

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE  
VOLTAJE**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
ÓPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE  
VOLTAJE**

**AUTOR:  
LENIN FABRICIO CHILLÁN SACANCELA**

**DIRECTOR:  
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

**Quito, Septiembre 2020**



Lenin Fabricio Chillan Sacancela

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE  
VOLTAJE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Lenin Fabricio Chillan Sacancela** (Y'1995-M'03). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Don Bosco, se graduó de bachiller Técnico Industrial en Electricidad y Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en la óptima ubicación de SVC en sistemas de Distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje.

[lchillan@est.ups.edu.ec](mailto:lchillan@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Manuel Dario Jaramillo Monge** (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

[mjaramillo@ups.edu.ec](mailto:mjaramillo@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, Manuel Darío Jaramillo Monge declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*OPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE*” realizado por Lenin Fabricio Chillán Sacancela, 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



.....

Darío Manuel Jaramillo Monge

C.C.: 1714298005

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Lenin Fabricio Chillán Sacancela, con documento de identificación N° 1727315523, 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: “*OPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE*”, 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.



.....  
Lenin Fabricio Chillán Sacansela  
C.C.: 1727315523  
Quito, D.M., Septiembre de 2020

## ÍNDICE GENERAL

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....  | 1  |
| Abstract .....   | 1  |
| 1    Introducción .....  | 2  |
| 2    Marco teórico .....   | 4  |
| 2.1  Equipos de compensación de potencia reactiva .....                                      | 4  |
| 2.2  Compensación Shunt .....  | 5  |
| 2.2.1  Condensadores Shunt .....   | 5  |
| 2.2.2  Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC) .....                              | 5  |
| 2.2.3  Compensadores estático (STATCOM) .....  | 7  |
| 2.3  Compensación en Serie .....   | 7  |
| 2.3.1  Condensador Serie .....   | 7  |
| 2.4  Flujos de Potencia .....  | 8  |
| 2.4.1  Función Objetivo .....  | 9  |
| 2.4.2  Restricciones .....   | 10 |
| 3    Planteamiento del Problema .....  | 11 |
| 3.1  Formulación del problema .....  | 11 |
| 3.2  Búsqueda Exhaustiva .....   | 11 |
| 3.3  Procedimiento de resolución .....   | 12 |
| 3.4  Sistemas Eléctricos de Prueba de la IEEE. ....  | 13 |
| 3.4.1  Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos. ....                                  | 13 |
| 3.4.2  Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos. ....                                  | 13 |
| 3.4.3  Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos .....                                  | 14 |
| 3.5  Casos de Estudio. ....  | 16 |
| Caso 1 .....   | 16 |
| Caso 2 .....   | 16 |
| Caso 3 .....   | 16 |
| 4    Análisis de resultados .....  | 16 |
| 4.1.1  Perfiles de voltaje del Sistema 13 Nodos de la IEEE. ....                             | 16 |
| 4.1.2  Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.<br>18 |    |
| 4.1.3  Perfiles de voltaje del Sistema 34 Nodos de la IEEE. ....                             | 18 |
| 4.1.4  Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.<br>19 |    |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.5 | Perfiles de voltaje del Sistema 37 Nodos de la IEEE.....                              | 20 |
| 4.1.6 | Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos.<br>21 |    |
|       | Conclusiones .....  | 21 |
| 4.2   | Trabajos futuros.....   | 22 |
|       | Referencias.....  | 22 |
| 4.3   | Matriz de Estado del Arte.....  | 26 |
| 4.4   | Resumen de Indicadores.....   | 30 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación Óptima del SVC en Sistemas de Distribución. ....   | 4  |
| Figura 2. Configuración TCR .....  | 6  |
| Figura 3. Configuración del TCS .....  | 6  |
| Figura 4. Curva P-V con conexión de SVC .....  | 7  |
| Figura 5. Diagrama de un STATCOM.....  | 7  |
| Figura 6. Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos. ....   | 12 |
| Figura 7. Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos. ....   | 13 |
| Figura 8. Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos. ....   | 14 |
| Figura 9. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos. ....                    | 15 |
| Figura 10. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos. ....                   | 16 |
| Figura 11. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos. ....                   | 16 |
| Figura 12. Diagrama de puntos de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. .... | 16 |
| Figura 13. Diagrama de barras de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. .... | 16 |
| Figura 14. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....   | 17 |
| Figura 15. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE sin SVC. ....   | 17 |
| Figura 16. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE con SVC. ....   | 17 |
| Figura 17. Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.....                                   | 18 |
| Figura 18. Pérdidas de Potencia del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.....  | 18 |
| Figura 19. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....   | 18 |
| Figura 20. Histograma del Sistema de 34 Nodos de la IEEE sin SVC. ....   | 19 |
| Figura 21. Histograma del Sistema de 34 Nodos de la IEEE con SVC. ....   | 19 |
| Figura 22. Pérdidas de Potencia del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....   | 19 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 23. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 37 Nodos de la IEEE. .... | 20 |
| Figura 24. Histograma del Sistema de 37 Nodos de la IEEE sin SVC. ....   | 21 |
| Figura 25. Histograma del Sistema de 37 Nodos de la IEEE con SVC. ....   | 21 |
| Figura 26. Pérdidas de Potencia del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. ....                                       | 21 |
| Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte .....  | 30 |
| Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....  | 31 |
| Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte .....   | 31 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Pseudocódigo de la Búsqueda Exhaustiva. ....  | 11 |
| Tabla 2. Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje. .... | 12 |
| Tabla 3. Datos del Generador del Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....  | 13 |
| Tabla 4. Datos de la red del Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....  | 13 |
| Tabla 5. Datos de los nodos del Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....   | 13 |
| Tabla 6. Datos del Generador del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....  | 13 |
| Tabla 7. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....  | 13 |
| Tabla 8. Datos de los nodos del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....   | 14 |
| Tabla 9. Datos del Generador del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. ....  | 15 |
| Tabla 10. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....   | 15 |
| Tabla 11. Datos de los nodos del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. ....  | 15 |
| Tabla 12. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 13 Nodos de la IEEE. ....   | 16 |
| Tabla 13. Valores comparativos del sistema de 13 nodos. ....   | 17 |
| Tabla 14. Valores comparativos del sistema de 34 nodos. ....   | 18 |
| Tabla 15. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. ....   | 19 |
| Tabla 16. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. ....   | 20 |
| Tabla 17. Valores comparativos del sistema de 37 nodos. ....   | 20 |
| Tabla 18. Matriz de estado del arte .....  | 26 |

# ÓPTIMA UBICACIÓN DE SVC EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA PARA MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE

## Resumen

La ubicación de compensadores en los sistemas de distribución puede incrementar la estabilidad del sistema, puede mejorar su robustez y brindar una mayor confiabilidad en el abastecimiento de la demanda y la calidad de suministro de electricidad, razón por la cual, es de mucha importancia realizar estudios eléctricos sobre la incorporación de compensadores en redes de distribución. Con lo mencionado anteriormente, se puede describir que el presente trabajo establecerá un modelo de optimización el cual tiene la finalidad de buscar la ubicación óptima de SVC en sistemas eléctricos de distribución mediante búsqueda exhaustiva con el fin de mejorar los perfiles de voltaje en base a la compensación reactiva que inyecta el SVC al sistema. El modelo de optimización será resuelto en el software de optimización GAMS mediante flujos óptimos de potencia y posteriormente simulado en MATLAB-SIMULINK el cual es un software de programación visual con el propósito de validar resultados entre ambos simuladores. Las variables eléctricas como resultado de la optimización y de la simulación permitirán evaluar la mejora de los perfiles de voltaje, la minimización de pérdidas de potencia y la mejora de los flujos de potencia reactiva para cada de estudio que se llevarán a cabo en los sistemas eléctricos planteados para la investigación.

**Palabras Clave:** Compensación Reactiva, Flujos óptimos de potencia, Perfiles de voltaje, Flujos de potencia reactiva, Técnicas de optimización.

## Abstract

The location of compensators in distribution systems can increase the stability of the system, improve its robustness and provide greater reliability in supplying the demand and the quality of electricity supply, which is why it is very important to carry out studies electricity on the incorporation of compensators in distribution networks.

With the aforementioned, it can be described that this work will establish an optimization model which has the purpose of finding the optimal location of SVC in electrical distribution systems through exhaustive search in order to improve the voltage profiles based on the reactive compensation that injects the SVC into the system. The optimization model will be solved in the GAMS optimization software using optimal power flows and later simulated in MATLAB-SIMULINK which is a visual programming software with the purpose of validating results between both simulators. The electrical variables as a result of the optimization and simulation will allow to evaluate the improvement of the voltage profiles, the minimization of power losses and the improvement of the reactive power flows for each study that will be carried out in the electrical systems raised for research.

**Keywords:** Reactive Compensation, Optimal power flows, voltage profiles, reactive power flows, optimization techniques.

# 1 Introducción

Un sistema eléctrico está conformado por tres áreas muy importantes: fuentes de generación, los sistemas de transmisión y los sistemas de distribución de electricidad. Dentro de este contexto se puede advertir que el sistema de distribución no ha sido analizado con la misma profundidad que los demás componentes del sistema eléctrico. Todo esto por causa de las grandes inversiones que requieren las líneas de transmisión y las centrales de generación, donde se debe contar con los recursos suficientes en estudios previos a su construcción [1].

Los sistemas de distribución, se proyectan y se amplían progresivamente, con pocos cambios en su infraestructura, con el propósito de garantizar la calidad del servicio para la carga presente y futura al menor costo de operación [2]. Un método para incrementar la capacidad de distribución es la implementación de fuentes de potencia reactiva [3].

La compensación reactiva es una de las técnicas más empleadas para aumentar los perfiles de voltaje y estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), de esta manera se presentan como una solución práctica y económica con respecto a la instalación de nuevas centrales.

Los flujos de potencia reactiva que inyectan los compensadores tienen como ventajas la minimización de las pérdidas de potencia activa y reactiva, y la mejora del factor de potencia sobre los sistemas de distribución. Para realizar el control de potencia reactiva se puede lograr mediante el uso de dispositivos de compensación como, capacitores en paralelo, inductores en paralelo, capacitores en serie, compensadores

estáticos (SVC), transformadores con cambio de taps y reguladores automáticos de voltaje (AVR) [4].

La compensación de potencia reactiva ha ido creciendo en relevancia por razones como:

Debido a los costos altos de combustibles se debe disponer de sistemas eléctricos que operen de manera eficiente para una red de distribución, con el fin de reducir las pérdidas mediante la minimización del flujo de reactivos.

El voltaje se considera como un parámetro referencial acerca de la calidad del servicio, su disminución de un valor normal puede ser costosa y perjudicial.

La ubicación de un equipo compensador de potencia reactiva conlleva a realizar un estudio técnico-económico, para determinar qué tipo de compensador se va a implementar dependiendo las características del sistema y las funciones de cada compensador, con el objetivo de optimizar los costos de instalación y las pérdidas de potencia [5]. Existen diferentes dispositivos de compensación de potencia reactiva como:

Los dispositivos electrónicos de potencia conocidos como Sistemas Flexibles (FACTS), los cuales brindan al sistema

mayor confiabilidad, y un incremento mayor en la capacidad de transferencia de energía eléctrica [6].

Dentro de los dispositivos de compensación se encuentra también el compensador estático (SVC), pero a diferencia de los otros tiene un menor costo por lo cual es la mejor opción para ser implementado en el sistema. Una de las características que tienen los SVC, es su rápida acción al compensar potencia reactiva en el SEP, brindando un control

de voltaje de forma muy rápida y eficiente [7] [8] [9].

Entre algunas de las técnicas de optimización para la ubicación óptima de compensadores se tiene un método basado en la búsqueda de armonía. En [10] se utiliza este método con el fin de determinar la ubicación y la cantidad de dispositivos compensadores síncronos estáticos (STATCOM), que pueden ser instalados en un sistema eléctrico, además este método es capaz de minimizar las pérdidas de potencia en dicho sistema.

Otro método para la implementación de compensadores se trata del algoritmo genético (GA), que mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI), puede buscar la implementación óptima y las características del tamaño de distintos tipos de FACTS, en amplios sistemas. El GA se utiliza para hallar las clasificaciones y ubicaciones de los equipos FACTS, el objetivo de este algoritmo es maximizar la capacidad de carga estática del sistema. Los dispositivos que se escogen para este método son: SVC, TCPST, TCSC, TCVR y UPFC [11].

El algoritmo de búsqueda de armonía global, es otra técnica para establecer el tamaño y la ubicación de compensadores de potencia reactiva de derivación, como STATCOM y SVC. Esta técnica permite mayor reducción de pérdidas de energía, como también mejorar la estabilidad de voltaje y minimizar el costo de instalación asociados a estos equipos, además que converge de forma más rápida que los métodos PSO y IHS [12].

El índice de sensibilidad a la pérdida (LSI) se emplea para determinar la ubicación óptima de FACTS, este método se basa en reducir la pérdida total de energía en el sistema, asimismo incrementa los perfiles de voltaje, los

flujos de energía y la capacidad de transferencia (ATC) [13].

Los algoritmos evolutivos es otra técnica empleada en la ubicación de compensadores. La evolución natural es un proceso de optimización basado en poblaciones, estos algoritmos se diferencian de los métodos convencionales de optimización en el tratamiento de la función objetivo y las restricciones de manera conjunta [14].

Para realizar la ubicación óptima de compensadores mediante los métodos mencionados anteriormente se debe realizar flujos de potencia, con el cual se puede obtener ventajas como: incorporar varios criterios de operación del sistema, ingresar diferentes variables de control (voltajes en los nodos de generación), implementar limitaciones eléctricas reales de operación y realizar un análisis preciso de las pérdidas en el sistema.

Los flujos de potencia permiten determinar voltajes y ángulos en los nodos, potencia activa y reactiva que están inyectando los generadores y flujos de potencia en las líneas de transmisión.

Este método también facilita un retrato flujos de potencia activa y reactiva reales y precisos junto con el perfil de voltaje de la red [12], [15]–[17]. Con los métodos y mencionados y lo FOP se busca implementar SVC a sistemas eléctricos con el propósito de aumentar los perfiles de voltaje en los nodos del sistema.

El diagrama esquemático para la ubicación óptima de SVC en sistemas de distribución se muestra en la Figura 1, en la cual se puede visualizar la implementación de estos equipos, los cuales darán al sistema una mejora en los perfiles de voltaje y ángulos en los nodos, también se logra con estos compensadores beneficiar el componente reactivo en la red de distribución.

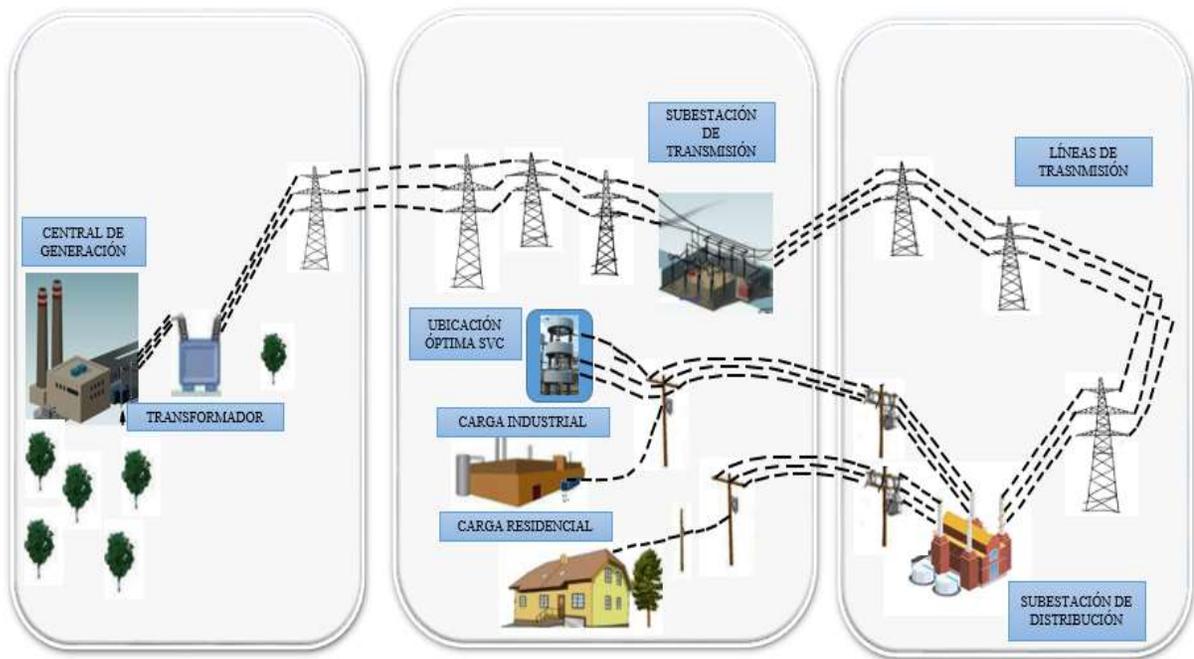


Figura 1. Ubicación Óptima del SVC en Sistemas de Distribución.

El trabajo se distribuye así: En la Sección 1: introducción y antecedentes; Sección 2: contiene un marco teórico con el resumen de los compensadores de reactivos; Sección 3: flujos de potencia; Sección 4: Planteamiento del problema en donde se tiene el algoritmo de las funciones objetivos, las variables y restricciones; Sección 5: análisis de resultados y, últimamente conclusiones y trabajos futuros.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Equipos de compensación de potencia reactiva

Los equipos de compensación reactiva instalados en un sistema eléctrico mejoran los perfiles de voltaje de la red, disminuyen las corrientes en las líneas, así como las pérdidas y proporcionan una mayor estabilidad y confiabilidad al sistema de potencia [14].

La compensación reactiva es un método empleado en recientes años. Las ubicaciones óptimas de estos dispositivos permiten suavizar los perfiles de voltaje en zonas en donde el sistema tenga sobrecargas, ya sea causado por la impedancia inductiva de las líneas de transporte o distribución de electricidad, o las cargas propias de líneas [18].

A causa de los problemas que ocasiona una gran cantidad de reactivos en el sistema, existen distintos métodos de compensación, algunos de ellos son:

Compensación en serie: esta compensación puede ser del tipo capacitiva, la cual se ejecuta mediante el uso de bancos de condensadores en serie, localizados en el extremo o al centro de la línea, o también del tipo inductiva, la cual al aumentar la reactancia en la línea reduce la capacidad de transferencia por la línea [19].

Compensación Shunt: este tipo de compensación se realiza mediante el uso de reactores o condensadores en paralelo. Al utilizar los condensadores, estos disminuyen la caída de voltaje en la línea, también reducen las pérdidas en los dispositivos y componentes del sistema y se tiene una mejora en el factor de potencia. En cambio, al utilizar reactores se dice que estos equipos absorben el componente reactivo con el fin de reducir sobrevoltajes en vacío [19].

Compensación Mixta: esta compensación es la que emplea los dos tipos de compensación mencionadas anteriormente [19].

Los compensadores también se clasifican según su control, estos pueden ser fija o variables [20].

- Fija: Se emplea en el caso que la curva de carga que se quiere compensar es de una característica plana. En este control la potencia reactiva se entrega de forma constante al sistema.
- Variable: este control, es el tipo de compensación que abastece la potencia activa, según las exigencias de la red. Se utiliza cuando la curva de carga tiene una conducta variable durante el transcurso del día. Este tipo de compensación se ha diseñado para conectarse y desconectarse muchas veces de manera que pueda acoplarse según los requerimientos del sistema.

## 2.2 Compensación Shunt

Esta compensación puede ser implementada cerca de la carga, en una subestación de transmisión o a su vez en una subestación de distribución.

También se caracteriza ya que puede ser del tipo inductiva o del tipo capacitiva, pero dado que en muchos

casos las carga son comúnmente inductivas, esta compensación es usualmente capacitiva.

### 2.2.1 Condensadores Shunt

Los condensadores shunt son dispositivos empleados a nivel de subestaciones por las siguientes causas:

- Aumenta de la capacidad de los equipos: Mediante la compensación shunt con bancos de condensadores se disminuye la cargabilidad en las líneas, generadores y transformadores, razón por la cual se emplean para transportar más potencia sin causar daños en los equipos o sobrecargas [21].
- Disminuye las pérdidas: Al inyectar reactivo a la carga con un factor de potencia inductivo, hace que se mejore y se reduzcan las pérdidas de corriente que circulan con destino a las líneas de transmisión de alta tensión [22].

Estos equipos son idóneos para ser usados en subestaciones de media o baja tensión, en donde se necesite compensar al factor de potencia [23].

### 2.2.2 Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC)

Los compensadores estáticos de potencia reactiva, SVC, son dispositivos de compensación reactiva, al igual que los bancos de condensadores, cuya operación de conectarse y desconectarse está controlada por dispositivos de control, conocidos como tiristores. A diferencia de los bancos de condensadores, estos elementos actúan al instante mejorando la estabilidad de voltaje del sistema de manera instantánea [24].

Los SVC empezaron a emplearse desde los años 70. Hoy en día se los puede encontrar instalados en sistemas de transmisión y redes de distribución. Como aplicaciones importantes de estos dispositivos se tiene: aumento de la estabilidad transitoria, previsión del colapso de tensiones, control de sobrevoltajes temporales, balance de potencia en sistemas desequilibrados, y atenuación de las oscilaciones electromecánicas en la red de transporte [25].

Estos dispositivos tienen un control de voltaje de una manera continua y muy rápida, este proceso se basa en la compensación o por medio de la absorción de reactivos [26]. El SVC debe ubicarse en los nodos en donde existan caídas de voltaje considerando ciertos parámetros como la cantidad de potencia reactiva que se va a inyectar y el nivel de voltaje aceptado en el nodo [27]. Algunas de las funciones del SVC es estabilizar el balanceado de carga y voltaje mediante la inyección de reactivos, mantener el factor de potencia dentro de los valores deseados, la mitigación de los armónicos [28]. Existen dos tipos de topologías para este compensador [29]:

- Reactancia controlada por tiristores (TCR): este diagrama se visualiza en la Figura 2. Configuración TCR, el cual muestra un sistema equivalente formado por un condensador en paralelo con una resistencia variable. Para controlar los ciclos de conducción, este control emplea 2 tiristores en antiparalelo, cuyo ángulo de disparo se acopla para cambiar el elemento esencial de la frecuencia de la corriente que fluye en este equipo.

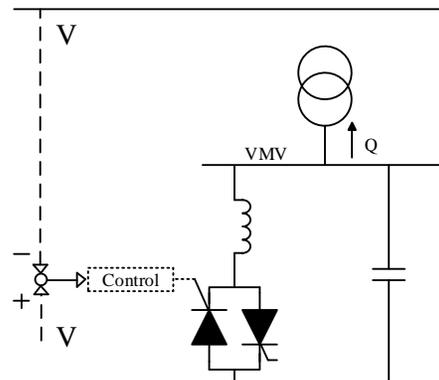


Figura 2. Configuración TCR

- Condensador Conmutado por Tiristores: En la Figura 3. Configuración del TCS, se tiene esta configuración en la cual el banco de condensadores se une al sistema eléctrico mediante tiristores. Esta es una de las configuraciones más sencillas, para el uso de equipos compensadores de potencia reactiva. Para conectar y desconectarlos los condensadores que integran el banco se hace por medio de dos tiristores conectados en antiparalelo, uno para cada ciclo de conducción, ya que los tiristores se controlan mediante una señal de disparo.

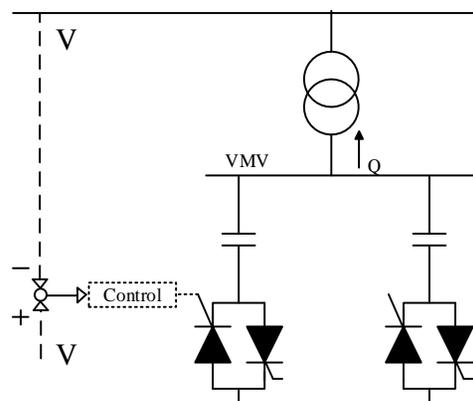


Figura 3. Configuración del TCS

En la Figura 4. Curva P-V con conexión de SVC se muestra la curva PV perteneciente a la red en la cual se ha implementado un SVC para inyectar

potencia reactiva. Para ello, los tiristores realizan el control del ángulo de disparo permitiendo mantener el voltaje de operación del sistema al valor de consigna.

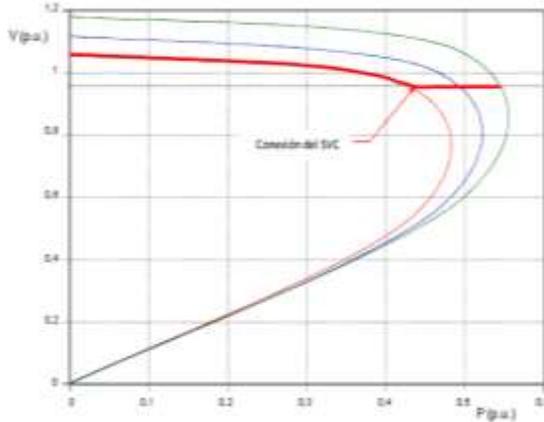


Figura 4. Curva P-V con conexión de SVC

### 2.2.3 Compensadores estático (STATCOM)

Los STATCOM son dispositivos que se pueden utilizar tanto en sistemas de distribución como en sistemas de transmisión con el fin de controlar el voltaje, mejorar el fp. Entre algunas de las características de este compensador se tiene [30]:

- Cuando se tiene voltajes muy bajos, este dispositivo es capaz de aportar corriente reactiva, con lo cual alivia los voltajes en condiciones de valores enormemente bajos [31].
- Estos dispositivos son ideales para el control de voltaje ya que tienen una capacidad rápida de respuesta y una habilidad para abastecer corriente capacitiva constante [32].

Los STATCOM pueden ser usados en donde se requiera: control y regulación efectivo del voltaje, disminución de sobrevoltajes temporales, incremento del margen de

estabilidad y entre otros más usos que pueden brindar estos dispositivos [33].

La Figura 5. Diagrama de un STATCOM indica un diagrama de este equipo, que está compuesto por un convertidor electrónico, un componente que almacena energía y un sistema de control que mantiene el voltaje de la etapa de continua en un valor de voltaje constante de referencia. El STATCOM al igual que el SVC puede cambiar tanto potencia activa como potencia reactiva en el sistema.

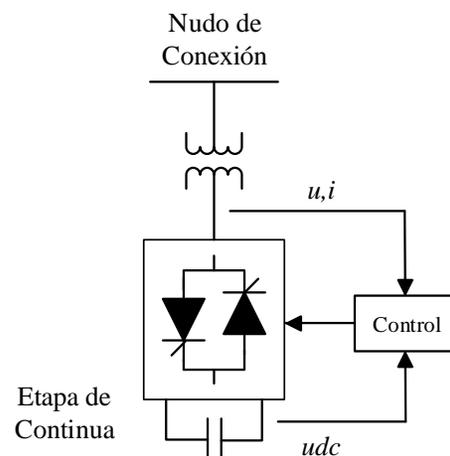


Figura 5. Diagrama de un STATCOM

## 2.3 Compensación en Serie

Es el método más claro de regulación de voltaje, pues al sumar una magnitud de voltaje regulable en fase con un voltaje que existe en un punto específico, se obtiene un voltaje de salida constante. Sin embargo, no se pueden eliminar las variaciones de voltaje, es decir, no se cambian los flujos de reactivos. A pesar de estos problemas, es un método seguro para regular el voltaje en los nodos de un sistema en los que la relación Q/V es alta, en otras palabras, cerca de la generación [34].

### 2.3.1 Condensador Serie

Los condensares al conectarse en serie con una línea, causan que la reactancia que resulta pueda ser de un valor negativo, positivo o nulo. Todo lo

anterior ocasiona que se reduzca la caída de voltaje a lo largo del sistema.

La disminución de reactancia en el sistema, ocasiona que los niveles de corto circuito aumenten en el sistema, lo que llevaría al uso de equipos más costosos que tengan la capacidad de tolerar estos niveles [35].

## 2.4 Flujos de Potencia

Los flujos de potencia son utilizados en los sistemas eléctricos con el fin de encontrar los valores de las variables eléctricas en un determinado escenario, tomando en cuenta las condiciones normales de funcionamiento y un régimen permanente [36]. Por medio de este estudio se obtiene los voltajes en todos los nodos y los flujos de potencia activa y reactiva por todos los elementos de un sistema de transmisión o distribución [37]. A continuación, se determinan las pérdidas de potencia activa y reactiva, y las corrientes de por cada uno de los elementos del sistema. Para lo cual se considera como datos de inicio, la inyección de potencia en todos los nodos de la red y el modelo eléctrico de la misma [38].

Para la resolución de los flujos de potencia se tienen que conocer ciertos parámetros de inicio como la impedancia de cada uno de los componentes y su reciprocidad con el sistema eléctrico, para ello se tiene que calcular la matriz de admitancia del sistema o conocida más como “Ybarra” [39].

A fin de obtener la matriz de admitancia, se utilizan las ecuaciones (1), (2) y (3). La matriz de admitancia está conformada por la admitancia mutua y la admitancia propia de cada elemento. La matriz de admitancia mutua ( $Y_{in}$ ) está expresada mediante la ecuación (4), cuya forma extendida se indica en la ecuación (5); de manera parecida, la admitancia propia se deduce aplicando la ecuación

(6), consiguiendo de esta manera la matriz de admitancia propia ( $Y_{ii}$ ) [40].

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} - j|Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = B_{ij} + jB_{ij} \quad (1)$$

$$B_{ij} = -\frac{x}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (2)$$

$$G_{ij} = \frac{R}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (3)$$

$$[Y_{in}] = -Y_{in} \angle \theta_{ij} \quad (4)$$

$$Y_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & 0 & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[Y_{ii}] = \sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (6)$$

La “Ybarra” descrita en la ecuación (7) se consigue como producto de las matrices parciales antes descritas, en la ecuación (8) se indica de forma matricial esta matriz [40].

$$[Y_{ij}] = [Y_{in}] + [Y_{ii}] \quad (7)$$

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La ecuación (9) es utilizada para determinar el voltaje de cada uno de los nodos [40].

$$V_i = V_i \angle \theta_i = |V_i| \cos \theta_i + j|V_i| \sin \theta_i \quad (9)$$

Se calcula la inyección de corriente de cada uno de los nodos con el fin de obtener los flujos de potencia activa y

reactiva; la cual resulta de la interrelación entre la matriz de voltajes de cada nodo y la matriz de admitancias, mediante el empleo de las ecuaciones (10) y (11) [40].

$$\begin{bmatrix} I_{ij} & \cdots & I_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{ij} & \cdots & I_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \cdots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -V_n Y_{in} & 0 & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \cdots & -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_i = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \dots Y_{in}V_n = Y_{ij}V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad (11)$$

$$P_i - Q_i = Y_{ii}V_i^2 + V_i * \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N V_i Y_{in} V_n \angle(\theta_{in} + \delta_n + \delta_i), i \in N \quad (13)$$

Al realizar el método matemático e determinar las componentes imaginarios y reales de la ecuación (13), se deducen las ecuaciones (14) y (15), las cuales ayudan a obtener la potencia activa y reactiva que fluye del nodo i hasta los otros nodos adyacentes [40].

$$P_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (14)$$

$$Q_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^N |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (15)$$

La determinación del balance nodal de potencia activa y reactiva se utilizan las ecuaciones (16) y (17) [40].

$$\sum P g_i - \sum P d_i = P_i(V, \delta) \quad (16)$$

$$\sum Q g_i - \sum Q d_i = Q_i(V, \delta) \quad (17)$$

Donde:

- $P_i$  Flujo de potencia activa del nodo i hacia los demás nodos adyacentes.
- $P g_i$  Potencia activa del generador ubicado en el nodo i.
- $P d_i$  Potencia activa de la carga ubicada en el nodo i.
- $Q_i$  Flujo de potencia reactiva del nodo i hacia los demás nodos adyacentes.
- $Q g_i$  Potencia reactiva del generador ubicado en el nodo i.
- $Q d_i$  Potencia reactiva de la carga ubicada en el nodo i.
- $V_i, V_k$  Voltaje en el nodo i y en el nodo k.
- $\delta_i, \delta_k$  Angulo de voltaje en el nodo i y en el nodo k.
- $g_{ii}$  ii-ésimo elemento de la matriz propia de conductancia nodal.
- $b_{ii}$  ii-ésimo elemento de la matriz propia de suceptancia nodal.
- $n$  Cantidad total de nodos del sistema.
- $g_{ik}$  ik-ésimo elemento de la matriz mutua de conductancia nodal.
- $b_{ik}$  ik-ésimo elemento de la matriz mutua de suceptancia nodal.

#### 2.4.1 Función Objetivo

La función objetivo se basa en minimizar los costos de implementación del SVC, como se muestra en la ecuación (18).

$$\min \sum_{j=1}^N b P g_j + \sum_{i=1}^N u_i Q_{svci} C_i \quad (18)$$

Donde:

- $P g_j$  Potencia activa del generador j
- $Q_{svci}$  Capacidad de potencia reactiva del compensador ubicada en el nodo i.
- $u_i$  Variable binaria de selección de ubicación del SVC
- $C_i$  Costo de la instalación del SVC en el nodo i

- $j$  Índice de generadores en el sistema  
 $i$  Índice de los nodos del sistema

## 2.4.2 Restricciones

### a. Restricción de balance de Potencia

Para el balance de potencia activa y reactiva, se considera el flujo de potencia de un nodo hacia otro, considerando que la potencia que ingresa a un nodo debe ser igual a la que está circulando en el propio nodo. La ecuación (19) y (20) indican estos balances:

$$\sum P_{g_j} - \sum P_{d_i} = \sum_{i=1}^n P_{i,k} \quad (19)$$

$$\sum Q_{g_j} - \sum Q_{d_i} + \sum Q_{com_i} = \sum_{i=1}^n Q_{i,k} \quad (20)$$

Donde:

- $P_{g_j}, Q_{g_j}$  Potencia activa y reactiva inyectada por el generador  $j$   
 $P_{d_i}, Q_{d_i}$  Potencia activa y reactiva que toma la carga ubicada en el nodo  $i$   
 $Q_{com_i}$  Potencia reactiva de compensación en el nodo  $i$ .  
 $P_{i,k}$  Flujo de Potencia activa y reactiva que va del nodo  $i$  al nodo  $k$  en el sistema  
 $Q_{i,k}$  Flujo de Potencia activa y reactiva que va del nodo  $i$  al nodo  $k$  para las líneas a ser conmutadas

### b. Restricción de límites de generación de potencia activa

Para los límites de generación de potencia activa y reactiva, se debe tener en cuenta que el generador no tiene que sobrepasar sus límites máximos de producción, la ecuación (21) y (21), muestran estos límites.

$$P_{gmin_j} \leq P_{g_j} \leq P_{gmax_j} \quad (21)$$

$$Q_{gmin_j} \leq Q_{g_j} \leq Q_{gmax_j} \quad (22)$$

### c. Restricción de flujo potencia activa y reactiva para las líneas

Los flujos de potencia activa y reactiva que circulan de un nodo hacia otro nodo del sistema, se indican en la ecuación (23) y (24), estas ecuaciones están establecidas según las leyes de Kirchhoff.

$$P_{i,k} = [V_i^2 \cdot g_{ii} - |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ii} \sin \delta_{ik})] \quad (23)$$

$$Q_{i,k} = [-V_i^2 \cdot b_{ii} - |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \delta_{ik} - g_{ik} \cos \delta_{ik})] \quad (24)$$

Donde:

- $P_{i,k}, Q_{i,k}$  Flujo de Potencia activa y reactiva que va del nodo  $i$  al nodo  $k$  para las líneas a ser conmutadas  
 $g_{ik}$   $ik$ -ésimo elemento de la matriz mutua de conductancia nodal de las líneas a ser conmutadas  
 $g_{ii}$   $ii$ -ésimo elemento de la matriz propia de conductancia nodal de las líneas a ser conmutadas  
 $b_{ik}$   $ik$ -ésimo elemento de la matriz mutua de susceptancia nodal de las líneas a ser conmutadas  
 $g_{ii}$   $ii$ -ésimo elemento de la matriz propia de susceptancia nodal de las líneas a ser conmutadas  
 $V_i, V_k$  Voltaje en el nodo  $i$  y en el nodo  $k$ .  
 $\delta_i, \delta_k$  Angulo de voltaje en el nodo  $i$  y en el nodo  $k$ .

### d. Restricción de límites de voltaje

Con el propósito que el sistema opere de manera estable, se considera límites de voltaje mínimos y máximos. La ecuación (25) nos indica estos límites.

$$V_{min_i} \leq V_i \leq V_{max_i} \quad (25)$$

Donde:

- $V_i$  Voltaje en el nodo  $i$ .

e. Restricción de los ángulos en los nodos

Esta restricción ayuda al sistema a garantizar su operación, mientras el ángulo de cada nodo se mantenga dentro de un rango permisible.

$$\delta_{min_i} \leq \delta_i \leq \delta_{max_i} \quad (26)$$

Donde:

$\delta_i$  Ángulo en el nodo i.

### 3 Planteamiento del Problema

#### 3.1 Formulación del problema

Para el presente trabajo de estudio, se hará el uso del modelo de optimización con el fin de obtener la ubicación óptima del SVC en los sistemas de distribución de prueba del IEEE de 13, 34 y 37 nodos para el efecto se hará uso de los algoritmos de búsqueda exhaustiva que contiene el GAMS en sus solvers.

El modelo de optimización busca la ubicación de SVC en el sistema mediante la búsqueda exhaustiva. Este modelo se ajusta a conjunto de restricciones de balance potencia activa y reactiva, límites mínimos y máximos de voltaje, restricciones de los flujos de potencia de un nodo hacia otro nodo y restricciones de límites de los ángulos.

El modelo de optimización, el cual contiene las restricciones y la función objetivo del problema, se asocia a una Programación no Lineal Entera Mixta (MINLP) cuya solución se la realizará en el software General Algebraic Modeling System).

La segunda parte del trabajo de estudio se basa en realizar las simulaciones de los sistemas de prueba en el software Matlab Simulink, el cual es un entorno de programación de más

alto nivel. Una vez realizadas las simulaciones en los dos softwares se validará los resultados obtenidos.

#### 3.2 Búsqueda Exhaustiva

La búsqueda exhaustiva es una de las soluciones más antiguas y a la vez unos de los métodos más exactos, debido a que puede aplicarse en varios problemas. Este método se basa en generar ordenadamente varias combinaciones posibles y evaluarlas dentro de un espacio de búsqueda factible. Esta es una técnica sencilla y muy factible para problemas denominados P, cuyo tiempo aumenta de manera polinomial.

El solver BONMIN (Basic Open-source NonlinearMixed Integer programming) es un solucionador de código abierto para la programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) que se encuentra dentro de las librerías de GAMS. Este solver es un algoritmo simple de ramificación y vinculación basado en la resolución de un programa continuo no lineal en cada nodo del árbol de búsqueda y la ramificación en variables enteras.

Para la implementación del SVC en el sistema de distribución se utiliza el solver BONMIN basado en la búsqueda exhaustiva, la Tabla 1. Pseudocódigo de la Búsqueda Exhaustiva. indica la estructura que cumple el algoritmo de búsqueda exhaustiva.

Tabla 1. Pseudocódigo de la Búsqueda Exhaustiva.

|        |  |
|--------|--|
| Paso 1 | Inicio   |
| Paso 2 | $i$ = primer nodo del espacio factible             |
| Paso 3 | mejor= f(i), solución=i                            |
| Paso 4 | Hacer hasta $i$ = ultimo nodo del espacio factible |
| Paso 5 | $i$ = siguiente nodo del espacio factible          |
| Paso 6 | prueba = f(i)                                      |
| Paso 7 | si prueba < mejor entonces                         |
| Paso 8 | mejor=prueba, solución= i                          |
| Paso 9 | Fin si   |

|         |         |
|---------|---------|
| Paso 10 | Repetir |
| Paso 11 | Fin     |

### 3.3 Procedimiento de resolución

Con el propósito de solucionar el modelo de optimización, se hará el uso del software GAMS, en el cual se ingresarán los datos de cada uno de los sistemas de prueba como lo son los datos de las líneas de transmisión, de los generadores y las cargas existentes en cada nodo. El software mediante un flujo óptimo de potencia resolverá el modelo de optimización para así poder determinar la ubicación óptima del SVC en los distintos sistemas. Como resultado de la optimización se conocerá el nodo o los nodos en donde implementará el SVC y también se determinarán los valores de las variables eléctricas de los sistemas de análisis.

En la Tabla 2. Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje. se indica el modelo de optimización planteado:

Tabla 2. Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje.

|        |  |
|--------|--|
| Paso 1 | Ingreso de datos del sistema eléctrico.  |
| Paso 2 | Valores iniciales de las variables eléctricas.   |
|        | Determinación de la Y de bus<br>$Y_{ij}$<br>$=  Y_{ij}  \cos \delta_{ij} + j  Y_{ij}  \sin \delta_{ij}$<br>$= G_{ij} + jB_{ij}$<br>Donde:  |
| Paso 3 | $G_{ij} = \frac{X}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$<br>$B_{ij} = \frac{R}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$<br>Matriz de Admitancia Mutua<br>$[Y_{in}] = -Y_{in} \angle \delta_{in}$<br>Matriz de Admitancia Propia |

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

|        |   |
|--------|---|
|        | Problema de Optimización en GAMS<br>Minimización de la Función Objetivo   |
|        | $\min \sum_{j=1}^N bP g_j + \sum_{i=1}^N u_i Q_{svci} C_i$  |
|        | Set Restricciones de igualdad   |
| Paso 4 | $P_{gi} - P_{di} = V_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}]$<br>$Q_{gi} - Q_{di} + Q_{svci} = V_i^2 B_{ii} + \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}]$ |
|        | Set Restricciones de desigualdad  |
|        | $V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max}$<br>$\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max}$<br>$P_{g,min} \leq P_g \leq P_{g,max}$<br>$Q_{g,min} \leq Q_g \leq Q_{g,max}$   |
| Paso 5 | Análisis de resultados  |
| Paso 6 | Fin   |

El algoritmo planteado en la Tabla 2. Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje. se lo realiza y ejecuta en el software GAMS mediante Programación

no lineal entera mixta (MINLP) y el uso del solver BONMINN, el cual se basa en el algoritmo de búsqueda exhaustiva con el propósito de localizar la ubicación del SVC en los sistemas de prueba de la IEEE de 13,34 y 37 Nodos. El modelo de optimización se lo efectuará en los sistemas de prueba para lo cual se tiene 1 caso de estudio para cada sistema. En cada uno de los casos se conseguirá analizar los perfiles de voltaje y pérdidas antes y después de la implementación del compensador en cada sistema eléctrico. A continuación, se muestra los sistemas eléctricos y sus características, y los casos de estudio.

### 3.4 Sistemas Eléctricos de Prueba de la IEEE.

#### 3.4.1 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.

El sistema eléctrico de 13 nodos está conformado por 1 generador, 13 líneas de transmisión y 7 cargas. La Figura 6. Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos. muestra el diagrama unifilar de este sistema, mientras que los datos del sistema se indican en la Tabla 3. Datos del Generador, Tabla 4. Datos de la red y Tabla 5. Datos de los nodos.

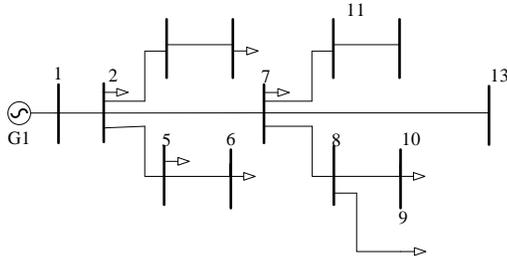


Figura 6. Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.

Tabla 3. Datos del Generador del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

| Nodo de Conexión | P. Max (MW) | Q. Min (MVar) | Q Max (MVar) |     |
|------------------|-------------|---------------|--------------|-----|
| G1               | 1           | 90            | 90           | -90 |

Tabla 4. Datos de la red del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

|     | Nini | Nfin | Rpu    | Xpu    |
|-----|------|------|--------|--------|
| L1  | 1    | 2    | 0,0016 | 0,0129 |
| L2  | 2    | 3    | 0,0652 | 0,1023 |
| L3  | 3    | 4    | 0,1149 | 0,1171 |
| L4  | 2    | 5    | 0,1200 | 0,3579 |
| L5  | 5    | 6    | 0,1200 | 0,3579 |
| L6  | 2    | 7    | 0,0018 | 0,0032 |
| L7  | 7    | 8    | 0,0689 | 0,0702 |
| L8  | 8    | 9    | 0,0689 | 0,0702 |
| L9  | 8    | 10   | 0,0599 | 0,1786 |
| L10 | 7    | 11   | 0,0704 | 0,0714 |
| L11 | 11   | 12   | 0,1896 | 0,0724 |
| L12 | 7    | 13   | 0,0728 | 0,0381 |

Tabla 5. Datos de los nodos del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

|     | Nc | Pd [MW] | Qd [MVar] |
|-----|----|---------|-----------|
| n1  | 1  | 0       | 0         |
| n2  | 2  | 0,2     | 0,12      |
| n3  | 3  | 0       | 0         |
| n4  | 4  | 0,4     | 0,29      |
| n5  | 5  | 0,17    | 0,12      |
| n6  | 6  | 0,2     | 0,12      |
| n7  | 7  | 1,15    | 0,66      |
| n8  | 8  | 0       | 0         |
| n9  | 9  | 0,11    | 0,07      |
| n10 | 10 | 0,16    | 0,07      |
| n11 | 11 | 0       | 0         |
| n12 | 12 | 0       | 0         |
| n13 | 13 | 0       | 0         |

#### 3.4.2 Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.

El sistema de distribución de 34 nodos está conformado por 1 generador, 33 líneas de transmisión y 29 cargas. La Figura7. Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos. muestra el diagrama unifilar de este sistema y la

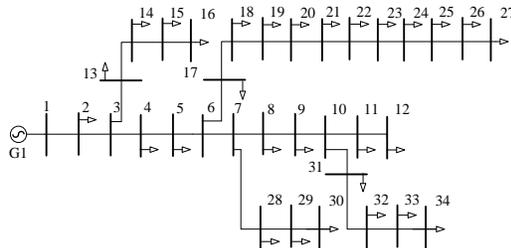


Figura7. Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.

Tabla 6. Datos del Generador del Sistema de 34 Nodos de la IEEE., Tabla 7. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. y Tabla 8. Datos de los nodos del Sistema de 34 Nodos de la IEEE., muestran las características del sistema.

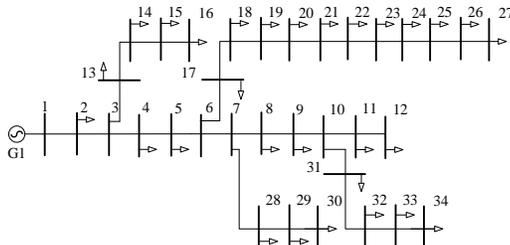


Figura7. Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.

Tabla 6. Datos del Generador del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

| Nodo de Conexión | P. Max (MW) | Q. Min (MVar) | Q Max (MVar) |
|------------------|-------------|---------------|--------------|
| G1               | 90          | 90            | -90          |

Tabla 7. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

|     | Nini | Nfin | Rpu    | Xpu    |
|-----|------|------|--------|--------|
| L1  | 1    | 2    | 0,0131 | 0,0054 |
| L2  | 2    | 3    | 0,0120 | 0,0049 |
| L3  | 3    | 4    | 0,0184 | 0,0051 |
| L4  | 4    | 5    | 0,0167 | 0,0046 |
| L5  | 5    | 6    | 0,0167 | 0,0046 |
| L6  | 6    | 7    | 0,0352 | 0,0060 |
| L7  | 7    | 8    | 0,0235 | 0,0040 |
| L8  | 8    | 9    | 0,0352 | 0,0060 |
| L9  | 9    | 10   | 0,0235 | 0,0040 |
| L10 | 10   | 11   | 0,0147 | 0,0025 |

|     |    |    |        |        |
|-----|----|----|--------|--------|
| L11 | 11 | 12 | 0,0118 | 0,0020 |
| L12 | 3  | 13 | 0,0176 | 0,0030 |
| L13 | 13 | 14 | 0,0235 | 0,0040 |
| L14 | 14 | 15 | 0,0118 | 0,0020 |
| L15 | 15 | 16 | 0,0058 | 0,0010 |
| L16 | 6  | 17 | 0,0200 | 0,0056 |
| L17 | 17 | 18 | 0,0184 | 0,0051 |
| L18 | 18 | 19 | 0,0233 | 0,0053 |
| L19 | 19 | 20 | 0,0212 | 0,0048 |
| L20 | 20 | 21 | 0,0212 | 0,0048 |
| L21 | 21 | 22 | 0,0293 | 0,0050 |
| L22 | 22 | 23 | 0,0293 | 0,0050 |
| L23 | 23 | 24 | 0,0352 | 0,0060 |
| L24 | 24 | 25 | 0,0235 | 0,0040 |
| L25 | 25 | 26 | 0,0147 | 0,0025 |
| L26 | 26 | 27 | 0,0118 | 0,0020 |
| L27 | 7  | 28 | 0,0176 | 0,0030 |
| L28 | 28 | 29 | 0,0176 | 0,0030 |
| L29 | 29 | 30 | 0,0176 | 0,0030 |
| L30 | 10 | 31 | 0,0176 | 0,0030 |
| L31 | 31 | 32 | 0,0235 | 0,0040 |
| L32 | 32 | 33 | 0,0176 | 0,0030 |
| L33 | 33 | 34 | 0,0118 | 0,0020 |

Tabla 8. Datos de los nodos del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

|     | Nc | Pd [MW] | Qd [MVar] |
|-----|----|---------|-----------|
| n1  | 1  | 0       | 0         |
| n2  | 2  | 0,23    | 0,1425    |
| n3  | 3  | 0       | 0         |
| n4  | 4  | 0,23    | 0,1425    |
| n5  | 5  | 0,23    | 0,1425    |
| n6  | 6  | 0       | 0         |
| n7  | 7  | 0       | 0         |
| n8  | 8  | 0,23    | 0,1425    |
| n9  | 9  | 0,23    | 0,1425    |
| n10 | 10 | 0       | 0         |
| n11 | 11 | 0,23    | 0,1425    |
| n12 | 12 | 0,137   | 0,084     |
| n13 | 13 | 0,072   | 0,045     |
| n14 | 14 | 0,072   | 0,045     |
| n15 | 15 | 0,072   | 0,045     |
| n16 | 16 | 0,0135  | 0,075     |

|     |    |       |        |
|-----|----|-------|--------|
| n17 | 17 | 0,23  | 0,1425 |
| n18 | 18 | 0,23  | 0,1425 |
| n19 | 19 | 0,23  | 0,1425 |
| n20 | 20 | 0,23  | 0,1425 |
| n21 | 21 | 0,23  | 0,1425 |
| n22 | 22 | 0,23  | 0,1425 |
| n23 | 23 | 0,23  | 0,1425 |
| n24 | 24 | 0,23  | 0,1425 |
| n25 | 25 | 0,23  | 0,1425 |
| n26 | 26 | 0,23  | 0,1425 |
| n27 | 27 | 0,137 | 0,085  |
| n28 | 28 | 0,075 | 0,048  |
| n29 | 29 | 0,075 | 0,048  |
| n30 | 30 | 0,075 | 0,048  |
| n31 | 31 | 0,057 | 0,0345 |
| n32 | 32 | 0,057 | 0,0345 |
| n33 | 33 | 0,057 | 0,0345 |
| n34 | 34 | 0,057 | 0,0345 |

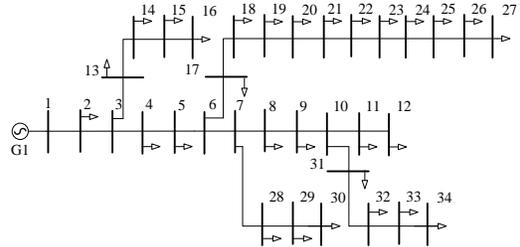


Figura 8. Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos.

Tabla 9. Datos del Generador del Sistema de 37 Nodos de la IEEE.

| Nodo de Conexión | P. Max (MW) | Q. Min (MVar) | Q Max (MVar) |     |
|------------------|-------------|---------------|--------------|-----|
| G1               | 1           | 90            | 90           | -90 |

Tabla 10. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

|     | Nini | Nfin | Rpu    | Xpu    |
|-----|------|------|--------|--------|
| L1  | 1    | 2    | 0,0131 | 0,0054 |
| L2  | 2    | 3    | 0,0120 | 0,0049 |
| L3  | 3    | 4    | 0,0184 | 0,0051 |
| L4  | 4    | 5    | 0,0167 | 0,0046 |
| L5  | 5    | 6    | 0,0167 | 0,0046 |
| L6  | 6    | 7    | 0,0352 | 0,0060 |
| L7  | 6    | 8    | 0,0235 | 0,0040 |
| L8  | 6    | 9    | 0,0352 | 0,0060 |
| L9  | 9    | 10   | 0,0235 | 0,0040 |
| L10 | 9    | 11   | 0,0147 | 0,0025 |
| L11 | 11   | 12   | 0,0118 | 0,0020 |
| L12 | 12   | 18   | 0,0176 | 0,0030 |
| L13 | 12   | 13   | 0,0235 | 0,0040 |
| L14 | 13   | 14   | 0,0118 | 0,0020 |
| L15 | 14   | 15   | 0,0058 | 0,0010 |
| L16 | 15   | 16   | 0,0200 | 0,0056 |
| L17 | 15   | 17   | 0,0184 | 0,0051 |
| L18 | 18   | 19   | 0,0233 | 0,0053 |
| L19 | 18   | 20   | 0,0212 | 0,0048 |
| L20 | 3    | 25   | 0,0212 | 0,0048 |
| L21 | 25   | 26   | 0,0293 | 0,0050 |
| L22 | 26   | 27   | 0,0293 | 0,0050 |
| L23 | 27   | 28   | 0,0352 | 0,0060 |
| L24 | 26   | 29   | 0,0235 | 0,0040 |
| L25 | 29   | 30   | 0,0147 | 0,0025 |
| L26 | 30   | 31   | 0,0118 | 0,0020 |
| L27 | 29   | 32   | 0,0176 | 0,0030 |
| L28 | 32   | 33   | 0,0176 | 0,0030 |

### 3.4.3 Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos

El sistema de distribución de 37 nodos está conformado por 1 generador, 36 líneas de transmisión y 25 cargas. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el diagrama unifilar de este sistema, mientras que los datos de los nodos, líneas y generador se muestran en la

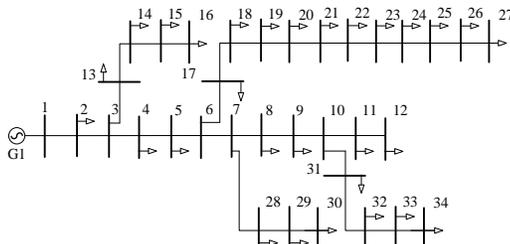


Figura 8. Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos.

Tabla 9. Datos del Generador del Sistema de 37 Nodos de la IEEE., Tabla 10. Datos de la red del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. y Tabla 11. Datos de los nodos del Sistema de 37 Nodos de la IEEE..

|     |    |    |        |        |
|-----|----|----|--------|--------|
| L29 | 32 | 34 | 0,0176 | 0,0030 |
| L30 | 4  | 21 | 0,0176 | 0,0030 |
| L31 | 21 | 22 | 0,0235 | 0,0040 |
| L32 | 22 | 23 | 0,0176 | 0,0030 |
| L33 | 22 | 24 | 0,0118 | 0,0020 |
| L34 | 3  | 35 | 0,0212 | 0,0048 |
| L35 | 35 | 36 | 0,0147 | 0,0025 |
| L36 | 35 | 37 | 0,0118 | 0,0020 |

Tabla 11. Datos de los nodos del Sistema de 37 Nodos de la IEEE.

|     | Nc | Pd [MW] | Qd [MVar] |
|-----|----|---------|-----------|
| n1  | 1  | 0       | 0         |
| n2  | 2  | 0,23    | 0,1425    |
| n3  | 3  | 0       | 0         |
| n4  | 4  | 0       | 0         |
| n5  | 5  | 0,23    | 0,1425    |
| n6  | 6  | 0       | 0         |
| n7  | 7  | 0,23    | 0,1425    |
| n8  | 8  | 0,23    | 0,1425    |
| n9  | 9  | 0       | 0         |
| n10 | 10 | 0,23    | 0,1425    |
| n11 | 11 | 0,23    | 0,1425    |
| n12 | 12 | 0       | 0         |
| n13 | 13 | 0,072   | 0,045     |
| n14 | 14 | 0,072   | 0,045     |
| n15 | 15 | 0,072   | 0,045     |
| n16 | 16 | 0,0135  | 0,075     |
| n17 | 17 | 0,23    | 0,1425    |
| n18 | 18 | 0       | 0         |
| n19 | 19 | 0,23    | 0,1425    |
| n20 | 20 | 0,23    | 0,1425    |
| n21 | 21 | 0,23    | 0,1425    |
| n22 | 22 | 0       | 0         |
| n23 | 23 | 0,23    | 0,1425    |
| n24 | 24 | 0,23    | 0,1425    |
| n25 | 25 | 0,23    | 0,1425    |
| n26 | 26 | 0       | 0         |
| n27 | 27 | 0,137   | 0,085     |
| n28 | 28 | 0,075   | 0,048     |
| n29 | 29 | 0       | 0         |
| n30 | 30 | 0,075   | 0,048     |
| n31 | 31 | 0,057   | 0,0345    |
| n32 | 32 | 0       | 0         |
| n33 | 33 | 0,057   | 0,0345    |
| n34 | 34 | 0,057   | 0,0345    |
| n35 | 35 | 0       | 0         |
| n36 | 36 | 0,137   | 0,084     |
| n37 | 37 | 0,137   | 0,084     |

### 3.5 Casos de Estudio.

#### Caso 1.

En el caso 1 se busca la ubicación óptima de un SVC en el sistema eléctrico de 13 Nodos de la IEEE, para lo cual el modelo de optimización planteado en el presente trabajo ubica al SVC en el nodo 7 como se muestra en la Figura 7. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos..

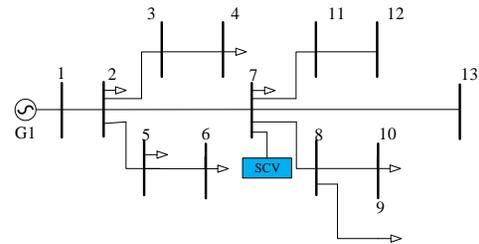


Figura 7. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.

#### Caso 2.

En este caso se realiza la ubicación óptima de 2 SVC en el sistema de prueba de la IEEE de 34 Nodos. Mediante el algoritmo de optimización realizado en GAMS nos identifica el nodo 2 y el nodo 3 como los nodos más óptimos para la ubicación de estos compensadores como se muestra en la Figura 8. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos..

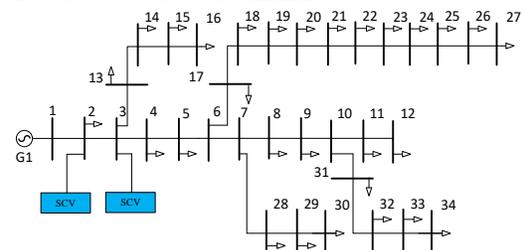


Figura 8. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.

#### Caso 3.

La ubicación 3 compensadores se busca en el sistema de la IEEE de 37 nodos. Para ello mediante el algoritmo de búsqueda exhaustiva se tiene la ubicación óptima en los nodos 3, 4 y 25 como se muestra en la Figura 9.

Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos..

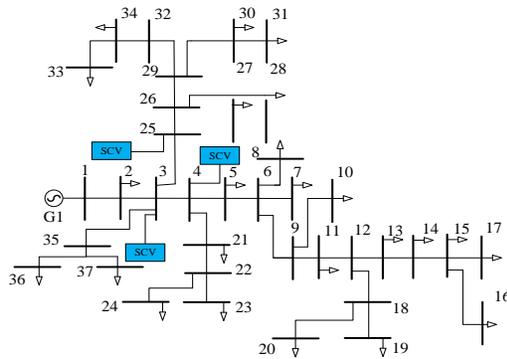


Figura 9. Ubicación óptima del SVC en el Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos.

## 4 Análisis de resultados

Mediante los casos mencionados anteriormente se tiene los siguientes resultados:

### 4.1.1 Perfiles de voltaje del Sistema 13 Nodos de la IEEE.

Al implementar un SVC en el sistema de 13 nodos ocasiona que los perfiles de voltaje en los nodos del sistema incrementen con un valor promedio de 0.44 % con respecto al sistema cuando no es compensado. La Tabla 12. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 13 Nodos de la IEEE. muestra los valores de voltajes obtenidos por el optimizador GAMS y simulados en la plataforma MATLAB-SIMULINK para validar resultados antes y después de la compensación.

Tabla 12. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

|    | SIN SVC | CON 1 SVC GAMS | CON 1 SVC SIMULINK |
|----|---------|----------------|--------------------|
| n1 | 1,0000  | 1,0000         | 1,0000             |
| n2 | 0,9998  | 1,0036         | 1,0035             |
| n3 | 0,9992  | 1,0031         | 1,003              |
| n4 | 0,9984  | 1,0023         | 1,0022             |
| n5 | 0,9985  | 1,0023         | 1,0022             |
| n6 | 0,9978  | 1,0017         | 1,0016             |

|     |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|
| n7  | 0,9997 | 1,0045 | 1,0045 |
| n8  | 0,9994 | 1,0042 | 1,0042 |
| n9  | 0,9993 | 1,0041 | 1,0041 |
| n10 | 0,9992 | 1,0040 | 1,004  |
| n11 | 0,9997 | 1,0045 | 1,0045 |
| n12 | 0,9997 | 1,0045 | 1,0045 |
| n13 | 0,9997 | 1,0045 | 1,0045 |

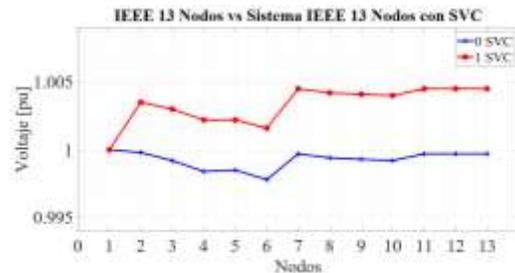


Figura 10. Diagrama de puntos de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

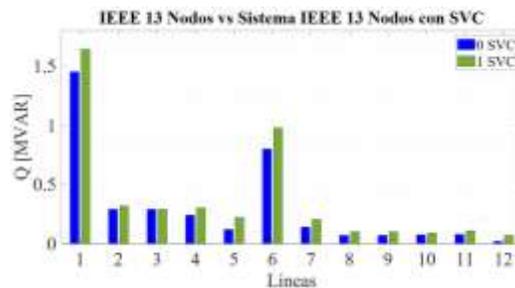


Figura 11. Diagrama de barras de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

La Figura 10. Diagrama de puntos de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. representa un diagrama de puntos y la Figura 11. Diagrama de barras de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. un diagrama de barras, en los dos gráficos se puede apreciar el incremento del voltaje en los nodos al implementar el SVC en el nodo 7.

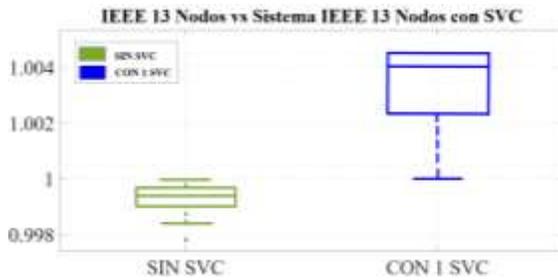


Figura 12. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

La Figura 12. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. representa un diagrama de cajas o box plot, en el cual se puede apreciar el aumento de voltaje al ubicar el SVC en el sistema, este diagrama muestra en la Tabla 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los siguientes valores:

Tabla 13. Valores comparativos del sistema de 13 nodos.

|         | Valor mínimo | Valor medio | Valor máximo |
|---------|--------------|-------------|--------------|
| ANTES   | 0.9990       | 0.9994      | 0.9998       |
| DESPUES | 1.0023       | 1,0034      | 1.0045       |

En la Tabla 13 muestra los valores máximos, medio y mínimos del sistema antes y después de la implementación del SVC, dando un incremento de 0.33% en valor mínimo, 0.40% en valor medio y 0.47% en valor máximo dentro del sistema de 13 Nodos.

La Figura 13. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE sin SVC. muestra los valores de voltaje del sistema original, sin la implementación del SVC, el cual presenta barras con valores de 0.998 a 0.9995 en 7 nodos del

sistema, mientras que en la Figura 14. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE con SVC. muestran los valores de voltaje del sistema después de ser implementado el SVC, con valores entre 1.0000 - 1.0045 p.u, de los cuales se observa 8 nodos del sistema se encuentran entre valores de 1.0038 p.u a 1.0045 p.u incrementado al sistema con un valor de 0.43% promedio.

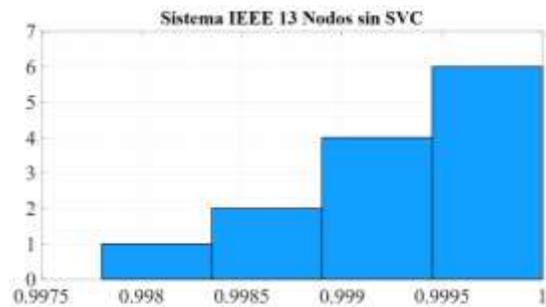


Figura 13. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE sin SVC.

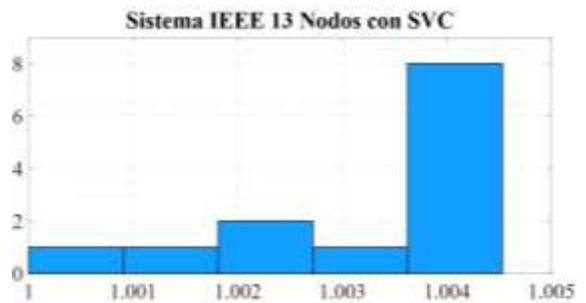


Figura 14. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE con SVC.

#### 4.1.2 Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos.

La ubicación óptima del SVC en el sistema de 13 nodos no sólo ocasiona una variación en los perfiles de voltaje, sino que al instalar el SVC este readecua los flujos de potencia reactiva como se muestra en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La readecuación los flujos de potencia ocasiona que se reduzcan en un valor de 28% las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico como se muestra en la

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

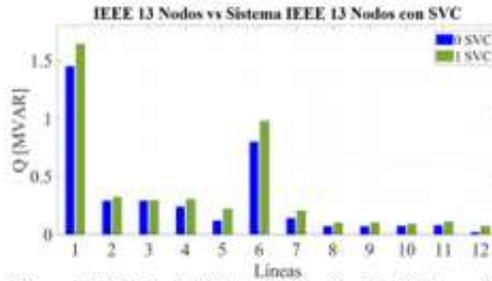


Figura 17. Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

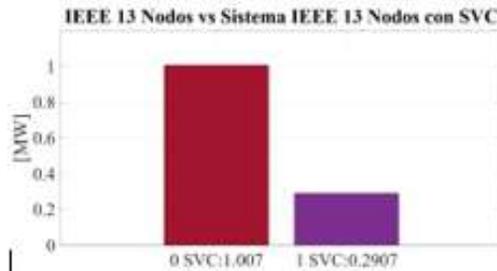


Figura 18. Pérdidas de Potencia del Sistema de 13 Nodos de la IEEE.

#### 4.1.3 Perfiles de voltaje del Sistema 34 Nodos de la IEEE.

Al implementar un SVC en el sistema de 34 nodos ocasiona que los perfiles de voltaje en los nodos del sistema incrementen con un valor promedio de 0.50 % con respecto al sistema cuando no es compensado. La Tabla 15 muestra los valores de voltajes obtenidos por el optimizador GAMS y simulados en la plataforma MATLAB-SIMULINK para validar resultados antes y después de la compensación.

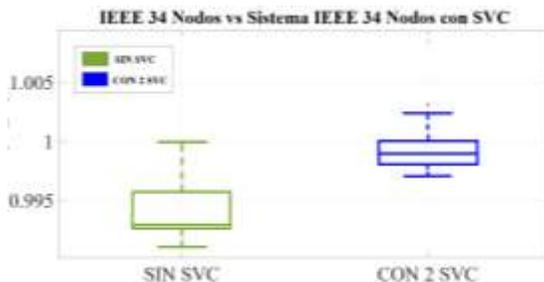


Figura 15. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

La Figura 12. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 13 Nodos de la IEEE. Figura 15 representa un diagrama de cajas o box plot, en el cual se puede apreciar el aumento de voltaje al ubicar el SVC en el sistema, este diagrama muestra en la Tabla 14 Tabla 13; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. los siguientes valores:

Tabla 14. Valores comparativos del sistema de 34 nodos.

|         | Valor mínimo | Valor medio | Valor máximo |
|---------|--------------|-------------|--------------|
| ANTES   | 0.994        | 0.9945      | 0.996        |
| DESPUES | 0.997        | 0.9985      | 1.000        |

En la Tabla 14 muestra los valores máximos, medio y mínimos del sistema antes y después de la implementación del SVC, dando un incremento de 0.30% en valor mínimo, 0.40% en valor medio y 0.40% en valor máximo dentro del sistema de 34 Nodos.

Tabla 15. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

|    | SIN SVC | CON 1 SVC GAMS | CON 2 SVC SIMULINK |
|----|---------|----------------|--------------------|
| n1 | 1,000   | 1,0000         | 1,000              |
| n2 | 0,999   | 1,0024         | 1,0039             |
| n3 | 0,9982  | 1,0032         | 1,0032             |
| n4 | 0,9969  | 1,0023         | 1,0019             |
| n5 | 0,9958  | 1,0085         | 1,0008             |
| n6 | 0,9947  | 0,9990         | 0,9997             |
| n7 | 0,9935  | 0,9983         | 0,9985             |
| n8 | 0,9932  | 0,9988         | 0,9983             |
| n9 | 0,9929  | 0,9997         | 0,9979             |

|     |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|
| n10 | 0,9927 | 0,9995 | 0,9978 |
| n11 | 0,9927 | 0,9995 | 0,9977 |
| n12 | 0,9926 | 0,9995 | 0,9977 |
| n13 | 0,9981 | 1,0032 | 1,0032 |
| n14 | 0,998  | 1,0031 | 1,0031 |
| n15 | 0,998  | 1,0031 | 1,003  |
| n16 | 0,998  | 1,0031 | 1,003  |
| n17 | 0,9941 | 0,9990 | 0,9992 |
| n18 | 0,9936 | 0,9997 | 0,9987 |
| n19 | 0,9931 | 0,9992 | 0,9982 |
| n20 | 0,9927 | 0,9988 | 0,9977 |
| n21 | 0,9923 | 0,9984 | 0,9974 |
| n22 | 0,9919 | 0,9980 | 0,997  |
| n23 | 0,9916 | 0,9977 | 0,9966 |
| n24 | 0,9912 | 0,9973 | 0,9963 |
| n25 | 0,9911 | 0,9972 | 0,9961 |
| n26 | 0,991  | 0,9971 | 0,9961 |
| n27 | 0,991  | 0,9971 | 0,9961 |
| n28 | 0,9931 | 0,9986 | 0,9981 |
| n29 | 0,9928 | 0,9981 | 0,9979 |
| n30 | 0,9927 | 0,9979 | 0,9977 |
| n31 | 0,9927 | 0,9985 | 0,9977 |
| n32 | 0,9926 | 0,9985 | 0,9977 |
| n33 | 0,9926 | 0,9974 | 0,9977 |
| n34 | 0,9926 | 0,9974 | 0,9977 |



Figura 17. Histograma del Sistema de 34 Nodos de la IEEE con SVC.

La Figura 16Figura 13. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE sin SVC. muestra los valores de voltaje del sistema original, sin la implementación del SVC, el cual presenta barras con valores de 0.992 a 0.9998, en los cuales 17 nodos se encuentran en un valor de 0.993 p.u, mientras que en la Figura 17 muestras los valores de voltaje del sistema después de ser implementado dos SVC en los nodos 2 y 3, con valores entre 0.992 - 1.000 p.u, de los cuales se observa una reducción de nodos en el punto 0.992 de 17 nodos a 11 nodos, y un incremento de 0.50% promedio a cada nodo dentro del sistema.

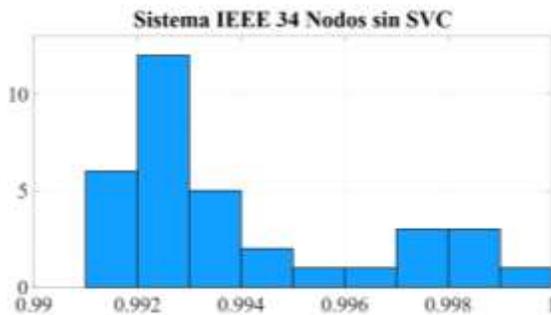


Figura 16. Histograma del Sistema de 34 Nodos de la IEEE sin SVC.

#### 4.1.4 Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 34 Nodos.

El aumento de voltaje al implementar los dos SVC hace que los flujos de potencia reactiva a través de las líneas de distribución aumenten y reduzcan en un 49.88% las pérdidas de potencia en comparación al sistema sin compensación, en la Figura 18. Pérdidas de Potencia del Sistema de 34 Nodos de la IEEE. se muestra las pérdidas de potencia reducidas en el sistema.

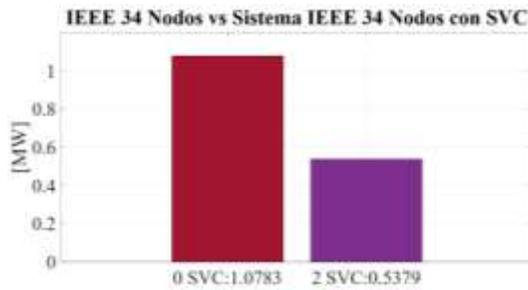


Figura 18. Pérdidas de Potencia del Sistema de 34 Nodos de la IEEE.

#### 4.1.5 Perfiles de voltaje del Sistema 37 Nodos de la IEEE.

La compensación 3 SVC en el sistema hace que los voltajes se incrementen con un valor de 0.90% promedio al sistema con respecto al sistema sin compensación, esta variación de voltaje ocasiona que el sistema sea más estable en su operación. En la Tabla 16. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. se puede visualizar los aumentos de voltaje obtenidos en el optimizador GAMS los cuales son validados con los datos que se obtiene de la simulación realizada en MATLAB-SIMULINK para este sistema de prueba,

Tabla 16. Perfiles de Voltaje en pu del Sistema de 37 Nodos de la IEEE.

|     | SIN SVC | CON 3 SVC GAMS | CON 3 SVC SIMULINK |
|-----|---------|----------------|--------------------|
| n1  | 1,0000  | 1,0000         | 1,0000             |
| n2  | 0,9992  | 1,0039         | 1,0032             |
| n3  | 0,9986  | 1,0077         | 1,0077             |
| n4  | 0,9979  | 1,0076         | 1,007              |
| n5  | 0,9975  | 1,0062         | 1,0065             |
| n6  | 0,9971  | 1,0068         | 1,0061             |
| n7  | 0,9971  | 1,0067         | 1,0061             |
| n8  | 0,997   | 1,0068         | 1,006              |
| n9  | 0,9964  | 1,0053         | 1,0055             |
| n10 | 0,9964  | 1,0055         | 1,0054             |
| n11 | 0,9963  | 1,0051         | 1,0053             |
| n12 | 0,9961  | 1,0060         | 1,0052             |
| n13 | 0,996   | 1,0058         | 1,005              |

|     |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|
| n14 | 0,996  | 1,0058 | 1,005  |
| n15 | 0,9959 | 1,0058 | 1,005  |
| n16 | 0,9959 | 1,0057 | 1,005  |
| n17 | 0,9959 | 1,0047 | 1,0049 |
| n18 | 0,996  | 1,0059 | 1,0051 |
| n19 | 0,996  | 1,0058 | 1,005  |
| n20 | 0,996  | 1,0052 | 1,005  |
| n21 | 0,9978 | 1,0064 | 1,0068 |
| n22 | 0,9977 | 1,0063 | 1,0067 |
| n23 | 0,9976 | 1,0063 | 1,0067 |
| n24 | 0,9977 | 1,0083 | 1,0067 |
| n25 | 0,9983 | 1,0089 | 1,0089 |
| n26 | 0,998  | 1,0088 | 1,0086 |
| n27 | 0,9979 | 1,0087 | 1,0085 |
| n28 | 0,9979 | 1,0087 | 1,0085 |
| n29 | 0,9978 | 1,0087 | 1,0083 |
| n30 | 0,9976 | 1,0087 | 1,0082 |
| n31 | 0,9976 | 1,0087 | 1,0082 |
| n32 | 0,9977 | 1,0087 | 1,0083 |
| n33 | 0,9977 | 1,0087 | 1,0083 |
| n34 | 0,9977 | 1,0087 | 1,0083 |
| n35 | 0,9986 | 1,0076 | 1,0076 |
| n36 | 0,9986 | 1,0076 | 1,0076 |
| n37 | 0,9986 | 1,0076 | 1,0076 |

Mediante el diagrama de caja, el cual se representa en la Figura 19. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 37 Nodos de la IEEE. se puede observar en la Tabla 17 la diferencia entre voltajes cuando el sistema no se encuentra compensado con respecto a la implementación de los 3 SVC. En cada diagrama de caja de la figura se puede observar los valores mínimos, máximos, medios y los cuartiles de voltaje.

Tabla 17. Valores comparativos del sistema de 37 nodos.

|  | Valor mínimo | Valor medio | Valor máximo |
|--|--------------|-------------|--------------|
|--|--------------|-------------|--------------|

| ANTES   | 0.9967 | 0.99725 | 0.9978 |
|---------|--------|---------|--------|
| DESPUES | 1.0052 | 1.0067  | 1.0082 |

En la Tabla 17 muestra los valores máximos, medio y mínimos del sistema antes y después de la implementación del SVC, dando un incremento de 0.85% en valor mínimo, 1.040% en valor medio y 0.945% en valor máximo dentro del sistema de 37 Nodos.

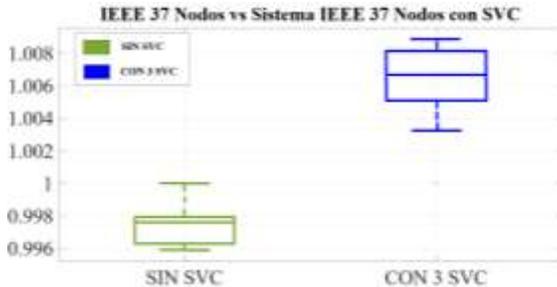


Figura 19. Diagrama de Caja de la Mejora de los Perfiles de Voltaje en el Sistema de 37 Nodos de la IEEE.

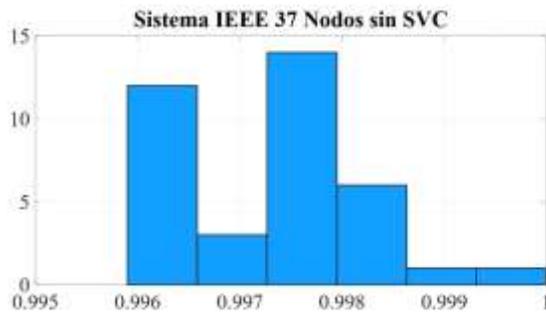


Figura 20. Histograma del Sistema de 37 Nodos de la IEEE sin SVC.

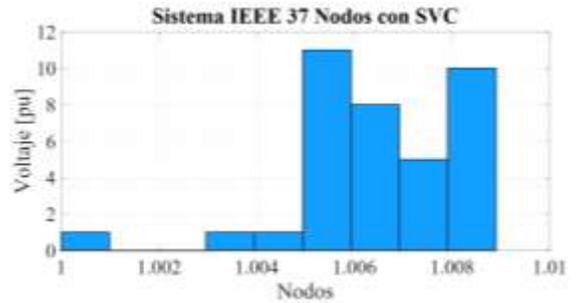


Figura 21. Histograma del Sistema de 37 Nodos de la IEEE con SVC.

La Figura 20 muestra los valores de voltaje del sistema original, sin la implementación del SVC, el cual presenta barras con valores de 0.996 a 1.00 p.u, entre los valores de 0.997 – 0.998 p.u se observa que existe 14 barras, mientras que en la Figura 21 Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE sin SVC. Figura 14. Histograma del Sistema de 13 Nodos de la IEEE con SVC. muestra los valores de voltaje del sistema después de ser implementado los SVC, con valores entre 1.0000 - 1.0085 p.u, de los cuales se observa que más de la mayoría de nodos se encuentran entre 1.004 a 1.0085 p.u incrementado al sistema con un valor de 0.90% promedio.

#### 4.1.6 Flujos de Potencia Reactiva del Sistema de Distribución de la IEEE de 37 Nodos.

La inclusión 3 compensadores eleva los niveles de voltajes consiguiendo de esta manera que los flujos de potencia reactiva que circulan a través de las líneas de distribución aumenten y por ende las pérdidas del sistema disminuyen en un 19,52% de manera considerable para este sistema, en la Figura 22. Pérdidas de Potencia del Sistema de 37 Nodos de la IEEE. se indica las pérdidas de potencia minimizadas.

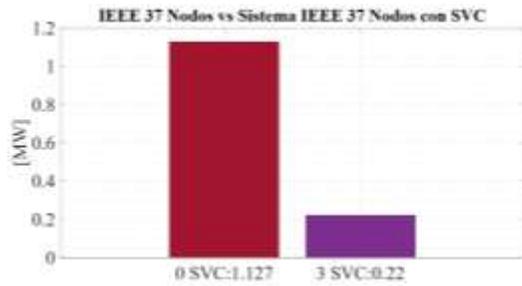


Figura 22. Pérdidas de Potencia del Sistema de 37 Nodos de la IEEE.

## Conclusiones

Del análisis de resultados y lo descrito en el presente documento se concluye lo siguiente:

- El presente trabajo realiza, ejecuta y simula un modelo de optimización para la ubicación óptima de SVC en sistemas de distribución. De los resultados obtenidos, se determina que, al implementar equipos de compensación para cada sistema eléctrico de prueba, se puede lograr grandes mejoras en la seguridad, confiabilidad y operatividad del sistema.
- La ubicación óptima de los SVC mediante búsqueda exhaustiva provoca una readecuación de los flujos de potencia de manera que los perfiles de voltaje incrementen y las pérdidas de potencia se reduzcan en el sistema eléctrico.
- En cada caso de estudio, se observa que la implementación óptima del SVC, provoca una inyección de potencia reactiva la cual provoca una mejora en los perfiles de voltaje y la reducción de pérdidas de potencia para cada sistema eléctrico planteado.
- Con los resultados obtenidos se tiene que el sistema de 13 nodos presenta incremento de voltaje del 1% al implementar un SVC en el nodo 7.
- Mientras que en el sistema de 34 nodos tiene una mejora de voltaje

del 2% al implementar dos SVC dentro del sistema en los nodos 2 y 3 del sistema ya mencionado.

- El sistema de 37 nodos tiene un aumento del 3% de voltaje, por lo que se concluye que, al implementar una mayor cantidad de SVC en un sistema eléctrico se va a tener un considerable aumento de voltaje.
- En el análisis de resultados se observa la diferencia al usar un número determinado de SVC, puesto que a mayor cantidad de SVC mayor compensación en los voltajes de los nodos, como es el caso del nodo 13, presentando valores mínimos de 0.33% en aumento, como en el caso de 3 SVC en 37 nodos con un valor mínimo de 1.004% de aumento en los voltajes del sistema.
- Con la implementación de 3 compensadores SVC en el sistema de eléctrico de 37 nodos se tiene una reducción de pérdidas menores con las de los otros casos de estudio, entonces se concluye que este caso es el más óptimo por tener una mayor mejora de voltaje y menores pérdidas.

## 4.2 Trabajos futuros

El trabajo realizado puede ser la base de nuevas investigaciones que pueden ser relacionadas con las siguientes temáticas:

- Diseño e implementación de sistemas multicontrol de SVC para HVDC.
- Determinación de capacidades de SVC en sistemas de distribución.
- Implementación óptima de SVC en sistemas desbalanceados.
- Control de SVC para la corrección del factor de potencia en sistemas de alta tensión.

## Referencias

- [1] J. P. Muyulema Masaquiza, “Estudio de la Composición de Pérdidas de la Energía en la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro,” vol. 1, pp. 1–154, 2008.
- [2] G. E. Marco and R. R. Carlos, “Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de distribución mediante técnicas heurísticas,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, pp. 1–12, 2015.
- [3] V. C. Figueroa, “Minimización de Pérdidas de Energía en Alimentadores Primarios de Distribución Mediante la Instalación de Capacitores Paralelo,” *iee*, vol. 1, pp. 1–172, 1986.
- [4] K. Avenue, “Artificial intelligence techniques for voltage control [of power systems],” vol. 1, pp. 1–6, 2005.
- [5] J. J. P. Calupiña, “Planeación óptima de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión basado en optimización no lineal entera mixta,” pp. 1–48, 2019.
- [6] T. Ding, R. Bo, F. Li, and H. Sun, “Optimal Power Flow With the Consideration of Flexible Transmission Line Impedance,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1655–1656, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2412682.
- [7] M. O. F. M. Moghavvemi, “Effects of Facts Devices on Static Voltage Stability,” vol. 1, pp. 1–6, 2015.
- [8] Cristina Alejandra Moreno Pérez, “Ubicación óptima de svcs en sistemas eléctricos de transmisión para la compensación de potencia reactiva basada en programación no lineal entera mixta,” vol. 1, pp. 1–37, 2018.
- [9] C. Alejandro, D. Duarte, A. M. Ramos, M. D. E. L. A. Comisión, R. P. Behnke, and G. J. Estevez, “Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables,” 2009.
- [10] M. M. Eissa, T. S. Abdel-Hameed, and H. Gabbar, “A novel approach for optimum allocation of Flexible AC Transmission Systems using Harmony Search technique,” *IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Eng. SEGE 2013*, no. February 2016, 2013, doi: 10.1109/SEGE.2013.6707939.
- [11] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 764–778, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2210253.
- [12] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, “Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 562–572, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.068.
- [13] D. Y. Construcción De Un Sistema Prototipo De Aforo Electrónico Para Tanques De Almacenamiento De Líquido, T. Pastás Jorge Armando, Y. Yáñez Santiago Xavier, and I. Ana Verónica Rodas Benalcázar, “Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica,” 2009.
- [14] M. Alonso Martínez, “Gestión

- óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos con generación eólica.” *Tesis*, vol. 1, no. 8, pp. 1–191, 2010.
- [15] J. C. P. Buezo, “Despacho óptimo de potencia reactiva en un sistema eléctrico de potencia por medio de programación no lineal,” vol. 1, no. 38, pp. 1–123, 2005.
- [16] D. Universidad Carlos III de Madrid Dept. Ingeniería eléctrica, Samos, “Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna,” vol. 1, pp. 1–41, 2008.
- [17] T. Akbari and M. Tavakoli Bina, “Linear approximated formulation of AC optimal power flow using binary discretisation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 5, pp. 1117–1123, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0388.
- [18] S. Ramírez, *Redes de distribución de energía*. 2009.
- [19] J. A. H. Galicia, “Planificación de la compensación reactiva mediante programación evolutiva,” 2554.
- [20] P. F. Guerrero Valdes, “Estudio del comportamiento de la potencia reactiva en sistemas zonales y propuesta de criterios para la compensación en subestaciones AT/MT,” *Tesis*, pp. 1–146, 2018.
- [21] S. Sithole, N. Mbuli, and J. H. C. Pretorius, “Voltage regulation in the douglas area using shunt capacitor banks and controllable shunt reactors,” *2013 13th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2013 - Conf. Proc.*, pp. 85–90, 2013, doi: 10.1109/IEEEIC-2.2013.6737888.
- [22] E. Society, *IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings IEEE Power and Energy Society*, vol. 2012, no. January. 2013.
- [23] I. Daut, R. C. Bahaudin, C. M. Hadzer, S. Hardi, N. Hashim, and I. Nisja, “Investigation on the effect of shunt capacitor and shunt filter on harmonic in distribution system,” *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, no. PECon 08, pp. 684–688, 2008, doi: 10.1109/PECON.2008.4762562.
- [24] M. Integer, N.-L. Programming, and A. Caballero, “Programación no lineal con variables binarias. (MINLP).,” pp. 1–18, 2000.
- [25] IEEE, *IEEE 1031-2000 Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators*, vol. 2011, no. June. 2011.
- [26] L. Wang, K. W. Lao, C. S. Lam, and M. C. Wong, “Delta-connected static var compensator (SVC) based hybrid active power filter (SVC-HAPF) and its control method,” *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-January, pp. 6384–6388, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8217112.
- [27] R. A. Susilo, Ipniansyah, Qomaruddin, and I. Mahfudi, “Improve Performance Electrical Power System on Mahakam System Using Static Var Compensator,” *2018 2nd Borneo Int. Conf. Appl. Math. Eng. BICAME 2018*, pp. 270–274, 2018, doi: 10.1109/BICAME45512.2018.1570510241.
- [28] C37.109 - 2006, *IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors*, vol. 2006, no. April. 2007.
- [29] H. E. Guerrero, “Desarrollo De Un Módulo De Entrenamiento, Basado En Circuitos Y Elementos De Electrónica De Potencia,”

- 2010.
- [30] E. E. S. Rodríguez, “Compensador Estático Síncrono ( STATCOM ): Modelado Y Simulación,” *Tesis*, vol. 1, no. 1, pp. 1–185, 2006.
- [31] R. Madhusudan and G. Ramamohan Rao, “Modeling and simulation of a distribution STATCOM (D-STATCOM) for power quality problems-voltage sag and swell based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM),” *IEEE-International Conf. Adv. Eng. Sci. Manag. ICAESM-2012*, pp. 436–441, 2012.
- [32] R. K. Varma and R. Salehi, “SSR Mitigation with a New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM),” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1473–1483, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2691279.
- [33] Z. Xi and S. Bhattacharya, “STATCOM control and operation with series connected transformer based 48-pulse VSC,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1714–1719, 2007, doi: 10.1109/IECON.2007.4460359.
- [34] J. C. Vaschetti and F. Magnago, “Control Automático de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia basado en Sistemas Expertos Automatic Voltage Control in Electrical Power System based on Expert Systems .,” *Redes Distrib. energía*, vol. 23, no. 5, pp. 69–84, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000500008.
- [35] C. Weishaupt and D. D. E. L. A. Torre, “Alternativas para reducir el nivel de cortocircuito en el Sistema Interconectado Central (SIC) de Chile,” *Cienc. e Ing.*, vol. 1, pp. 1–8, 2017.
- [36] A. Garces, “A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2394296.
- [37] H. Wang, S. Mu, Y. Wang, and Z. Zhang, “An Approximate Power Flow Method to Deal with the Non-convergence Problem of Power Flow Calculation,” *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2018 - Proc.*, pp. 292–299, 2019, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601714.
- [38] N. Muñoz and F. Villada, “Análisis de los Flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos y su Interpretación Física,” *Redes Distrib. energía*, vol. 23, pp. 57–68, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000500007.
- [39] E. D. E. Ingeniería, “Estudio de Estabilidad para Análisis de condiciones y tiempos de recierres en líneas de 230kV del Sistema NACIONAL DE Transmisión.,” *Tesis*, vol. 1, pp. 1–167, 2006.
- [40] S. R. E. G. Victor Hugo Orejuela Luna, “Optimización de alimentadores primarios usando gams,” *Redes Distrib. energía*, vol. 1, pp. 1–19, 2019.

### 4.3 Matriz de Estado del Arte

Tabla 18. Matriz de estado del arte

| ITEM | DATOS |  |         |       | TEMÁTICA                |                    |                                   |                      | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA<br>FUNCIONES OBJETIVO                     |  |                      |                       | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                          |                    |   |  | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA |                          |                     |   | SOLUCIÓN PROPUESTA                           |  |  |   |   |                                       |                                  |
|------|-------|--|---------|-------|-------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------|--|--|----------------------|-----------------------|---|--------------------|---|--|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|---|--|--|--|---|---|---------------------------------------|----------------------------------|
|      | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO  | PAÍS    | CITAS | UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC | FLUJOS DE POTENCIA | ESTABILIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO | PÉRDIDAS DE POTENCIA | IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA UBICACIÓN DE SVC | MEJORA DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN | VARIACIÓN DE VOLTAJE | REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS | LÍMITES DE POTENCIA DE GENERACIÓN ACTIVA Y REACTIVA | BLANCE DE POTENCIA | LÍMITES DE LA MAGNITUD DE VOLTAJES EN LAS NODOS | LÍMITES DE LOS ÁNGULO DE FASE EN LOS NODOS | CANTIDAD MÁXIMA DE SVC               | TÉCNICAS COMPUTACIONALES | TÉCNICAS HEURÍSTICA | VARIACIÓN DE VOLTAJE Y MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA | DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DEL SVC | DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS CON LA | MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC | IMPLEMENTACIÓN DE SVC MEDIANTE LA BUSQUEDA EXHAUSTIVA | DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS QUE VALIDAN LA MODELACION DEL SISTEMA | EVALUACIÓN DE LOS PERFILES DE VOLTAJE | ALGORITMO DE BUSQUEDA EXHAUSTIVA |
| 1    | 2008  | Estudio de la Composición de Pérdidas de la Energía en la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro                             | Ecuador | 12    | ☒                       | ☒                  | ☐                                 | ☒                    | ☐  | ☐  | ☒                    | ☒                     | ☒   | ☒                  | ☒   | ☐  | ☐                                    | ☒                        | ☐                   | ☐   | ☐  | ☒  | ☒  | ☐   | ☐   | ☒                                     |                                  |
| 2    | 2015  | Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de distribución mediante técnicas heurísticas                            | USA     | 6     | ☒                       | ☐                  | ☐                                 | ☒                    | ☐  | ☒  | ☐                    | ☒                     | ☒   | ☒                  | ☒   | ☐  | ☐                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☐  | ☐  | ☐  | ☒   | ☐   | ☐                                     |                                  |
| 3    | 1986  | Minimización de Pérdidas de Energía en Alimentadores Primarios de Distribución Mediante la Instalación de Capacitores Paralelo | India   | 33    | ☒                       | ☒                  | ☐                                 | ☒                    | ☐  | ☐  | ☐                    | ☒                     | ☒   | ☐                  | ☐   | ☐  | ☐                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☒  | ☐  | ☒  | ☐   | ☐   | ☐                                     |                                  |
| 4    | 1993  | Artificial intelligence techniques for voltage control [of power systems]  | India   | 20    | ☒                       | ☒                  | ☒                                 | ☐                    | ☐  | ☐  | ☐                    | ☒                     | ☒   | ☐                  | ☐   | ☐  | ☐                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☐  | ☒  | ☐  | ☐   | ☐   | ☐                                     |                                  |
| 5    | 1982  | STATIC REACTIVE COMPENSATION FOR POWER TRANSMISSION SYSTEMS  | India   | 13    | ☐                       | ☐                  | ☐                                 | ☒                    | ☐  | ☒  | ☒                    | ☐                     | ☒   | ☒                  | ☐   | ☐  | ☒                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☐  | ☒  | ☐  | ☐   | ☒   | ☐                                     |                                  |
| 6    | 2017  | COST OPTIMIZATION OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM  | India   | 16    | ☒                       | ☒                  | ☐                                 | ☐                    | ☐  | ☐  | ☐                    | ☒                     | ☐   | ☐                  | ☐   | ☐  | ☐                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☒  | ☐  | ☒  | ☐   | ☐   | ☐                                     |                                  |
| 7    | 2016  | Optimal Power Flow With the Consideration of Flexible Transmission Line Impedance  | China   | 11    | ☐                       | ☒                  | ☒                                 | ☒                    | ☐  | ☒  | ☒                    | ☐                     | ☒   | ☒                  | ☐   | ☐  | ☒                                    | ☐                        | ☐                   | ☐   | ☐  | ☒  | ☐  | ☐   | ☒   | ☒                                     | ☐                                |

|    |      |  |             |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|------|--|-------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8  | 2018 | Ubicación óptima de svcs en sistemas eléctricos de transmisión para la compensación de potencia reactiva basada en programación no lineal entera mixta | Ecuador     | 26 | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ |
| 9  | 2019 | Planeación óptima de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión basado en optimización no lineal entera mixta                   | Ecuador     | 15 | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ |   |
| 10 | 2017 | UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE  | Ecuador     | 27 | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ |
| 11 | 2015 | STATCOM control and operation with series connected transformer based 48-pulse VSC   | Taiwan      | 2  | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ |
| 12 | 2017 | Load flow analysis for three phase unbalanced distribution feeders using Matlab  | India       | 12 | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ |
| 13 | 2016 | OPTIMAL LOCATION IDENTIFICATION OF FACTS DEVICES THROUGH GENETIC ALGORITHM AND THE NETWORK STRUCTURAL TECHNIQUES                                       | Reino Unido | 26 | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ |
| 14 | 2016 | IMPLEMENTATION OF IMPERIALIST COMPETITIVE ALGORITHM FOR OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES TO ENHANCE THE POWER SYSTEM PERFORMANCE                    | India       | 15 | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ |
| 15 | 2016 | OPTIMAL ALLOCATION OF DISTRIBUTED GENERATION (DGS) AND STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) IN A POWER SYSTEM USING REVAMP VOLTAGE STABILITY INDICATOR         | India       | 14 | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ |
| 16 | 2014 | OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF SVC BY USING VARIOUS META-HEURISTIC OPTIMIZATION METHODS   | Indonesia   | 18 | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ |
| 17 | 2014 | APPLICATION OF MIN CUT ALGORITHM FOR OPTIMAL LOCATION OF FACTS DEVICES CONSIDERING SYSTEM LOADABILITY AND COST OF INSTALLATION                         | USA         | 26 | ✗ | ✗ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ |
| 18 | 2014 | APPLICATIONS OF FLEXIBLE AC TRANSMISSIONS SYSTEM (FACTS) TECHNOLOGY IN SMARTGRID AND ITS EMC IMPACT  | USA         | 7  | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ✗ | ☐ | ☐ |



|           |      |  |           |     |                                     |                                     |                                     |                                     |                          |                          |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                          |                          |                                     |                                     |                          |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
|-----------|------|--|-----------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 31        | 2014 | STEADY STATE VOLTAGE STABILITY ENHANCEMENT OF POWER SYSTEM USING FACTS DEVICES   | India     | 11  | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 32        | 2013 | SIMULTANEOUS OPTIMAL PLACEMENT AND PARAMETER-TUNING OF SVC, TCSC AND PSS USING HONEY-BEE MATING  | China     | 13  | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 33        | 2011 | OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF STATIC VAR COMPENSATORS IN POWER SYSTEMS USING IMPROVED HARMONY SEARCH ALGORITHM   | Indonesia | 20  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 34        | 2017 | LOCATION OF MULTI-TYPE FACTS DEVICES UNDER CONTINGENCY: AN INTELLIGENT APPROACH USING MODIFIED ABC   | India     | 19  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 35        | 2017 | IMPROVING VOLTAGE STABILITY OF POWER SYSTEM USING FACTS DEVICE   | India     | 133 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 36        | 2017 | OPTIMAL PLACEMENT OF STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) IN POWER SYSTEM ALONG WITH WIND POWER GENERATION   | India     | 12  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| 37        | 2018 | Improve Performance Electrical Power System on Mahakam System Using Static Var Compensator   | Indonesia | 12  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 38        | 2017 | SSR Mitigation with a New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM)   | India     | 25  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 39        | 2012 | Modeling and simulation of a distribution STATCOM (D-STATCOM) for power quality problems-voltage sag and swell based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) | India     | 4   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 40        | 2017 | FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA REACTIVA BASADO EN ÓPTIMO DESPACHO DE CARGA USANDO GAMS   | Ecuador   | 16  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| CANTIDAD: |      |  |           |     | 29                                  | 28                                  | 16                                  | 24                                  | 3                        | 9                        | 22                                  | 13                                  | 31                                  | 35                                  | 23                                  | 23                       | 4                        | 2                                   | 13                                  | 4                        | 13                                  | 6                                   | 23                                  | 12                                  | 17                                  | 15                                  | 5                                   |

4.4 Resumen de Indicadores

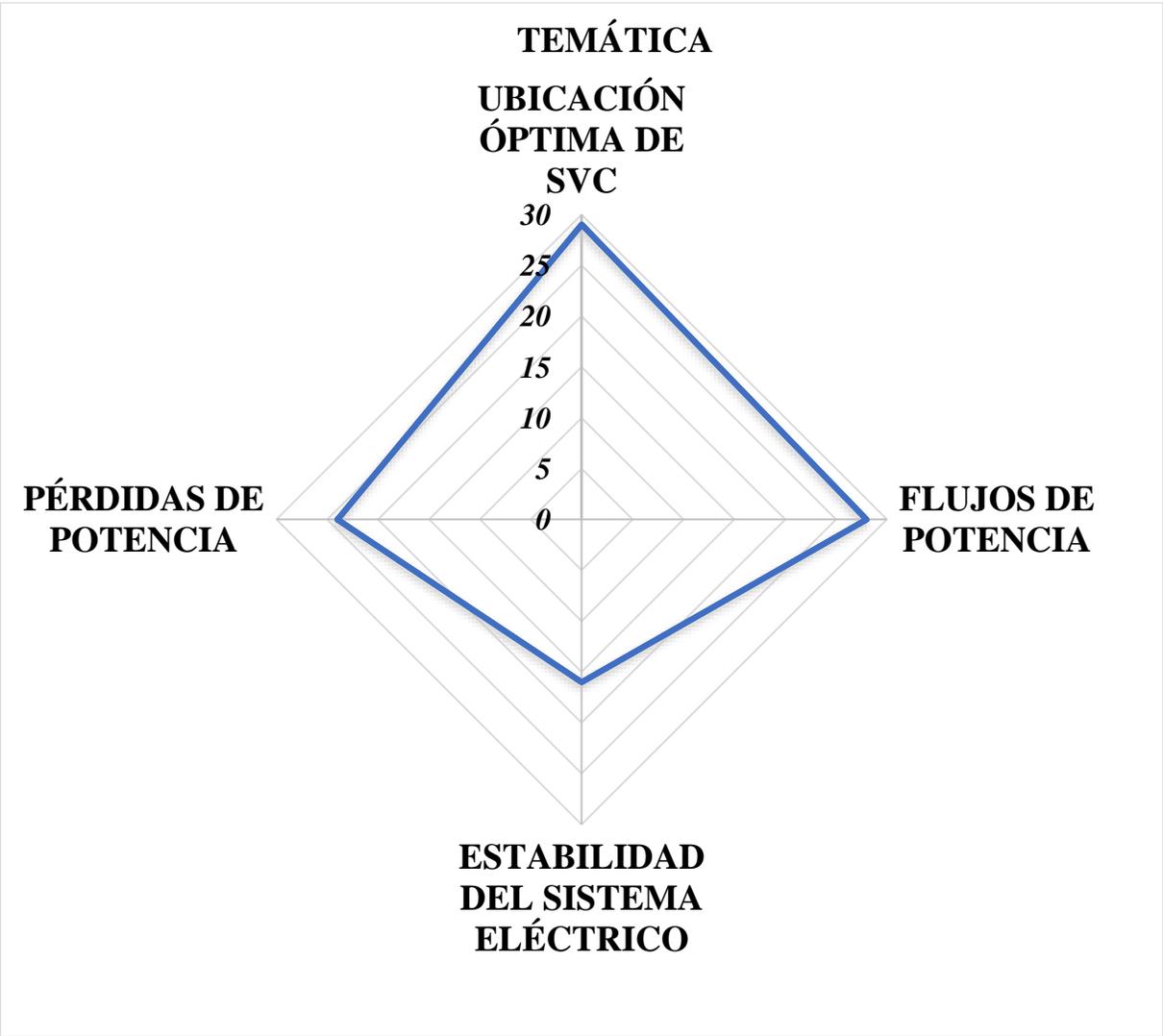
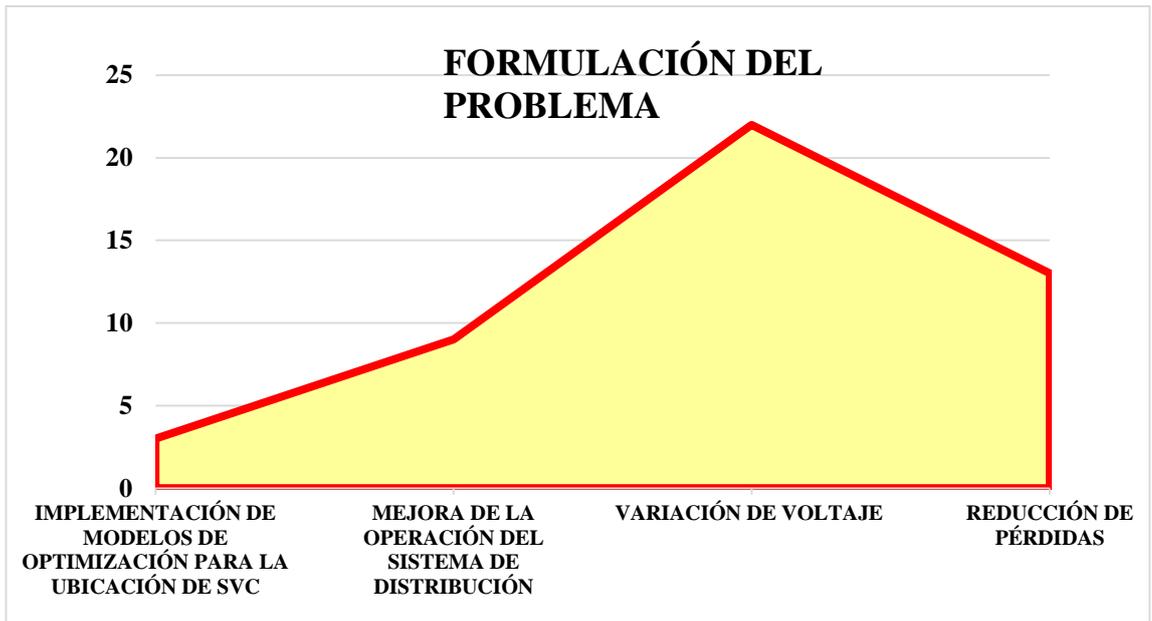
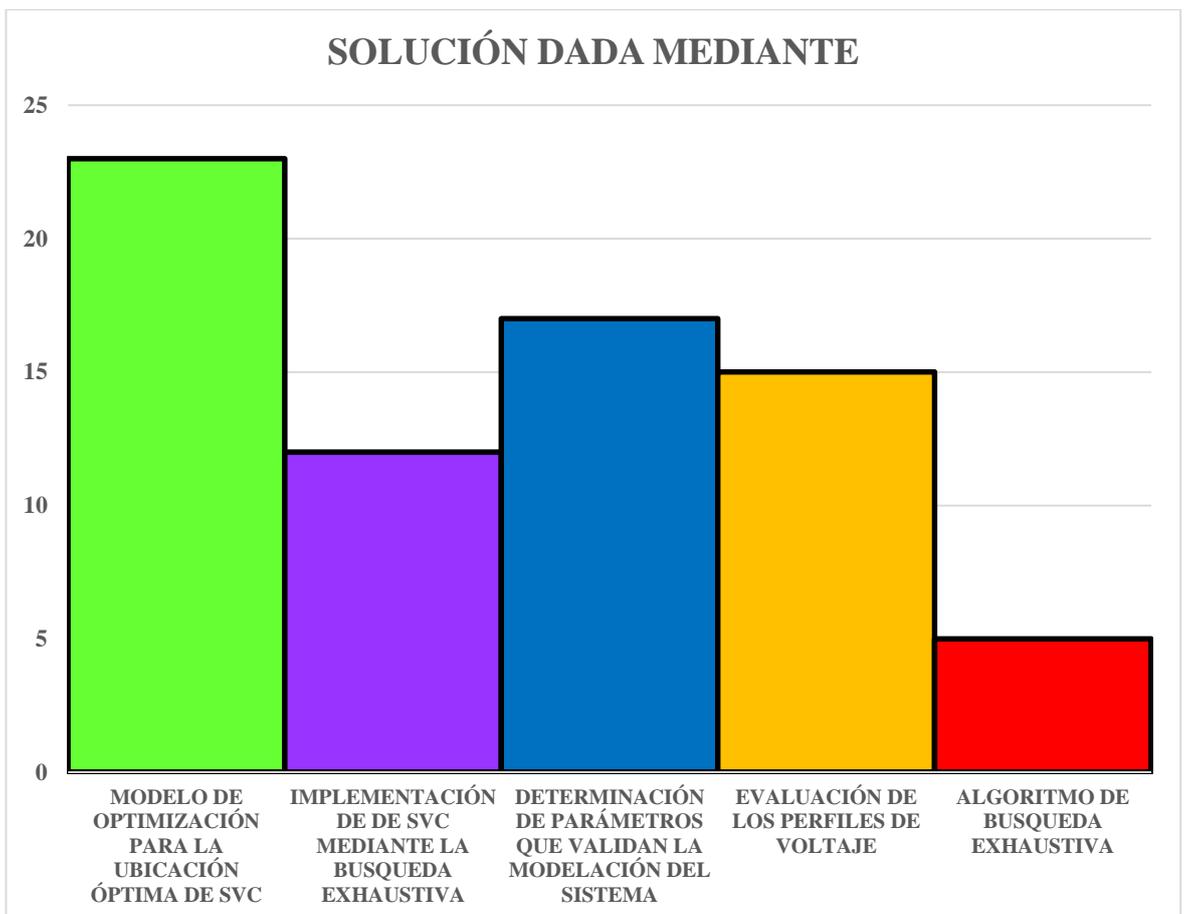


Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte



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



**Figura 25.** Indicador de solución - Estado del arte