sus instalaciones ya que tiene más riesgo de sufrir caídas de tensión y tienen más pérdidas de distribución.

Al suministrar menos potencia reactiva a la red, genera un ahorro económico ya que esto genera que la penalización existente se elimine por obtener una energía reactiva dentro de los parámetros estipulados, así se reduce el valor total de la factura de energía.

- ***Impactos Empresariales y Sociales***

Tenemos impactos positivos empresariales y sociales ya que con la compensación logramos aumentar la vida útil de los equipos y maquinarias, también generaría un sostenimiento sencillo y de bajo costo, Reduce las caídas de tensión y se disminuye las pérdidas del sistema de red eléctrica por calentamientos en sus elementos. Aumentando la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.

- ***Impactos de Investigación***

Las agencias reguladoras exigen que el servicio prestado por las empresas de servicios públicos presente un estándar de calidad y confiabilidad cada vez más alto. Se vuelve necesario la selección adecuada y la correcta ubicación para la compensación de potencia reactiva utilizando bancos de capacitores. debido a lo anterior se hacen estudios sobre las diferentes técnicas óptimas para correcta ubicación del equipo ya mencionado.

CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones

En esta investigación se presentó el método heurístico del Algoritmo Genético el cual se implementó mediante el desarrollo del software Matlab. se simuló un sistema de distribución radial IEEE de 33 Barras para realizar el flujo de carga ya que este algoritmo genético presentado encuentra fácilmente las mejores soluciones para el sistema de prueba. Se determina el procedimiento óptimo para las ubicaciones de los capacitores ejecutando la compensación de potencia reactiva en el sistema demostrando la eficiencia del método propuesto para resolver este problema de la ubicación óptima.

Las restricciones relacionadas con la ubicación óptima de los bancos de capacitores se tienen en cuenta el nivel de voltaje en cada barra de la red y las pérdidas obtenidas en cada barra. La utilización de capacitores en un sistema de distribución pretende obtener mejores resultados en los niveles de tensión, mejorar el factor de potencia y reducir las pérdidas de nuestras potencias, cuando se propuso la solución del problema de pérdidas de potencia el voltaje obedece al planteamiento de criterios técnicos, ya que los costos elevados originados los podemos reducir a cambio de mantener un perfil de voltaje dentro de los parámetros aceptables. Cuando proponemos la reducción de pérdidas, El principal problema sería resolver los problemas económicos.

Este método no es complicado, puede encontrar la mejor selección de la ubicación y el tamaño de los bancos de capacitores. Los métodos heurísticos son muy adecuados para resolver problemas complejos, como la localización de bancos de capacitores en la red de distribución. a partir de la ubicación de estos bancos de capacitores basándonos en la técnica de algoritmo genético, Esta ofrece los mejores resultados con respecto a los métodos tradicionalmente empleados. De acuerdo con los resultados obtenidos, la principal ventaja del método propuesto es el mínimo costo total. Ya que a la hora de comparar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos de la técnica de polinización de flores y otros. Observamos como utilizamos menor cantidad de capacitores por una compensación similar y hasta mejor a los resultados obtenidos en esta literatura.

En el sistema de prueba se pudo constatar que en efecto la simulación realiza el objetivo principal, el cual es encontrar las ubicaciones óptimas y el tamaño óptimo de los bancos de capacitores a instalar en el sistema de distribución el cual nos permitió minimizar costos y reducir las pérdidas de energía.

4.2 Referencias

- A.Y. Abdelaziz, E. A. (2015). Optimal sizing and locations of capacitors in radial distribution.
- Abdelazeem A. Abdelsalam, G. H. (2019). Shunt Capacitors Optimal Placement in Distribution Networks Using Artificial. 9.
- Agata Szulka, R. M. (2017). Selection of Optimal Location and Rated Power of capacitor banks in distribution network using genetic algorithm. 6.
- Amiel, I., Rajput, S., & Averbukh, M. (2021). Capacitive reactive power compensation to prevent voltage instabilities in.
- Borges, D., & Concepcion, Y. (2017). Reactive compensation in primary distribution power systems, applying genetic algorithms.
- Campolina , A., Ramos , I., & Ribeiro, D. (2022). Sensibility Analysis with Genetic Algorithm to Allocate Distributed.
- F, G. (2006). *flujo de potencia*. Obtenido de https://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/Capitulo3.pdf
- factor de potencia y sus implicaciones tecnicas*. (s.f.). Obtenido de Certificado en administracion de energia: http://www.andi.hn/wp-content/uploads/2014/11/1-Factor-de-potencia-y-sus-implicaciones-t+%C2%AEcnico-econ+%C2%A6micas_sn.pdf
- G, A. (2011). *Ubicación Óptima De Capacitores En Redes Primarias De Distribución Utilizando Algoritmos Genéticos Considerando Demanda Variable*.
- Grainger, J., & Stevenson, w. (1996). *analisis de sistemas de potencia* . McGraw-Hill.
- Gutierrez, G., Villaroel, M., & Carter , S. (2018). metodo de suma de potencias en sistemas de distribución.
- Hadzhiev, I., Malamov, D., & Balabosov, I. (2020). Analysis of Higher Harmonics During Reactive.
- Jahromi, M. J. (2021). Reactive Power Compensation and Power Loss Reduction using Optimal Capacitor Placement. 6.
- Karthikaikannan, D. G. (2018). Optimal Sizing Of Capacitors In Radial Distribution System Using Improved Harmony Search Algorithm . 5.
- Kouhsari, S. M. (2021). Evaluation of harmonic effect on capacity and location of optimal capacitors in distribution network using HBB-BC algorithm.
- M, A. (2014). *Metering Engineering*. Obtenido de Banco de Capacitores: <https://metering.com.mx/s/wp-content/uploads/2014/07/capacitores.pdf>

- M, G. (2005). *localizacion optima de capacitores en redes primarias de distribucion via algoritmos geneticos*.
- M, H. (2008). *Aplicación De Algoritmos Genéticos Para La Localización Óptima De Capacitores En Redes Primarias De Distribución*.
- M. O. Okelola, O. W. (2022). Optimal Sizing and Placement of Shunt Capacitors on the Distribution System Using Whale Optimization Algorithm. 9.
- Mansour, A. A. (2019). Optimal Allocation and Hourly Scheduling of. 16.
- Martinez, J., Gomez, J., Martinez, D., & Vargas, C. (2017). Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 2-3.
- Mohsin Shahzad¹, Q. S. (2021). Reactive Power Support in Radial Distribution Network Using Mine Blast Algorithm. 8.
- Muhammad Junaid Tahir, M. B. (2022). Optimal Placement of Capacitors in Radial Distribution Grids. 27.
- Oscar Danilo Montoya, F. D. (2022). Annual Operating Costs Minimization in Electrical Distribution Networks via the Optimal Selection and Location of Fixed-Step Capacitor Banks Using a Hybrid Mathematical Formulation. 14.
- Raheem, A., Kamel , S., Ebeed, M., & Yu, J. (2018). Optimal Capacitor Allocation in Radial Distribution.
- Redondo , F., & Redondo , R. (2017). *Potencia reactiva y energía reactiva*. Obtenido de <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/EnergiaReactiva.pdf>
- Resistencia* . (2019). Obtenido de electronica unicrom: [https://unicrom.com/impedancia-resistencia-reactancia/#:~:text=La%20resistencia%20es%20el%20valor,y%20las%20bobinas%20\(inductores\)](https://unicrom.com/impedancia-resistencia-reactancia/#:~:text=La%20resistencia%20es%20el%20valor,y%20las%20bobinas%20(inductores).).
- risoul. (2021). *Compensación de la energía reactiva y su papel en el incremento del factor de potencia*. Obtenido de <https://www.risoul.com.mx/blog/compensacion-de-la-energia-reactiva-y-su-papel-en-el-incremento-del-factor-de-potencia#:~:text=Beneficios%20de%20la%20compensaci%C3%B3n%20reactiva,-La%20compensaci%C3%B3n%20reactiva&text=Optimizaci%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20en>
- Ruiz , F., Barrera, C., & Valenzuela , A. (2020). Reactive Power Compensation Using Power Flow Sensitivity Analysis and QV Curves.
- Sani, S. A. (2019). Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems using Improved Bacterial Foraging Algorithm. 5.

Shankar, G. B. (2018). Optimal Sizing and Allocation of Capacitors in Radial Distribution System using Sine Cosine Algorithm. 4.

Solutions, U. E. (2009). *Unique Engineering Solutions*. Obtenido de <https://www.youtube.com/@UniqueEngineeringSolutions/about>

Tecnologico de Monterrey. (s.f.). Obtenido de Energía eléctrica: conceptos y principios básicos: https://repositorio.tec.mx/ortec/bitstream/handle/11285/631223/13_t5s2_c5_pdf_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Potencias%3A,con%20dando%20como%20resultado%20VAR.

Upper, N. H. (2017). Moth-flame Algorithm and Loss Sensitivity Factor. 6.

V, T., Jayabarathi, T., Raghunathan, T., & Yang, X. (2018). Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm. 3 - 5.

Wikipedia. (2020). *Sistema por unidad*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_por_unidad