

**ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA EN REDES
ÉLECTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE
DEMANDA RESIDENCIAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA REACTIVA EN REDES
ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE
DEMANDA RESIDENCIAL**

**AUTOR:
JULIO CÉSAR VÁRGAS BEDÓN**

**TUTOR:
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

Quito, septiembre 2020

Julio César Vargas Bedón

ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE DEMANDA RESIDENCIAL.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Julio César Vargas Bedón (A'1985 – M'08). Nació en Ibarra, Ecuador. Bachiller con especialidad en Técnico Industrial en Electricidad del Instituto Tecnológico “Central Técnico”, Ecuador (2003). Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se enfoca en el estudio de Óptima compensación fija de potencia reactiva en redes eléctricas de distribución basada en escenarios de demanda residencial. jvargasbl@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

©2020 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 “*ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE DEMANDA RESIDENCIAL*” realizado por Julio César Vargas Bedón , obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., septiembre de 2020



.....

Alexander Águila Téllez

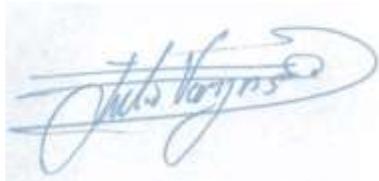
C.C.:1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Julio César Vargas Bedón, con documento de identificación N° 1719731455, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE DEMANDA RESIDENCIAL”* 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., septiembre de 2020



.....
Julio César Vargas Bedón

C.C.: 1719731455

Quito, D.M., septiembre de 2020

1. ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Sistemas de distribución	3
2.2	Topologías mayormente radiales	4
2.3	Múltiples conexiones.....	4
2.4	Compensación de Reactivo.....	4
2.5	Elementos a considerar para la ubicación y dimensionamiento de bancos de capacitadores	5
2.6	Minimización de pérdidas de potencia	5
2.7	Factor de potencia	6
2.8	Perfiles de voltaje	6
2.9	Métodos de compensación de potencia reactiva	7
2.10	Compensación reactiva paralelo pura.....	7
2.11	Compensación reactiva en serie	7
2.12	Máquinas Sincrónicas.....	7
2.13	SVC	7
2.14	Demanda	7
2.15	Influencia del factor de potencia y perfil de voltaje	8
2.16	Análisis de optimización por Tabú Search	9
2.16.1	Definición	9
2.16.2	Descripción	9
2.16.3	Configuración inicial	9
2.16.4	Generación del vecindario	9
2.16.5	Elección del mejor vecino.....	10
2.16.6	Actuación de la configuración Taboo Search	10
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
3.1	Formulación del método	11
3.1.1	Función objetivo.....	11
3.2	Restricciones	11
3.2.1	Restricción de balance de potencia	11
3.2.2	Condicionamiento de los valores de voltaje	12
3.2.3	Restricción binaria.....	12
3.3	Formulación de búsqueda Taboo	12

3.4	Procedimiento de solución óptima	13
4	SISTEMA PROPUESTO DE DISTRIBUCIÓN RADIAL PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	13
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
5.1	Perfil de voltaje.	15
5.2	Selección de nodo.....	16
5.3	Análisis del factor de potencia en el sistema	17
5.4	Comparativa con otros autores.....	19
6	TRABAJOS FUTUROS	19
7	CONCLUSIONES.....	20
8	REFERENCIAS	20
8.1	Matriz de Estado del Arte	24
8.2	Resumen de Indicadores	25

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema radial de distribución [12].	4
Figura 2. Tipos de conexión en distribución.	4
Figura 3. Triángulo de Potencias compensadas.	4
Figura 4. Compensación fija.	6
Figura 5. Curva de la demanda por día.	8
Figura 6. Demanda Estudio CONELEC [29].	8
Figura 7. Diagrama de construcción del vecindario	10
Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo.	10
Figura 9. Diagrama IEEE 15 barras de distribución.	14
Figura 10. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda baja).	15
Figura 11. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda media).	15
Figura 12. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda alta).	16
Figura 13. Muestra de mejora del perfil de voltaje de demanda baja.	16
Figura 14. Demanda baja elección de nodo.	17
Figura 15. Demanda media elección de nodo.	17
Figura 16. Demanda alta elección de nodo.	17
Figura 17. Mejora del perfil de potencia (Demanda baja).	18
Figura 18. Mejora del perfil de potencia (Demanda baja).	18
Figura 19. Mejora del perfil de potencia (Demanda Media).	18
Figura 20. Mejora del perfil de potencia (Demanda media).	18
Figura 21. Mejora del perfil de potencia (Demanda alta).	18
Figura 22. Mejora del perfil de potencia (Demanda alta).	19
Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	25
Figura 24. Indicador de formulación del problema - Estado del arte	26
Figura 25. Indicador de solución - Estado del arte	26

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo de búsqueda Tabú Search	12
Tabla 2. Algoritmo de óptima ubicación fija de potencia reactiva en redes eléctricas de distribución n en escenarios de demanda residencial.	13
Tabla 3. Datos generadores del sistema	13
Tabla 4. Voltaje de barra.....	14
Tabla 5. Datos generadores del sistema de la carga	14
Tabla 6. Datos líneas del sistema.....	14
Tabla 7. Casos y nodo escogido.	14
Tabla 8. Datos comparativos de (V) vs. (V) compensado.	15
Tabla 9. Comparativa de voltaje en pu	16
Tabla 10. Selección de nodo.....	17
Tabla 11. Mejora del perfil ángulo Phi.	19
Tabla 12. Matriz de estado del arte.....	24

ÓPTIMA COMPENSACIÓN FIJA DE POTENCIA EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN BASADA EN ESCENARIOS DE DEMANDA RESIDENCIAL

Resumen

El objetivo de este trabajo es compensar de manera óptima la potencia reactiva en condiciones de demanda mínima, media y máxima a nivel residencial. Además del impacto en la curva de voltaje y factor de potencia.

Para entenderlo, se estableció un análisis matemático con el fin de determinar la localización y tamaño del compensador fijo, utilizando un modelo estándar IEEE con 15 barras de distribución. El proceso propuesto se realiza mediante el método de "búsqueda tabú", la aplicación de este método promoverá la localización y capacidad óptimas del compensador fijo inyectando potencia reactiva en uno de los nodos. Además, el algoritmo utilizado en este trabajo permite calcular la mejor solución y cumplir con los requisitos necesarios para garantizar la calidad energética de todas las partes del SEP.

Ubicando el compensador de manera óptima e incrementando los componentes de potencia ($\cos \phi$), se pueden reducir los costos y se puede equilibrar el volumen de reactivo en el punto más crítico de la curva de demanda.

Finalmente se realizará una comparación de los datos del sistema sin compensar y compensados, resaltando la mejora en los perfiles de voltaje y el factor de potencia.

Palabras Clave: Compensadores fijos, Demanda, Optimización, Perfiles de voltaje, Potencia reactiva, Tabú Search

Abstract

The aim of this work is to optimally compensate the reactive power in conditions of minimum, average and maximum demand at residential level. In addition to the impact on the voltage curve and power factor.

To understand it, a mathematical analysis was established in order to determine the location and size of the fixed compensator, using a standard IEEE model with 15 busbars. The proposed process is done by the method of "taboo search", the application of this method will promote the optimal location and capacity of the fixed compensator by injecting reactive power in one of the nodes. In addition, the algorithm used in this work allows calculating the best solution and meeting the necessary requirements to ensure the energy quality of all parts of the SEP.

By locating the compensator in an optimal way and increasing the power components ($\cos \phi$), costs can be reduced and the volume of reagent can be balanced at the most critical point of the demand curve.

Finally, a comparison of the uncompensated and compensated system data will be made, highlighting the improvement in voltage profiles and power factor.

Keywords: Fixed Compensators, Demand, Optimization, Voltage Profiles, Reactive Power, Taboo Search.

1 INTRODUCCIÓN

A medida que la población continúa creciendo, la demanda de energía eléctrica se ha convertido en la causa de muchos inconvenientes, como; voltaje bajo, disminución de energía en la línea y factor de potencia inestable. Estos factores son la causa de pérdidas técnicas y económicas. Si se analiza solo a nivel residencial tendremos tres tipos de demanda clasificadas, por su consumo en diferentes etapas del día, en el caso de las horas pico se puede contemplar que el consumo llega a su máximo valor; así como en horas valle, es decir la demanda media y la baja, en el cual su valor de la demanda se reduce, siendo este el motivo por lo que los usuarios industriales y domiciliarios exigen soluciones para garantizar la estabilidad y la calidad de energía [1].

Debido a los desarrollos tecnológicos que ocurren en todo el mundo, la curva de carga se ha vuelto cada vez más compleja, reflejándose en el equipamiento de maquinaria con electrónica de potencia, lo que resulta en variación de corriente y tensión, haciendo que los equipos sean más susceptibles a la calidad de la energía. Mientras que en las industrias, las cargas eléctricas son de naturaleza inductiva debido a la presencia de equipos especiales con un componente altamente reactivo como motores, refrigeradores, entre otros [2].

Aproximadamente el 13% de la energía generada total perdida, se origina por el nivel de distribución. Según varios estudios realizados en los últimos 50 años, se ha podido evidenciar la existencia de pérdidas técnicas y económicas [3].

Por lo tanto hay un gran campo de estudio de ingeniería en donde se podrá

emplear la compensación reactiva en las redes de distribución. Dicho estudio consiste en la determinación de los nodos en los cuales se podrá instalar un número de bancos de capacitores para maximizar los beneficios obtenidos de la reducción de pérdidas del sistema, de tal forma que es fundamental tener en cuenta los beneficios de la instalación de bancos de condensadores ya que de éstos dependerá la configuración de la red eléctrica y su estado de carga.

En el sistema eléctrico de potencia (SEP), existen múltiples etapas, como la generación, la transmisión y distribución de energía, cuya función básica es transferir esta energía del centro de generación al centro de consumo; y finalmente entregarla de manera segura a los usuarios con un buen nivel de calidad según las normas establecidas.

Aproximadamente 2/3 de la inversión total en el sistema de energía se dedica a la parte de distribución de energía ("Gigante invisible"), esto significa un trabajo serio en la todo lo que conlleva con la construcción y operación de la distribución de energía, que requiere procesar una gran cantidad de información y la toma de muchas decisiones siendo esta una tarea compleja pero muy importante.

La red de distribución de energía es considerada como una construcción esencial para la sociedad actual, cualquier falla puede derivar en cortes, que pueden ser catastróficos para algunas industrias [4], lo que refleja las necesidades del sector eléctrico ecuatoriano. El consumo de energía eléctrica es 2,2 veces superior al de hace 15 años, donde el servicio eléctrico ha dado cobertura al 96,5% de los habitantes [5].

Los estudios han demostrado que de 1980 a 2006, el consumo mundial de

electricidad aumentó a una tasa anual de aproximadamente el 3,1%. Según la Administración de Información Energética (EIA) , la probabilidad de consumo de energía aumentó de 3.836 a 4.797 mil millones de (kW/h), 2013-2040 [6].

Durante 60 años, la ubicación de los condensadores de compensación ha sido un contratiempo relacionado con los sistemas de distribución de energía; pero con una perspectiva mínima de costos del sistema y el acatamiento de las restricciones y limitaciones, se puede lograr la mejor posición del banco compensador. [7].

Estos dispositivos son los que más se utilizan, ya que inyectan compensación de energía reactiva en la red de distribución, logrando múltiples objetivos, como mejorar los valores de voltaje, reducir la pérdida de energía y expandir la capacidad de la línea; y esto es útil para optimizar la calidad de la energía, el factor de potencia y la liberación de la red. Debido a la implementación de estos dispositivos se podrá notar un impacto económico con un ahorro considerable [8], por consiguiente al tener estos beneficios es importante tomar en cuenta la ubicación y dimensionamiento del SEP de distribución en la red.

Las principales limitaciones incluyen la carga y el funcionamiento de cada nodo, tales como: la magnitud de la corriente, la curva de voltaje y el calibre del conductor de cada bus durante los diferentes niveles de carga [9]. La ubicación de los bancos de capacitores en zonas óptimas, favorece a las empresas de servicios públicos que suministran energía, proporcionando buena potencia y reduciendo las pérdidas de energía eléctrica.

Este artículo se organizará de la siguiente manera: En el segundo capítulo, se utilizarán definiciones básicas para desarrollar el estado del arte; en el tercer capítulo introduciremos el planteamiento del problema y la fórmula del algoritmo de optimización a utilizar; en el cuarto capítulo, observaremos el análisis de resultados; en el quinto capítulo, expondremos las conclusiones y; finalmente, en el sexto capítulo, brindaremos sugerencias para el próximo trabajo de investigación.

2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe de manera corta y resumida conceptos básicos sobre los sistemas de distribución, compensación de reactivo, métodos de compensación, demanda: escenarios de demanda residencial, influencia de las variables y modelo matemático Taboo Search.

2.1 Sistemas de distribución

El sistema de distribución de energía tiene un sitio primordial en la infraestructura del sistema eléctrico, y su función principal es adquirir la energía eléctrica generada y transportarla al cliente final. En este sentido, los estándares de transporte eléctrico deben estar de acuerdo con las perspectivas esenciales y márgenes de calidad de energía, en los cuales se considera: garantizar el correcto funcionamiento del sistema, minimizar las interrupciones del servicio, aumentar la calidad del servicio con los clientes, operación y mantenimiento con costos inferiores y mayor confiabilidad [10].

En cuanto a la estructura topológica de la red de distribución, se refiere a la forma de distribuir la energía mediante la disposición de los distintos segmentos del circuito de distribución [11].

2.2 Topologías mayormente radiales

El sistema de distribución es mayoritariamente radial, lo que significa que el flujo de energía proviene de un solo nodo, y el nodo principal es la subestación que suministra energía al resto de la red.

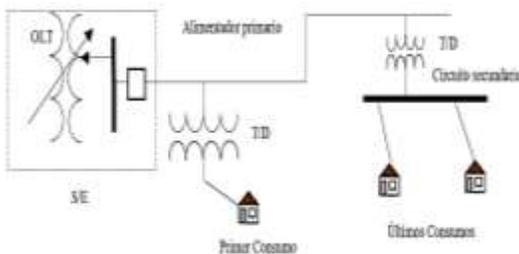


Figura 1. Sistema radial de distribución [12].

2.3 Múltiples conexiones

En este tipo de conexión, de acuerdo a la exigencia de cada consumidor, ya sea residencial, comercial o industrial; la distribución de energía se realiza en niveles de media o baja tensión, por lo que se pueden encontrar diversas configuraciones en la conexión, clasificadas en: monofásico, bifásico y trifásico.

En media tensión, en gran parte las redes son trifásicas, no obstante, se pueden encontrar también cargas bifásicas, en particular en áreas rurales. La prevalencia de las cargas de baja tensión en donde se encuentran diferentes conexiones que en gran parte tienen cargas de naturaleza monofásica. Por lo tanto, es primordial mencionar que debido al desarrollo poblacional y de los negocios, las conexiones trifásicas y las fuentes de energía son más comunes en la actualidad [13].

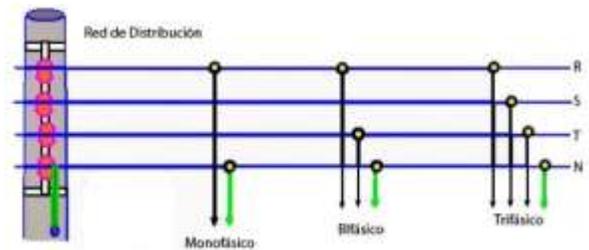


Figura 2. Tipos de conexión en distribución.

2.4 Compensación de Reactivo

La compensación de potencia reactiva es un proceso de reducción de la demanda de potencia reactiva del sistema eléctrico mediante el acoplamiento de condensadores o filtros de armónicos, consiguiendo así mayor capacidad de la red, lo que aumenta la relación entre potencia activa, útil y total [14].

La compensación de la potencia reactiva intenta hacer que el factor de potencia se acerque a 1, lo que conlleva que toda la potencia proporcionada al equipo se transforme en potencia útil (factor ideal), por ejemplo en los dispositivos eléctricos instalados que cuentan con un componente de potencia inductivo de modo que la potencia reactiva a compensar será netamente capacitiva [13], [15].

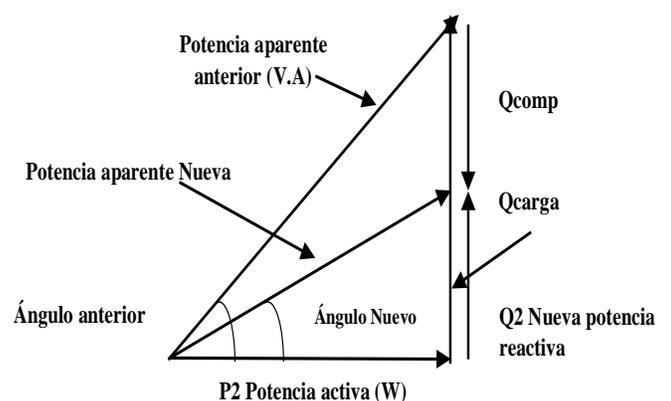


Figura 3. Triángulo de Potencias compensadas.

2.5 Elementos a considerar para la ubicación y dimensionamiento de bancos de capacitadores

Cuando se consideran las pérdidas técnicas y económicas que ocurren en el sistema eléctrico, causadas por la colocación del equipo en un lugar inapropiado y una fuente de alimentación insuficiente, provoca considerables pérdidas [16].

En la implementación de los bancos de capacitores debe considerarse algunos aspectos, como es: el estudio en redes y la potencia de los bancos de capacitores a instalarse; por lo general los capacitores disponen de valores nominales enteros de una unidad estándar (5, 25, 50 kVAr, por ejemplo) [17].

El propósito es maximizar la compensación para que el banco de condensadores instalado en la red radial esté más cerca del extremo de la barra con la carga más alta. En una red de malla, es mejor colocarlo en la barra de refuerzo más alejada del bus de energía y la barra de refuerzo más ocupada.[18]

Mientras que en los sistemas de carga desequilibrados en distribución, así como en las redes de generación importantes; la compensación óptima ya no es necesaria. Por esta razón la optimización se debe ejecutar, considerando los perfiles de carga, basándose en la demanda que los consumidores tengan en tiempo real [18], [19].

Para que la energía suministrada se encuentre dentro del estándar de calidad de energía se deben efectuar estudios de optimización de las redes [20], para solucionar esta problemática, se puede buscar medidas de como concentrar la potencia en un punto específico de la red, por lo que lo ideal sería encontrar una alternativa que cumpla con los

modelos establecidos y la ubicación puntual de la red, la misma que será desarrollada en este artículo, por lo cual es importante comprender ciertos criterios que se explicaran a continuación.

2.6 Minimización de pérdidas de potencia

El diseño de sistemas de compensación, suministra energía reactiva, con el fin de que el sistema eléctrico funcione correctamente. [10].

La potencia proporcionada se vuelve útil cuando la compensación de reactivos se ha realizado; para esto, la compensación de reactivos se utiliza para reducir significativamente las pérdidas en sus perfiles de voltaje y potencia en circuitos de distribución ubicados en zonas rurales o urbanas.

En los sistemas eléctricos es muy importante tomar en consideración la presencia de la potencia reactiva, ya que en este sistema existen varias de las cargas que requieren de reactivos para su funcionamiento sin contar con el cableado de la infraestructura de distribución que también generan reactivo dentro del sistema [21]; siempre debe existir un balance de potencia, es decir, un equilibrio que pueda garantizar la calidad de energía y sus perfiles tanto de voltaje como de potencia, si hay una falta de potencia reactiva en el sistema, provocará una caída de tensión, mientras que demasiada potencia reactiva provocará una sobretensión que pondrá en peligro la calidad de la fuente de alimentación y del sistema.

Un resultado importante dentro de la compensación de la energía reactiva es el mermar las pérdidas Joule de los conductores y transformadores [22], [23], es decir que bajo a ese resultado se puede evitar que exista un sobredimensionamiento de muchos

componentes de instalación, además que para los consumidores industriales es primordial conservar el control de la energía eléctrica y que esta se encuentre dentro del límite permitido (FP es 0,96) , favoreciendo al consumidor con el ahorro de energía en su planilla eléctrica[13].

2.7 Factor de potencia

La definición de factor de potencia se refiere a la diferencia entre el voltaje V (kV) y la corriente I (A), además indica la capacidad de energía aprovechada [2].

A nivel industrial, el factor de potencia suele ser bajo porque su tecnología se basa en cargas y equipos inductivos. Con el fin de reducir la corriente y la pérdida de potencia, los bancos de condensadores tienen como objetivo moderar el factor de potencia y la distribución de tensión [13].

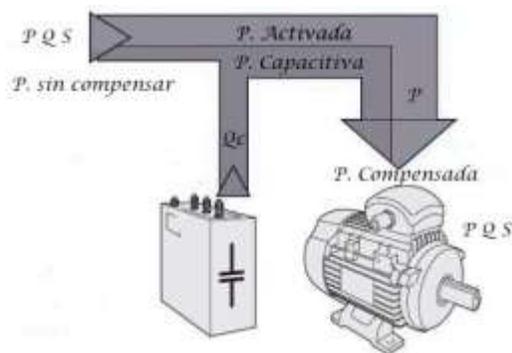


Figura 4. Compensación fija.

En las zonas que presentan picos de demanda en épocas marcadas, suele utilizarse un control estacional, mediante un estudio de carga en base a un análisis del régimen anual y por otro lado se ubican en diferentes zonas bancos capacitivos de forma permanente [10]. Cuando la conducta de la carga no cambia dentro de las 24 horas y se manejan cargas de tipo industrial; se suele utilizar bancos de compensación en

jornadas diarias, generalmente de 8 am a 8 pm. Estos controles proporcionan energía de manera programada ya sea por horario o jornada [21]. Dado que el factor de potencia no se puede controlar permanentemente, el sistema puede compensar en exceso durante estas horas.

Llegando a la conclusión que el comportamiento de la potencia reactiva varía dependiendo las cargas industriales o residenciales y es distinta en cada ciclo del año, o en cada momento del día; en tal virtud en estos procesos se manejarán con un control de reactivos [24].

2.8 Perfiles de voltaje

El banco de condensadores tiene una gran ventaja debido a su apropiada ubicación, ya que se puede obtener una compensación acertada. Con la mejora del perfil de voltaje tanto de potencia reactiva y activa de la red, se incrementa la calidad de la energía, además de enfatizar que la prioridad de la red de distribución es mantener la curva de voltaje en diferentes nodos de la red.

Si cambia la demanda de potencia reactiva de la carga, la regulación de voltaje puede convertirse en un problema en donde la distribuidora tendrá que solucionar para garantizar la calidad de energía, la distribuidora está obligada a mantener los perfiles de voltaje dentro de las categorías que se encuentran entre un $\pm 5\%$ del voltaje nominal en fases largas como horas y minutos [25].

Para evitar pérdidas económicas es importante instituir un sistema eléctrico basado en potencia reactiva mediante compensadores. El equilibrio que ofrece la potencia reactiva puede reducir la corriente porque cuanto menos corriente fluye a través del cable de alimentación, menor es la caída de voltaje, lo que mejora el voltaje en el sistema [26].

2.9 Métodos de compensación de potencia reactiva

Las empresas distribuidoras de energía, en donde el costo de la energía eléctrica es muy importante para reducir los gastos operativos y las pérdidas de distribución de energía, logrando así una mayor eficiencia energética [21]. Así nos encontramos en busca de herramientas eficientes y equipos que sirvan para la solución y mejora a estos problemas, como los que se detallarán brevemente a continuación.

2.10 Compensación reactiva paralelo pura

Su función principal es aumentar el desempeño del factor de potencia, ya que al reducir la corriente en todo el circuito, puede disminuir las pérdidas y mejorar el perfil de tensión [20].

2.11 Compensación reactiva en serie

Al utilizar la compensación en serie, se pueden reducir la variación de voltaje y la pérdida de línea, que es el resultado de la carga [21]. Esto es el producto de la compensación en serie que cuenta con la capacidad que al estar en serie, consigue la auto-regulación de reactivos los mismos que se encuentran en función de la corriente de carga.

2.12 Máquinas Sincrónicas

La generación de kVAr depende de la excitación, para satisfacer su demanda de energía reactiva y, a su vez, transferir la energía reactiva al sistema eléctrico, es necesario sobreexcitarlo [22]. De esta forma se obtendrá un motor trabajando sin carga con un amplio rango de regulación, es llamado también condensador síncrono. Dependiendo del nivel de excitación del campo magnético, su rango será suficiente para la capacidad reactiva o la potencia inducida. Es fundamental señalar que

las máquinas síncronas tienen dos funcionalidades: la sobre-excitación, que trabajará como condensadores; y la sub-excitación que trabajará como inductancias.

Un capacitor síncrono, siempre tendrá dos configuraciones, si esta sobre-excitado, la potencia estará reducida por la temperatura y si esta sub-excitado estará limitada por la estabilidad de la máquina [9]. Empleada únicamente cuando haya un motor síncrono de alta potencia en funcionamiento durante un tiempo prolongado (superior a 200 HP) en la instalación.

2.13 SVC

SVC o Compensador Estático de Potencia Reactiva, su operación se basa en el empleo de tiristores, bobinas y capacitores, siendo estos dispositivos fundamentados en tecnología de electrónica de potencia. Cabe señalar que el uso de dispositivos basados en la electrónica de potencia está cada vez más extendido, además de ser visto como una alternativa para superar las condiciones de transmisión y calidad del suministro eléctrico. A diferencia de un compensador síncrono, un dispositivo que genera o absorbe energía reactiva a través de semiconductores controlados conectados en paralelo con la red no tiene partes móviles. Para equilibrar la potencia reactiva controlando la amplitud de voltaje en una barra específica con el sistema de potencia, se ampliará el compensador de VAR estático. Estos tipos de dispositivos pueden estar conformados por bancos de condensadores fijo o conmutados y por los bancos de reactores fijos o en paralelo [18].

2.14 Demanda

Es la potencia eléctrica o energía consumida en un rango de duración determinado, estos rangos de duración

por lo general son minutos u horas, a este espacio se lo llama intervalo de demanda y su indicación es obligatoria para interpretar un determinado valor de demanda [27], [28].

La demanda de energía está determinada por el consumo de energía de un equipo o máquina y el valor de energía promedio es igual a intervalos de 15 minutos [13].

La demanda varía con el tiempo, mostrando patrones estacionales crecientes asociados con el horario de consumo, los cuales se clasifican en:

- **Demanda mínima.** - este es el valor correspondiente al valor mínimo registrado en un intervalo de tiempo [13].
- **Demanda media.** - Este es el valor correspondiente al valor de consumo medio registrado en un intervalo de tiempo. [13].
- **Demanda máxima.** - este es el valor correspondiente al valor máximo de consumo registrado en un intervalo de tiempo [27].

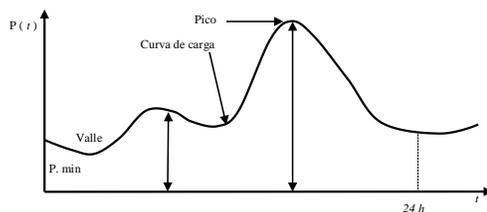


Figura 5. Curva de la demanda por día.

Estos tres valores rigen en la curva típica de la demanda y su configuración depende de la cantidad de consumo que se genera en un lapso; dando lugar a las llamadas horas pico de consumo (demanda máxima) y las horas valle (conjugación entre demanda mínima y media).

Para el análisis de este trabajo se enfocará en el tipo de demanda residencial, siendo este el consumo que se genera en una agrupación de vivienda, su demanda tiene un comportamiento variable debido a factores climáticos y

socioeconómicos que dependerán del día y la hora de consumo[9].

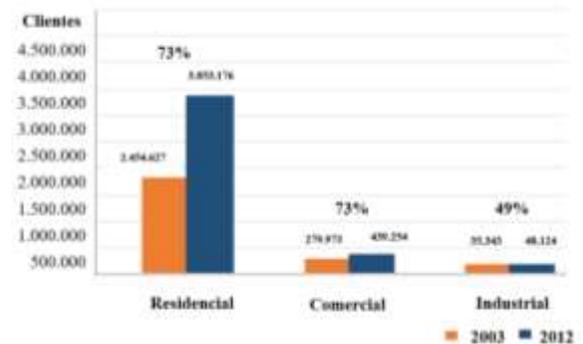


Figura 6. Demanda Estudio CONELEC [29].

En la figura anterior se puede observar el crecimiento que ha tenido la demanda residencial en un lapso de tiempo del 2003 al 2012, teniendo un 73% del consumo total que corresponde a la demanda residencial [29].

2.15 Influencia del factor de potencia y perfil de voltaje

Los reactivos son necesarios para el flujo electromagnético y esta potencia no produce trabajo físico en el equipo, que es esencial para componentes móviles como motores, transformadores equipos de refrigeración, etc. Cuando la cantidad de estos equipos son numerosos, será más notoria la potencia reactiva, es decir que mientras más carga reactiva tenga la instalación mayor número de reactivos se necesitarán en el sistema, lo que resultará en una reducción considerable en el factor de potencia. [30].

En la actualidad en una zona residencial es muy común que cada hogar disponga de un equipo de refrigeración, lámpara fluorescente o algún motor pequeño que se encuentra en los electrodomésticos que son de uso continuo en nuestro diario vivir; al tener una demanda variable en tiempo, los perfiles de voltaje y potencia se van a ver afectados, como es el caso de una zona residencial. Los domicilios

existentes generan una gran cantidad de reactivos en un momento específico del día. La suma de estos reactivos perjudicará al usuario final, dando lugar a las siguientes desventajas:

- Incremento de la intensidad de corriente.
- Daño en los conductores y fuertes caídas de tensión.
- Acortamiento de la vida útil de los conductores y de su capacidad de conducción.
- Incremento de la temperatura del conductor, ocasionando que vida útil del aislamiento disminuya.

Para una empresa distribuidora es esencial, según su política entregar energía de calidad y con los parámetros establecidos, para lograr que esto se cumpla, se utilizan compensadores reactivos realizando un estudio previo para determinar una buena ubicación.

2.16 Análisis de optimización por Tabú Search

A continuación se describe la definición y análisis de la búsqueda Tabú Search.

2.16.1 Definición

La búsqueda tabú es un análisis matemático para llegar a la optimización, su principio se basa en procedimientos de aprendizaje implícitos y explícitos, fundados en derivar y encontrar el mayor número de estrategias inteligentes para resolver un problema [31]. El entorno de memoria adaptable, se utiliza en procedimientos de solución de problemas, además de requerir la creación de estructuras para hacer posible su utilización. De esta forma, debido a la confianza en la memoria evolutiva, los elementos prohibidos en la búsqueda tabú reciben este estado, y esta confianza permite que

este estado se modifique según el tiempo y el entorno. En este sentido, se puede asumir que la búsqueda tabú se basa en ciertos conceptos que conectan el campo de la inteligencia artificial y la optimización [31].

2.16.2 Descripción

La búsqueda tabú es un tipo de búsqueda por sectores, que obtiene una solución dentro del sector, aunque no sea tan buena como la actual. De tal forma, que se puede omitir soluciones óptimas locales y continuar buscando, para obtener mejores soluciones [32].

Para evitar que las soluciones locales obtenidas previamente no sean óptimas, se utilizan estructuras de almacenamiento a corto y largo plazo, en las que un cierto número de las últimas soluciones se clasifican como soluciones tabú. Las soluciones tabú no están permitidas por un período de tiempo, por lo que el algoritmo básico de búsqueda tabú tiene los siguientes aspectos [33].

2.16.3 Configuración inicial

La configuración inicial es el conjunto de variables enteras del problema, que se ordenan en forma de vector o matriz. La configuración inicial puede obtenerse de forma aleatoria o generarse mediante un algoritmo de construcción [32].

2.16.4 Generación del vecindario

En la búsqueda tabú, la generación de vecinos de la configuración X es la configuración X' obtenida de X . Dado que en la mayoría de los casos, el vecino $N(X)$ puede ser muy grande, esto significa un esfuerzo elevado en el cómputo de búsqueda local. Por lo tanto, la cantidad de vecinos debe reducirse a un conjunto $N^*(X)$ menor que $N(X)$, y las reglas de construcción de vecindarios deben redefinirse. [32].

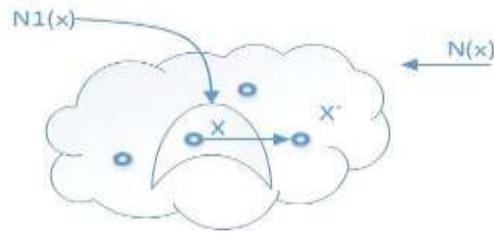


Figura 7. Diagrama de construcción del vecindario

Esta etapa es una de las más importantes del proceso, porque de ella depende en gran medida el éxito de la búsqueda.

2.16.5 Elección del mejor vecino

Al definir el barrio se evaluará a cada habitante para determinar qué valor tendrá la función objetivo y si cumple con los requisitos necesarios; en este sentido, se resuelve la factibilidad de configuración de vecinos.

Los vecinos se colocan en un resumen según el valor de la función objetivo, y luego el proceso selecciona al mejor candidato. Se seleccionará al candidato con la mejor función objetivo, que este no esté prohibido y sea viable, de lo contrario, la búsqueda continuará en el próximo vecino. Este proceso se llama búsqueda agresiva.

Dado que la mejor iteración del proceso se almacena, es posible que en una iteración dada, el candidato no tenga la mejor solución, el procedimiento continúa [32].

Este método puede evitar que el cálculo sea capturado por el valor óptimo cercano y encontrar una solución factible o la mejor solución encontrada en el vecindario [33].

2.16.6 Actuación de la configuración Taboo Search

En el algoritmo Taboo Search, se requiere una estructura tabú. El código de la estructura es el mismo que el de la configuración X , y se utiliza para almacenar el código de sitios prohibidos

o tabúes. En todo el proceso, cada posición de la configuración X puede estar prohibida y el "estado tabú" puede ser o no una variable [32].

Esto se denomina procedimiento de memoria versátil y es un componente que además de prevenir ciclos, también hace que el proceso de consulta sea inteligente.

Finalmente, al seleccionar al mejor vecino, la posición desde la que se genera la configuración X debe suprimir las iteraciones k y los sitios en su estado Tabú deben reducirse mediante una iteración, esto pertenece a los procesos de renovación de la estructura tabú [32].



Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema planteado en este trabajo está sujeto a una función objetivo y a un grupo de limitaciones. Se utiliza un algoritmo matemático que permita una compensación óptima de la potencia en función a un proceso de optimización (Tabú Search), reduciendo así costos,

pérdidas y compensación fija; las cuales podrán compensar la red de distribución a través de la ubicación óptima del banco de condensadores.

El problema propuesto tiene una estructura general, que consiste en la función objetivo y las pérdidas que conllevan la instalación de la compensación fija; además, se encontrarán problemas bajo ciertas restricciones de balance de potencia, voltaje de nodo y binarias; la tensión tendrá limitantes mínimos y máximos que oscilan entre valores de 0,9 pu a 1,1 pu.

Estos rangos de operación aseguran un correcto funcionamiento y a su vez garantizan la calidad de energía en el SEP de distribución.

3.1 Formulación del método

A continuación se muestra la formulación del método que se va a usar en este trabajo.

3.1.1 Función objetivo

El modelo propuesto, tiene la finalidad de minimizar los valores de inversión al año, los mismos que son añadidos a la instalación de los compensadores, para su modelación se utiliza la siguiente ecuación:

$$\min \sum_{i=1}^N b_i P_{gi} + \sum_{i=1}^N QComp_i * u_i * Z_i \quad (1)$$

Donde:

- b_i Factor de costo de la generación de energía activa en el nodo i (\$/MW²h, \$MWh, \$/h).
- $QComp_i$ Banco de Condensadores (Potencia reactiva de compensación).
- u_i Variable binaria de ubicación del compensador.

Z_i Costo de instalación del Banco de Condensadores.

3.2 Restricciones

La función objetivo del modelo matemático está sujeta a varias restricciones que ayudan al sistema a mejorar su operación, mostrándose a continuación las siguientes:

3.2.1 Restricción de balance de potencia

Para lograr el equilibrio entre potencias, de acuerdo con la ley de Kirchhoff, donde la potencia activa y reactiva que ingresan a un nodo debe ser la misma a la potencia activa y reactiva entregadas por el nodo al sistema. Las ecuaciones (2) y (3) muestran el balance de potencia del nodo.

$$\begin{aligned} & \sum P_{in_i} - \sum P_{d_i} \\ &= \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \delta_{ik} \\ &+ b_{ik} \sin \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum Q_{in_i} - \sum Q_{d_i} \\ &= \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \delta_{ik} \\ &- b_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

- P_{in_i}, Q_{in_i} Potencia activa y reactiva que ingresan al nodo i .
- P_{d_i}, Q_{d_i} Demanda en el nodo i de la potencia activa y reactiva.
- g_{ik} Elemento ik -ésimo de la matriz mutua de conductancia nodal.

b_{ik}	Elemento Ik-ésimo de la matriz mutua de suceptancia nodal.
V_i, V_k	Tensión del nodo i y en el nodo k.
δ_i, δ_k	Ángulo de voltaje en el nodo k e i.

3.2.2 Condicionamiento de los valores de voltaje

Los valores establecidos en la regulación correspondientes a los límites mínimos y máximos de las restricciones de voltaje se encuentran entre 0,95 y 1,1 pu.

$$V_{min_i} \leq V_i \leq V_{max_i} \quad (4)$$

3.2.3 Restricción binaria

La restricción binaria sirve para que el optimizador escoja el nodo de ubicación del banco de capacitores en la red de distribución, en la ecuación (5) se establece la restricción a través de una variable binaria.

$$\sum_{i=1}^n u_i = 1 \quad (5)$$

Donde:

u_i Variable de binaria de selección

Mediante la variable binaria, se logra que el optimizador escoja un solo nodo para la ubicación óptima del compensador, cumpliendo tanto la función objetivo como las restricciones establecidas.

3.3 Formulación de búsqueda Taboo

El método del algoritmo de Taboo Search fue implementado con el fin de encontrar soluciones óptimas o soluciones locales. Este algoritmo forma parte de las técnicas *meta heurísticas* de optimización.

El algoritmo de Tabú Search, mediante una investigación por el espacio nos brinda una respuesta de cómo realizar un modelo de búsqueda local por medio de una ruta de trayectoria.

La resolución óptima se ubica dentro de un registro, en el cual se guardan las mejores soluciones obtenidas en las búsquedas locales efectuadas según el procedimiento antes dicho. El pseudocódigo que se muestra en la Tabla 1 indica el proceso básico del algoritmo Tabú Search mientras recorre el espacio de solución.

Tabla 1. Algoritmo de búsqueda Tabú Search

1	Paso Iniciar lista élite FOR i=1 TO número de búsquedas locales DO
	Inicializar memorias. FOR t=1 TO número de iteraciones DO IF t==1 THE . Seleccionar la configuración inicial x^t . END IF Asignar incumbente local como $f(N'(x^t))$. Generar el vecindario reducido $N'(x^t)$ Evaluar la función de adaptación $f(N'(x^t))$.
2	Paso IF Mejora incumbente local THEN Actualizar la incumbente local. Seleccionar la configuración x^{t+1} por atributos tabú. ELSE Seleccionar la configuración x^{t+1} por atributos tabú. END IF Actualizar memorias. END FOR Actualizar lista élite. END FOR
3	Paso Fin

Donde:

x^t Define el vecindario

- $N(x^t)$ Conjunto de elementos adyacentes a x^t tal que $x^t \in N(x^t)$.
- $N'(x^t)$ Conjunto de vecinos puede ser obtenido por medio de estrategias heurísticas guiadas o mediante un proceso de generación aleatorio.

En la Tabla 1 se muestra el proceso analítico del modelo de optimización ideado mediante el siguiente algoritmo.

3.4 Procedimiento de solución óptima

Se utilizarán programas de Matlab y GAMS, en donde se introducirán los datos de la red de distribución como generadores, líneas y cargas del sistema con el fin de resolver los problemas propuestos en este trabajo.

En estos software se realizan un flujo óptimo de potencia, cuyo fin es el de minimizar la función objetivo asociado a la instalación del banco de capacitor y realizar la ubicación de este en la **red eléctrica de distribución**.

Tabla 2. Algoritmo de óptima ubicación fija de potencia reactiva en redes eléctricas de distribución n en escenarios de demanda residencial.

Adquisición de los datos del sistema eléctrico.	
1	Paso b) A=[Nc,Pmax,Pmin,Qmax,Qmin, B=[Nin,Pd,Qd] C=[Bini,Bfin,R,X,B/2]
2	Paso Ingreso de datos matriz de admitancias
3	Paso Ingreso de datos valores iniciales de las variables eléctricas.
4	Paso Problema de Optimización en GAMS Ingreso de datos Condiciones iniciales Ingreso de datos variable binaria $U_i \in \{0,1\}$

Ingreso de datos Restricciones de Igualdad

$$\sum P_{in_i} - \sum P_{d_i} = \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik})$$

$$\sum Q_{in_i} - \sum Q_{d_i} = \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik})$$

$\sum u^{(i)} = 1$
Ingreso de datos restricciones de desigualdad

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

$$\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max}$$

$$P_{g,min} \leq P_g \leq P_{g,max}$$

$$Q_{g,min} \leq Q_g \leq Q_{g,max}$$

4 SISTEMA PROPUESTO DE DISTRIBUCIÓN RADIAL PARA EL CASO DE ESTUDIO

Para estudiar este método de optimización, se consideró un sistema eléctrico de distribución radial IEEE de 15 nodos, y en su descripción se utilizó los siguientes datos para modelar y simular en este caso.

Tabla 3. Datos generadores del sistema

Generador	Nodo	Pmax(MW)	Qmax(Mvar)
G1	1	90	90

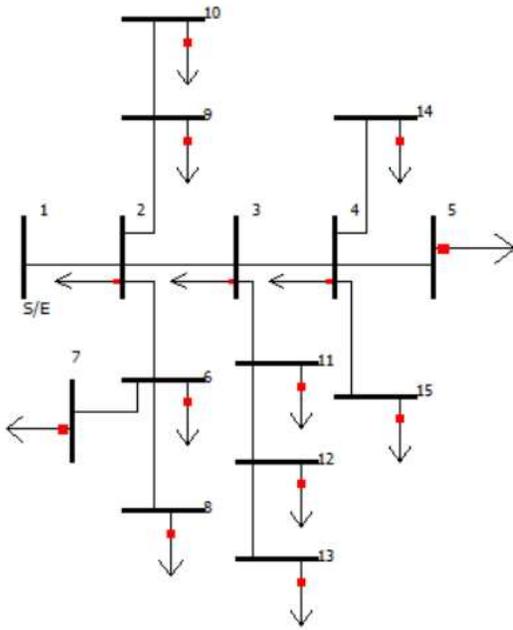


Figura 9. Diagrama IEEE 15 barras de distribución.

Tabla 4. Voltaje de barra

NODO	VOLTAJE(KV)
1-15	11.432

Tabla 5. Datos generadores del sistema de la carga

NODO	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.624	0.063
2	2.485	0.153
3	3.874	0.294
4	2.326	0.135
5	1.339	0.036
6	2.914	0.198
7	1.969	0.099
8	1.639	0.066
9	1.84	0.087
10	7.51	0.066
11	1.396	0.042
12	1.087	0.009
13	1.483	0.048
14	1.417	0.042
15	1	0

Tabla 6. Datos líneas del sistema

Nodo	Nini	Nfini	R(pu)	X(pu)	B(pu)
L1	1	2	0.0032	0.0752	0.0000
L2	2	3	0.0003	0.0018	0.0015
L3	3	4	0.0067	0.0308	0.0353
L4	4	5	0.0058	0.0149	0.0025
L5	5	6	0.0141	0.0365	0.0000
L6	4	7	0.0080	0.0370	0.0312
L7	7	8	0.0090	0.0416	0.0000
L8	8	9	0.0070	0.0323	0.0015
L9	9	10	0.0037	0.0169	0.0035
L10	10	11	0.0090	0.0416	0.0020
L11	3	12	0.0275	0.1270	0.0000
L12	12	13	0.0315	0.0814	0.0000
L13	13	14	0.0397	0.1030	0.0000
L14	14	15	0.0106	0.0042	0.0000

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza el análisis del sistema, para estudiar el perfil de voltaje, conducta del flujo de potencia y los niveles de potencia tanto activa como reactiva, en cada uno de los componentes. El algoritmo busca en el sistema de distribución radial y encuentra la mejor manera de localizar y dimensionar el banco de condensadores. Para obtener una compensación del sistema, se debe obtener las características necesarias para mantener el voltaje del nodo dentro del estándar establecido.

Tabla 7. Casos y nodo escogido.

	Casos	Costos	Nodo Escogido
Costo sin Compensador		680.8	
Costo con Compensador de 5 kVAr	1	698.1	2
Costo con Compensador de 35 kVAr	2	682.1	3
Compensador de 70 kVAr	3	692.5	4

Tabla 8. Datos comparativos de (V) vs. (V) compensado.

No dos	Vpu sin Compensador	Vpu con Compensador de 5 kVAR	Vpu con Compensador de 35 kVAR	Vpu con Compensador de 70 kVAR
1	1	1	1	1
2	1.0092	1.0167	1.035	1.0586
3	1.0094	1.0169	1.0358	1.06
4	1.0113	1.0188	1.0378	1.0822
5	1.0111	1.0186	1.0376	1.082
6	1.0106	1.0181	1.0371	1.0815
7	1.0117	1.0192	1.0383	1.0828
8	1.011	1.0186	1.0377	1.0822
9	1.0106	1.0182	1.0373	1.0819
10	1.0104	1.018	1.0371	1.0817
11	1.0103	1.0179	1.037	1.0817
12	1.0078	1.0153	1.0343	1.0585
13	1.0065	1.0141	1.033	1.0573
14	1.0055	1.0131	1.032	1.0564
15	1.0054	1.013	1.0319	1.0563

Enfocándose en la demanda de un día de 24 horas se ha considerado la potencia de los capacitores dependiendo al costo que implica poner este componente en el sistema de distribución, en la tabla 7 se muestra el nodo escogido por el algoritmo y el costo con la potencia en cada caso.

5.1 Perfil de voltaje.

Al analizar los diferentes factores de la demanda hemos observado la mejora en el perfil de voltaje en cada uno de los nodos, gráficas obtenidas con los datos de la Tabla 8.

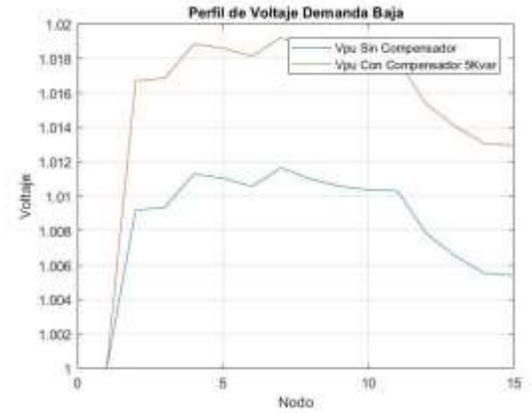


Figura 10. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda baja).

En el gráfico 10 muestra el perfil de voltaje mejorado, aumentando el voltaje en todo el sistema con un compensador de 5 KVAR colocado en el nodo número 2, que previamente fue escogido mediante el algoritmo Taboo Search.

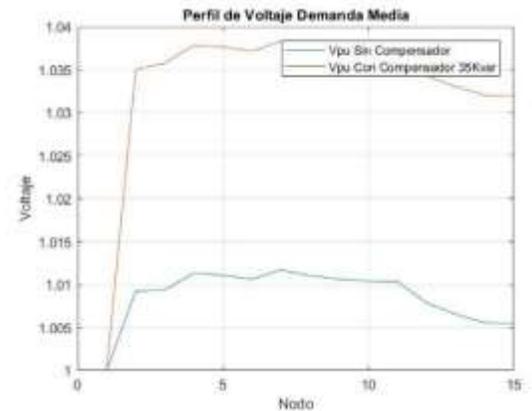


Figura 11. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda media).

En el gráfico 11 muestra el perfil de voltaje mejorado, aumentando el voltaje en todo el sistema con un compensador de 35 KVAR colocado en el nodo número 3, que previamente fue escogido mediante el algoritmo Taboo Search, en este caso corresponde a la etapa de demanda media.

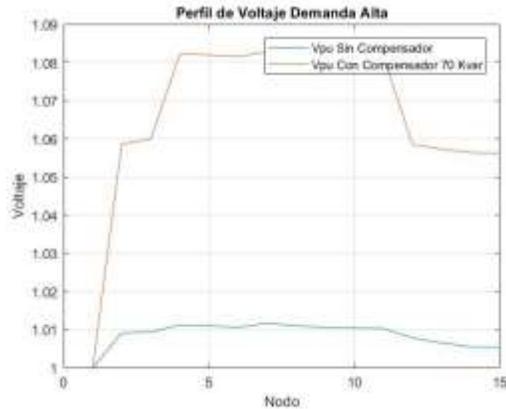


Figura 12. Muestra la mejora en el perfil de voltaje (Demanda alta).

En el gráfico 12 muestra el perfil de voltaje mejorado, aumentando el voltaje en todo el sistema con un compensador de 70 KVAR colocado en el nodo número 4, que previamente fue escogido mediante el algoritmo Taboo Search, en este caso corresponde a la etapa de demanda alta.

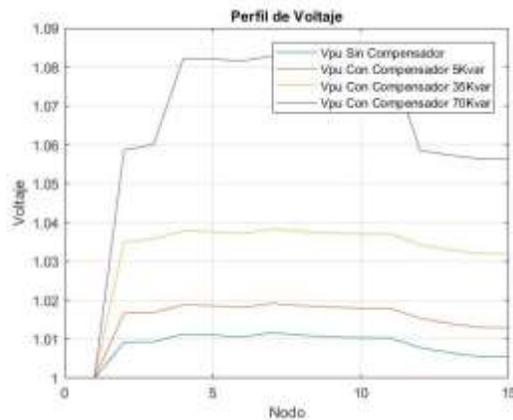


Figura 13. Muestra de mejora del perfil de voltaje de demanda baja.

El análisis del perfil de voltaje se muestra toda la mejora del perfil de voltaje en diferentes etapas del día, considerando las diferentes demandas que podrían existir en un día completo de 24 horas.

Tabla 9. Comparativa de voltaje en pu

Nodos	Vpu sin Compensador	Vpu con Compensador de 5 kVAR	Vpu con Compensador de 35 kVAR	Vpu con Compensador de 70 kVAR
1	1	1	1	1
2	1.009195 636	1.016697 803	1.034973 666	1.058649 488
3	1.009358 854	1.016864 067	1.035755 714	1.059999 219
4	1.011295 797	1.018841 947	1.037835 632	1.082197 821
5	1.011054 285	1.018602 795	1.037602 287	1.081977 334
6	1.010575 678	1.018127 745	1.037135 962	1.081530 187
7	1.011660 697	1.019230 205	1.038281 91	1.082775 629
8	1.011003 725	1.018587 436	1.037674 208	1.082246 292
9	1.010594 2	1.018187 228	1.037297 03	1.081920 712
10	1.010376 784	1.017973 372	1.037091 961	1.081735 278
11	1.010319 021	1.017917 301	1.037040 083	1.081692 83
12	1.007828 979	1.015346 168	1.034267 132	1.058546 6
13	1.006525 211	1.014052 231	1.032997 29	1.057306 384
14	1.005524 823	1.013059 329	1.032022 74	1.056354 409
15	1.005419 394	1.012954 684	1.031920 018	1.056254 053

5.2 Selección de nodo

Utilizando el algoritmo de búsqueda tabú se selecciona el mejor nodo para obtener la óptima compensación reactiva, si este no es viable, se selecciona

el nodo que más se asemeje al óptimo, con este método se analizó tres escenarios como se muestra a continuación, en las gráficas.

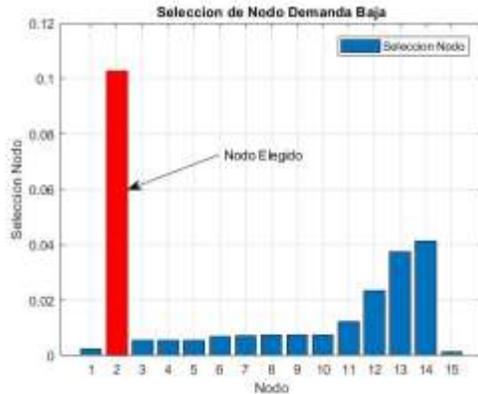


Figura 14. Demanda baja elección de nodo.

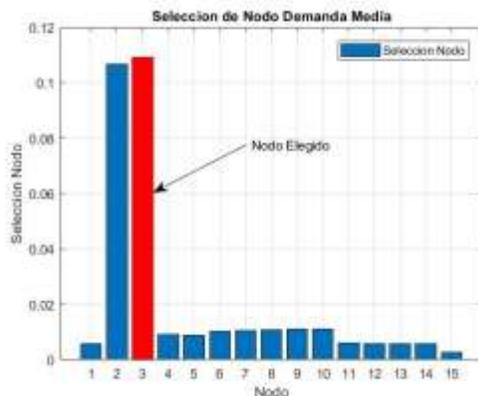


Figura 15. Demanda media elección de nodo.

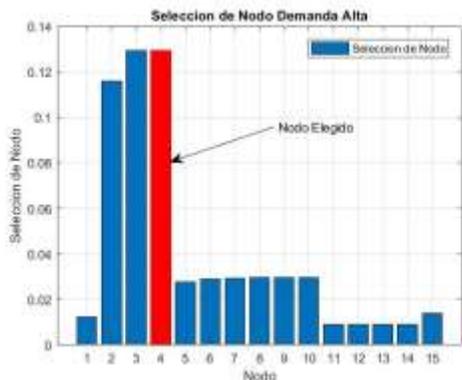


Figura 16. Demanda alta elección de nodo.

La selección del nodo es muy importante, ya que este un proceso que

permitirá elegir el nodo más óptimo en el cual se pueda colocar un compensador fijo con el menor costo posible.

Tabla 10. Selección de nodo.

Nodo	Demanda Baja	Demanda Media	Demanda Alta
1	0.002411563	0.005848169	0.01214578
2	0.102736332	0.106585246	0.115973709
3	0.005505364	0.109122212	0.129448259
4	0.005509518	0.009008641	0.129318219
5	0.005400333	0.008903991	0.027494322
6	0.006759546	0.010268301	0.028870962
7	0.007121636	0.010638719	0.029261485
8	0.007405573	0.010926228	0.029557848
9	0.007500384	0.011021838	0.029655499
10	0.007558428	0.011080521	0.029715848
11	0.012240865	0.005977072	0.009094008
12	0.023434629	0.005843782	0.008968496
13	0.037456477	0.005772331	0.008900978
14	0.041357858	0.005772315	0.008900963
15	0.001149717	0.002731718	0.013858508

5.3 Análisis del factor de potencia en el sistema

Es posible que el factor de potencia afecte la eficiencia del sistema de distribución de potencia, el factor de potencia del sistema de distribución está limitado a 0.9. Si hay un valor más bajo, debe corregirse porque el factor de potencia está estrechamente relacionado con el porcentaje de pérdida de voltaje y potencia activa.

Como se puede observar en la figura en cada demanda la compensación es diferente debido a que en cada nodo la carga varía según la hora.

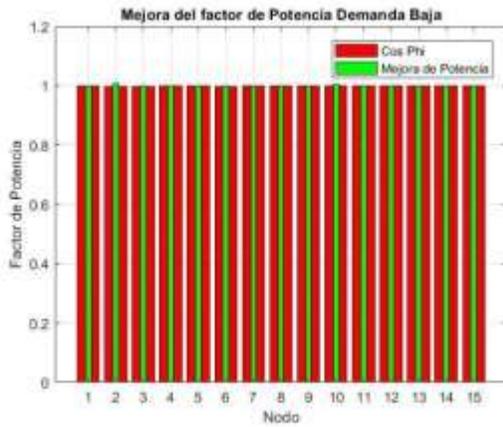


Figura 17. Mejora del perfil de potencia (Demanda baja).

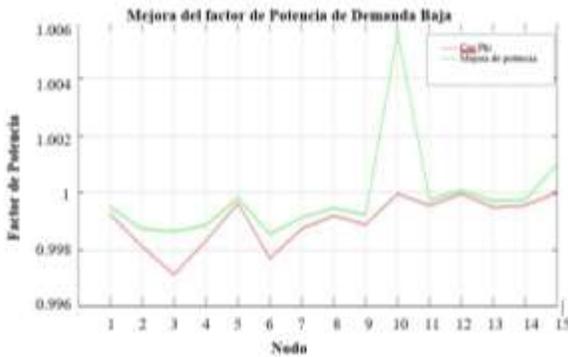


Figura 18. Mejora del perfil de potencia (Demanda baja).

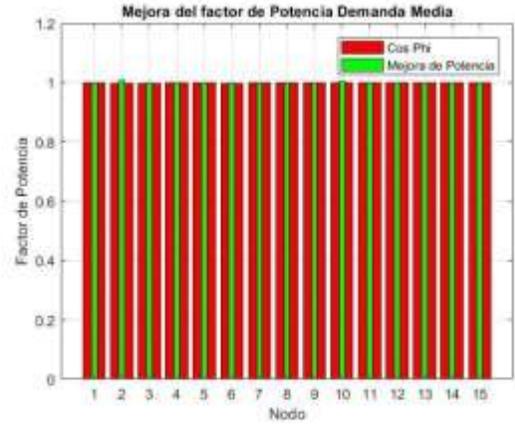


Figura 19. Mejora del perfil de potencia (Demanda Media).

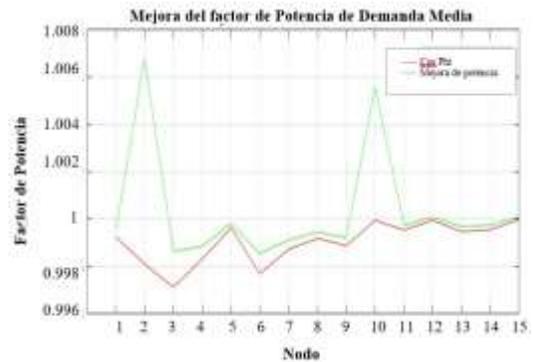


Figura 20. Mejora del perfil de potencia (Demanda media).

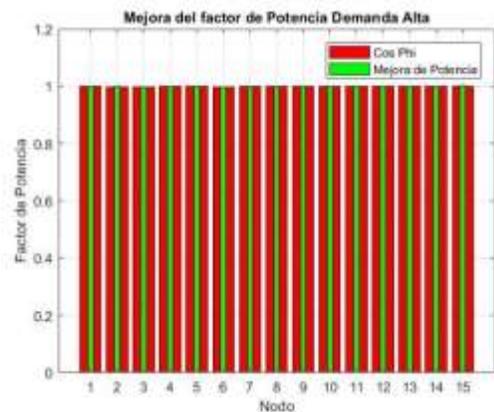


Figura 21. Mejora del perfil de potencia (Demanda alta).



Figura 22. Mejora del perfil de potencia (Demanda alta).

La tabla número 11 muestra la mejora de los perfiles del factor de potencia en tres etapas diferentes, si se lo asocia con el ángulo original del sistema se puede observar cómo compensa los perfiles de potencia reactiva mejorando el ángulo de desfase.

Tabla 11. Mejora del perfil ángulo Phi.

No do	Cos PHI	Mejora De Potencia Baja	Mejora De Potencia Media	Mejora De Potencia Alta
1	0.9992 484	0.00026 3936	0.00026 3936	0.00026 3936
2	0.9981 1	0.00061 8692	0.00868 147	3.80925 E-05
3	0.9971 327	0.00150 5103	0.00150 5103	0.00011 4223
4	0.9983 199	0.00054 1938	0.00054 1938	0.00094 37
5	0.9996 388	0.00017 9357	0.00017 9357	4.82214 E-06
6	0.9976 995	0.00085 1098	0.00085 1098	5.78302 E-05
7	0.9987 384	0.00038 8186	0.00038 8186	1.95177 E-05
8	0.9991 902	0.00026 885	0.00026 885	1.08262 E-05
9	0.9988 84	0.00033 8938	0.00033 8938	1.60259 E-05
10	0.9999 614	0.00564 0228	0.00564 0228	4.95679 E-05
11	0.9995 477	0.00019 497	0.00019 497	5.86585 E-06
12	0.9999 657	0.00011 8161	0.00011 8161	9.78334 E-07
13	0.9994 766	0.00022 0044	0.00022 0044	7.12213 E-06
14	0.9995 61	0.00020 0877	0.00020 0877	5.95401 E-06
15	1 4988	0.00100 4988	0.0001 4988	0.001 4988

5.4 Comparativa con otros autores

En el análisis de una óptima compensación reactiva se puede encontrar varios autores que determinan la ubicación y la potencia de dichos elementos. Los métodos utilizados pueden ser heurísticos, que son relacionados con problemas reales tomando en cuenta el conocimiento disponible. Con este tipo de información se puede encontrar soluciones razonables a un problema. Relacionando los métodos *meta heurísticos* con los *heurísticos*, se puede mencionar que los heurísticos, son considerados como un marco de algoritmo general que puede adaptarse a problemas específicos con cambios mínimos, y en cuanto a los meta heurísticos, estos son conocidos como como las mejores aproximaciones para resolver problemas. Es así que se hace la comparativa con otros trabajos, que a pesar de que se haya podido encontrar la ubicación y la potencia óptima de compensadores fijos para una red de distribución; el método de Tabú Search, selecciona el mejor nodo para obtener la óptima compensación reactiva, si este no es viable, se selecciona el nodo que más se asemeje al óptimo, dando más alternativas de solución a los problemas de compensación reactiva a nivel de distribución.

6 TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda a futuro realizar un análisis en conjunto para optimizar la ubicación, el tamaño y la viabilidad de otros tipos de compensadores que puedan operar en niveles residenciales, así complementar el contenido de la investigación de esta manera, llegando no solo a la compensación óptima sino también a una selección precisa del equipo a ser usado. Sin embargo, esto dependerá

del costo del equipo. La generación de energía distribuida también se puede considerar en función de la curva de capacidad y el tipo de generación de energía instalada. Por lo tanto, es necesario investigar los tipos de generación de energía renovable y su contribución al sistema.

7 CONCLUSIONES

En este estudio, se utilizó un procedimiento que con la ayuda del optimizador GAMS y la meta heurística "Tabú Search", en donde se muestra que la óptima compensación reactiva al mejorar la colocación de condensadores fijos en un SEP de distribución de 15 barras, se evidencia la minimización de la pérdida de potencia y la reducción sustancial de costos, además de que en este método se utilizó los límites de voltaje y potencia reactiva para garantizar la calidad de energía para el usuario final.

Al principio, el valor de voltaje del sistema de distribución de energía no alcanzó el límite establecido. Por lo que al implementar el algoritmo de búsqueda tabú, la curva de voltaje se puede mejorar; perfeccionando así el factor de potencia, de modo que la pérdida en el sistema se pueda reducir para lograr el objetivo de compensación, que incluye la inyección. Con relación a la energía reactiva, esta se utiliza para mejorar el rendimiento del sistema, específicamente para mantener el voltaje cerca de su valor nominal y reducir la corriente, contribuyendo así con la estabilidad del sistema.

El crecimiento de reactivos afecta la reducción del factor de potencia y el voltaje. Esto significa que el sistema eléctrico no compensado generará un consumo energético innecesario, que se refleja en la factura de la luz del usuario

final. La posición óptima de la compensación de potencia reactiva disminuye el número de compensadores, reduce la pérdida de SEP, aumenta el factor de potencia y reduce el consumo de energía del circuito del sistema.

Finalmente, se puede concluir que en el sistema eléctrico y la potencia reactiva es la principal causa de caída de tensión; por lo tanto, es muy importante controlar de manera efectiva y precisa el flujo de potencia reactiva de la red distribución, ya que esta puede afectar al correcto funcionamiento del SEP, perjudicando a los usuarios finales; considerando que la curva de demanda, se refiere a la cantidad de horas que el sistema tiene mayor carga.

8 REFERENCIAS

- [1] E. M. García Torres, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, "Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlo algorithms and Markov Chains (MCMC)," in *Power Engineering Conference (UPEC), 2016 51st International Universities*, 2016, no. Mcmc, pp. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114092.
- [2] N. Fernández and W. Figueredo, "Ubicación óptima de bancos de capacitores en redes de distribución," 2007.
- [3] D. D. Lucache, C. Moisa, and J. Lobry, "Economic appraisal of optimal location and sizing of capacitors in radial distribution systems using PSO," *2014 Int. Conf. Appl. Theor. Electr. ICATE 2014 - Proc.*, 2014, doi: 10.1109/ICATE.2014.6972626.
- [4] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez,

- R. C. Hincapié-Reyes, and J. W. González-Sánchez, "Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.
- [5] L. Haro and J. Oscullo, "Factor Anual de Emisión de CO₂ Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014 Annual CO₂ Emissi," *Rev. Politécnica-Marzo*, vol. 37, no. 1, 2009.
- [6] A. A. GONZALO GUTIÉRREZ, "Optima ubicacion y dimensionamiento de bancos de capacitores usando compensación Vol-Var en microredes eléctricas," *Univ. Politécnica Sales.*, 2018.
- [7] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. M. Kinawy, and M. T. Mouwafi, "Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 5, pp. 1209–1221, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0799.
- [8] M. Mosbah, R. D. Mohammadi, S. Arif, and A. Hellal, "Optimal of shunt capacitor placement and size in Algerian distribution network using particle swarm optimization," *Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016*, no. November, pp. 192–197, 2017, doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804297.
- [9] F. A. Castillo Muñoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, "Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795819.
- [10] N. E. Gomez Ramirez, "Metodología de gestión de potencia reactiva para mejorar el margen de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia descentralizados," p. 125, 2014.
- [11] M. Basantes, "DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DEL BARRIO " LA GARZOTA " , PARROQUIA CHILLOGALLO," p. 223, 2008.
- [12] E. Inga Ortega, D. Arias Cazco, V. Orejuela Luna, and J. Inga Ortega, "Comunicaciones celulares para medición inteligente de energía eléctrica en sistemas de distribución," *Ingenius*, no. 10, 2013, doi: 10.17163/ings.n10.2013.03.
- [13] D. Arturo and H. Re, "Análisis del proyecto de compensación de energía reactiva en baja tensión, implementado por Electronoroeste SA," 2019.
- [14] R. M. Mujal Rosas, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*. 2002.
- [15] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746,

- Aug. 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00746.
- [16] D. B. Vasconcellos, I. P. Abril, and V. L. Martínez, “Modelación de los efectos de la compensación de potencia reactiva en sistemas de suministro eléctrico,” *Ingeniare*, vol. 20, no. 2, pp. 160–169, 2012, doi: 10.4067/s0718-33052012000200003.
- [17] G. Gutierrez, A. Aguila, D. González, and L. Ortiz, “Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 3, pp. 465–472, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082717.
- [18] M. L. Viracocha Chicaiza, “Óptimo Dimensionamiento Y Ubicación De Bancos De Capacitores En Redes De Distribución Usando Algoritmo De Colonia De Hormigas,” 2018.
- [19] S. M. Medina and A. Aguila, “Óptima Compensación de Potencia Reactiva en Redes de Distribución Radiales considerando periodo de diseño Optimal Compensation of Reactive Power in Radial Distribution Networks considering design period,” *2019 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 108–115, 2019, doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00026.
- [20] A. A. Z. Diab, V. N. Tulskey, and M. A. Tolba, “Optimal shunt capacitors sittings and sizing in radial distribution systems using a novel hybrid optimization algorithm,” *2016 18th Int. Middle-East Power Syst. Conf. MEPCON 2016 - Proc.*, pp. 445–452, 2017, doi: 10.1109/MEPCON.2016.7836929.
- [21] S. Raúl and R. Rodríguez, “Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores y estudio de optimización de la solución mediante búsqueda exhaustiva,” *Visión Electrónica*, vol. 1, no. 1, pp. 71–80, 2008.
- [22] A. A. Téllez, A. Robayo, I. Isaac, G. López, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living energy Transit.*, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [23] A. Aguila and J. Wilson, “Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
- [24] C. Álvarez, “Manejo De Reserva De Potencia Reactiva Mediante Un Sistema De Control Jerárquico Distribuido.,” *Manejo Reserv. Potencia React. Median. Un Sist. Control Jerárquico Distrib.*, vol. 1, no. 21, pp. 7–13, 2003, doi: 10.22517/23447214.7491.
- [25] G. Campusano, “Impacto de la Generación Distribuida en la Operación de la Distribución,” *Impacto La Gener. Distrib. En La Operacion La Distrib.*, vol. 1, no. 1, p. 82, 2013, doi: 10.1007/978-1-61779-080-5_8.
- [26] J. Rojas and A. Águila, “Óptima

Compensación De La Potencia
Reactiva En Redes De
Distribución Eléctrica Basado En
Simulated Annealing,”
Univerisdad Politécnica Sales.,
2017.

- [27] S. Briones, D. Olmedo, P. Massuh, and F. Ismael, “INGENIERO ELÉCTRICO TEMA :,” 2019.
- [28] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” in *PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention*, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378.
- [29] CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), “Estudio y Gestión de la Demanda Eléctrica,” *Plan Maest. Electríf. 2013-2022*, vol. 2, p. 206, 2013.
- [30] J. Garcia, “Cómo Reducir la Factura de Energía Eléctrica Corrigiendo el Factor de Potencia,” no. 01, pp. 1–7, 2013.
- [31] F. Glover and B. Batista, “Introducción a la Búsqueda Tabu,” vol. 1, pp. 1–36, 2000.
- [32] E. Y. S. RODRÍGUEZ, “UBICACIÓN ÓPTIMA DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE MEDIA TENSIÓN,” 2010.
- [33] J. C. Galvis, “Aplicación Del Algoritmo De Búsqueda Tabú Al Problema De Despacho Hidrotérmico,” *Sci. Tech.*, vol. XI, no. 29, pp. 25–30, 2005, doi: 10.22517/23447214.6617.

8.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 12. Matriz de estado del arte

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
				COMPENSADO DE LA CARGA	DEMANDA	DISTRIBUCIÓN	TABU SEARCH	COMPENSACIÓN REACTIVA	VARIABLE DINAMIA	UBICACIÓN DE CAPACITORES	MEJORA DEL COSTO	DISMINUIR LOS COSTOS	RESTRICCIÓN DE BALANCE	RESTRICCIÓN DE CARGA	RESTRICCIÓN DE TENSION	LIMITACIÓN DE LOS RECURSOS	MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA	BUSQUEDA DE ALGORITMO	BANCO DE CAPACITORES	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	METAHEURÍSTICA	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN	MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA	FACTOR DE POTENCIA	CONTROL DE TENSION	BUSQUEDA DE ALGORITMO
1	2015	UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE	1	X				X		X	X	X		X		X	X	X		X	X		X			
2	2007	UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA ELEVAD	2	X		X		X			X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X		
3	2014	ECONOMIC APPRAISAL OF OPTIMAL LOCATION AND SIZING OF CAPACITORS IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING PSO	1	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X			
4	2017	MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE DEPLOYMENT OF A GRID FOR RURAL ELECTRIFICATION BASED ON A HEURISTIC METHOD	2			X				X		X	X	X		X			X	X				X		
5	2009	FACTOR ANUAL DE EMISIÓN DE CO2 PRODUCIDO POR EL PARQUE GENERADOR DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DEL ECUADOR, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA CONVENCIÓN MARCO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO UNFCCC	1		X	X	X									X				X	X					
6	2018	ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE BANCOS DE CAPACITORES USANDO COMPENSACIÓN VOLT-VAR EN MICRO-REDES ELÉCTRICAS	1	X				X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X		
7	2016	OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT IN DISTRIBUTION SYSTEMS FOR POWER LOSS REDUCTION AND VOLTAGE PROFILE IMPROVEMENT," IET GENER. TRANSM. DISTRIB.	1	X	X			X			X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	
8	2017	OPTIMAL OF SHUNT CAPACITOR PLACEMENT AND SIZE IN ALGERIAN DISTRIBUTION NETWORK USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	1	X				X		X	X	X	X	X			X	X	X			X	X	X		
9	2015	ANALYSIS OF POWER LOSSES IN THE ASYMMETRIC CONSTRUCTION OF ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEMS	3		X	X					X	X	X			X	X	X	X			X	X	X		
10	2014	METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE POTENCIA REACTIVA PARA MEJORAR EL MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DESCENTRALIZADOS	3	X	X			X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X			
11	2008	DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DEL BARRIO "LA GARZOTA & QUOT	1		X	X		X															X	X		
12	2016	MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE BANCO DE CONDENSADORES EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL	1	X	X	X		X			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X		
13	2019	ANÁLISIS DEL PROYECTO DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN BAJA TENSIÓN, IMPLEMENTADO POR ELECTRONOROESTE SA	7	X	X			X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		
14	2002	CÁLCULO DE LÍNEAS Y REDES ELÉCTRICAS	1		X	X						X											X	X		
15	2018	OPTIMAL REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS WITH DISTRIBUTED RESOURCES. REVIEW	1	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X		
16	2012	MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	1	X	X			X			X					X	X	X	X		X	X	X	X		
17	2020	OPTIMUM LOCATION AND SIZING OF CAPACITOR BANKS USING VOLT VAR COMPENSATION IN MICRO-GRIDS	1	X				X			X			X		X	X	X	X			X	X	X		
18	2018	PTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN USANDO ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS	3	X		X		X			X	X	X			X	X	X	X		X	X	X	X		
19	2019	ÓPTIMA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN RADIALES CONSIDERANDO PERIODO DE DISEÑO OPTIMAL COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS CONSIDERING DESIGN PERIOD	1	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X		
20	2017	OPTIMAL SHUNT CAPACITORS SITTINGS AND SIZING IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING A NOVEL HYBRID OPTIMIZATION ALGORITHM	2	X	X	X		X			X	X	X						X			X	X	X	X	
21	2008	ESTADO DEL ARTE EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE CAPACITORES Y ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA	4	X			X	X		X	X	X	X			X	X	X	X		X	X	X	X	X	
22	2019	OPTIMAL SIZING OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING EXHAUSTIVE SEARCH ALGORITHM	1			X	X			X			X	X			X	X	X			X	X	X	X	
23	2017	TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF MEASURES FOR REDUCING ENERGY LOSSES IN DISTRIBUTION SYSTEMS	1	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	
24	2003	MANEJO DE RESERVA DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL JERÁRQUICO DISTRIBUIDO	1			X		X			X			X		X	X	X	X			X	X	X	X	
25	2013	IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA OPERACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN	1			X		X			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	
26	2016	ÓPTIMA COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA BASADO EN SIMULATED ANNEALING	1	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	
27	2016	ANALYSIS OF STABILITY OF TENSION AND LOSSES OF ELECTRIC POWER IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION	1					X			X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	
28	2019	ESTUDIO DE LA PROYECCIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE CNEL E	1	X	X			X			X	X	X		X	X	X	X	X			X	X	X	X	
29	2015	RESPONSE OF RESIDENTIAL ELECTRICITY DEMAND AGAINST PRICE SIGNALS IN ECUADOR	1	X	X	X		X			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	
30	2013	ESTUDIO Y GESTIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA	1	X	X	X		X			X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	
31	2013	CÓMO REDUCIR LA FACTURA DE ENERGÍA ELÉCTRICA CORRIENDO EL FACTOR DE POTENCIA	2	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	
32	2000	INTRODUCCIÓN A LA BUSQUEDA TABU	6				X			X					X				X						X	
33	2010	UBICACIÓN ÓPTIMA DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE MEDIA TENSIÓN	1		X	X		X			X	X	X	X			X	X	X			X	X	X	X	
34	2005	APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ AL PROBLEMA DE DESPACHO HIDROTÉRMICO	1		X	X	X		X			X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	
Total			58	22	13	20	4	26	6	21	25	27	21	3	25	23	24	6	17	15	15	15	25	27	26	8

8.2 Resumen de Indicadores

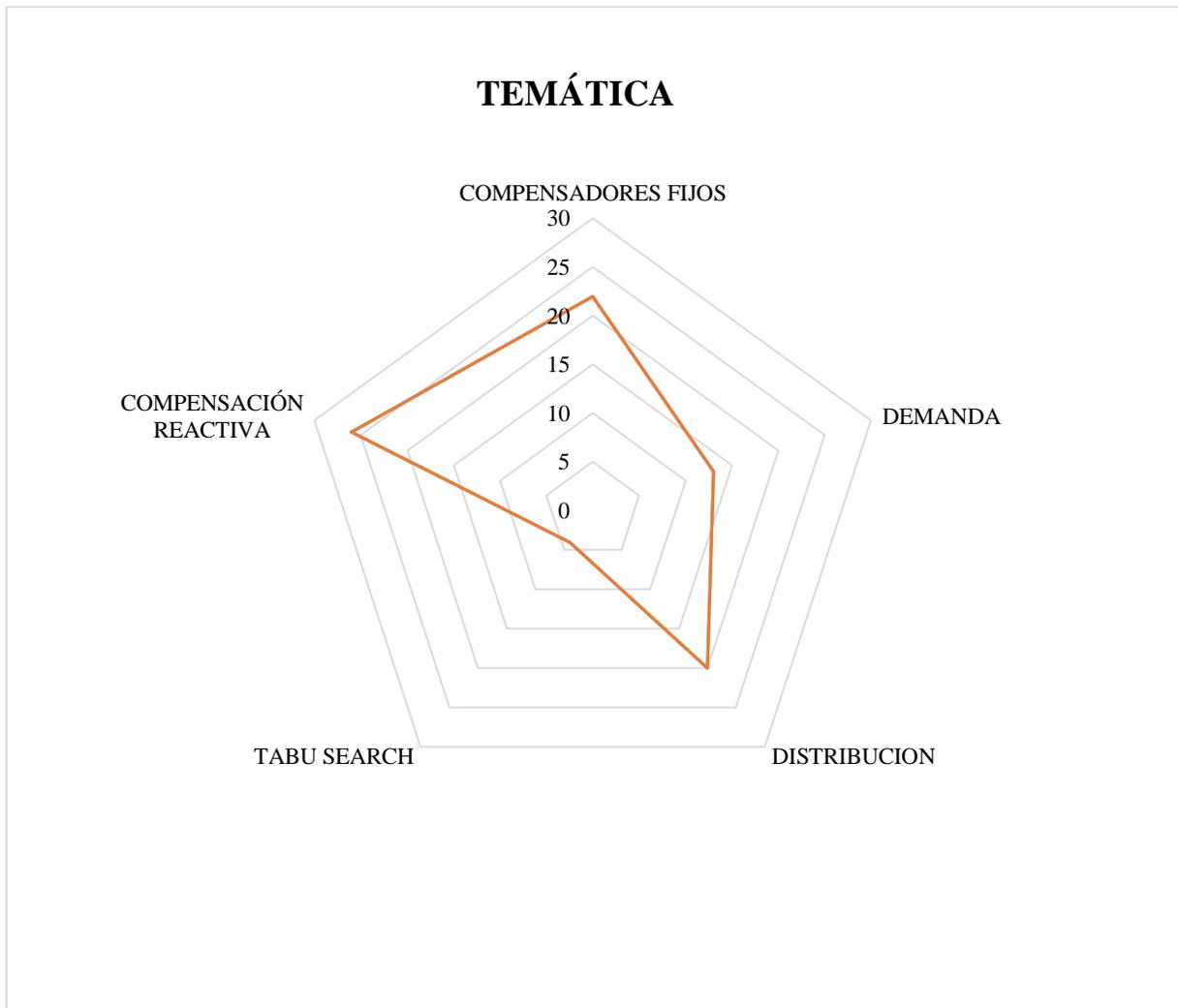


Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

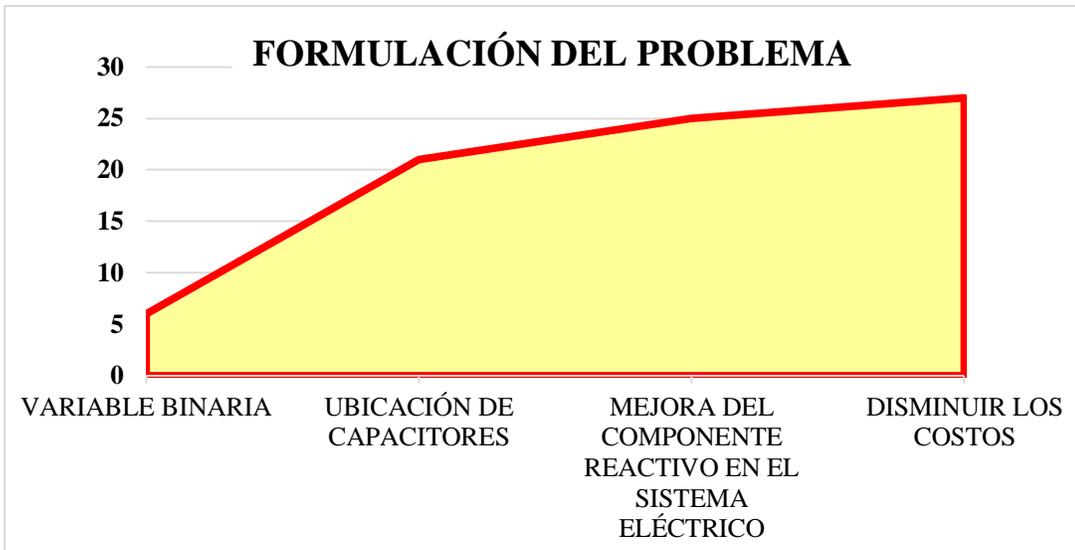


Figura 24. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

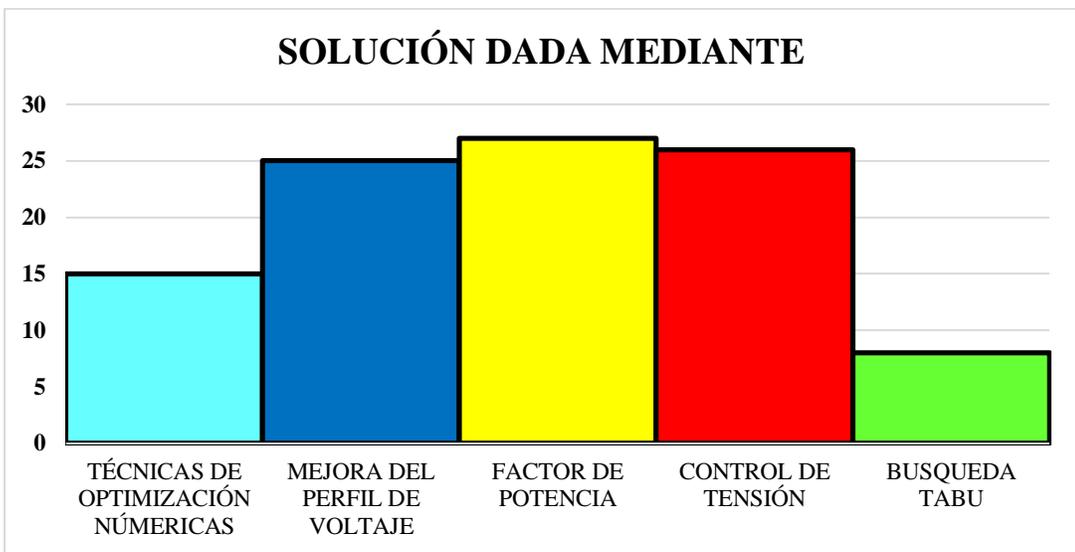


Figura 25. Indicador de solución - Estado del arte