

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS  
BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA USANDO EL FLUJO DE  
POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**





**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE EQUIPOS DE  
COMPENSACIÓN DE REACTIVOS  
BASADOS EN ELECTRÓNICA DE  
POTENCIA USANDO EL FLUJO DE  
POTENCIA ITERATIVO ADELANTE -  
ATRÁS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: WILLIAM PAUL QUIMBITA SOTO

TUTOR: ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN

Quito -Ecuador

2022

William Paul Quimbita Soto

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**William Paul Quimbita Soto** (Y'1996 – M'05). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Militar N. 10 “Abdón Calderón” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la óptima ubicación de equipos de compensación de reactivos basados en electrónica de potencia usando el flujo de potencia iterativo adelante - atrás. [wquimbitas@est.ups.edu.ec](mailto:wquimbitas@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Alex David Valenzuela Santillán** (Y'1989 – M'12). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013. Además, realizó estudios de posgrado en Newcastle University en el Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. [avalenzuela@ups.edu.ec](mailto:avalenzuela@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**

©2022 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

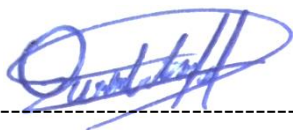
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

Yo, William Paul Quimbita Soto con documento de identificación N° 1718560863 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 06 de mayo del año 2022

Atentamente,



---

William Paul Quimbita Soto  
1718560863

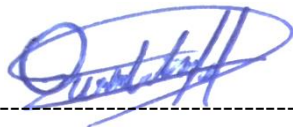
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, William Paul Quimbita Soto con documento de identificación No. 1718560863, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Óptima ubicación de equipos de compensación de reactivos basados en electrónica de potencia usando el flujo de potencia iterativo adelante - atrás”, el cual 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 concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de mayo del año 2022

Atentamente,



---

William Paul Quimbita Soto

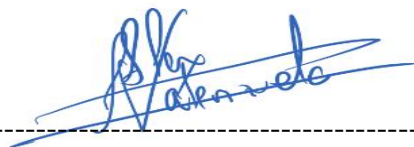
1718560863

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alex David Valenzuela Santillán con documento de identificación N° 1721848644, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ÓPTIMA UBICACIÓN DE EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS, realizado por William Paul Quimbita Soto con documento de identificación N° 1718560863, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de mayo del año 2022

Atentamente,



Ing. Alex David Valenzuela Santillán, MSc  
1721848644

## 1. ÍNDICE GENERAL

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducción .....  | 2  |
| 2     | Marco teórico .....   | 5  |
| 2.1   | Generalidades de los sistemas de distribución .....                                     | 5  |
| 2.1.1 | Clasificación de los sistemas de distribución de acuerdo a su construcción.....         | 5  |
| 2.1.2 | Sistemas radiales, anillo y malla .....   | 5  |
| 2.2   | Perturbaciones que afectan la calidad de la energía en los sistemas de distribución ... | 6  |
| 2.3   | Calidad de la energía en los sistemas de distribución industriales.....                 | 7  |
| 2.4   | Principio básico de operación de un DSTATCOM .....                                      | 7  |
| 2.4.1 | Clasificación de los DSTATCOMs.....   | 7  |
| 2.5   | Modos de operación y control de un DSTATCOM .....                                       | 8  |
| 2.5.1 | Modo de operación del compensador .....   | 8  |
| 2.5.2 | Modos de control del DSTATCOM.....  | 9  |
| 3     | Formulación del problema .....  | 9  |
| 3.1   | Método de Barrido Iterativo adelante – atrás .....                                      | 10 |
| 3.1.1 | Barrido de corriente.....   | 10 |
| 3.1.2 | Barrido de voltaje .....  | 11 |
| 3.1.3 | Criterio de convergencia .....  | 11 |
| 3.2   | Modelamiento matemático.....  | 12 |
| 3.2.1 | Función objetivo .....  | 12 |
| 3.2.2 | Restricción máxima cantidad de DSTATCOM .....   | 12 |
| 3.2.3 | Restricción de voltaje en las barras .....  | 13 |
| 3.2.4 | Restricción de la cantidad de potencia reactiva en el DSTATCOM.....                     | 13 |
| 4     | Caso de estudio .....   | 14 |
| 5     | Análisis de resultados.....   | 16 |
| 5.1   | Sistema IEEE de 33 barras .....   | 16 |
| 5.1.1 | Selección de la potencia mínima mediante el algoritmo.....                              | 16 |
| 5.1.2 | Sistema en condiciones iniciales .....  | 17 |
| 5.1.3 | Ubicación de los compensadores en el sistema.....                                       | 17 |
| 5.2   | Sistema de 59 barras.....   | 19 |
| 5.2.1 | Selección de la potencia mínima mediante el algoritmo.....                              | 19 |
| 5.2.2 | Sistema en condiciones iniciales .....  | 19 |
| 5.2.3 | Ubicación de los compensadores en el sistema.....                                       | 20 |



|   |    |
|---|----|
| 5.3 Comparación de pérdidas activas dependiendo del caso de estudio ..... | 21 |
| 5.3.1 Comparación de pérdidas activas para el sistema IEEE 33 barras..... | 21 |
| 5.3.2 Comparación de pérdidas activas para el sistema de 59 barras .....  | 21 |
| 6 Conclusiones .....  | 22 |
| 6.1 Trabajos futuros .....  | 22 |
| 7 Referencias .....   | 22 |
| 7.1 Matriz de Estado del Arte .....                                       | 26 |
| 7.2 Resumen de Indicadores .....  | 31 |

## 2. ÍNDICE DE FIGURAS

|   |  |
|---|--|
| Figura 1. Sistema de distribución tipo radial .....                               | 5  |
| Figura 2. Sistema de distribución tipo anillo .....                               | 6  |
| Figura 3. Sistema red o malla.....  | 6  |
| Figura 4. DSTATCOM basado en CSC.....   | 8  |
| Figura 5. DSTATCOM basado en VSC.....   | 8  |
| Figura 6. Operación del DSTATCOM.....   | 9  |
| Figura 7. Diagrama de flujo para el algoritmo de barrido adelante – atrás.....    | 10                                       |
| Figura 8. Barrido de corrientes.....  | 10                                       |
| Figura 9. Barrido de voltajes.....  | 11                                       |
| Figura 10. Diagrama de flujos para la modelación matemática.....                  | 13                                       |
| Figura 11. Sistema IEEE de 33 barras .....  | 16                                       |
| Figura 12. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 3 DSTATCOM | 17                                       |
| Figura 13. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 4 DSTATCOM | 17                                       |
| Figura 14. Perfiles de voltaje del sistema IEEE 33 barras sin DSTATCOM .....      | 17                                       |
| Figura 15. Óptima ubicación de 3 DSTATCOM en el sistema IEEE de 33 barras .....   | 18                                       |
| Figura 16. Perfiles de voltaje del sistema IEEE 33 barras con 3 DSTATCOM .....    | <b>¡Error!<br/>Marcador no definido.</b> |
| Figura 17. Óptima ubicación de 4 DSTATCOM en el sistema IEEE de 33 barras .....   | 18                                       |
| Figura 18. Perfiles de voltaje del sistema IEEE 33 barras con 4 DSTATCOM .....    | 19                                       |
| Figura 19. Sistema de 59 barras .....   | 19                                       |
| Figura 20. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 3 DSTATCOM | 19                                       |
| Figura 21. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 4 DSTATCOM | 19                                       |
| Figura 22. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras sin DSTATCOM .....        | 19                                       |
| Figura 23. Óptima ubicación de 3 DSTATCOM en el sistema de 59 barras.....         | 20                                       |
| Figura 24. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras con 3 DSTATCOM .....      | 20                                       |
| Figura 25. Óptima ubicación de 4 DSTATCOM en el sistema de 59 barras.....         | 21                                       |
| Figura 26. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras con 4 DSTATCOM .....      | 21                                       |
| Figura 27. Comparación de pérdidas activas para cada escenario .....              | 21                                       |
| Figura 28. Comparación de pérdidas activas para cada escenario .....              | 21                                       |
| Figura 29. Resumen e indicadores de la temática – Estado de arte .....            | 31                                       |
| Figura 30. Indicador de formulación del problema – Estado de arte .....           | 31                                       |
| Figura 31. Indicador de solución – Estado de arte .....                           | 32                                       |

### 3. ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Clasificación de las Perturbaciones .....                                    | 6  |
| Tabla 2: Modo de operación del DSTATCOM.....  | 8  |
| Tabla 3: Variables de operación.....  | 8  |
| Tabla 4: Tipos de operación del DSTATCOM en relación a sus variables .....            | 9  |
| Tabla 5: Datos de las líneas del sistema IEEE 33 barras .....                         | 14 |
| Tabla 6: Cargas del sistema IEEE 33 barras .....                                      | 14 |
| Tabla 7: Datos de las líneas del sistema IEEE 59 barras .....                         | 15 |
| Tabla 8: Cargas del sistema IEEE 59 barras .....                                      | 15 |
| Tabla 9: Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 33 barras, escenario 1 .....       | 17 |
| Tabla 10: Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 33 barras, escenario 2.....       | 17 |
| Tabla 11: Óptima ubicación de los compensadores en el sistema IEEE de 33 barras ..... | 18 |
| Tabla 12: Óptima ubicación de los compensadores en el sistema IEEE de 33 barras ..... | 18 |
| Tabla 13: Valores del DSTATCOM para el sistema de 59 barras, escenario 1 .....        | 20 |
| Tabla 14: Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 59 barras, escenario 2.....       | 20 |
| Tabla 15: Óptima ubicación de los compensadores en el sistema de 59 barras.....       | 20 |
| Tabla 16: Óptima ubicación de los compensadores en el sistema de 59 barras.....       | 21 |
| Tabla 17: Matriz de estado de arte .....  | 26 |

# ÓPTIMA UBICACIÓN DE EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS

## Resumen

El presente artículo plantea determinar la óptima ubicación de compensadores de potencia reactiva (DSTATCOM), a través de la implementación del método de barrido iterativo adelante – atrás para flujos de potencia.

El algoritmo implementado considera minimizar las pérdidas en el sistema de distribución considerando como restricción que los niveles de voltaje estén dentro de un margen determinado. De igual manera la selección de las barras candidatas se realiza automáticamente mediante la aplicación de un algoritmo de búsqueda.

Una vez determinadas las barras candidatas se evalúan iterativamente flujos de potencia de barrido adelante – atrás, para de esta manera determinar la ubicación de los DSTATCOM.

Para el modelamiento de este problema, se toma como caso de estudio dos sistemas de distribución. Se implementa el sistema de prueba IEEE de 33 nodos y un sistema de 59 nodos propuesto por el autor.

El análisis de los resultados está definido en base a la inclusión de 3 y 4 compensadores en los dos sistemas o casos de estudio.

**Palabras Clave:** Compensación reactiva, Potencia reactiva, DSTATCOM, Método de barrido iterativo adelante – atrás, Perfiles de voltaje.

## Abstract

The present research is to determine the optimal location of reactive power compensators (DSTATCOM), through the implementation of the iterative forward-backward sweep method for power flows.

The implemented algorithm considers minimizing the losses in the distribution system considering as a restriction that the voltage levels are within a certain margin. Similarly, the selection of candidate bars is done automatically by applying a search algorithm.

Once the candidate bars have been determined, forward-backward sweep power flows are evaluated iteratively, in order to determine the location of the DSTATCOMs.

For the modeling of this problem, two distribution systems are taken as a case study. The IEEE 33-node test system and a 59-node system proposed by the author are implemented.

The analysis of the results is defined based on the inclusion of 3 and 4 compensators in the two systems or case studies.

**Keywords:** Reactive compensation, Reactive power, DSTATCOM, Iterative forward – backward method, Voltage profiles.

# 1 Introducción

Uno de los fundamentos principales de un sistema de distribución es proveer un servicio eléctrico de alta calidad. Con el aumento de la demanda los sistemas de distribución suelen estar operando a su máxima capacidad; lo que genera una disminución en la calidad de la energía eléctrica.

Esta disminución genera inconvenientes para un sin número de usuarios incluidas las empresas distribuidoras, por todo ello, las redes de distribución deben asegurar la entrega del suministro de energía eléctrica de forma confiable, segura y eficiente, adecuada al tipo de usuario [1], [2].

Uno de los sectores en donde se presentan estos inconvenientes como caídas de voltaje son los distritos industriales, por lo general este sector consta de grandes cargas con un alto componente inductivo; estos problemas traen consigo el incremento de las pérdidas en el sistema y la reducción en el factor de potencia [3].

Por lo cual es fundamental implementar diferentes técnicas de compensación para poder corregir la disminución de la calidad de energía en los sistemas de distribución [4].

Con el paso de los años el estudio de la calidad de energía ha tenido como objetivo realzar la eficiencia en los sistemas eléctricos de potencia [5], mediante la electrónica de potencia que se ha encargado de crear dispositivos que permiten controlar, conservar y procesar la electricidad.

Sin embargo, los problemas en la calidad de la energía se siguen produciendo debido a cargas dinámicas o no lineales o por la interacción entre la carga y la red de distribución [6].

Sin dejar de lado aspectos como el parpadeo de voltaje (Flicker), huecos de tensión (Sag), sobretensiones (Swell), son algunos de los problemas que generan la disminución en la calidad de la energía.

Para reducir o mitigar estos problemas se han creado diversos compensadores encargados de corregir el factor de potencia, regular el valor del voltaje en los nodos de las barras de un SEP, todo esto mediante la inclusión de elementos pasivos del tipo L (inductivo) y C (capacitivo) y de elementos activos como CSI (Fuentes de corriente) y VSI (fuentes de voltaje) [7].

Con el avance de la tecnología y la adaptación de nuevos sistemas eléctricos de potencia se han desarrollado nuevos dispositivos del tipo Custom Power, que se basan en principios básicos de la electrónica de potencia y son usados principalmente para mejorar la calidad de la energía [6].

Suelen estar divididos en compensadores conectados en serie del tipo DVR (Dynamic Voltage Restorer), compensadores conectados en derivación del tipo DSTATCOM (Distribution Static Compensator) y compensadores conectados en serie y derivación del tipo UPQC (Unified Power Quality Compensator) [6], [8].

En función de lo anteriormente mencionado es indispensable mejorar la calidad de la energía, para ello en el trabajo a desarrollar se va a implementar una metodología iterativa del tipo adelante – atrás, la cual es idónea para sistemas de distribución del tipo radial [9].

El objetivo principal para aplicar esta metodología es la de determinar la ubicación óptima para los equipos de compensación, los cuales permitan minimizar las pérdidas en los conductores de las redes eléctricas de distribución.

Una vez determinada la ubicación óptima de los compensadores, estos se van a encargar de inyectar potencia reactiva en el sitio designado, disminuyendo así la componente reactiva inductiva y por consiguiente las pérdidas; para el trabajo se ha considerado como restricción técnica que los niveles de voltaje permanezcan dentro de sus límites operativos [6], [10].

Los dispositivos de compensación a implementar en las redes de distribución son los D-STATCOM, este dispositivo es un compensador estático de potencia, que entra en funcionamiento a partir de una fuente de voltaje conectada en derivación, tiene por finalidad controlar potencia reactiva, regular los niveles de voltaje, mitigar problemas de armónicos [11], [12].

Dentro de su estructura cuentan con un almacenador de energía de corriente continua, un convertidor DC/AC, la importancia del convertidor es que permite obtener voltaje en corriente alterna la cual permite compensar tanto potencia activa como reactiva, de igual manera consta de un transformador de acoplamiento encargado de asegurar la continuidad en el suministro eléctrico [13].

Teniendo en cuenta lo que son y como es su estructura, lo que se pretende en esta investigación es determinar una correcta ubicación de estos dispositivos en la red de distribución a partir de un modelo matemático; este modelo tiene por objetivo determinar la ubicación del DSTATCOM en la red, es decir, en que nodo debe ser conectado el dispositivo; de igual manera debe garantizar que las pérdidas van a ser minimizadas a partir de una optimización.

En [13] se trata acerca de una red de distribución de 33 kV desarrollada en Matlab/Simulink, en la cual se plantea implementar un DSTATCOM con la

finalidad de controlar las fluctuaciones de voltaje, este control se lo ejecuta a través de PWM (Modulación por ancho de pulsos); la ventaja de aplicar este método es que si el voltaje de salida es menor al voltaje de la barra el dispositivo va a absorber potencia reactiva por lo que se va a comportar como una inductancia, caso contrario, si el voltaje es mayor a la tensión de la barra, el DSTATCOM va a actuar como un condensador que genera potencia reactiva.

En [14] se menciona la simulación de un DSTATCOM bajo diferentes condiciones de cargas (50 kW, 100 kW y 150 kW) y una carga del tipo RL trifásica de 10 kVA, estas cargas van a ser encendidas en intervalos de 0.3 a 0.8 segundos para crear diferentes caídas de voltaje; para verificar el comportamiento del compensador su simulación se va a realizar en Matlab/Simulink para una línea de distribución de 415 V.

En [15] la investigación tiene por finalidad mejorar los perfiles de voltaje en una red de distribución real mediante el método de relación de voltaje positivo (PVR); la simulación se la va a implementar en el software OPEN-DSS. El método tiene por objetivo determinar la o las barras más débiles del sistema IEEE 13 barras, una vez determinada la barra se procede a acoplar el DSTATCOM.

En [16] trata acerca de la eliminación de las corrientes armónicas bajo diversas perturbaciones de cargas, estas son del tipo R, RL y RLE. El método a emplear es conocido como MIRPT para DSTATCOM (Potencia reactiva instantánea modificada) que en conjunto con la transformada rápida de Fourier (FFT) se verifica si la deformación armónica total está dentro de los parámetros que dictamina IEEE Std. 519-1992. Tanto la simulación como los resultados se realizan en Matlab.

En [17] se va a ubicar al DSTATCOM en el punto de acoplamiento común (PCC) mediante un controlador PI, este utiliza una técnica de procesamiento de señales estáticas; este modo de control permite eliminar los armónicos creados en la fuente, obteniendo una forma de onda sinusoidal y balanceada. La implementación de este tipo de control se lo realiza en un sistema de distribución con cargas lineales y no lineales, la simulación se la realiza en Matlab/Simulink.

En [18] se busca reducir la creación de armónicos, caída de voltaje y mejorar el factor de potencia, a través de la metodología IRP (Instantaneous Reactive Power), en un sistema de distribución de 25 kV, esta metodología permite obtener una fuente de potencia constante tras la compensación y en general es muy útil para obtener un factor de potencia igual a uno. La simulación se la realiza en Matlab/Simulink.

En [19] la investigación tiene por objetivo eliminar o reducir los THD presente tanto en el voltaje como en la corriente, el trabajo plantea dos escenarios, uno en donde no se implementa el DSTATCOM y otro en donde el DSTATCOM es aplicado dentro del sistema en conjunto con unas cargas variables; para lograr esto se va a crear un controlador del tipo PI, todos estos elementos son creados en el software Matlab/Simulink.

En [20] propone la creación de un solo DSTATCOM, el cual contenga sus dos modos de control, es decir un modo de control de corriente y otro de voltaje; para que este dispositivo funcione se plantea el uso del método MPC (Model Predictive Control), y este método tiene por objetivo generar un factor de potencia cercano a la unidad al igual que los voltajes en los nodos del sistema, de igual manera la

simulación de este caso se la realiza en Matlab/Simulink.

En [21] investiga como reducir las pérdidas en el sistema radial IEEE 33 barras, a través del análisis de sensibilidad, el cual permite determinar la ubicación óptima para los condensadores y así reducir el tiempo de búsqueda durante los procesos de optimización. Una vez implementado el DSTATCOM en una de las barras seleccionadas se prevé tener como resultado la reducción en las pérdidas del sistema y poder ahorrar costos.

En [22] propone investigar la capacidad del DSTATCOM en presencia de cargas variables, para ello el dispositivo se va a conectar en derivación a la carga, y así poder proteger la carga de perturbaciones. En definitiva, el trabajo estudia la aplicación del DSTATCOM como un regulador de voltaje en una red de distribución. La simulación que propone este autor se la realiza en un sistema de distribución de 25 kV a través del software Matlab/Simulink.

La estructura del presente artículo está compuesta por: Sección I: introducción, en esta sección se explica los antecedentes de los diferentes compensadores de potencia reactiva, al igual se habla de investigaciones relacionadas al tema del artículo. Sección II: marco teórico, en esta sección se explica todo lo relacionado al DSTATCOM y los diferentes tipos de sistemas de distribución. Sección III: formulación del problema, en esta sección se explica el flujo de potencia a implementar en los sistemas de prueba IEEE, de igual manera se explica la formulación matemática del barrido iterativo adelante - atrás. Sección IV: caso de estudio, en esta sección se muestra los datos de los dos casos de estudio a implementar. Sección V: análisis de resultados. Sección VI: conclusiones y trabajos futuros. Sección VII: referencias.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Generalidades de los sistemas de distribución

Las redes de distribución son uno de los tantos componentes que forman parte de los sistemas eléctricos de potencia. En esta etapa la potencia generada se debe repartir a una gran cantidad de consumidores.

Para poder cumplir este propósito se encuentran las centrales eléctricas, encargadas de transformar la energía mecánica a energía eléctrica, permitiendo suministrar la electricidad hacia grandes sectores que constan de numerosas cargas [23].

#### 2.1.1 Clasificación de los sistemas de distribución de acuerdo a su construcción

De acuerdo a su construcción los sistemas de distribución pueden ser aéreos y subterráneos [24].

##### *Sistema de distribución aéreo*

Poseen un conductor desnudo, el cual va soportado mediante aisladores en postes de madera o concreto; sus principales ventajas son [24]:

- Precios menores,
- Adquisición de materiales de una manera más simple,
- Mantenimiento más simple,
- Fácil identificación de fallas.

Entre sus desventajas se encuentran:

- Mala imagen hacia los usuarios,
- Seguridad muy baja,
- Presencia de muchas fallas atmosféricas.

##### *Sistema de distribución subterráneo*

Son empleadas principalmente en zonas en donde se es difícil instalar redes aéreas, sus principales ventajas son:

- Mas fiables y seguras,
- Mejor apariencia.

Entre sus desventajas se encuentran:

- Alto costo de construcción,
- Mantenimiento más complejo,

- Están expuestas a la humedad.

#### 2.1.2 Sistemas radiales, anillo y malla

La distribución de la energía eléctrica desde la planta de generación al consumidor tiene por lo general dos niveles, un primario que transporta niveles de voltaje superiores a los que el consumidor maneja y un secundario que maneja voltajes de utilización hasta el medidor del consumidor [25].

Los sistemas básicos de distribución se encuentran dentro la distribución primaria y se clasifican en:

- Sistemas radiales,
- Sistema de anillo abiertos o cerrados,
- Sistema de malla.

##### *Sistemas radiales*

Son los sistemas con menos confiabilidad y los más económicos, se caracterizan por el trayecto de la corriente en un solo sentido, son de fácil mantenimiento por lo tanto son los sistemas más empleados [25], [26].

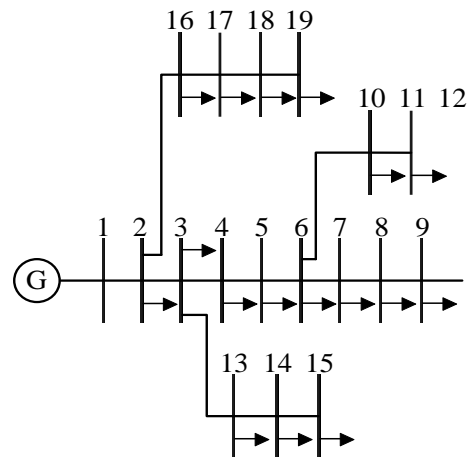


Figura 1. Sistema de distribución tipo radial

##### *Sistemas de anillo*

Este sistema cuenta con más de una trayectoria entre la fuente o fuentes y la carga, para proporcionar el servicio de energía eléctrica [25].



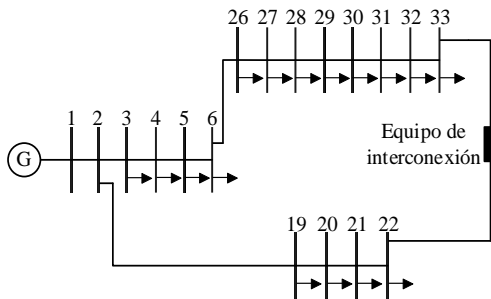


Figura 2. Sistema de distribución tipo anillo

### Sistemas de malla

Estos sistemas de distribución poseen mayor confiabilidad en el servicio eléctrico, por lo general son combinaciones de los sistemas anillo y radial; se los suele emplear cuando existen cargas críticas en el sistema o cuando existen cargas que suelen quedar aisladas del servicio ante la presencia de una falla [25].

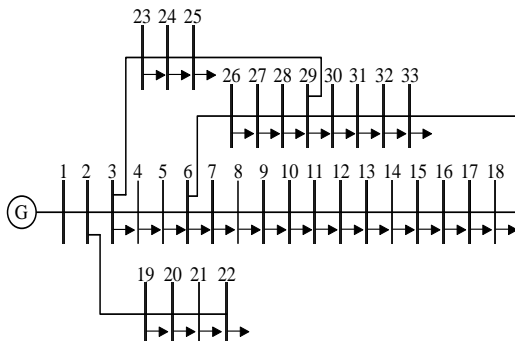


Figura 3. Sistema red o malla

## 2.2 Perturbaciones que afectan la calidad de la energía en los sistemas de distribución

Dentro de los sistemas de distribución los factores que disminuyen la calidad de energía son las perturbaciones, estas pueden ser provocadas por causas externas como tormentas eléctricas o internas provocadas por cortocircuitos o fallas en algún elemento de la red [27].

Las perturbaciones como parte del estudio en la calidad del suministro y definidas por el estándar IEEE de un sistema eléctrico de potencia se pueden organizar en siete categorías, según la

forma de onda [27], [28], tal y como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 1:** Clasificación de las Perturbaciones

| Categoría de la perturbación              | Causas   |
|---|--|
| 1. Transitorios                           |  |
| Impulsiva                                 | Rayos, impulsos de conexión                                  |
| Oscilatoria                               | Desconexión de cargas inductivas/capacitivas                 |
| 2. Interrupciones                         | Conmutación, fallas de la red, disparo de disyuntores        |
| 3. Bajada de tensión/subtensión           |  |
| Bajada de tensión                         | Cargas de arranque, fallas                                   |
| Subtensión                                | Fallas de la red, cambios de carga                           |
| 4. Aumento de tensión/sobretensión        |  |
| Aumento de tensión                        | Cambios de carga, fallas de la red                           |
| Sobretensión                              | Cambios de carga, fallas de la red                           |
| 5. Distorsión de la forma de onda         |  |
| Desplazamiento por CC                     | Rectificadores, fuentes de alimentación defectuosos          |
| Armónicas                                 | Cargas electrónicas (cargas no lineales)                     |
| Interarmónicas                            | Señales de control, cicloconvertidores, motores de inducción |
| Corte intermitente                        | Mecanismos de velocidad variable                             |
| 6. Fluctuaciones de tensión               | Funcionamiento intermitente de los equipos de carga          |
| 7. Variaciones de la frecuencia eléctrica | Generadores de reserva regulados en forma ineficiente        |

### 2.3 Calidad de la energía en los sistemas de distribución industriales

La electricidad es considerada uno de los insumos más importantes del planeta, sin electricidad, el mundo no se movería y las industrias dejarían de funcionar. Por lo tanto, brindar una correcta calidad en la energía es una de las grandes metas dentro de los sistemas eléctricos de potencia [7], [8].

En Ecuador la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables en su último balance nacional de energía del año 2021, sitúa al sector industrial con un 23,37% en consumo de energía; siendo este el segundo consumo más grande después del residencial [9].

Para determinar la calidad de la energía en los sistemas de distribución, por lo general se usan índices de calidad para encontrar niveles de tensión y el porcentaje de armónicos en la red [10].

#### *Nivel de voltaje (Índice de calidad)*

$$\Delta V_k (\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad (1)$$

Donde:

- $\Delta V_k$ : Alteración de voltaje, en el punto de prueba,
- $V_k$ : Voltaje RMS,
- $V_n$ : Voltaje nominal.

#### *Armónicos (Índice de calidad)*

$$V_i' = \left( \frac{V_i}{V_n} \right) * 100 \quad (2)$$

$$THD = \left( \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

- $V_i'$ : Factor de distorsión armónica

individual de voltaje,

$THD$ : Factor de distorsión total por armónicos,

$V_i$ : Armónicos de tensión de orden n para el cálculo del THD.

### 2.4 Principio básico de operación de un DSTATCOM

El DSTATCOM al ser un compensador estático de potencia, puede tener aplicaciones como el control de potencia reactiva y la regulación de voltaje [11], [17]; por lo general suelen ser ubicados en conexión paralelo hacia el sistema de distribución o directamente a la carga [32], [33].

La estructura básica de un DSTATCOM consta de un almacenador de energía de corriente continua, un inversor de potencia y un sistema de control encargado de que todos los elementos funcionen correctamente [1].

El DSTATCOM empieza su funcionamiento al momento que una corriente entra en su sistema, mediante esto el dispositivo opera ininterrumpidamente monitoreando tanto los voltajes y las corrientes, y en el caso de existir un disturbio, el dispositivo se encarga de decidir una cantidad de compensación para que el sistema no presente fallas [1], [5], [10].

#### 2.4.1 Clasificación de los DSTATCOMs

Su clasificación se basa dependiendo del convertidor que se utilice, estos convertidores pueden ser de fuente de corriente (CSC) o de fuente de voltaje (VSC) [34].

#### *DSTATCOM basado en CSC (Current-source converter)*

La topología CSC tiene por característica principal la salida de una corriente alterna controlable, esta topología suele ser más

fiable y tolerante ante fallas, esto debido al inductor que limita la tasa de aumento de la corriente en caso de una falla [35].

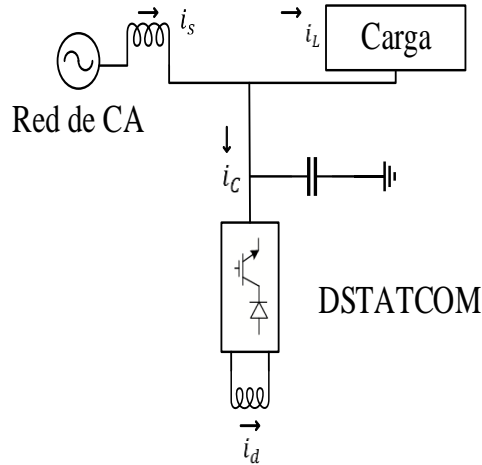


Figura 4. DSTATCOM basado en CSC

### ***DSTATCOM basado en VSC (Voltage-source converter)***

La topología VSC se puede clasificar en: VSC sin transformador, VSC con transformador no aislado y VSC con transformador aislado; esta técnica se la usa para estabilizar y mejorar el perfil de voltaje [34].

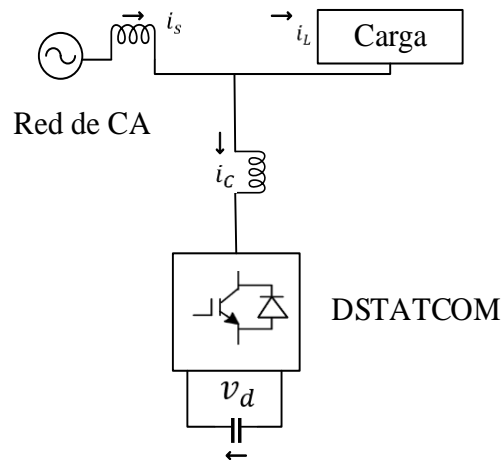


Figura 5. DSTATCOM basado en VSC

## **2.5 Modos de operación y control de un DSTATCOM**

El DSTATCOM tiene como principal función compensar potencia reactiva, lo que genera una mejora en el voltaje de los nodos; para realizar esta acción el dispositivo varía la magnitud y el ángulo del VSC (Voltage Source Converter) en relación al nodo del sistema en el cual el DSTATCOM es ubicado [22], [36], [37].

El intercambio de la potencia reactiva que existe entre el DSTATCOM y la red, es del fenómeno capacitivo e inductivo, esta relación se produce por el VSC y la tensión del nodo que va a ser analizado [22], la relación antes mencionada se describe en la tabla dos, considerando que,  $V_{barra}$  = tensión en el nodo y  $V_{VSC}$  = voltaje en el modo de operación VSC.

Tabla 2: Modo de operación del DSTATCOM

| Tipo de relación      | Modo de operación |
|-----------------------|-------------------|
| $V_{barra} > V_{VSC}$ | Capacitivo        |
| $V_{barra} < V_{VSC}$ | Inductivo         |

### **2.5.1 Modo de operación del compensador**

En el momento en que el compensador comienza a operar, este elemento va a poseer flujos de potencia activa y reactiva en ambos sentidos, a partir de lo cual se generan modos de operación en relación con las siguientes variables [38].

Tabla 3: Variables de operación

| Variable | Significado                                   |
|----------|---|
| $\theta$ | Ángulo de la red de distribución              |
| $\phi$   | Ángulo del convertidor                        |
| $V_d$    | Magnitud de voltaje de la red de distribución |
| $V_s$    | Magnitud de voltaje de salida del convertidor |

Las variables en el modo de operación VSC se pueden visualizar en la figura 6:

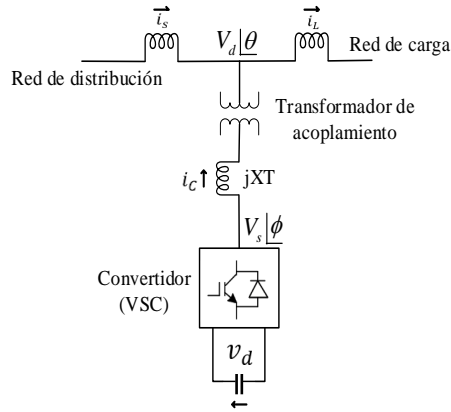


Figura 6. Operación del DSTATCOM

Teniendo en cuenta las variables mencionadas, el DSTATCOM va a presentar los siguientes modos de operación:

Tabla 4: Tipos de operación del DSTATCOM en relación a sus variables

| Operación         | Respuesta del SEP                           |
|-------------------|---|
| $ V_d > V_s $     | Absorbe potencia reactiva (inductivo)       |
| $ V_s > V_d $     | Genera potencia reactiva (capacitivo)       |
| $ \theta > \phi $ | Proporciona potencia activa (reduce $V_d$ ) |
| $ \theta < \phi $ | Absorbe potencia activa (eleva $V_d$ )      |

### 2.5.2 Modos de control del DSTATCOM

El modo de control se basa en como el dispositivo es conectado en el sistema, para lo cual se distinguen dos modos:

1. Modo de control por corriente
2. Modo de control por voltaje

#### Modo de control por corriente

Este control permite solucionar problemas como la rectificación del factor de potencia y el control de la variación en los perfiles de voltaje. Para realizar este modo de control el DSTATCOM debe ser

conectado en paralelo a la carga; el comportamiento ideal del dispositivo, puede ser interpretado como una fuente de corriente controlada [1], [39], [7], [40].

#### Modo de control por voltaje

Este modo tiene por objetivo controlar las perturbaciones provocadas en el sistema, las perturbaciones controladas pueden ser: regulación y compensación de voltaje de corta duración, control en la distorsión de la forma de onda y compensación de fluctuaciones de voltaje, conocidas como parpadeo de voltaje (flicker) [1], [6], [41], [42].

La ubicación óptima del DSTATCOM debe ser en la barra donde se requiere controlar o regular el nivel de voltaje [41], [43].

### 3 Formulación del problema

La idea de implementar compensadores de potencia reactiva tiene por objetivo minimizar las pérdidas de potencia considerando restricciones de voltaje.

Con ayuda del algoritmo y en conjunto con el barrido iterativo adelante - atrás se puede determinar la óptima ubicación de los compensadores.

Sin embargo, el enfoque principal de esta investigación es la de minimizar las pérdidas en los conductores de la redes de distribución a partir de la inyección de potencia reactiva en un sitio designado [3].

Los casos de estudio analizados en este artículo, son sistemas de distribución con topología radial, este tipo de configuraciones ante la presencia de una falla genera una interrupción o corte de suministro en el sistema eléctrico, por lo que el consumidor final se ve afectado [25], [26].

Por ello, lo que se busca es garantizar que no existan este tipo de interrupciones, una de las alternativas para disminuir estos errores es la corrección del factor de potencia y el fortalecimiento de los

perfiles de voltaje a través de los dispositivos conocidos como DSTATCOM.

Otro punto importante es el flujo de potencia una vez que el DSTATCOM es implementado, dado que el sistema de distribución es radial uno de los métodos que pueden ser empleados es el barrido iterativo adelante - atrás o también conocido como la técnica de la escalera [44].

Este método radica en la solución de las leyes de Kirchhoff, aplicados a sistemas de distribución radiales, en donde constan líneas trifásicas, bifásicas y monofásicas no balanceadas.

### 3.1 Método de Barrido Iterativo adelante – atrás

El método se compone de dos partes:

1. Barrido hacia adelante
2. Barrido hacia atrás

En primera instancia, el barrido hacia adelante se encarga de calcular los voltajes aguas abajo de la fuente o generación. Por ello, el método deduce que las corrientes de carga son iguales a cero y se calcula lo voltajes de carga, dada esta condición los voltajes de carga serán idénticos a los voltajes de la fuente [45].

Mientras que, el barrido hacia atrás calcula las corrientes desde la carga a la fuente utilizando los voltajes calculados más recientes del barrido hacia adelante; es decir, se aplica la teoría de la segunda ley de Kirchhoff, en donde la suma de las caídas y subidas de tensión en un campo cerrado siempre debe ser cero.

En la figura 7 se detalla mediante un diagrama de flujo la operación del barrido adelante – atrás, teniendo en cuenta que el barrido va a converger dependiendo de la máxima iteración.

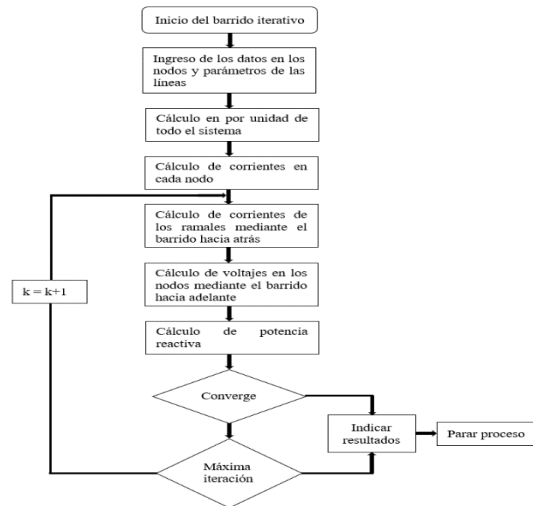


Figura 7. Diagrama de flujo para el algoritmo de barrido adelante – atrás

Posteriormente de llevarse a cabo los primeros barridos hacia adelante y hacia atrás, los nuevos voltajes de carga se determinan utilizando las corrientes más recientes.

Estos barridos continúan hasta que el error entre los voltajes de carga nuevos y anteriores se encuentren dentro de una tolerancia especificada [44].

#### 3.1.1 Barrido de corriente

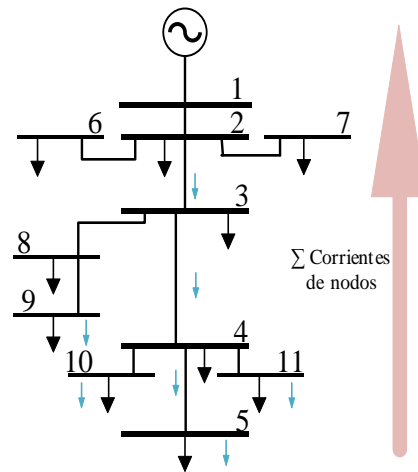


Figura 8. Barrido de corrientes

Para el desarrollo del barrido de corriente se debe emplear la primera ley de Kirchhoff, para ello se debe asumir un valor de 1 en p.u. en la barra slack. El

cálculo de las corrientes nodales se debe empezar desde un nodo final hacia un nodo inicial (barra slack); por último, se debe sumar todas las corrientes lo que se conoce como barrido de corriente [46].

En (4) se señala la ecuación para el desarrollo del barrido de corriente:

$$(I_{ok})_{ABC} = (I_o)_{ABC} + \sum (I_{oz})_{ABC} \quad (4)$$

Donde:

- $I_{ok}$ : Flujo de corriente a través de las líneas o-k.
- $I_{oz}$ : Flujo de corriente a través de las líneas o-z.
- $I_o$ : Corriente inyectada en o (corriente nodal).

### 3.1.2 Barrido de voltaje

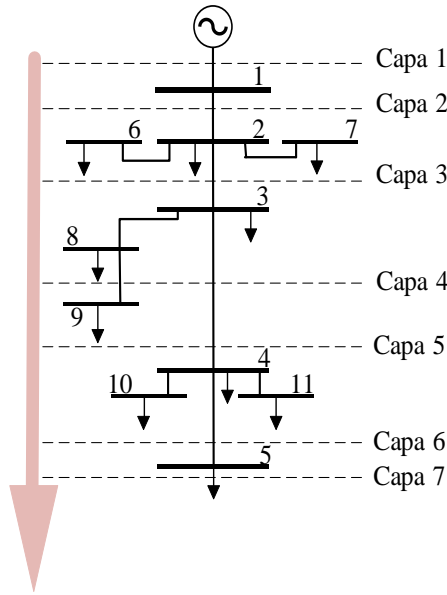


Figura 9. Barrido de voltajes

Por medio de la segunda ley de Kirchhoff se puede obtener los valores de las caídas de voltaje en el sistema, primero se debe empezar desde el nodo inicial y continuar el proceso de cálculo aguas abajo, es decir en cada uno de los nodos faltantes [46].

Con los resultados obtenidos en el barrido de corrientes se procede a

determinar los valores de las tensiones en cada uno de los nodos, una vez realizado este proceso se debe actualizar las corrientes en los nodos y así empezar nuevamente el proceso o iteración.

Este proceso se describe en la ecuación (5):

$$V_o = V_p + Z_{op} * I_{op} \quad (5)$$

Donde:

- $V_o$ : Tensión en el nodo de llegada.
- $V_p$ : Tensión en el nodo de entrega.
- $Z_{op}$ : Impedancia entre o-p.
- $I_{op}$ : Flujo de corriente a través de o-p.

Dado que las corrientes se actualizan en cada uno de los nodos, es obligatorio corregir el valor de tensión que se genera en la barra infinita (slack), con ayuda de la ecuación (6) se vuelve a actualizar el voltaje en el nodo fuente:

$$V_{slk} = V_{th} - Z_{th} * I_{th} \quad (6)$$

Donde:

- $V_{slk}$ : Tensión en el nodo slack.
- $V_{th}$ : Tensión en el nodo de entrega.
- $Z_{th}$ : Impedancia de Thévenin.
- $I_{th}$ : Corriente total en el nodo fuente.

### 3.1.3 Criterio de convergencia

Anteriormente se mencionó que el DSTATCOM es idóneo para producir o entregar potencia reactiva, por lo cual se debe definir la ecuación que permita esta acción.

En (7) se observa la ecuación que permite calcular la potencia reactiva en el dispositivo [47]:

$$Q_{DSTC} = \frac{|V_o||V_{DSTC}|}{X_{DSTC}} \cos \delta - \frac{|V_o|^2}{X_{DSTC}} \quad (7)$$

Y para la potencia activa tenemos la siguiente ecuación (8):

$$P_{DSTC} = \frac{|V_o||V_{DSTC}|}{|X_{DSTC}|} \sin \delta \quad (8)$$

Donde:

|              |   |
|--------------|---|
| $Q_{DSTC}$ : | Potencia reactiva de intercambio entre el dispositivo y la red.             |
| $P_{DSTC}$ : | Potencia activa de intercambio entre el dispositivo y la red.               |
| $V_o$ :      | Tensión en el nodo de conexión.   |
| $V_{DSTC}$ : | Voltaje del dispositivo.  |
| $X_{DSTC}$ : | Reactancia generada entre el dispositivo y el nodo candidato.               |
| $\delta$ :   | Diferencia entre los valores de ángulo del dispositivo y el nodo candidato. |

### 3.2 Modelamiento matemático

Para modelar el aspecto matemático en primer lugar se debe determinar una función objetivo en donde se ponga en manifiesto el número de DSTATCOM que van a ser implementados en los sistemas de prueba IEEE 33 y 59 barras.

Del mismo modo se debe considerar las pérdidas totales de energía en las líneas y la potencia reactiva total que se va a inyectar en las barras candidatas.

El modelo matemático tiene con objetivo determinar si la solución propuesta en el artículo cumple con lo establecido en el mismo, es decir, con la implementación de los DSTATCOM se van a reducir las pérdidas y van a mejorar los perfiles de voltaje.

#### 3.2.1 Función objetivo

La función objetivo del artículo basa su principio en las pérdidas totales en las líneas y el número óptimo de ubicaciones de los DSTATCOM.

Para ello se debe determinar la potencia reactiva que produce o entrega el DSTATCOM y en especial la búsqueda de las barras candidatas en donde la potencia reactiva va a ser inyectada.

La función objetivo se la detalla en la ecuación (9).

$$\begin{aligned} \text{Min } P &= P_{Perd}^{Total} + Q_{DSTC}^{Total} \\ &= \sum_{i=1}^{N_b-1} P_{Perd_i} + \sum_{j=1}^{N_{DSTC}} Q_{DSTC_j} \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

|                      |  |
|----------------------|--|
| $P_{Perd}^{Total}$ : | Pérdida total de energía.                            |
| $Q_{DSTC}^{Total}$ : | Potencia reactiva en el DSTATCOM.                    |
| $N_b$ :              | Número de barras.                                    |
| $N_{DSTC}$ :         | Número óptimo de ubicación de los DSTATCOM.          |
| $P_{Perd_i}$ :       | Pérdida de potencia activa en la línea i.            |
| $Q_{DSTC_j}$ :       | Potencia reactiva total inyectada en la ubicación j. |

#### 3.2.2 Restricción máxima cantidad de DSTATCOM

Esta restricción tiene como objetivo reducir la colocación de los compensadores. Por lo tanto, el número óptimo de compensadores debe ser menor o igual al número máximo de ubicaciones posibles, esta restricción se la aprecia en la ecuación (10).

$$N_{DSTATCOM} \leq N_{DSTATCOM}^{max} \quad (10)$$

Donde:

|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| $N_{DSTATCOM}$ : | Número de compensadores. |
|------------------|--------------------------|

$N_{DSTATCOM}^{max}$ : Número máximo de ubicaciones posibles.

### 3.2.3 Restricción de voltaje en las barras

El voltaje en cada barra debe estar dentro de sus límites mínimos ( $V_{min}$ ) y máximos ( $V_{max}$ ), para ello se debe considerar 0.95 p.u. como un voltaje mínimo y 1.03 p.u. como un voltaje máximo.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (11)$$

### 3.2.4 Restricción de la cantidad de potencia reactiva en el DSTATCOM

La inyección de potencia reactiva debe estar dentro de sus límites mínimos y máximos, esta restricción se puede apreciar en la ecuación (12).

$$Q_{DSTCj}^{min} \leq Q_{DSTCj} \leq Q_{DSTCj}^{max} \quad (12)$$

Donde:

$Q_{DSTCj}$ : Inyección de potencia reactiva en la ubicación j.

El siguiente diagrama de flujo detalla el procedimiento implementado por el algoritmo.

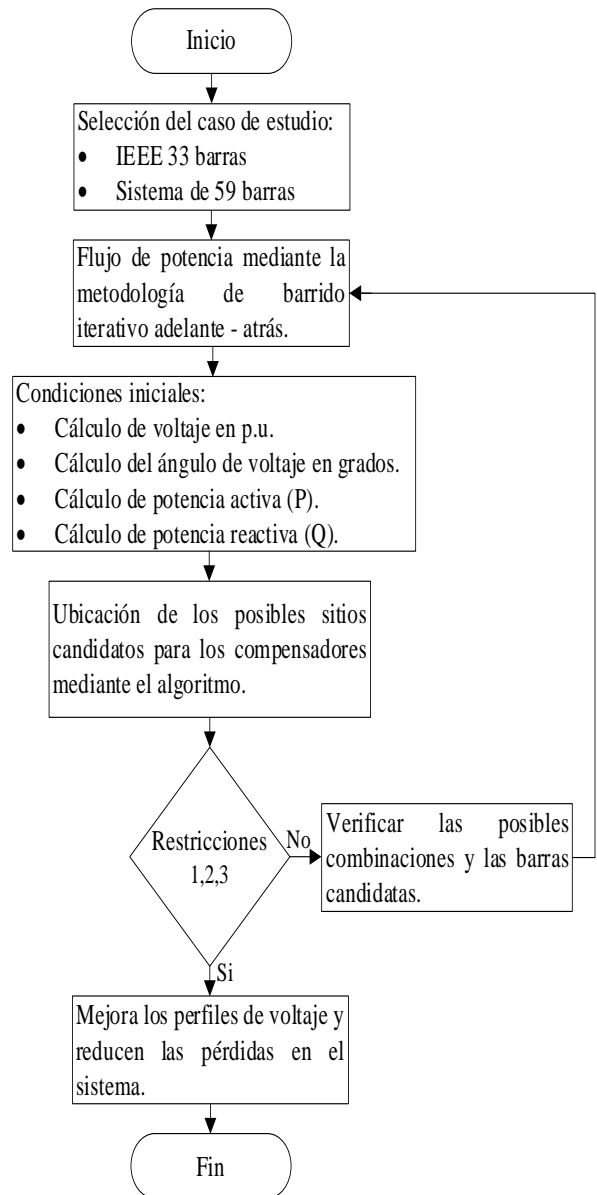


Figura 10. Diagrama de flujos para la modelación matemática

Las restricciones consideradas en el diagrama de flujo son:

- Restricción 1: Restricción máxima cantidad de DSTATCOM.
- Restricción 2: Restricción de voltaje en las barras.
- Restricción 3: Restricción de la cantidad de potencia reactiva en el DSTATCOM.



## 4 Caso de estudio

Para el desarrollo del artículo se consideraron dos casos de estudio.

El primero caso de estudio es el sistema de prueba IEEE de 33 barras, este sistema de distribución al poseer una topología radial se lo considera como un candidato idóneo para ubicación de los compensadores de potencia reactiva.

Los datos de las líneas del sistema IEEE 33 barras se indican en la tabla 5, mientras que, los datos de potencia activa y reactiva de las cargas se indican en la tabla 6. Teniendo como resultado un total de 33 cargas y 32 líneas.

**Tabla 5:** Datos de las líneas del sistema IEEE 33 barras

| Línea | Bus inicio | Bus fin | Resistencia [ohm] | Reactancia [ohm] |
|-------|------------|---------|-------------------|------------------|
| 1     | 1          | 2       | 0,0922            | 0,0470           |
| 2     | 2          | 3       | 0,4930            | 0,2511           |
| 3     | 3          | 4       | 0,3660            | 0,1864           |
| 4     | 4          | 5       | 0,3811            | 0,1941           |
| 5     | 5          | 6       | 0,8191            | 0,7070           |
| 6     | 6          | 7       | 0,1872            | 0,6188           |
| 7     | 7          | 8       | 0,7114            | 0,2351           |
| 8     | 8          | 9       | 1,0300            | 0,7400           |
| 9     | 9          | 10      | 1,0440            | 0,7400           |
| 10    | 10         | 11      | 0,1966            | 0,0650           |
| 11    | 11         | 12      | 0,3744            | 0,1238           |
| 12    | 12         | 13      | 1,4680            | 1,1550           |
| 13    | 13         | 14      | 0,5416            | 0,7129           |
| 14    | 14         | 15      | 0,5910            | 0,5260           |
| 15    | 15         | 16      | 0,7463            | 0,5450           |
| 16    | 16         | 17      | 1,2890            | 1,7210           |
| 17    | 17         | 18      | 0,7320            | 0,5740           |
| 18    | 2          | 19      | 0,1640            | 0,1565           |
| 19    | 19         | 20      | 1,5042            | 1,3554           |
| 20    | 20         | 21      | 0,4095            | 0,4784           |
| 21    | 21         | 22      | 0,7089            | 0,9373           |
| 22    | 3          | 23      | 0,4512            | 0,3083           |
| 23    | 23         | 24      | 0,8980            | 0,7091           |
| 24    | 24         | 25      | 0,8960            | 0,7011           |
| 25    | 6          | 26      | 0,2030            | 0,1034           |
| 26    | 26         | 27      | 0,2842            | 0,1447           |
| 27    | 27         | 28      | 1,0590            | 0,9377           |
| 28    | 28         | 29      | 0,8042            | 0,7006           |

|    |    |    |        |        |
|----|----|----|--------|--------|
| 29 | 29 | 30 | 0,5075 | 0,2585 |
| 30 | 30 | 31 | 0,9744 | 0,9630 |
| 31 | 31 | 32 | 0,3105 | 0,3619 |
| 32 | 32 | 33 | 0,3410 | 0,5302 |

**Tabla 6:** Cargas del sistema IEEE 33 barras

| Bus                | P [kW]      | Q[kVAR]     |
|--------------------|-------------|-------------|
| 1                  | 0           | 0           |
| 2                  | 100         | 60          |
| 3                  | 90          | 40          |
| 4                  | 120         | 80          |
| 5                  | 60          | 30          |
| 6                  | 60          | 20          |
| 7                  | 200         | 100         |
| 8                  | 200         | 100         |
| 9                  | 60          | 20          |
| 10                 | 60          | 20          |
| 11                 | 45          | 30          |
| 12                 | 60          | 35          |
| 13                 | 60          | 35          |
| 14                 | 120         | 80          |
| 15                 | 60          | 10          |
| 16                 | 60          | 20          |
| 17                 | 60          | 20          |
| 18                 | 90          | 40          |
| 19                 | 90          | 40          |
| 20                 | 90          | 40          |
| 21                 | 90          | 40          |
| 22                 | 90          | 40          |
| 23                 | 90          | 50          |
| 24                 | 420         | 200         |
| 25                 | 420         | 200         |
| 26                 | 60          | 25          |
| 27                 | 60          | 25          |
| 28                 | 60          | 20          |
| 29                 | 120         | 70          |
| 30                 | 200         | 600         |
| 31                 | 150         | 70          |
| 32                 | 210         | 100         |
| 33                 | 60          | 40          |
| <b>Carga total</b> | <b>3715</b> | <b>2300</b> |

El segundo caso de estudio es un sistema propuesto de 59 barras, el cual es un sistema de distribución radial adecuado para la colocación de compensadores potencia reactiva. Los datos de las líneas se visualizan en la tabla

7 y los valores de potencia activa y reactiva de las cargas se indican en la tabla 8.

**Tabla 7:** Datos de las líneas del sistema IEEE 59 barras

| Línea | Bus inicio | Bus fin | Resistencia [ohm] | Reactancia [ohm] |
|-------|------------|---------|-------------------|------------------|
| 1     | 1          | 2       | 0,04407           | 0,01950          |
| 2     | 2          | 3       | 0,05472           | 0,01041          |
| 3     | 3          | 4       | 0,06116           | 0,01164          |
| 4     | 4          | 5       | 0,05601           | 0,01066          |
| 5     | 5          | 6       | 0,04378           | 0,00833          |
| 6     | 6          | 7       | 0,09206           | 0,01752          |
| 7     | 7          | 8       | 0,03283           | 0,00625          |
| 8     | 8          | 9       | 0,05086           | 0,00968          |
| 9     | 9          | 10      | 0,01996           | 0,00380          |
| 10    | 10         | 11      | 0,11717           | 0,02230          |
| 11    | 11         | 12      | 0,16996           | 0,03235          |
| 12    | 12         | 13      | 0,07275           | 0,01385          |
| 13    | 13         | 14      | 0,05279           | 0,01005          |
| 14    | 14         | 15      | 0,08756           | 0,01666          |
| 15    | 15         | 16      | 0,01610           | 0,00306          |
| 16    | 16         | 17      | 0,07275           | 0,01385          |
| 17    | 17         | 18      | 0,03155           | 0,00600          |
| 18    | 2          | 19      | 0,04378           | 0,00833          |
| 19    | 19         | 20      | 0,01738           | 0,00331          |
| 20    | 20         | 21      | 0,01803           | 0,00343          |
| 21    | 21         | 22      | 0,06438           | 0,01225          |
| 22    | 3          | 23      | 0,02125           | 0,00404          |
| 23    | 23         | 24      | 0,04120           | 0,00784          |
| 24    | 24         | 25      | 0,06374           | 0,01213          |
| 25    | 6          | 26      | 0,02575           | 0,00490          |
| 26    | 26         | 27      | 0,06567           | 0,01250          |
| 27    | 27         | 28      | 0,05537           | 0,01054          |
| 28    | 28         | 29      | 0,07983           | 0,01519          |
| 29    | 29         | 30      | 0,02357           | 0,01136          |
| 30    | 30         | 31      | 0,00396           | 0,00191          |
| 31    | 31         | 32      | 0,06374           | 0,01213          |
| 32    | 32         | 33      | 0,02768           | 0,00527          |
| 33    | 33         | 34      | 0,05150           | 0,00980          |
| 34    | 32         | 35      | 0,03219           | 0,00613          |
| 35    | 35         | 36      | 0,03734           | 0,00711          |
| 36    | 36         | 37      | 0,05859           | 0,01115          |
| 37    | 35         | 38      | 0,01803           | 0,00343          |
| 38    | 38         | 39      | 0,06889           | 0,01311          |
| 39    | 39         | 40      | 0,04056           | 0,00772          |
| 40    | 40         | 41      | 0,00708           | 0,00135          |
| 41    | 40         | 42      | 0,03283           | 0,00625          |
| 42    | 42         | 43      | 0,03863           | 0,00735          |
| 43    | 42         | 44      | 0,06052           | 0,01152          |
| 44    | 44         | 45      | 0,03670           | 0,00698          |

|    |    |    |         |         |
|----|----|----|---------|---------|
| 45 | 45 | 46 | 0,01288 | 0,00245 |
| 46 | 31 | 47 | 0,02060 | 0,00392 |
| 47 | 47 | 48 | 0,04507 | 0,00858 |
| 48 | 48 | 49 | 0,08048 | 0,01532 |
| 49 | 48 | 50 | 0,06567 | 0,01250 |
| 50 | 50 | 51 | 0,04571 | 0,00870 |
| 51 | 50 | 52 | 0,03026 | 0,00576 |
| 52 | 52 | 53 | 0,05022 | 0,00956 |
| 53 | 52 | 54 | 0,03283 | 0,00625 |
| 54 | 54 | 55 | 0,03026 | 0,00576 |
| 55 | 54 | 56 | 0,03219 | 0,00613 |
| 56 | 56 | 57 | 0,05923 | 0,01127 |
| 57 | 56 | 58 | 0,06889 | 0,01311 |
| 58 | 58 | 59 | 0,07919 | 0,01507 |

**Tabla 8:** Cargas del sistema IEEE 59 barras

| Bus | P [kW]    | Q[kVAR] |
|-----|-----------|---------|
| 1   | 0         | 0       |
| 2   | 699,8057  | 680     |
| 3   | 0         | 0       |
| 4   | 0         | 0       |
| 5   | 321       | 680     |
| 6   | 1608,3748 | 680     |
| 7   | 675,5854  | 680     |
| 8   | 1083,8585 | 680     |
| 9   | 0         | 0       |
| 10  | 2110,6483 | 680     |
| 11  | 181,3949  | 680     |
| 12  | 688,3688  | 680     |
| 13  | 327,5494  | 680     |
| 14  | 106,3614  | 680     |
| 15  | 0         | 0       |
| 16  | 1367,2151 | 680     |
| 17  | 26,5984   | 680     |
| 18  | 0         | 0       |
| 19  | 286,5984  | 680     |
| 20  | 2138,5340 | 680     |
| 21  | 0         | 0       |
| 22  | 0         | 0       |
| 23  | 211,2474  | 680     |
| 24  | 2616,9028 | 680     |
| 25  | 0         | 0       |
| 26  | 0         | 0       |
| 27  | 2385,0575 | 680     |
| 28  | 1916,9951 | 680     |
| 29  | 2057,1693 | 680     |
| 30  | 485,8937  | 680     |
| 31  | 0         | 0       |
| 32  | 0         | 0       |
| 33  | 257,2149  | 680     |
| 34  | 1347,9198 | 680     |

|                    |                    |              |
|--------------------|--------------------|--------------|
| 35                 | 0                  | 0            |
| 36                 | 122,58298          | 680          |
| 37                 | 154,8636           | 680          |
| 38                 | 761,5187           | 680          |
| 39                 | 194,2857           | 680          |
| 40                 | 0                  | 0            |
| 41                 | 1775,9468          | 680          |
| 42                 | 0                  | 0            |
| 43                 | 12,5059            | 680          |
| 44                 | 0                  | 0            |
| 45                 | 0                  | 0            |
| 46                 | 1719,5191          | 680          |
| 47                 | 297,8577           | 680          |
| 48                 | 0                  | 0            |
| 49                 | 1934,4677          | 680          |
| 50                 | 0                  | 0            |
| 51                 | 1348,7004          | 680          |
| 52                 | 0                  | 0            |
| 53                 | 239,1236           | 680          |
| 54                 | 0                  | 0            |
| 55                 | 128,6212           | 680          |
| 56                 | 0                  | 0            |
| 57                 | 2303,0529          | 680          |
| 58                 | 812,6343           | 680          |
| 59                 | 1196,1948          | 680          |
| <b>Carga total</b> | <b>35902,16898</b> | <b>25160</b> |

Por cada caso de estudio se considera 2 escenarios a analizar. Como primer punto se analiza los sistemas con sus condiciones iniciales con el objetivo de evaluar sus pérdidas y perfiles de voltaje.

Mientras que, como segundo punto se analiza los mismos aspectos, para el primer sistema se considera la incorporación de 3 y 4 compensadores, para el segundo sistema se incorpora la misma cantidad de compensadores y se analiza los mismos aspectos.

## 5 Análisis de resultados

Mediante la implementación del algoritmo lo que se busca es minimizar las pérdidas en los sistemas de distribución considerando como restricción que los niveles de voltaje estén dentro de un margen determinado.

La selección de las barras candidatas se realiza de forma automática mediante la aplicación del algoritmo de búsqueda.

Una vez identificadas las barras candidatas se efectúa iterativamente flujos de potencia de barrido adelante – atrás, con la finalidad de determinar la ubicación de los equipos de compensación, los cuales permiten minimizar las pérdidas en los conductores de las redes eléctricas de distribución teniendo como restricción los perfiles de voltaje.

### 5.1 Sistema IEEE de 33 barras

El primer caso de estudio es el sistema de prueba IEEE de 33 barras, considerado como un sistema de distribución, lo que lo hace idóneo para el análisis de perfiles de voltaje, dicho sistema se muestra en la figura 11.

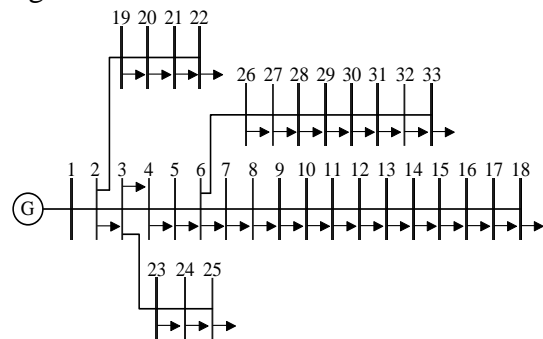


Figura 11. Sistema IEEE de 33 barras

#### 5.1.1 Selección de la potencia mínima mediante el algoritmo

El algoritmo implementado permite delimitar la potencia mínima a través de una serie de combinaciones, la selección de la potencia mínima tiene por finalidad determinar cuál es la potencia con menor pérdida una vez que se ubican los compensadores.

A continuación, se muestran las diversas opciones que el programa determina, una vez que ingresan 3 y 4 DSTATCOM al sistema IEEE 33 barras.

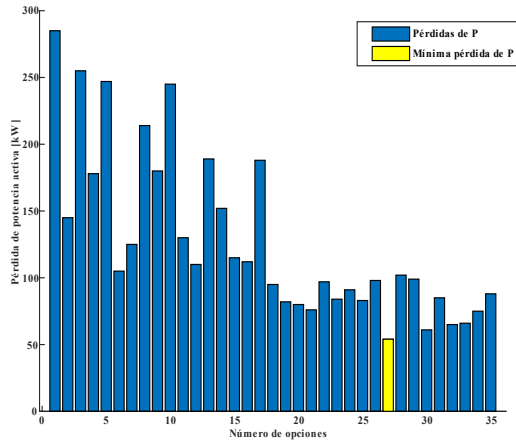


Figura 12. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 3 DSTATCOM

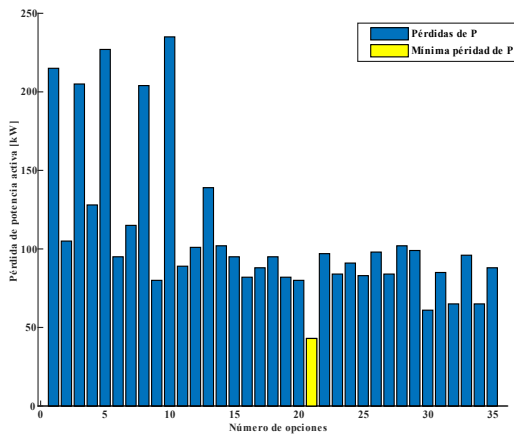


Figura 13. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 4 DSTATCOM

### 5.1.2 Sistema en condiciones iniciales

A partir de los datos mostrados en las tablas 5 y 6, se procede a ejecutar el flujo de potencia, mediante el barrido iterativo adelante – atrás. Con la finalidad de obtener los perfiles de voltaje en cada una de las barras del sistema en condiciones iniciales.

En la figura 14 se puede visualizar como existen barras en donde el voltaje es inferior a 0.95 p.u.

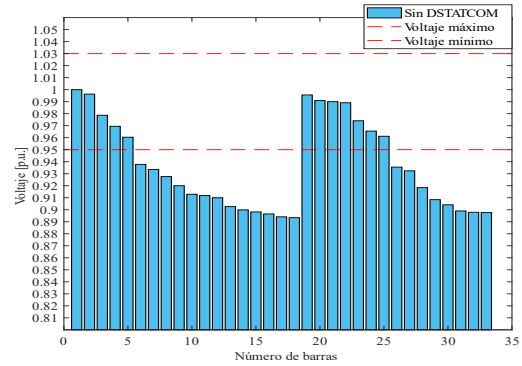


Figura 14. Perfiles de voltaje del sistema IEEE 33 barras sin DSTATCOM

### 5.1.3 Ubicación de los compensadores en el sistema

Como se puede observar en la figura 14 son algunas barras que no cumplen con la condición de un voltaje mínimo de operación, para poder corregir este problema se van a crear dos escenarios.

El primero, en donde el sistema conste con tres DSTATCOM dependiendo de las barras candidatas. Mientras que, para el segundo escenario se van a colocar cuatro DSTATCOM y así poder verificar como los perfiles de voltaje mejoran de forma exponencial.

Los datos de los dos escenarios que van a ser implementados en el sistema de prueba IEEE de 33 barras se muestran en las tablas 9 y 10.

Tabla 9: Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 33 barras, escenario 1

| DSTATCOM | Q [kVAR] |
|----------|----------|
| 1        | 500      |
| 2        | 600      |
| 3        | 700      |

Tabla 10: Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 33 barras, escenario 2

| DSTATCOM | Q [kVAR] |
|----------|----------|
| 1        | 350      |
| 2        | 480      |
| 3        | 600      |
| 4        | 750      |

### 5.1.3.1 Ingreso de 3 DSTATCOM en el sistema

A través del barrido iterativo adelante – atrás, se puede determinar donde se pueden ubicar los compensadores de una manera óptima, por lo tanto, las barras candidatas para ubicar los compensadores y mejorar los perfiles de voltaje se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11:** Óptima ubicación de los compensadores en el sistema IEEE de 33 barras

| Ubicación | Número de DSTATCOM |
|-----------|--------------------|
| Barra 14  | 1                  |
| Barra 29  | 2                  |
| Barra 32  | 3                  |

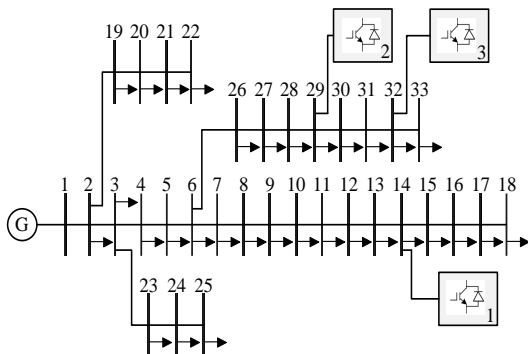
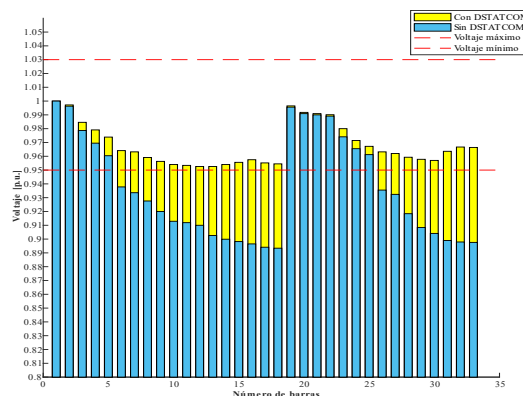


Figura 15. Óptima ubicación de 3 DSTATCOM en el sistema IEEE de 33 barras

Con la inyección de potencia reactiva en las barras candidatas, los perfiles de voltaje mejoran al instante, tal y como se aprecia en la figura 16.



### 5.1.3.2 Ingreso de 4 DSTATCOM en el sistema

La óptima ubicación de cuatro compensadores tiene por finalidad incrementar los valores de los perfiles de voltaje y mediante el barrido iterativo, se consideran las siguientes barras que se describen en la tabla 12.

**Tabla 12:** Óptima ubicación de los compensadores en el sistema IEEE de 33 barras

| Ubicación | Número de DSTATCOM |
|-----------|--------------------|
| Barra 10  | 1                  |
| Barra 13  | 2                  |
| Barra 18  | 3                  |
| Barra 31  | 4                  |

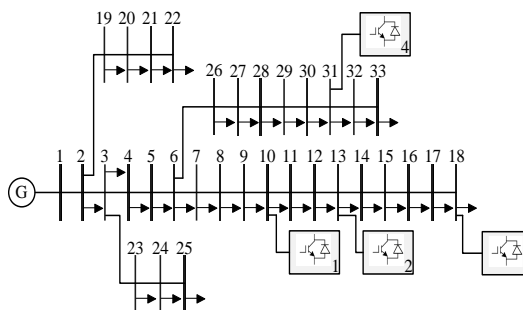


Figura 17. Óptima ubicación de 4 DSTATCOM en el sistema IEEE de 33 barras

La mejora de los perfiles de voltaje se puede apreciar en la figura 18.

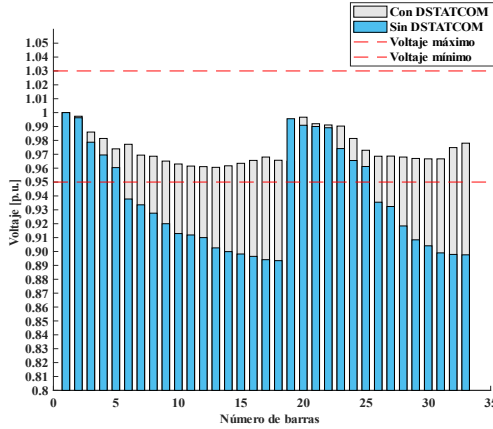


Figura 18. Perfiles de voltaje del sistema IEEE 33 barras con 4 DSTATCOM

## 5.2 Sistema de 59 barras

Para determinar los perfiles de voltaje se ha designado un sistema de topología radial de 59 barras, el diagrama unifilar se muestra en la figura 19.

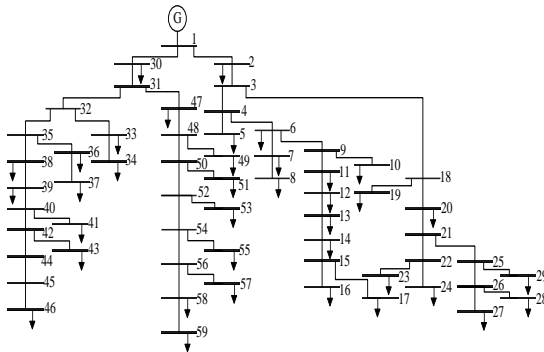


Figura 19. Sistema de 59 barras

### 5.2.1 Selección de la potencia mínima mediante el algoritmo

Al igual que en el escenario anterior, el algoritmo debe determinar cuál es la potencia mínima en cada uno de los casos de estudio. Las imágenes se muestran a continuación.

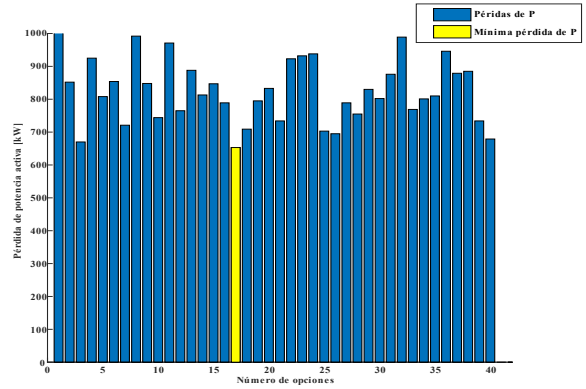


Figura 20. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 3 DSTATCOM

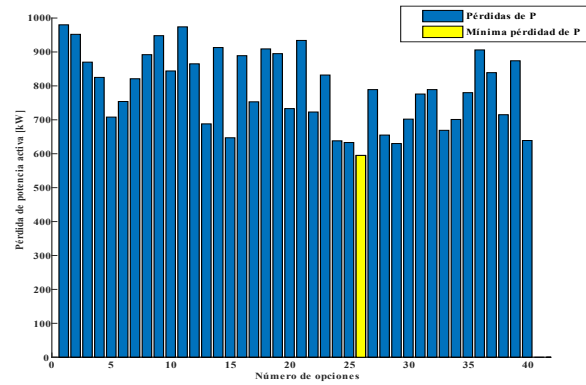


Figura 21. Opciones para la selección de la potencia mínima al incluir 4 DSTATCOM

### 5.2.2 Sistema en condiciones iniciales

Tal y como se sucedió en el caso anterior, el sistema va a mostrar los perfiles de voltaje en condiciones nominales, tomando en cuenta sus valores detallados en las tablas 7 y 8.

Los valores obtenidos a partir del flujo de potencia se detallan en la figura 22.

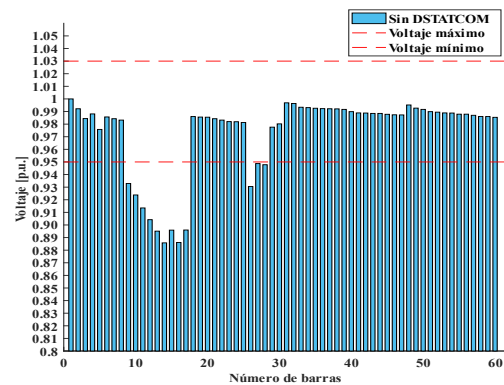


Figura 22. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras sin DSTATCOM

### 5.2.3 Ubicación de los compensadores en el sistema

A partir de los datos obtenidos del sistema en condiciones iniciales, se realiza un análisis para determinar la óptima ubicación de los compensadores, los valores de estos se detallan en las tablas 13 y 14.

Al igual que el anterior caso de estudio, se plantea dos escenarios.

**Tabla 13:** Valores del DSTATCOM para el sistema de 59 barras, escenario 1

| DSTATCOM | Q [kVAR] |
|----------|----------|
| 1        | 600      |
| 2        | 750      |
| 3        | 890      |

**Tabla 14:** Valores del DSTATCOM para el sistema IEEE 59 barras, escenario 2

| DSTATCOM | Q [kVAR] |
|----------|----------|
| 1        | 450      |
| 2        | 550      |
| 3        | 680      |
| 4        | 880      |

#### 5.2.3.1 Ingreso de 3 DSTATCOM en el sistema

Mediante el barrido iterativo se puede encontrar las barras candidatas, dichas barras se detallan en la tabla 15 y la ubicación de los compensadores en el sistema se muestra en la figura 23.

**Tabla 15:** Óptima ubicación de los compensadores en el sistema de 59 barras

| Ubicación | Número de DSTATCOM |
|-----------|--------------------|
| Barra 15  | 1                  |
| Barra 17  | 2                  |
| Barra 27  | 3                  |

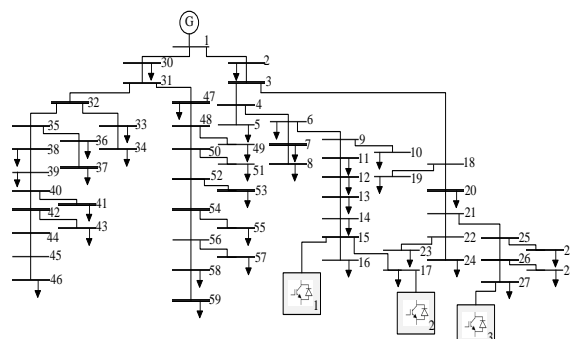


Figura 23. Óptima ubicación de 3 DSTATCOM en el sistema de 59 barras

Con la óptima ubicación de los compensadores y la inyección de potencia reactiva, los perfiles de voltaje en las barras candidatas mejoran, tal y como se aprecia en la figura 24.

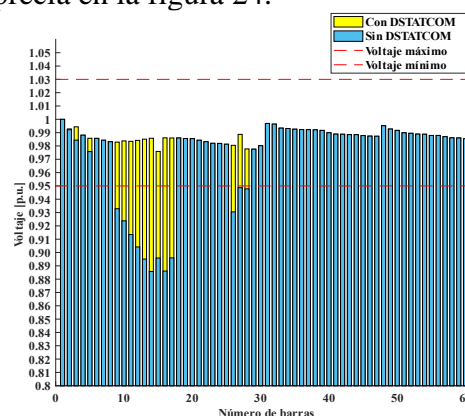


Figura 24. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras con 3 DSTATCOM

#### 5.2.3.2 Ingreso de 4 DSTATCOM en el sistema

Para poder mejorar aún más los perfiles de voltaje se procede a ingresar 4 compensadores en el sistema.

Con la ayuda del barrido iterativo se pueden encontrar las barras candidatas y así poder asegurar una mejoría en los perfiles de voltaje.

Las barras candidatas y la óptima ubicación de los compensadores se detallan en la tabla 16 y la figura 25, respectivamente.

**Tabla 16:** Óptima ubicación de los compensadores en el sistema de 59 barras

| Ubicación | Número de DSTATCOM |
|-----------|--------------------|
| Barra 13  | 1                  |
| Barra 15  | 2                  |
| Barra 16  | 3                  |
| Barra 27  | 4                  |

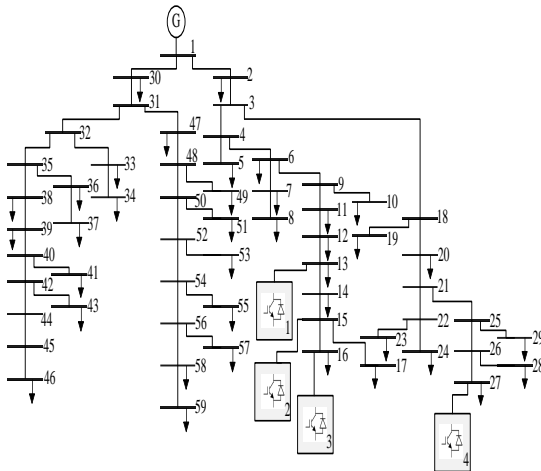


Figura 25. Óptima ubicación de 4 DSTATCOM en el sistema de 59 barras

Con las nuevas ubicaciones de los compensadores, los niveles de voltaje mejoran considerablemente, mejorando así la calidad de servicio del sistema propuesto.

Los nuevos perfiles de voltaje se pueden apreciar en la figura 26.

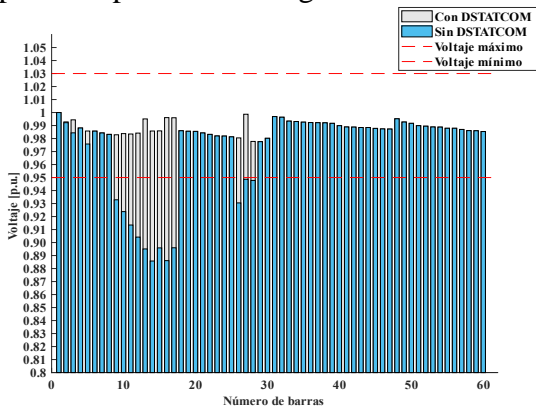


Figura 26. Perfiles de voltaje del sistema de 59 barras con 4 DSTATCOM

### 5.3 Comparación de pérdidas activas dependiendo del caso de estudio

Para el análisis de las pérdidas de potencia activa se debe considerar las potencias mínimas encontradas en cada uno de los casos, y así poder corroborar si los resultados son correctos.

Con los resultados obtenidos previamente se puede evidenciar que la inserción de compensadores de potencia reactiva mejora los perfiles de voltaje y, en consecuencia, se minimizan las pérdidas en cada uno de los sistemas de distribución.

#### 5.3.1 Comparación de pérdidas activas para el sistema IEEE 33 barras

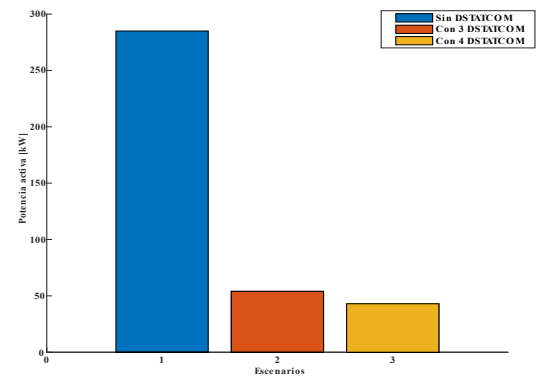


Figura 27. Comparación de pérdidas activas para cada escenario

#### 5.3.2 Comparación de pérdidas activas para el sistema de 59 barras

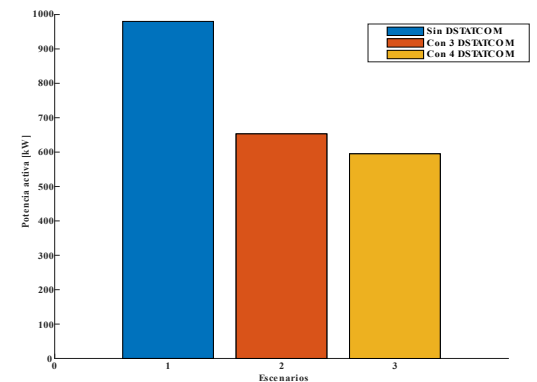


Figura 28. Comparación de pérdidas activas para cada escenario



## 6 Conclusiones

Para poder modelar e implementar un compensador de potencia reactiva, primero se debe resolver un flujo de potencia, que para este artículo fue el barrido interactivo adelante – atrás. Este método también conocido como técnica de la escalera es muy útil al momento de tratar con sistemas de distribución radial. Con la implementación del barrido interactivo adelante – atrás se pudo determinar la óptima ubicación de los compensadores, dado que determina los perfiles de voltaje más bajos, con lo que se tiene como resultado a las barras candidatas.

Mediante las gráficas 12, 13, 20, 21, 23 y 24, se puede asegurar que las pérdidas seleccionadas por el programa son similares a las pérdidas totales del sistema una vez que se insertan los compensadores de potencia reactiva, y con ello, se minimiza las pérdidas.

El algoritmo propuesto en esta investigación permite establecer cuántos compensadores se pueden colocar en los sistemas, al igual que sus valores de potencia reactiva. Y así, poder asegurar una mejora en los perfiles de voltaje.

Cada escenario propuesto nos indica como la inyección de potencia reactiva en las barras candidatas provoca que los perfiles de voltaje mejoren, asegurando una mejor calidad de energía en los sistemas de distribución.

Se debe tener en cuenta que, si un sistema de distribución es mayor a los escenarios propuestos, mayor debe ser la entrega de potencia reactiva de los compensadores.

Con los resultados obtenidos se puede asegurar que va a existir una reducción en las pérdidas de los sistemas, lo que conlleva a cumplir con los parámetros de estabilidad y confiabilidad en los sistemas de distribución.

## 6.1 Trabajos futuros

Tomando como referencia los resultados obtenidos se puede proponer mejorar el algoritmo implementado en ese artículo, con la finalidad de poder ingresar diversas restricciones que existen en los sistemas de distribución real.

Otra propuesta para el desarrollo de un futuro trabajo, es el análisis de control del compensador, en donde se pueda manipular la inyección de corriente; es decir, realizar una comparativa de la corriente de referencia con la corriente de inyección a través de un controlador.

## 7 Referencias

- [1] M. A. Mantilla Villalobos and J. F. Petit Suarez, “Compensadores Estáticos de Potencia: Visión General y Revisión del Estado de Arte,” *Glob. Shad. Africa Neoliberal World Order*, no. 1, pp. 8–10, 2010, doi: 10.18273/revuin.
- [2] J. Arizpe Islas, S. Neira Rosales, and A. López Escamilla, “Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia,” *Ingenierías*, vol. 1, no. 1, pp. 29–54, 2013.
- [3] S. J. R. O.-C. M.-G. B. C.-Q. M. L.-L. Benavides-Córdoba, “Implementation of a Distribution Static Compensator D-STATCOM: Hardware and Firmware Description,” *Sci. Tech.*, vol. 24, no. 4, pp. 555–565, 2019.
- [4] M. Polo, J. Bernardo, and J. B. Peña, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra,” vol. 38, 2017.
- [5] F. Jurado, N. Gonzalez, J. Barrera, M. Barrera, and J. Segundo, “Modelado y operación del compensador estático de distribución,” p. 13, 2014, [Online]. Available: <http://www.reibci.org/publicados/2014/octubre/0500108.pdf>.
- [6] S. Y. Jung, T. H. Kim, S. Il Moon, and B. M. Han, “Analysis and control of DSTATCOM for a line voltage

- regulation,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, pp. 729–734, 2002, doi: 10.1109/PESW.2002.985100.
- [7] B. Singh, A. Adya, A. P. Mittal, and J. R. P. Gupta, “Analysis, simulation and control of DSTATCOM in three-phase, four-wire isolated distribution systems,” *2006 IEEE Power India Conf.*, vol. 2005, pp. 471–476, 2005, doi: 10.1109/POWERI.2006.1632556.
- [8] G. F. Reed, M. Takeda, I. Iyoda, S. Murakami, T. Aritsuka, and K. Tokuhara, “Improved power quality solutions using advanced solid-state switching and static compensation technologies,” *IEEE Eng. Soc. Winter Meet.*, vol. 2, pp. 1132–1137, 1999, doi: 10.1109/pesw.1999.747364.
- [9] J. C. Serrano and Y. A. Carranza Sánchez, “Flujo de carga trifásico para sistemas radiales de distribución,” *Sci. Tech.*, vol. XI, no. 29, pp. 139–143, 2005.
- [10] V. M. Awasth and V. A. Huchche, “Reactive power compensation using D-STATCOM,” *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 583–585, 2016, doi: 10.1109/ICEETS.2016.7583821.
- [11] A. Ghosh and G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1st ed. Springer Science+Business Media, LLC, 2002.
- [12] S. Ahmad and M. S. Potdar, “Real and Reactive Power Compensation of a Power System by using DSTATCOM,” *2nd Int. Conf. Signal Process. Commun. ICSPC 2019 - Proc.*, pp. 148–152, 2019, doi: 10.1109/ICSPC46172.2019.8976519.
- [13] V. S. Tejwani, H. B. Kapadiya, A. S. Pandya, and J. B. Bhati, “Power quality improvement in power distribution system using D-STATCOM,” *2013 Nirma Univ. Int. Conf. Eng. NUiCONE 2013*, no. 7, 2013, doi: 10.1109/NUiCONE.2013.6780153.
- [14] A. R. Gidd, A. D. Gore, S. B. Jondhale, O. V. Kadekar, and M. P. Thakre, “Modelling, analysis and performance of a DSTATCOM for voltage sag mitigation in distribution network,” *Proc. Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2019*, vol. 2019-April, no. Icoei, pp. 366–371, 2019, doi: 10.1109/icoei.2019.8862554.
- [15] N. Hayat, S. R. Ghatak, S. R. Pani, and S. Mishra, “Performance Improvement of Three Phase Unbalance Distribution System Using DG and DSTATCOM,” *2020 IEEE Calcutta Conf. CALCON 2020 - Proc.*, pp. 200–205, 2020, doi: 10.1109/CALCON49167.2020.9106473.
- [16] P. Shadangi, S. D. Swain, and P. K. Ray, “Experimental realization of DSTATCOM for Power Quality Enhancement under Various Load Perturbations,” *3rd Int. Conf. Energy, Power Environ. Towar. Clean Energy Technol. ICEPE 2020*, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404488.
- [17] A. Kumar and P. Kumar, “Sliding Mode Control of DSTATCOM for Power Quality Improvement,” *2019 8th Int. Conf. Power Syst. Transit. Towar. Sustain. Smart Flex. Grids, ICPS 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067552.
- [18] J. P. Keshri and H. Tiwari, *Quality of Power Enhancement of Distribution Network System Using DSTATCOM in Simulink Tool of MATLAB*, vol. 151. Springer Singapore, 2021.
- [19] S. Ali, M. Jamil, and M. A. Khan, *Power Quality Analysis and Enhancement Using DSTATCOM for Three-Phase Variable Load*, vol. 766. Springer Singapore, 2021.
- [20] D. A. Patel, K. Venkatraman, V. R. R. Rudra Raju, and N. K. Kumar, “A Dual Functional DSTATCOM for Power Quality Improvement,” *J. Inst. Eng. Ser. B*, vol. 102, no. 5, pp. 881–893, 2021, doi: 10.1007/s40031-021-00575-9.

- [21] P. Shanmugasundaram and A. R. Babu, "Application of DSTATCOM for loss minimization in radial distribution system," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 397, pp. 189–198, 2016, doi: 10.1007/978-81-322-2671-0\_18.
- [22] P. Shafaghi, "Applications of DSTATCOM to regulate voltage on a distribution network," *ECTI-CON 2017 - 2017 14th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.*, no. 1, pp. 868–871, 2017, doi: 10.1109/ECTICon.2017.8096376.
- [23] J. Dolores and J. Cervantes, *Sistemas de distribución de energía eléctrica*. .
- [24] S. R. Castaño, *Redes de Distribución de Energía*, Tercera ed. Manizales, 2004.
- [25] A. Pansini, *Electrical Distribution Engineering*, 700 Indian., vol. 3, no. 3. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 2007.
- [26] R. T. Bhimarasetti and A. Kumar, "A New Contribution to Distribution Load Flow Analysis for Radial and Mesh Distribution Systems Department of Electrical Engineering," 2014, doi: 10.1109/CICN.2014.255.
- [27] I. Std, I. Standards, C. Committee, P. Quality, and I. S. Board, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 1995. 2001.
- [28] J. Seymour and T. Horsley, "Suministro Eléctrico," vol. 18, pp. 1–22.
- [29] Q. Duan, C. Ma, W. Sheng, and C. Shi, "Research on power quality control in distribution grid based on energy router," *POWERCON 2014 - 2014 Int. Conf. Power Syst. Technol. Towar. Green, Effic. Smart Power Syst. Proc.*, no. Powercon, pp. 2115–2121, 2014, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993567.
- [30] "Balance Nacional de Energía Eléctrica," *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables*, 2021. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/> (accessed Jul. 01, 2021).
- [31] CONELEC, "Regulación 004/01-Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución," 2001. [Online]. Available: <http://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Regulacion-No.-CONELEC-004-01.pdf>.
- [32] K. R. Padiyar, *Facts Controllers in Power Transmission Distribution*. 2007.
- [33] M. V. M. Kumar and MishraM.K., "Three-leg inverterbased distribution static compensator topology for compensating unbalanced and non-linear loads," *IET Power Electron*, vol. 8 no.11, pp. 2076–2084, 2015.
- [34] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, *Power Quality Problems and Mitigation Techniques*, 1st ed. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2015.
- [35] M. D. Singh, R. K. Mehta, and A. K. Singh, "Current source converter based D-STATCOM for voltage sag mitigation," *Int. J. Simul. Multidiscip. Des. Optim.*, vol. 6, p. A5, 2015, doi: 10.1051/smdo/2015005.
- [36] T. Chugh and A. Singh, "Reactive power compensation using D-STATCOM with fuzzy logic supervision," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853519.
- [37] B. Ismail, M. M. Naain, N. Izzri, A. Wahab, and L. J. Awal, "Optimal Placement of DSTATCOM in Distribution Network Based on Load Flow and Voltage Stability Indices Studies," pp. 0–5, 2017.
- [38] V. Lituma, R. Pérez, and M. Guerrero, "Diseño e implementación de un compensador estático de potencia reactiva (DSTATCOM); basado en un

- convertidor trifásico con modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM), controlado por un procesador digital de señales,” *ESPOL*, 2009.
- [39] T. Zaveri, B. Bhalja, and N. Zaveri, “Comparison of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 582–594, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.044.
- [40] G. Escobar, A. M. Stanković, and P. Mattavelli, “Reactive power, unbalance and harmonics compensation using D-Statcom with a dissipativity-based controller,” *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, vol. 4, pp. 3051–3056, 2000, doi: 10.1109/cdc.2000.912163.
- [41] J. G. Prasad Reddy and K. R. Reddy, “Design and simulation of Cascaded H-bridge multilevel inverter based DSTATCOM for compensation of reactive power and harmonics,” *2012 1st Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol. RAIT-2012*, pp. 737–743, 2012, doi: 10.1109/RAIT.2012.6194546.
- [42] C. Sharmeela, G. Uma, and M. R. Mohan, “Multi-level distribution STATCOM for voltage sag and swell reduction,” *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 2, pp. 1303–1307, 2005, doi: 10.1109/pes.2005.1489131.
- [43] 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.
- [44] W. H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis,” in *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution: The Electric Power Engineering Handbook*, Third Edit., Las Cruces, New Mexico: CRC Press, 2018, pp. 26-1-26–58.
- [45] T. Cabrera and A. Geovanny, “Implementación de una herramienta de software para la evaluación de confiabilidad de sistemas eléctricos de distribución utilizando un método simulativo,” *Escuela Politécnica Nacionanl*, 2018.
- [46] G. W. Chang, S. Y. Chu, and H. L. Wang, “A simplified forward and backward sweep approach for distribution system load flow analysis,” *2006 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON2006*, no. 4, pp. 1–5, 2006, doi: 10.1109/ICPST.2006.321724.
- [47] P. R. Kasari, M. Paul, B. Das, and A. Chakraborti, “Analysis of D-STATCOM for power quality enhancement in distribution network,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2017-Decem, pp. 1421–1426, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228081.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 17: Matriz de estado de arte

| ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS |       |  |      |  |  |                                     |                                     |   |                                     |  |   |   |                                     |                                     |  |   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |   |
|---|-------|--|------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| ITEM  | DATOS |  |      | TEMÁTICA                                       |  |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVOS    |                                     |  |   | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA                                 |   |                                     | SOLUCIÓN PROPUESTA                  |                                     |                                     |                                     |   |
|   | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO  | CTAS | Perturbaciones en los sistemas de distribución | Operación del DSTATCOM en los sistemas de distribución | Ubicación óptima del DSTATCOM       | Perfiles de voltaje                 | Impacto del DSTATCOM en los perfiles de voltaje | Minimizar Pérdidas de Potencia      | Implementación de DSTATCOM en sistemas de distribución | Criterios de convergencia en los DSTATCOM | Flujos de potencia para sistemas radiales | Magnitud de voltaje                 | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Máxima cantidad de potencia reactiva en los sistemas de distribución | Flujos de Potencia – barrido iterativo adelante - atrás | Óptima ubicación de compensadores   | Estrategias de control              | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Ubicación óptima de los DSTATCOM    | Mejorar los perfiles de voltaje     | Mejorar la calidad de energía en los sistemas de distribución |
| 1   | 2010  | Compensadores estáticos de potencia: Visión General y Revisión del Estado del Arte                           | 50   | <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 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"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 2   | 2013  | Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia   | 8    | <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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 3   | 2019  | Implementation of a Distribution Static Compensator D-STATCOM: Hardware and Firmware Description             | 32   | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" 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 checked="" 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"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 4   | 2017  | Calidad de la energía bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra                                 | 17   | <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 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 checked="" type="checkbox"/>                           |
| 5   | 2014  | Modelado y operación del compensador estático de distribución  | 15   | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" 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 type="checkbox"/>            | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 6   | 2002  | Analysis and Control of DSTATCOM for a line Voltage Regulation   | 8    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" 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 checked="" 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"/>                                      |
| 7   | 2005  | Analysis, Simulation and Control of DSTATCOM in Three – phase, Four – wire Isolated Distribution Systems     | 11   | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 8   | 1999  | Improved power quality solutions using advanced solid – state switching and static compensation technologies | 6    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 9   | 2005  | Flujo de carga trifásico para sistemas radiales de distribución  | 4    | <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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA  
USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**

| ITEM | DATOS |   |       | TEMÁTICA                                       |  |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVOS    |                                     |  |   | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA                                 |   |                                     | SOLUCIÓN PROPUESTA                  |                                     |                                     |                                     |   |
|------|-------|---|-------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
|      | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO   | CITAS | Perturbaciones en los sistemas de distribución | Operación del DSTATCOM en los sistemas de distribución | Ubicación óptima del DSTATCOM       | Perfiles de voltaje                 | Impacto del DSTATCOM en los perfiles de voltaje | Minimizar Pérdidas de Potencia      | Implementación de DSTATCOM en sistemas de distribución | Criterios de convergencia en los DSTATCOM | Flujos de potencia para sistemas radiales | Magnitud de voltaje                 | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Máxima cantidad de potencia reactiva en los sistemas de distribución | Flujos de Potencia – barrido iterativo adelante - atrás | Óptima ubicación de compensadores   | Estrategias de control              | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Ubicación óptima de los DSTATCOM    | Mejorar los perfiles de voltaje     | Mejorar la calidad de energía en los sistemas de distribución |
| 10   | 2016  | Reactive Power Compensation using D-STATCOM   | 9     | <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 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 type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |   |
| 11   | 2002  | Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices  | 58    | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                        | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>                  | <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 type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 12   | 2019  | Real and Reactive Power Compensation of a Power System by using DSTATCOM                              | 17    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" 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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |   |
| 13   | 2013  | Power Quality improvement in power Distribution System Using D-STATCOM                                | 10    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 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"/>                                      |
| 14   | 2019  | Modelling, Analysis and Performance of a DSTATCOM for Voltage Sag Mitigation in Distribution Network  | 20    | <input checked="" 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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 15   | 2020  | Performance Improvement of Three Phase Unbalance Distribution System Using DG and DSTATCOM            | 9     | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" 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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 16   | 2021  | Experimental realization of DSTATCOM for Power Quality Enhancement Under Various Load Perturbations   | 10    | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 17   | 2019  | Sliding Mode Control of DSTATCOM for Power Quality Improvement  | 10    | <input checked="" 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 checked="" 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 type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 18   | 2021  | Quality of Power Enhancement of Distribution Network System Using DSTATCOM in Simulink Tool of MATLAB | 17    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 19   | 2021  | Power Quality Analysis and Enhancement Using DSTATCOM for Three-Phase Variable Load                   | 15    | <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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 20   | 2021  | A Dual Functional DSTATCOM for Power Quality Improvement  | 18    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA  
USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**

| ITEM | DATOS |  |       | TEMÁTICA                                       |  |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVOS    |                                     |  |   | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA                                 |   |                                   | SOLUCIÓN PROPUESTA                  |                                     |                                     |                                     |   |
|------|-------|--|-------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
|      | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO  | CITAS | Perturbaciones en los sistemas de distribución | Operación del DSTATCOM en los sistemas de distribución | Ubicación óptima del DSTATCOM       | Perfiles de voltaje                 | Impacto del DSTATCOM en los perfiles de voltaje | Minimizar Pérdidas de Potencia      | Implementación de DSTATCOM en sistemas de distribución | Criterios de convergencia en los DSTATCOM | Flujos de potencia para sistemas radiales | Magnitud de voltaje                 | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Máxima cantidad de potencia reactiva en los sistemas de distribución | Flujos de Potencia – barrido iterativo adelante - atrás | Óptima ubicación de compensadores | Estrategias de control              | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Ubicación óptima de los DSTATCOM    | Mejorar los perfiles de voltaje     | Mejorar la calidad de energía en los sistemas de distribución |
| 21   | 2016  | Application of DSTATCOM for Loss Minimization in Radial Distribution System                    | 14    | <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 checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                                  | <input checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>          | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 22   | 2017  | Applications of DSTATCOM to Regulate Voltage on a Distribution Network                         | 20    | <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 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 23   | 1995  | Sistemas de distribución de energía eléctrica  | 10    | <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 checked="" 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 type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 24   | 2004  | Redes de Distribución de Energía   | 45    | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                           |
| 25   | 2007  | Electrical Distribution Engineering  | 0     | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                               | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>                           |
| 26   | 2014  | A New Contribution to Distribution Load Flow Analysis for Radial and Mesh Distribution Systems | 19    | <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 checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <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 checked="" type="checkbox"/>                           |
| 27   | 2001  | IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Sponsor                        | 0     | <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 type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>                                | <input type="checkbox"/>          | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 28   | 2010  | Suministro eléctrico   | 6     | <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 type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 29   | 2014  | Research on Power Quality Control in Distribution Grid Based on Energy Router                  | 21    | <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 type="checkbox"/>                  | <input checked="" 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 type="checkbox"/>                                      |
| 30   | 2021  | Balance Nacional de Energía Eléctrica  | 0     | <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 type="checkbox"/>                                | <input type="checkbox"/>          | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                           |

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA  
USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**

| ITEM | DATOS |   |       | TEMÁTICA                                       |  |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVOS    |                                     |  |   | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA                                 |   |                                     | SOLUCIÓN PROPUESTA                  |                                     |                                     |                                     |   |
|------|-------|---|-------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
|      | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO   | CITAS | Perturbaciones en los sistemas de distribución | Operación del DSTATCOM en los sistemas de distribución | Ubicación óptima del DSTATCOM       | Perfiles de voltaje                 | Impacto del DSTATCOM en los perfiles de voltaje | Minimizar Pérdidas de Potencia      | Implementación de DSTATCOM en sistemas de distribución | Criterios de convergencia en los DSTATCOM | Flujos de potencia para sistemas radiales | Magnitud de voltaje                 | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Máxima cantidad de potencia reactiva en los sistemas de distribución | Flujos de Potencia – barrido iterativo adelante - atrás | Óptima ubicación de compensadores   | Estrategias de control              | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Ubicación óptima de los DSTATCOM    | Mejorar los perfiles de voltaje     | Mejorar la calidad de energía en los sistemas de distribución |
| 31   | 2001  | Regulación 004/01 – Calidad del servicio eléctrico  | 0     | <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 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 checked="" type="checkbox"/> |   |
| 32   | 2007  | Facts Controllers in Power Transmission and Distribution  | 1     | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>                                  | <input type="checkbox"/>                                | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |   |
| 33   | 2015  | Three-leg inverterbased distribution static compensator topology for compensating unbalanced and non-linear loads   | 18    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 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"/>            |   |
| 34   | 2015  | Power Quality Problems and Mitigation Techniques  | 17    | <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 checked="" type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>                  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                                  | <input checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |   |
| 35   | 2015  | Current source converter based D-STATCOM for voltage sag mitigation Moirangthem   | 16    | <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 type="checkbox"/>                  | <input 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"/>            |   |
| 36   | 2017  | Reactive Power Compensation using D-STATCOM with Fuzzy Logic Supervision  | 11    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>                                | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |   |
| 37   | 2017  | Optimal Placement of DSTATCOM in Distribution Network Based on Load Flow and Voltage Stability Indices Studies  | 18    | <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 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"/>            |   |
| 38   | 2009  | Diseño e implementación de un compensador estático de potencia reactiva (D-Statcom); basado en un convertidor trifásico con modulación sinusoidal de ancho de pulso (spwm), controlado por un procesador digital de señales (dsp tms320c2000) | 4     | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                                  | <input checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                                      |
| 39   | 2012  | Comparison of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions  | 18    | <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 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 type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                           |



**ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS BASADOS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA  
USANDO EL FLUJO DE POTENCIA ITERATIVO ADELANTE - ATRÁS**

| ITEM             | DATOS |  |       | TEMÁTICA                                       |  |                                     |                                     | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVOS    |                                     |  |   | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA                |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA                                 |   |                                     | SOLUCIÓN PROPUESTA                  |                                     |                                     |                                     |   |
|------------------|-------|--|-------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
|                  | AÑO   | TÍTULO DEL ARTÍCULO  | CITAS | Perturbaciones en los sistemas de distribución | Operación del DSTATCOM en los sistemas de distribución | Ubicación óptima del DSTATCOM       | Perfiles de voltaje                 | Impacto del DSTATCOM en los perfiles de voltaje | Minimizar Pérdidas de Potencia      | Implementación de DSTATCOM en sistemas de distribución | Criterios de convergencia en los DSTATCOM | Flujos de potencia para sistemas radiales | Magnitud de voltaje                 | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Máxima cantidad de potencia reactiva en los sistemas de distribución | Flujos de Potencia – barrido iterativo adelante - atrás | Óptima ubicación de compensadores   | Estrategias de control              | Máxima cantidad de DSTATCOM         | Ubicación óptima de los DSTATCOM    | Mejorar los perfiles de voltaje     | Mejorar la calidad de energía en los sistemas de distribución |
| 40               | 2000  | Reactive Power, unbalance and Harmonic Compensation using D-STATCOM with a Dissipativity – Based Controller  | 10    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" 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 type="checkbox"/>   | <input checked="" type="checkbox"/>                     | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                                      |
| 41               | 2012  | Design and Simulation of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Based DSTATCOM for Compensation of Reactive Power and Harmonics                                   | 9     | <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 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"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                                      |
| 42               | 2005  | Multi-level Distribution STATCOM for Voltage Sag and Swell reduction   | 11    | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                        | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 43               | 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) | 12    | <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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| 44               | 2018  | Distribution System Modeling and Analysis  | 2     | <input checked="" type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>                  | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                                  | <input type="checkbox"/>                                | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                                      |
| 45               | 2018  | Implementación de una herramienta de software para la evaluación de confiabilidad de sistemas eléctricos de distribución utilizando un método simulativo         | 46    | <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 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 type="checkbox"/>                                      |
| 46               | 2006  | A Simplified Forward and Backward Sweep Approach for Distribution System Load Flow Analysis  | 16    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>                  | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" 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"/>                                      |
| 47               | 2017  | Analysis of D-STATCOM for Power Quality Enhancement in Distribution Network  | 18    | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>             | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>                    | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/>       | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input checked="" type="checkbox"/>                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                                      |
| <b>CANTIDAD:</b> |       |  |       | 15   | 37   | 19                                  | 24                                  | 20  | 22                                  | 35   | 18  | 21  | 34                                  | 14                                  | 11   | 23  | 13                                  | 23                                  | 17                                  | 11                                  | 34                                  | 15  |

## 7.2 Resumen de Indicadores

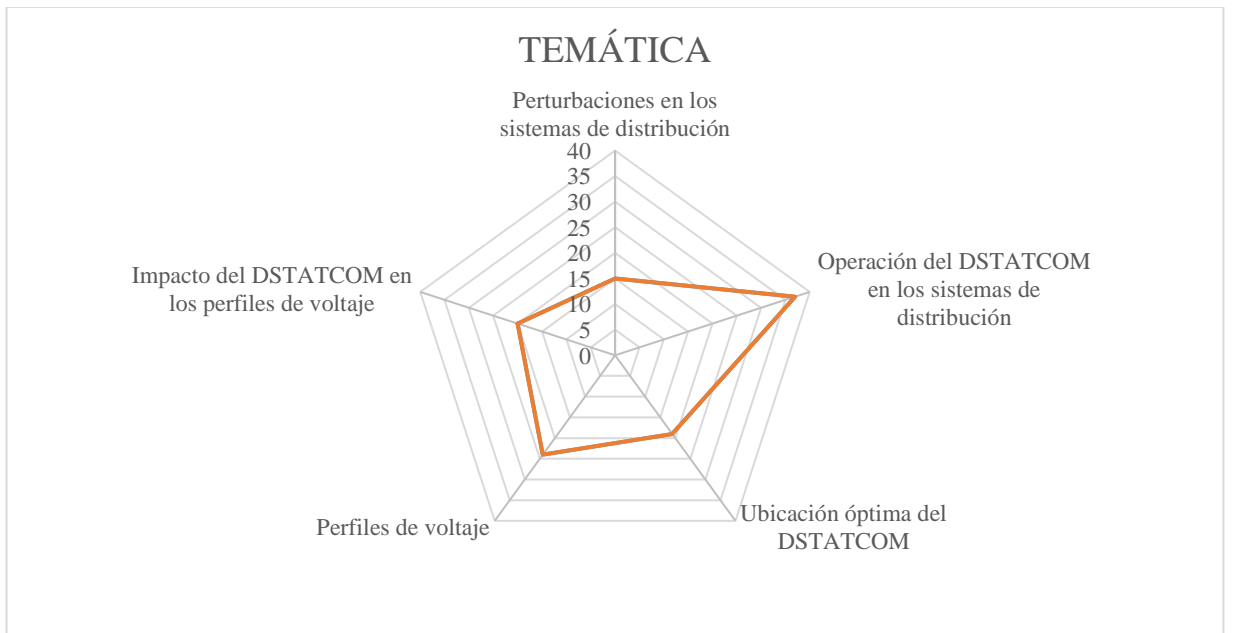


Figura 29. Resumen e indicadores de la temática – Estado de arte

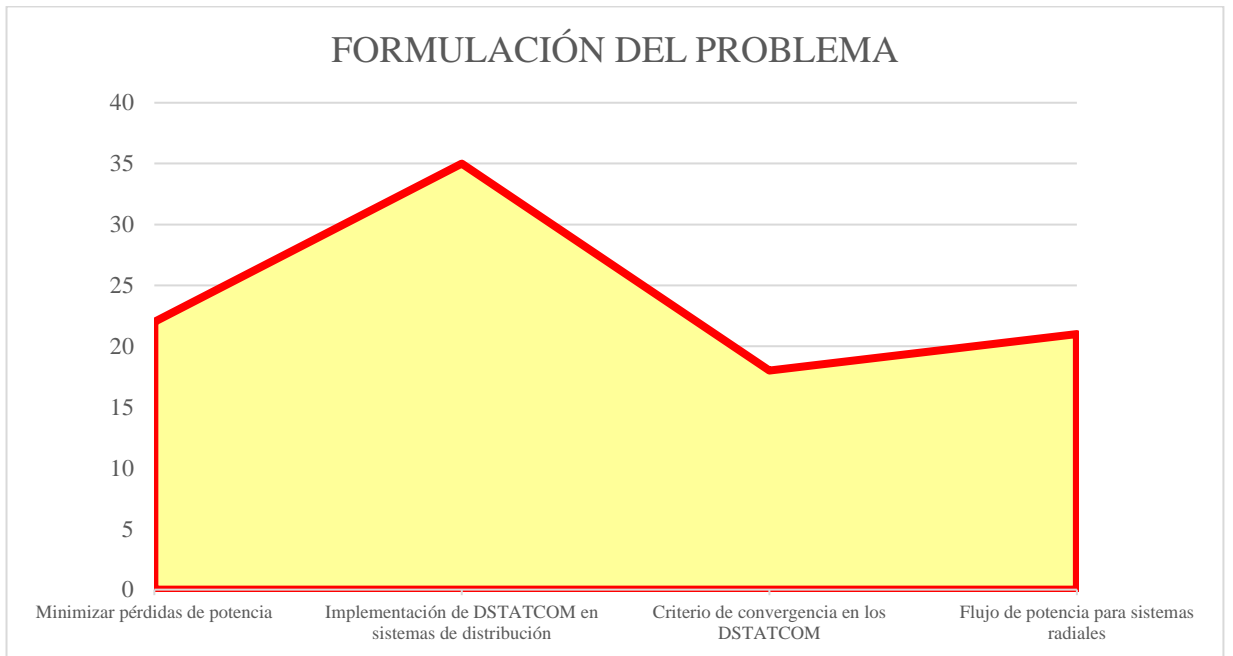


Figura 30. Indicador de formulación del problema – Estado de arte

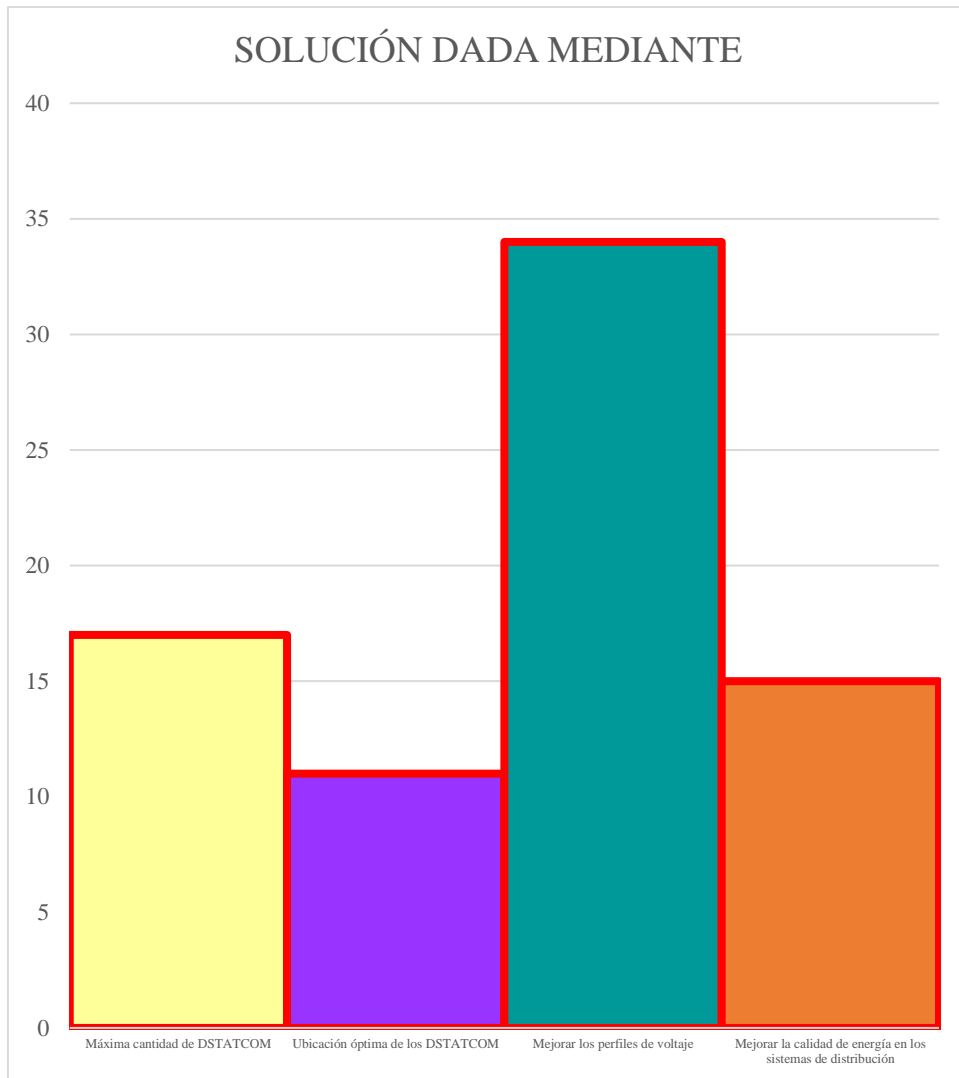


Figura 31. Indicador de solución – Estado de arte