

**ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE BANCOS DE
CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE
COLONIA DE HORMIGAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE BANCOS DE
CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE
COLONIA DE HORMIGAS**

**AUTOR:
MARCELA LUCIA VIRACOCCHA CHICAIZA**

**DIRECTOR:
ALEXANDER AGUILA TÉLLEZ**

Quito, Febrero 2018

Marcela Lucía Viracocha Chicaiza

ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS

Universidad Politécnica Salesiana , Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto.



Marcela Lucía Viracocha Chicaiza (A'1985 – M'08). Nació en Quito, Ecuador. Bachiller con especialidad en Físico Matemático en la Unidad Educativa Experimental Manuela Cañizares, Ecuador (2003). Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la universidad politécnica salesiana. Su trabajo se enfoca en el estudio de óptimo dimensionamiento y ubicación de bancos de capacitores en redes de distribución usando algoritmos de colonia de hormigas.
mviracochac@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



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

Todos los derechos reservados:

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

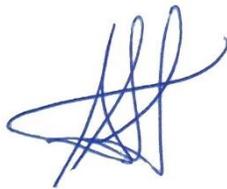
DERECHOS RESERVADOS

©2018 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Óptimo Dimensionamiento y Ubicación de Bancos de Capacitores en Redes de Distribución Usando Algoritmo de Colonia de Hormigas*” realizado por Marcela Lucía Viracocha Chicaiza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2018



.....
Alexander Águila Téllez

C.C.: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Marcela Lucía Viracocha Chicaiza, con documento de identificación N° 1720258597, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Óptimo Dimensionamiento y Ubicación de Bancos de Capacitores en Redes de Distribución Usando Algoritmo de Colonia de Hormigas*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Febrero 2018



.....
Marcela Lucía Viracocha Chicaiza
C.C.: 1720258597

1. INDICE GENERAL

1.	Introducción	2
2.	Marco teórico	3
2.1.	Parámetros a considerar para el óptimo dimensionamiento y ubicación de bancos de capacitores	3
2.2.	Minimización de Pérdidas de Potencia	3
2.3.	Factor de potencia	4
2.4.	Perfiles de voltaje	4
2.5.	Métodos de compensación de potencia reactiva	5
2.5.1.	Compensación Reactiva en Paralelo Pura	5
2.5.2.	Compensación Reactiva en Serie	5
2.5.3.	Máquinas Sincrónicas	5
2.5.4.	SVC	5
2.5.5.	Bancos de Capacitores	5
2.6.	Dispositivos empleados para compensar la potencia reactiva en redes de distribución	6
2.6.1.	Sistemas flexibles de transmisión de CA	6
2.6.2.	Compensadores de var estáticos	6
2.6.3.	Compensadores en serie controlados por tiristores (TCSC's)	6
2.6.4.	Compensador síncrono estático (STATCOMs)	6
2.6.5.	Controlador de flujo de potencia unificado (UPFC)	6
2.7.	Análisis de la Optimización por Colonia de Hormigas	6
2.7.1.	Descripción	7
2.7.2.	Aplicaciones	7
3.	Formulación del Método	8
3.1	Función objetivo a minimizar	8
3.2	Algoritmo de Optimización	9
3.1.1	Pseudocódigo Ybarra	9
3.1.2.	Pseudocódigo OCH	10
4.	Análisis de Resultados	11
4.1.	Análisis del Voltaje	12
4.2.	Análisis de Potencia Reactiva y Factor de Potencia	13
4.2.1.	Análisis de la Potencia Reactiva en el Sistema	14
4.2.2.	Análisis del Factor de Potencia en el Sistema	15
5.	Conclusiones	15
6.	Referencias	16

2. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Compensación de Potencia Reactiva en el Sistema de Distribución	3
Figura 3. Sistema de Distribución 30 Nodos compensado con 3 bancos de capacitores.	12
Figura 4. Voltaje del Sistema Sin Compensar	13
Figura 5. Voltaje del Sistema Compensado	13
Figura 6. Voltaje del Sistema de-30 Nodos Sin Compensar Vs Compensado	13
Figura 7. Potencia Reactiva No Compensada Vs Compensada.....	14
Figura 8. Factor de Potencia No Compensado Vs Compensado	15

3. INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del circuito de distribución IEEE 30 Nodos	8
Tabla 2: Valores calculados del sistema de distribución IEEE 30 Nodos	9
Tabla 3: Matriz Ybarra.....	10
Tabla 4: Voltajes [p.u.] del Sistema Sin Compensación Vs Sistema Compensado	12
Tabla 5: Potencia Reactiva y Factor de Potencia sin Compensación.....	13
Tabla 6: Potencia Reactiva y Factor de Potencia con Compensación	14
Tabla 7: Valor de los capacitores en el sistema	15
Tabla 8: Perdidas en el Sistema antes y después de la compensación	15

OPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS

Resumen

Este artículo propone un Método de Optimización por Colonia de Hormigas (OCH) para resolver el problema de compensación de la potencia reactiva en los sistemas de distribución; el cual permitirá determinar la ubicación y dimensión óptima de un banco de capacitores; el problema en la colocación del banco de capacitores consiste en encontrar lugares para instalar los capacitores en una red de distribución eléctrica con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia en el sistema de distribución. La OCH es un método de inteligencia, poderoso para resolver problemas de optimización; inspirado en el comportamiento natural de las colonias de hormigas. La metodología propuesta, programado en MATLAB, se valida con los sistemas de prueba IEEE de 30 nodos con la obtención y discusión de los resultados; exponiendo así el valor del enfoque propuesto; en el cual el resultado obtenido fue satisfactorio, ya que se obtuvo minimización de pérdidas en el sistema y se mejoró el índice de perfiles de voltaje.

Palabras Claves: Bancos de capacitores, compensación de potencia reactiva, optimización por colonia de hormigas, minimización de pérdidas, redes de distribución

Abstract

This article proposes a Method of Optimization by Colony of Ants (OCH) to solve the of the reactive power in the distribution systems; that will allow to determine the location and optimal dimension of a capacitor bank; the problem in the placement of the capacitor bank is to find places to install the capacitors in an electrical distribution network in order to reduce power losses in the distribution system. The OCH is an intelligence method, powerful to solve optimization problems; inspired by the natural behavior of the ant colonies. The proposed methodology, programmed in MATLAB, is validated with the IEEE test systems of 30 nodes with the obtaining and discussion of the results; thus exposing the value of the proposed approach; in which the obtained result was satisfactory, since losses were minimized in the system and the index of voltage profiles was improved.

Keywords: Capacitor banks, reactive power compensation, ant colony optimization, loss minimization, distribution networks.

1. Introducción

El Sistema de Distribución es parte importante del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). La tendencia industrial a nivel mundial, es optimizar los sistemas de potencia; la mayoría de los sistemas de distribución están configurados de forma radial para facilitar su protección [37]; cada alimentador del sistema cuenta con diferentes cargas como: industriales, comerciales y residenciales que cuentan con diferentes patrones que hacen que las cargas máximas de los alimentadores ocurran en momentos diferentes [1].

El flujo de potencia reactiva que se presenta en el sistema de distribución produce pérdidas de energía, problemas de regulación de voltaje, bajo factor de potencia, y además limita la capacidad de transporte de energía útil; reduciendo de esta manera la eficiencia de la red. El sistema eléctrico con elementos inductivos transporta dos tipos de potencia: la real, la que realiza el trabajo efectivo medida en [kW] kilovatios, y la potencia reactiva o no productiva, medida en [kvar] kilovoltio amperios reactivos [2].

La reconfiguración de la red, la instalación de capacitores, el balanceo de carga y la introducción de mayores niveles de tensión en la red son alternativas disponibles para reducir pérdidas a nivel de distribución. En diferentes estudios se ha tomado la reconfiguración de la red como un método eficaz que puede hacer uso del equipo existente para reducir las pérdidas de los alimentadores de distribución y mejorar la seguridad del sistema [1].

La localización y dimensionamiento óptima de un banco de capacitores puede llegar a ser un punto clave para garantizar que los sistemas eléctricos de distribución funcionen exitosamente. Existen diferentes métodos para determinar una localización óptima. En algunas de estas técnicas manipulan

enfoques analíticos, mientras que otros utilizan algoritmos de gran complejidad [3]. Los resultados que se obtengan dependerán de la técnica aplicada; con ello se obtendrá mejor precisión al momento de implementar el banco de capacitores para compensación de potencia reactiva en la red. Los capacitores se han utilizado generalmente para proporcionar compensación de la potencia reduciendo el efecto de transporte de energía reactiva [3]. Al momento que la energía reactiva sea compensada el factor de potencia debería igualarse a uno, disminuirían las pérdidas, el perfil de voltaje estará dentro de los límites aceptables; y toda la potencia suministrada a la instalación se convierte en potencia útil [4]. La cantidad de compensación está relacionada con la colocación de capacitores; la determinación de su ubicación, dimensión, tipo y número de condensadores que se van a colocar en la red de distribución [3]. Se estima que alrededor del 5% al 13% de la generación total es desperdiciada a nivel de distribución [1]-[37].

Todos los medios para reducir las pérdidas del sistema de distribución merecen ser investigados. Este artículo presenta un estudio de minimización de pérdidas de potencia activa en redes eléctricas de distribución, con caso de estudio en un circuito de la IEEE de 30 nodos mediante la óptima selección y ubicación de bancos de capacitores implementando un algoritmo que sea capaz de proporcionar los mejores resultados para su solución.

La Optimización basada en Colonias de Hormigas es un procedimiento metaheurístico que soluciona problemas de optimización [5]. El algoritmo más simple usado en los sistemas de colonia de hormigas, es el cual es conformado por sus módulos básicos: 1) inicialización de parámetros, 2) construcción de alternativas de solución

y 3) actualización de feromonas [2]-[6]. Una vez se inicializan los parámetros propios del algoritmo, los procedimientos 2, 3 se ejecutan iterativamente hasta cumplir con un adecuado criterio de parada.

Se realiza un conjunto de iteraciones que permiten encontrar respuestas globales y particulares para su solución, además de agregar un conocimiento heurístico y en algunas ocasiones funciones de probabilidad [5]-[6]-[7].

En el capítulo 2 se desarrolla un estado del arte con definiciones concretas para ímpetu del artículo. En el capítulo 3 se realiza la formulación del método y se presentará el algoritmo de optimización a usarse. Continuando con un análisis de resultados en el capítulo 4. Para finalmente, exponer las conclusiones y referencias del desarrollo del artículo.

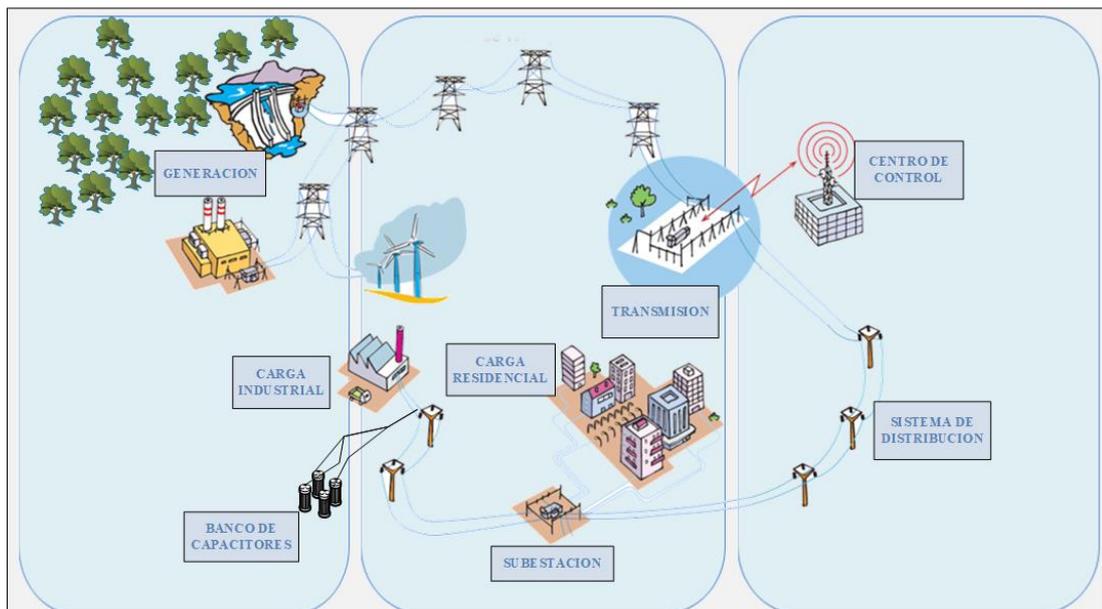


Figura 1. Compensación de Potencia Reactiva en el Sistema de Distribución

2. Marco teórico

2.1. Parámetros a considerar para el óptimo dimensionamiento y ubicación de bancos de capacitores

Estudiando sobre las pérdidas que sufre el sistema eléctrico se construye la idea de colocar capacitores que se encuentren asociados a una carga, una solución que indica una mala explotación de la potencia capacitiva que se instala y a su vez un gasto innecesario.

Pero se puede hallar una solución como concentrar potencia necesaria, en un punto específico de la red que se

encuentra mediante una óptima medición de energía, o por razones técnicas se puede colocar capacitores a la mayor carga que se encuentra a la red [8]. Lo ideal es encontrar una solución beneficiosa, como colocar bancos de capacitores puntuales en la red según la determinación de una localización mediante OCH, la cual será desarrollada en este artículo. Para lo cual se considera importante el conocer ciertos criterios que se explica a continuación.

2.2. Minimización de Pérdidas de Potencia

Los sistemas de compensación de potencia reactiva tienen la finalidad de aportar energía reactiva para un mejor

funcionamiento del sistema eléctrico [9]. La potencia suministrada en el sistema se convierte en útil cuando la energía reactiva es compensada [10]; para ello la inyección de reactivos es utilizado para la minimización de pérdidas técnicas en circuitos de distribución rurales y urbanos. [11]-[12]. En los sistemas eléctricos es importante la presencia de la potencia reactiva ya que dentro del sistema varias de las cargas requieren de reactivos para funcionar además que dentro de la red también contamos con los cables los mismos que generan reactivos [38]; siempre debe existir un equilibrio, debido a que una falta de potencia reactiva en un sistema genera caída de tensión, mientras que un exceso de potencia reactiva, ocasionaría sobretensiones [3]-[4].

La reducción de las pérdidas Joule en los conductores y transformadores es un resultado importante del compensar la energía reactiva [10]-[11]. Además estas pérdidas son contabilizadas como energía activa consumida (kWh) por el contador de energía eléctrica, por lo que se traduce también en una reducción en los costos [9].

2.3. Factor de potencia

El factor de potencia es bajo en la industria ya que la mayoría de sus cargas y equipos son de presencia inductiva [13]; esto muestra una reducción de la capacidad, un incremento de pérdidas y caída de voltaje en el sistema eléctrico [9]. Corregir el factor de potencia es la principal función de los bancos de capacitores. Al momento de disminuir la circulación de corriente se reduce las pérdidas de potencia y se mejoran los perfiles de voltaje [14].

En sectores en los cuales las cargas presentan picos de demanda, en épocas marcadas del año suele utilizarse el control estacional o permanente de los bancos capacitivos [15]. En las cargas

agrícolas sus mayores demandas suelen ser del mes de noviembre al mes de marzo; el comportamiento de la componente reactiva de este tipo de cargas varía en trimestres, semestres o de forma permanente; dependiendo del comportamiento de la carga [16]-[17]. Si la carga es agrícola es conveniente usar un control estacional durante el tiempo de mayor demanda; mientras que para cargas industriales con procesos productivos continuos, es preciso un control permanente [18].

Cuando el comportamiento de la carga no varía dentro del día y se tratan cargas del tipo industrial suele utilizarse los bancos de compensación en horarios fijos del día, habitualmente desde 8 am a 8 pm; son controles por horario o jornada [2]. Existe el riesgo en el sistema de que este control lo sobrecompense durante estas horas al no tener un control permanente del factor de potencia.

El comportamiento de la potencia reactiva cuando las cargas son agrícolas, industriales o residenciales, es diferente en cada época del año y en cada hora del día; en estos procesos se maneja un control por reactivos [18].

2.4. Perfiles de voltaje

Un punto muy importante en la red de distribución es mantener los perfiles de voltaje en los distintos puntos de la red; en los centros de distribución si se refiere a una red en anillo y, en los finales de la línea si es una red radial [14]. Si se presentan cargas con una demanda variable de potencia reactiva la regulación de tensiones puede significar un problema [15]-[18]. La distribuidora debe mantener obligatoriamente las tensiones dentro de los rangos definidos que están en un ± 5 % del voltaje nominal en ciclos largos como horas y minutos [19].

Para evitar estos efectos de una forma económica y viable es diseñar el sistema eléctrico en función de la

potencia reactiva mediante compensadores. La compensación de la energía reactiva reduce la corriente ya que al circular menos corriente por los cables de alimentación tenemos menos caída de tensión. Y así mejoraremos el voltaje en el sistema [20]. El fraccionamiento de la potencia total en diferentes escalones, permite la mejora de los niveles de tensión para diferentes puntos de carga en la red; esto evita sobretensiones que se producirían en caso de sobre compensar el sistema eléctrico [5]-[15]-[21].

2.5. Métodos de compensación de potencia reactiva

2.5.1. Compensación Reactiva en Paralelo Pura

La principal función es mejorar el factor de potencia, ya que al disminuir la circulación de corriente a lo largo del circuito se reduce las pérdidas y mejora los perfiles de tensión [1]-[2].

2.5.2. Compensación Reactiva en Serie

Al utilizar compensación en serie tenemos la reducción de las variaciones de voltaje y de las pérdidas de la línea, que son resultados a causa de la carga [1]. Esto es el resultado de una compensación en serie que cuenta con la ventaja de que al estar en serie obtiene un auto regulación de reactivos ya que estos se encuentran en función de la corriente de carga.

2.5.3. Máquinas Sincrónicas

La generación de kvar depende de la excitación, para poder cumplir sus necesidades de energía reactiva y entregar a su vez energía reactiva al sistema eléctrico, necesita estar sobreexcitado [22]. Así se obtendrá un motor síncrono trabajando en vacío y con un amplio rango de regulación. Se lo conoce además como capacitor síncrono y según sea el nivel de excitación del campo son capaces de

trabajar con potencia reactiva capacitiva o inductiva. Si está sobre excitadas se comportan como condensadores. Por el contrario si están sub excitadas se comportan como inductancias.

En un capacitor síncrono en condiciones de sobre excitación la potencia está limitada por la temperatura; mientras que en sub excitación está limitada por la estabilidad de la máquina. Utilizada sólo en el caso de que existan en la instalación motores síncronos de gran potencia que funcionan por largos períodos de tiempo (mayores a 200 HP).

2.5.4. SVC

El Compensador Estático de Potencia Reactiva o Static Var Compensator (SVC) cuyo funcionamiento se basa en la utilización de tiristores más bobinas y capacitores son dispositivos basados en electrónica de potencia. Es necesario decir que la utilización de dispositivos basados en electrónica de potencia está cada vez más extendida, y son, cada vez más, una alternativa para superar situaciones de transporte de energía eléctrica y calidad de suministro. Estos son dispositivos conectados a la red eléctrica en paralelo; que generan o absorben potencia reactiva a través de semiconductores controlados. A diferencia de los compensadores síncronos no poseen ninguna parte móvil. Para compensar la potencia reactiva usando un control de la magnitud de tensión en un bus particular de un sistema eléctrico de potencia son aplicados los compensadores estáticos de var. Un banco de capacitores fijo o controlado (conmutado); o un banco fijo y un banco de reactores conmutados en paralelo forman parte de estos dispositivos.

2.5.5. Bancos de Capacitores

Debido a su economía y flexibilidad esta opción es la más utilizada en la

actualidad en las diferentes instalaciones industriales [23]; los bancos de capacitores elevan el factor de potencia, esto aumenta la potencia transmitida por el sistema eléctrico.

2.6. Dispositivos empleados para compensar la potencia reactiva en redes de distribución

En una empresa distribuidora los costos de la energía eléctrica son importantes para la reducción de gastos por: operación y pérdidas en distribución y así obtener un mayor rendimiento energético [2]. Así nos encontramos en busca de eficientes herramientas y equipos que sirvan de soluciones y mejoras a estos problemas; como los que se detallan brevemente a continuación.

2.6.1. Sistemas flexibles de transmisión de CA Realizan el control dinámico del ángulo de fase, impedancia y voltaje; permitiendo incrementar la calidad del suministro a la red [24]. Entre los principales FACTS tenemos:

2.6.2. Compensadores de var estáticos Usado por mucho tiempo para resolver problemas de tensión. El SVC's tiene un alto desempeño en el control de tensión en estado estable y transitorio gracias a su rápida, y exacta respuesta. Además de reducir las pérdidas del sistema con optimización a la potencia reactiva los SVC's, mejoran la estabilidad transitoria y amortiguan las oscilaciones. Es el más importante de los Sistemas flexibles de transmisión de CA [9]-[16].

2.6.3. Compensadores en serie controlados por tiristores (TCSC's)

Su principal beneficio es el control de flujo en las líneas, incremento de transferencia de energía y

amortiguamiento de oscilaciones. Es una ramificación de los condensadores serie convencionales, con el complemento de un reactor controlado por tiristores. Obtenemos un sistema de compensación continuo en serie, y rápidamente variable colocando un condensador en serie con un reactor controlado en paralelo [2]-[3].

2.6.4. Compensador síncrono estático (STATCOMs)

A mínimas tensiones cuentan con altas salida de reactivos; un STATCOM puede considerarse como una fuente de corriente independiente de la tensión del sistema [25]. A diferencia de los convencionales SVC's para suministrar al sistema de distribución potencia reactiva inductiva o capacitiva no demandan mayor cantidad de inductores o capacitores. Son SVC's basados en GTO (Gate turn-off type tiristor) [1]-[25].

2.6.5. Controlador de flujo de potencia unificado (UPFC)

El UPFC es un dispositivo que acopla lo mejor del TCSC y el STATCOM; en lugar de una tensión con un ángulo de fase fijo puede aplicar una tensión serie del ángulo de fase requerido [26].

2.7. Análisis de la Optimización por Colonia de Hormigas

El término heurístico se relaciona con resolver problemas reales con el conocimiento disponible; heurística proviene de una palabra griega relacionado con el concepto de encontrar, es el calificativo de procedimientos; que cuando se emplea técnicas y conocimiento se encuentra soluciones razonables a un problema. En una optimización, aparte de cumplir las soluciones posibles en un problema, se busca la óptima según el criterio de comparación entre ellas.

Las metaheurísticas a diferencia de las heurísticas pueden considerarse

como un marco general algorítmico, para ser adaptado a un problema específico con mínimos cambios. Las metaheurísticas son reconocidas como una de las mejores aproximaciones para resolver problemas de optimización combinatoria. Entre las metaheurísticas se encuentra la Optimización basada en Colonias de Hormigas OCH que fue presentada por Marco Dorigo en su tesis doctoral en 1992 [18]. Básicamente, se trata de una técnica probabilística para resolver problemas complejos computacionales; que pueden ser reducidos a la búsqueda de caminos en grafos.

La OCH se inspira directamente en el comportamiento de las colonias reales de hormigas para solucionar problemas de optimización combinatoria. Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas son parte de la rama inteligencia colectiva; este es el campo de investigación que estudia algoritmos inspirados en la observación del comportamiento de enjambres. Los algoritmos de inteligencia colectiva están compuestos de individuos simples que cooperan a través de la auto-organización, es decir sin ninguna forma de control central sobre los miembros del enjambre.

Las hormigas son insectos sociales, los cuales viven en colonias y cuyo comportamiento está encaminado a la conservación de toda la colonia antes que al de una simple componente individual de la colonia. La comunicación entre hormigas es a través de sus feromonas [27]; éstas son sustancias que les permiten encontrar los caminos más cortos entre su nido y la fuente de alimentos. Esta peculiaridad es utilizada para la solución de problemas de optimización que necesiten mejorar tiempos de cómputo para solucionar una aplicación específica [5].

2.7.1. Descripción

Cuando estos insectos están en busca de la comida exploran el área alrededor de su colonia de forma aleatoria. Al momento de encontrar comienzos de alimento éstos son evaluados por su cantidad y calidad [6]. Después de encontrar la fuente de alimento, vuelven a su colonia, dejando un rastro de feromona (un químico) entre la fuente de alimento y su nido [28]; la cual ayudará a las demás para que localicen los alimentos recorriendo rutas cortas.

Luego, estas nuevas hormigas refuerzan el rastro de feromonas y las hormigas futuras eligen seguir el mismo rastro.

Si trasladamos este comportamiento directamente a un programa para diseñar un algoritmo de búsqueda podemos localizar rápidamente una estrategia óptima para una posible solución [10].

Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que este tipo de algoritmo por OCH es analizado como un proceso específico de problemas matemáticos en donde se encuentran sólo soluciones globales [5]. A continuación, el Pseudocódigo OCH.

2.7.2. Aplicaciones

Los algoritmos de OCH son utilizados cuando se presentan problemas no determinísticos (aquellos que no pueden ser solucionados por algoritmos con estructura polinomial), y son de tipo exponencial [27]-[6].

Las aplicaciones de los algoritmos de optimización por colonia de hormigas son amplias y se desarrollan en diferentes campos de aplicación, como: redes neuronales, inteligencia artificial, optimización de funciones numéricas, sistemas difusos, procesamiento de imágenes, control de sistemas, problemas del hombre viajero, enrutamiento de vehículos, líneas de producción de carros, problema de la mochila, asignación de horarios, control inteligente, entre otros [29]-[16]-[3].

3. Formulación del Método

3.1. Función objetivo a minimizar

Para iniciar se establece como idea principal la estabilidad del sistema, manteniendo por medio de la compensación el voltaje nodal en rangos adecuados para la estabilidad del sistema, se realiza una función objetivo que tiene por prioridad minimizar las caídas de voltaje

Por lo tanto, se procede a minimizar la siguiente ecuación.

$$FO = \sum_{k=1}^n (V_k - V_{k+1}) \quad (1)$$

Dónde:

V_k : Voltaje inicial

V_{k+1} : Voltaje inicial más la diferencia de voltaje entre los nodos

n: número de nodos

Los elementos que están dentro de la sumatoria se refieren a la diferencia de voltaje; es la diferencia de voltaje entre nodo 1 y el nodo 2. Después se suma esa misma diferencia de voltaje, pero ahora con el nodo 2 y el nodo 3 y así sucesivamente en función con las que están conectadas. Básicamente esa función será una minimización suma de la diferencia de los voltajes.

El problema es determinar la óptima ubicación y dimensionamiento de bancos de capacitores en un sistema de distribución radial utilizando Optimización por Colonia de Hormigas; para minimizar pérdidas activas, mejorar los perfiles de voltaje, además de corregir el factor de potencia [30].

En la Figura 7 tenemos el diagrama del sistema de distribución radial de 30 nodos.

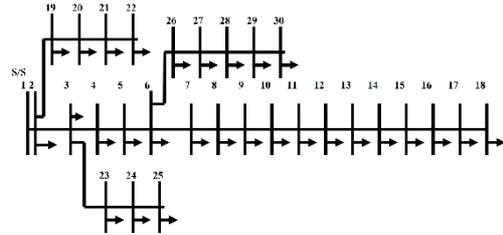


Figura 2. Diagrama unifilar del Sistema de Distribución IEEE-30 Nodos

La finalidad de la implementación de bancos de capacitores es minimizar las pérdidas y elevar los voltajes. Ya que la caída de tensión es la principal consecuencia de una potencia reactiva.

Del circuito de la IEEE de 30 nodos se obtiene los valores nominales de voltaje; de carga, de generación, resistencia y reactancias que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores del circuito de distribución IEEE 30 Nodos

Datos Reales				
Ramales	Potencia Activa MW	Potencia Reactiva Mvar	Resist. Ω	React. Ω
1-2	0,100	0,06	0,092	0,047
2-3	0,090	0,040	0,493	0,251
3-4	0,120	0,080	0,366	0,186
4-5	0,060	0,030	0,381	0,194
5-6	0,060	0,020	0,819	0,707
6-7	0,200	0,100	0,187	0,619
7-8	0,200	0,100	1,711	1,235
8-9	0,060	0,020	1,030	0,740
9-10	0,060	0,020	1,044	0,740
10-11	0,045	0,030	0,197	0,065
11-12	0,060	0,035	0,374	0,124
12-13	0,060	0,035	1,468	1,155
13-14	0,120	0,080	0,542	0,713
14-15	0,060	0,010	0,591	0,526
15-16	0,060	0,020	0,746	0,545
16-17	0,060	0,020	1,289	1,721
17-18	0,090	0,040	0,732	0,574
2-19	0,090	0,040	0,164	0,157
19-20	0,090	0,040	1,504	1,355
20-21	0,090	0,040	0,410	0,478
21-22	0,090	0,040	0,709	0,937

3-23	0,090	0,050	0,451	0,308
23-24	0,420	0,200	0,898	0,709
24-25	0,420	0,200	0,896	0,701
5-26	0,060	0,025	0,203	0,103
26-27	0,060	0,025	0,284	0,145
27-28	0,060	0,020	1,059	0,934
28-29	0,120	0,070	0,804	0,701
29-30	0,200	0,600	0,508	0,259

3.2. Algoritmo de Optimización

En la Tabla 2 se encontrarán los valores del circuito de distribución de la IEEE de 30 nodos; los cuales serán utilizados para la simulación del circuito; para los programas de Matlab y DigSILENT Power Factory. Para el programa de Power Factory se usará los valores reales de línea y carga; mientras que para Matlab los valores en por unidad que serán calculados a través de las ecuaciones (2) (3).

$$R_{[\Omega]} = r[pu] \cdot \frac{U_n^2[kV^2]}{S_b[MVA]} \quad (2)$$

$$X_{[\Omega]} = x[pu] \cdot \frac{U_n^2[kV^2]}{S_b[MVA]} \quad (3)$$

Tabla 2: Valores calculados del sistema de distribución IEEE 30 Nodos

V	Ramales	r p.u	x p.u	R Ω/m	X Ω/m
12,66	1-2	0,006	0,003	0,092	0,047
12,66	2-3	0,031	0,016	0,493	0,251
12,66	3-4	0,023	0,012	0,366	0,186
12,66	4-5	0,024	0,012	0,381	0,194
12,66	5-6	0,051	0,044	0,819	0,707
12,66	6-7	0,012	0,039	0,187	0,619
12,66	7-8	0,107	0,077	1,711	1,235
12,66	8-9	0,064	0,046	1,03	0,74
12,66	9-10	0,065	0,046	1,044	0,74
12,66	10-11	0,012	0,004	0,197	0,065
12,66	11-12	0,023	0,008	0,374	0,124
12,66	12-13	0,092	0,072	1,468	1,155
12,66	13-14	0,034	0,044	0,542	0,713
12,66	14-15	0,037	0,033	0,591	0,526

12,66	15-16	0,047	0,034	0,746	0,545
12,66	16-17	0,08	0,107	1,289	1,721
12,66	17-18	0,046	0,036	0,732	0,574
12,66	2-19	0,01	0,01	0,164	0,157
12,66	19-20	0,094	0,085	1,504	1,355
12,66	20-21	0,026	0,03	0,41	0,478
12,66	21-22	0,044	0,058	0,709	0,937
12,66	3-23	0,028	0,019	0,451	0,308
12,66	23-24	0,056	0,044	0,898	0,709
12,66	24-25	0,056	0,044	0,896	0,701
12,66	5-26	0,013	0,006	0,203	0,103
12,66	26-27	0,018	0,009	0,284	0,145
12,66	27-28	0,066	0,058	1,059	0,934
12,66	28-29	0,05	0,044	0,804	0,701
12,66	29-30	0,032	0,016	0,508	0,259

3.1.1 Pseudocódigo Ybarra

Un flujo de potencia permite encontrar los valores de las variables eléctricas; esto contiene las magnitudes y los ángulos de fase de los voltajes en los nodos; además de los flujos de potencia activa y reactiva en cada elemento que forma parte del sistema [31]-[32]. Para un análisis de flujo de potencia es indispensable conocer inicialmente la impedancia de cada uno de los elementos (tabla 1) por lo que es necesario obtener la matriz de admitancia del sistema, llamada también “Ybarra” [29]. A continuación se detalla el pseudocódigo del algoritmo utilizado para determinar la Ybarra del sistema.

Pseudocódigo Algoritmo Ybarra

Paso 1: Asignación de los recursos Líneas, Trafos, Generación, carga

Paso del Sistema a por unidad (p.u)

Paso 3: $R_{[\Omega]} = r[pu] \cdot \frac{U_n^2[kV^2]}{S_b[MVA]}$

$X_{[\Omega]} = x[pu] \cdot \frac{U_n^2[kV^2]}{S_b[MVA]}$

Calculo de susceptancia y conductancia del sistema

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j|Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$B_{ij} = \frac{X}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Paso 4:

$$G_{ij} = \frac{R}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Admitancia mutua y propia de la Ybarra.

$$[Y_{in}] = -Y_{in} < \theta_{in}$$

$$[Y_{ii}] = -\sum_{j=1}^N -Y_{in} < \theta_{in}$$

la matriz Ybarra

$$[Y_{ij}] = [Y_{in}] + [Y_{ii}]$$

Paso 5: Fin

La Ybarra es utilizada para el ingreso de la matriz para la optimización de colonia de hormigas; además la Ybus realiza la asignación de los nodos factibles en los cuales se va a colocar la compensación. A continuación en la Tabla 3 la Ybarra del sistema calculada.

Tabla 3: Matriz Ybarra

		Ybus																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	137,97 -137,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-137,97 214,943 -25,81372	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0 -25,813 84,801838 -34,77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0 0 -34,7721068,165 -33,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0 0 0 -33,39 44,607 -11,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0 0 0 0 -11,21 81,081 -7,178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0 0 0 0 0 -7,178 13,336 -6,157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0 0 0 0 0 0 -6,157 16,421 -10,26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0 0 0 0 0 0 0 -10,26 20,481 -10,218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0 0 0 0 0 0 0 0 -10,21 83,7087 -73,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0 0 0 0 0 0 0 0 0 -73,490 112,07 -38,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -38,58 45,33 -6,743	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -6,743 17,573 -10,8295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -10,82 25,9620 -15,132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -15,132 29,138 -14,006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -14,006 18,4749 -4,4685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -4,4685 18,027 -13,558	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -13,558 13,5585	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0 -51,150 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 57,0307 -5,88055	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -5,88055 22,4312 -16,5506	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -16,5506 24,7758 -8,2269	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0 -8,22690 8,22690	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0 0 -24,21601 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 35,209 -10,993	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0 -10,99 22,0881 -11,094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0 -11,094 11,0948	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0 0 0 0 0 0 -62,68 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 107,474 -44,785	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0 -44,785 53,3007 -8,5152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0 -8,5152 19,8457 -11,3305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0 -11,330 36,40613 -25,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0 -25,0756 33,3967	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.1.2. Pseudocódigo OCH

La Optimización por Colonia de Hormigas es un programa constructivo; en cada iteración del algoritmo cada hormiga construye una solución al problema a través de un grafo en donde los nodos de la red de distribución corresponden a los vértices y las líneas a las distancias [27]. En el algoritmo se construyen las soluciones de la siguiente forma: para cada hormiga k en cada paso de construcción se escoge ir del nodo i al siguiente nodo j , $\forall j$, con

una probabilidad P_{ij}^k como se muestra en la ecuación (4).

$$P_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})^{\alpha} (\eta_{ij})^{\beta}}{\sum_{j \in N_i^k} (\tau_{ij})^{\alpha} (\eta_{ij})^{\beta}} \text{ Si } j \in N_i^k \quad (4)$$

Dónde:

N_i^k : Es el área alcanzable por la hormiga k cuando se encuentra en el nodo i .

α : Es el factor de escalado de feromona

β : El de visibilidad

τ_{ij} : El valor de feromona en el arco que une los nodos i y j

η_{ij} : Se denomina función de visibilidad, que depende totalmente de las características del problema que se va a resolver [7][1][28].

Una vez determinada la Ybus se determina el Pseudocódigo de Colonia de Hormigas utilizado para encontrar la óptima ubicación y dimensión del banco de capacitores en el sistema de distribución de 30 nodos. El problema de minimización de pérdidas en la red de distribución puede ser formulado como un problema de optimización no lineal en el que la solución es seleccionar entre todas las configuraciones posibles [10].

Para el uso del algoritmo aparte de la Ybus se requiere voltajes en por unidad de los nodos, las cargas y la generación de cada una, que son obtenidas a partir de la simulación de Power Factory. A continuación, el pseudocódigo de la OCH.

Pseudocódigo Algoritmo Colonia de Hormigas

Paso 1: Inicio

Paso 2: Asignación de Valores

Asignación de los recursos feromonas, Ybus, Tasa de evaporación

Paso 4: Proceso

Mientras (condición de comparación)
Elaboración de soluciones posibles

$$P_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} (\tau_{ij})^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}$$

τ_{ij} Es el rastro de la feromona

η_{ij} Es la matriz Ybus

Restricciones:

Se aplica

$$\Delta V_i = \begin{cases} 1 & \text{si } v_i \text{ es menor a } 0,96 \text{ p. u} \\ 0 & \text{si } v_i \text{ esta entre el rango} \\ & 0,97 - 1,00 \text{ p. u} \end{cases}$$

$$0,96 > v_i > 0,99$$

$$V_1 = \frac{P_i}{i_i * \cos(\phi)}$$

V_1 = Voltaje inicial

P_i = Potencia inicial

i_i = Corriente inicial

V_2 = Voltaje Nominal

$$Q_c = V_2 * i_i * \sin\left(\arccos\left(\frac{P_i}{V_2 * i_i}\right)\right)$$

Q_c [Mvar]

Paso 5: Visualizar

Los puntos de localización en los nodos en donde irán los compensadores, el valor del compensador y las gráficas comparativas de los niveles de voltaje antes y después de la compensación

Paso 6: Fin

4. Análisis de Resultados

Se realiza un análisis del sistema para observar el perfil de tensiones, el comportamiento de los flujos de potencia, los niveles de potencia activa y reactiva en los elementos. Este algoritmo realizó una búsqueda por el sistema de distribución radial y encontró la mejor ruta para la ubicación y magnitud de los bancos de capacitores; para así obtener la compensación del sistema; los cuales toman un carácter necesario para mantener los niveles de voltaje nodal dentro de los rangos de calidad.

Bajo el criterio de corridas sucesivas del algoritmo de optimización; se establece la localización, y la cantidad de unidades necesarias para la compensación. Con lo cual se llegó a localizar los bancos de capacitores en los nodos 7, 15 y 26, que son los puntos en los cuales el sistema presenta mayor cantidad de pérdidas.

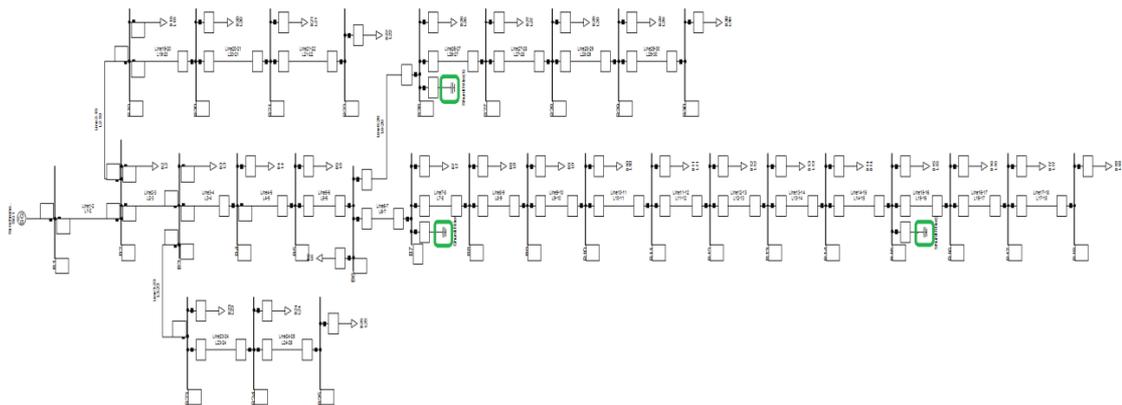


Figura 3. Sistema de Distribución 30 Nodos compensado con 3 bancos de capacitores

En la Figura 3 se puede observar la mejor ubicación de los bancos de capacitores arrojada por el algoritmo, que se encuentran en los nodos 7,15 y 26. Los valores de los capacitores en el nodo 7 es 0,6023 Mvar, en el nodo 15 es 0,1380 Mvar y en el nodo 26 es de 0,5019.

4.1. Análisis del Voltaje

En la Tabla 4 se establece un sistema de distribución radial de 30 nodos como se presenta en la Figura 2. El análisis que se efectúa considera un escenario crítico para el sistema de distribución planteado, de tal forma que el objetivo radica en minimizar las pérdidas del sistema.

Tabla 4: Voltajes [p.u.] del Sistema Sin Compensación Vs Sistema Compensado

VOLTAJES		
Ramales	Sin Compensación	Con Compensación
1	1,000	1
2	1,000	1,000
3	0,990	0,990
4	0,980	0,990
5	0,970	0,990
6	0,960	0,980
7	0,950	0,980
8	0,940	0,980
9	0,930	0,970
10	0,930	0,960
11	0,930	0,960

12	0,930	0,960
13	0,920	0,960
14	0,920	0,960
15	0,920	0,960
16	0,920	0,960
17	0,910	0,960
18	0,910	0,960
19	1,000	1,000
20	0,990	0,990
21	0,990	0,990
22	0,990	0,990
23	0,980	0,990
24	0,970	0,980
25	0,970	0,980
26	0,960	0,970
27	0,960	0,970
28	0,950	0,970
29	0,940	0,960
30	0,940	0,960

A continuación, en la Figura 4 encontramos un análisis de voltaje sin compensación, podemos observar que en los nodos 7, 15 y 26 tenemos una caída de voltaje notoria de valores en p.u. de 0,95; 0,92 y 0,94 respectivamente por nodo.

En la Figura 5 se puede verificar el resultado de la compensación de reactivos con respecto a los niveles de voltaje; realizada por el algoritmo.

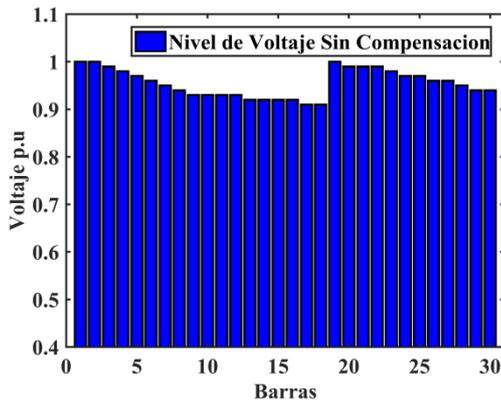


Figura 4. Voltaje del Sistema Sin Compensar

Se puede verificar la implementación de bancos de capacitores, y además observar los valores mejorados en los nodos que se tenía en el sistema inicial, ahora tenemos los valores en por unidad de 0,98; 0,96; y 0,97 en los nodos 7, 15 y 26 respectivamente. Se puede visualizar el aumento de los voltajes en la mayoría de los nodos del sistema.

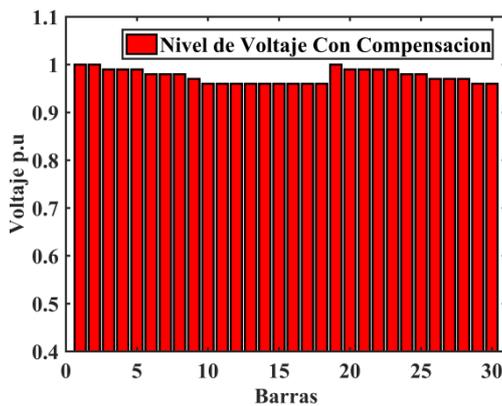


Figura 5. Voltaje del Sistema Compensado

Se verifica la compensación de reactivos mediante la optimización de colonia de hormigas implementando 3 bancos de capacitores fijos. En la Figura 6 se puede apreciar una comparación sin compensación y con compensación en el sistema de distribución; .se observa los valores compensados en la línea de color rojo; y con la línea de color azul los valores del sistema inicial; teniendo una mejora del 3% en el nodo 7; 4% en el nodo 15 y un 3% de mejora en el nodo 26. Se puede observar el aumento de los voltajes en la mayoría de los nodos del

sistema mejorando así el perfil de voltaje.

El voltaje mínimo en por unidad de los nodos está en 0,91 p.u. y esto se puede apreciar en los nodos mencionados anteriormente, mientras que cuando ya se realiza la optimización con los bancos se observa un voltaje mínimo de 0,96 p.u. lo cual estaría en perfecto funcionamiento bajo los valores aceptados.

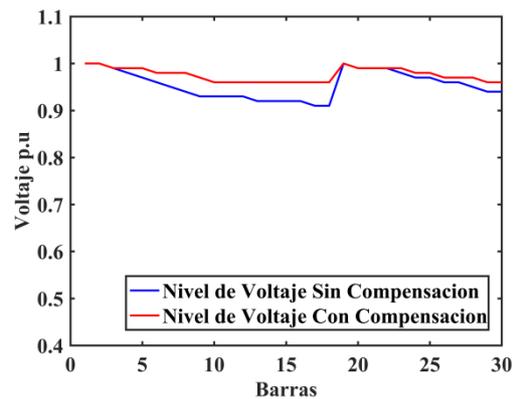


Figura 6. Voltaje del Sistema de-30 Nodos Sin Compensar Vs Compensado

4.2. Análisis de Potencia Reactiva y Factor de Potencia

Las siguientes Tablas son valores de potencia reactiva y factor de potencia en sistema inicial y cuando el sistema ya se encuentra compensado; con la cual se procederá a realizar un análisis comparativo entre sus resultados. Los datos a continuación mostrados son obtenidos del circuito que se realizó en Power Factory de 30 nodos; antes y después de la respectiva compensación.

Tabla 5: Potencia Reactiva y Factor de Potencia sin Compensación

SIN COMPENSACION		
Ramales	Potencia Reactiva [Mvar]	Factor De Potencia
1	0,000	1
2	0,010	0,928
3	0,100	0,925
4	0,160	0,920
5	0,230	0,913

6	0,180	0,907
7	-0,050	0,909
8	-0,200	0,915
9	-0,270	0,924
10	-0,330	0,910
11	-0,330	0,921
12	-0,310	0,931
13	-0,400	0,943
14	-0,480	0,920
15	-0,520	0,937
16	-0,540	0,952
17	-0,620	0,967
18	-0,630	0,980
19	0,000	0,980
20	-0,060	0,919
21	-0,080	0,922
22	-0,100	0,925
23	0,060	0,923
24	-0,020	0,923
25	-0,070	0,926
26	0,220	0,918
27	0,270	0,909
28	0,420	0,894
29	0,550	0,873
30	0,650	0,845

14	-4,500	0,986
15	-4,720	0,977
16	-4,740	0,971
17	-4,800	0,969
18	-4,810	0,974
19	-0,080	0,998
20	-0,150	0,999
21	-0,160	0,998
22	-0,190	0,997
23	-0,460	0,999
24	-0,550	0,999
25	-0,590	0,999
26	-1,820	0,989
27	-1,760	0,990
28	-1,620	0,991
29	-1,500	0,993
30	-1,410	0,993

Tabla 6: Potencia Reactiva y Factor de Potencia con Compensación

CON COMPENSACION		
Ramales	Potencia Reactiva [Mvar]	Factor De Potencia
1	0,000	1
2	-0,070	1,000
3	-0,430	0,999
4	-0,700	0,998
5	-0,990	0,997
6	-1,790	0,990
7	-2,120	0,986
8	-2,790	0,975
9	-3,180	0,968
10	-3,560	0,961
11	-3,610	0,979
12	-3,720	0,996
13	-4,260	0,998

4.2.1. Análisis de la Potencia Reactiva en el Sistema

Usualmente al optimizar reactivos se reducen las pérdidas de potencia activa incrementando a su límite superior la tensión. En la Figura 7 se observa de color azul la potencia reactiva antes de la compensación y de color amarillo una vez compensado. Al ubicar los bancos en los nodos 7,15 y 26 tenemos una mejora en la potencia reactiva del sistema. Para mejorar el factor de potencia se implementó compensación capacitiva y es lo que se puede observar en la figura.

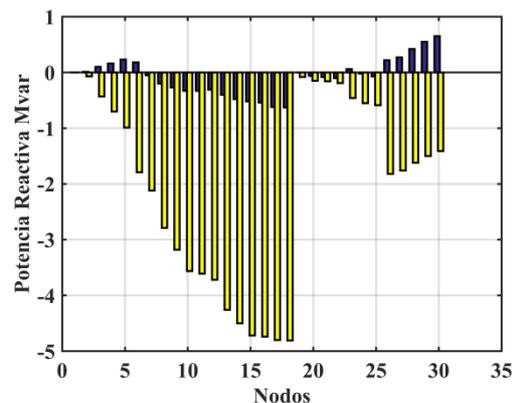


Figura 7. Potencia Reactiva No Compensada Vs Compensada

4.2.2. Análisis del Factor de Potencia en el Sistema

El factor de potencia tiene mayor incidencia de pérdida en la eficiencia del sistema de distribución eléctrica. Es utilizado un límite de factor de potencia de 0,9 para sistemas de distribución eléctrica. Si existen valores menores deben ser corregidos ya que el factor de potencia está muy relacionado en porcentaje de pérdidas de tensión y potencia activa.

En la Figura 8 se observa de color azul el factor de potencia antes de la compensación en el sistema. Una vez compensado; es decir al ubicar los bancos de capacitores; se puede apreciar de color amarillo que hay una mejora notoria en todo el sistema en relación al factor de potencia; teniendo así una mejora del 8%.

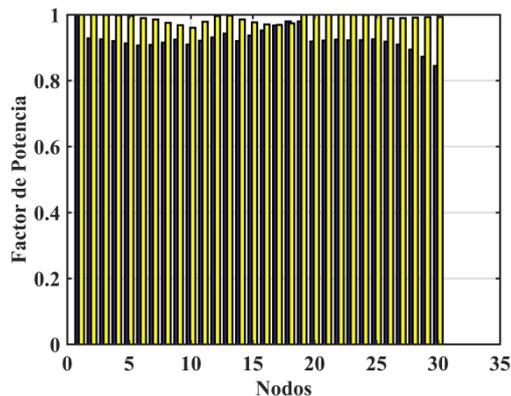


Figura 8. Factor de Potencia No Compensado Vs Compensado

En la Tabla 7 se observa el valor de los capacitores para los nodos óptimos seleccionados.

Tabla 7: Valor de los capacitores en el sistema

Sistema	Nodo 7 Mvar	Nodo 15 Mvar	Nodo 26 Mvar
Sin compensar	0	0	0
Compensado	0,602	0,138	0,501

En la Tabla 8 se muestra los valores de pérdidas del sistema en general antes

y después de la compensación; el resultado es una reducción de pérdidas en el sistema y la estabilidad de los niveles de voltaje en cada uno de los nodos (Tabla 4).

Tabla 8: Perdidas en el Sistema antes y después de la compensación

Sistema	Perdidas MW	Perdidas Mvar
Sin compensar	0,149	0,101
Compensado	0,118	0,081

Para evaluar el rendimiento del algoritmo de OCH se utilizó un sistema eléctrico de distribución radial de 30 nodos, con un total de generación activa de 3,412 MW, generación reactiva de 1,353 Mvar, con carga de 3,294 MW y 2,089 Mvar.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un método de compensación de potencia reactiva, basado en un modelo de optimización de colonia de hormigas el cual logró la búsqueda de una solución óptima dentro del sistema de 30 nodos; ésta solución enfatizó sobre aquellos que estaban por debajo del voltaje recomendado para realizar así una óptima ubicación.

Al inicio el sistema de distribución contaba con valores de voltaje fuera de los límites establecidos; al correr el algoritmo de OCH se obtuvo una mejora en el perfil de voltaje, factor de potencia con lo cual se pudo minimizar las pérdidas en el sistema cumpliendo con el concepto que la compensación consiste en la inyección de energía reactiva para mejorar la operación de los sistemas de energía eléctrica, y de forma más específica para mantener las tensiones próximas a sus valores nominales, reducir las intensidades y, por tanto aportar a la estabilidad del sistema.

Un aumento de la potencia reactiva produce un decrecimiento del factor de potencia y el voltaje, es decir que un sistema eléctrico no compensado seguramente está pagando o pagara recargos en su facturación por consumo de energía eléctrica; con una óptima ubicación de la compensación disminuyo el número de compensadores, perdidas, incremento el factor de potencia y reduzco el consumo de la potencia de las líneas;

La propuesta de una colonia de hormigas para determinar la óptima colocación y ubicación de condensadores en una red de distribución radial de 30 nodos mostró ser un método práctico para la colocación de los bancos de capacitores en la red de distribución; éste enfoque puede ser aplicado a otros problemas prácticos que requieren una decisión compleja.

Se concluye que dentro del sistema la potencia reactiva es causante principal de caídas de voltaje y bajo factor de potencia por lo cual es importante un control efectivo y preciso del flujo de potencia reactiva.

6. Referencias

- [1] A. Y. Abdelaziz, R. A. Osama, and S. M. El-Khodary, "Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimisation algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 2, p. 176, 2012.
- [2] N. Fernández and W. Figueredo, "Ubicación óptima de bancos de capacitores en redes de distribución," 2007.
- [3] S. Sundhararajan and A. Pahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1499–1507, 1994.
- [4] J. C. Carlisle, A. A. El-Keib, D. Boyd, and K. Nolan, "A review of capacitor placement techniques on distribution feeders," *Syst. Theory, 1997., Proc. Twenty-Ninth Southeast. Symp.*, no. 1, pp. 359–365, 1997.
- [5] R. A. Bolaños and C. A. Correa, "Optimización por colonia de hormigas aplicada al problema de planeamiento de la transmisión," *Rev. Ing. Univ. los Andes*, 2009.
- [6] A. Soifer and I. Loiseau, "Algoritmos de Colonia de Hormigas para el Problema del Viajante de Comercio por Familias y para el Problema de Ruteo de Vehículos por Familias," *Simp. Argentino Investig. Oper.*, 2015.
- [7] M. J. Kasaei, "Loss Reduction in Distribution Network Using Simultaneous Capacitor Placement and Reconfiguration With Ant Colony Algorithm," pp. 1–4, 2010.
- [8] "trujillo.pdf." . Trujillo Armijos, J. A. (2017). "Optimización multiobjetivo de flujos de potencia en redes de distribución basado en el control volt-var" Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito
- [9] E. Gómez, "Compensación de Potencia Reactiva," p. 90, 2009.
- [10] J. L. Bala, P. A. Kuntz, and M. J. Pebles, "Optimal capacitor allocation using a distribution-analyzer-recorder," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 464–469, 1997.
- [11] H. Durán, "Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders A Dynamic Programming Approach," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, no. 9, pp. 1769–1774,

- 1968.
- [12] A. Askarzadeh, "Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 14, pp. 3631–3638, 2016.
- [13] R. a. Gallego, a. Monticelli, and R. Romero, "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 10, pp. 59–59, 2001.
- [14] S. Soto and V. Hinojosa, "Stochastic optimal allocation of reactive power banks for system loss minimization," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1980–1987, 2016.
- [15] N. E. Gmez Ramirez, "Metodologa de gestin de potencia reactiva para mejorar el margen de estabilidad de voltaje en sistemas elctricos de potencia descentralizados," p. 125, 2014.
- [16] B. Barán, J. Vallejos, R. Ramos, and U. Fernández, "Multi-objective Reactive Power Compensation," *Computing*, vol. 0, no. C, pp. 97–101, 2001.
- [17] "UPS-KT00188.pdf".
- [18] L. W. L. Wang and C. Singh, "Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C (Applications Rev.)*, vol. 38, no. 6, pp. 757–764, 2008.
- [19] D. Das, D. P. Kothari, and A. Kalam, "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks I'," vol. 17, no. 5, pp. 335–346, 1995.
- [20] E. S. Ali, S. M. A. Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Electrical Power and Energy Systems Improved Harmony Algorithm and Power Loss Index for optimal locations and sizing of capacitors in radial distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 252–263, 2016.
- [21] D. Das and H. S. Nagi, "Novel method for solving radial distribution networks."
- [22] V. Farahani, S. Member, B. Vahidi, and S. Member, "Reconfiguration and Capacitor Placement Simultaneously for Energy Loss Reduction Based on an Improved Reconfiguration Method," vol. 27, no. 2, pp. 587–595, 2012.
- [23] C. Maza and O. Iván, "CARRERA : INGENIERÍA ELÉCTRICA Tesis previa a la obtención del Título de : TEMA : Cuenca – Ecuador."
- [24] "La regulaci ´ on tensi ´ on-reactiva," pp. 1–31.
- [25] S. X. Chen, Y. S. F. Eddy, H. B. Gooi, M. Q. Wang, and S. F. Lu, "A centralized reactive power compensation system for LV distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 274–284, 2015.
- [26] G. Estrada Soria, J. H. Tovar Hernandez, and G. Guti??rrez Alcaraz, "Metodolog??a para la localizaci??n optima de capacitores mediante sensibilidades lineales," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 3, no. 2, pp. 185–192, 2005.
- [27] C. A. Robles Algarín, "Optimización por colonia de hormigas : aplicaciones y tendencias," *Rev. Ing. Solidaria*, vol. 6, pp. 83–89, 2010.
- [28] J. Nikoukar and M. Gandomkar, "Capacitor Placement in Distribution Networks Using Ant Colony Algorithm 2 . Basic

- Concepts Of ACS Algorithm.”
- [29] P. Gardel, B. Barán, H. Estigarribia, and U. Fernández, “Aplicación del Ómicron ACO al problema de Compensación de Potencia Reactiva en un Contexto Multiobjetivo .”
- [30] M. C. P. Filho, “Capacitor Placement Using Ant Colony Optimization and Gradient,” 2009.
- [31] Rojas Gómez, J. A. (2017). Óptima compensación de la potencia reactiva en redes de distribución eléctrica basado en SIMULATED ANNEALING. Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Sede Quito
- [32] Inachonta Monta, J. M. (2017). “Óptimo flujo de potencia reactiva en redes eléctricas de distribución con generación distribuida”. Universidad Politécnica Salesiana. Carrera Ingeniería Eléctrica. Sede Quito.