

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR
TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR
LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN
SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR
TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR
LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN
SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.**

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

AUTOR: JOSEPH ALEXANDER ROCHA ALOMOTO

TUTOR: ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

Quito -Ecuador

2022

Joseph Alexander Rocha Alomoto

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISION.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Joseph Alexander Rocha Alomoto (Y'1998 – M'10). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Don Bosco de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la ubicación óptima de compensador en serie controlado por tiristores utilizando enjambre de partículas para reducir las pérdidas de potencia en sistemas de transmisión. jrochaa@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila Téllez (Y'1981 – M'09). Recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador. aguila@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, Joseph Alexander Rocha Alomoto con documento de identificación N° 1725564056 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, 05 de mayo del año 2022

Atentamente,



Joseph Alexander Rocha Alomoto
1725564056

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

Yo, Joseph Alexander Rocha Alomoto con documento de identificación No. 1725564056, 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: “Ubicación óptima de compensador en serie controlado por tiristores utilizando enjambre de partículas para reducir las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de voltaje en sistemas de transmisión”, 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, 05 de mayo del año 2022

Atentamente,



Joseph Alexander Rocha Alomoto
1725564056

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alexander Águila Téllez con documento de identificación N° 1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN, realizado por Joseph Alexander Rocha Alomoto con documento de identificación N° 1725564056, 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, 05 de mayo del año 2022

Atentamente,



Alexander Águila Téllez
1755983184

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract.....	1
1. Introducción.....	2
2. Marco Teórico	3
2.1 Sistema de transmisión eléctrica.	3
2.1.1 Líneas de transmisión.....	3
2.1.2 Pérdidas de potencia.....	4
Pérdidas técnicas.	4
Pérdidas no técnicas.	4
Pérdidas por efecto Joule.....	4
Pérdidas por efecto corona.	4
Pérdidas en aisladores.	5
2.2 Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).	5
2.3 Compensador serie controlador por tiristores (TCSC).....	6
2.3.1 Modos de operación del TCSC.	6
Modo bloqueo.	7
Modo bypass.	7
Modo vernier.....	7
2.3.2 Función de costos de TCSC.	7
2.4 Algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO).....	8
3. Planteamiento y Metodología del Problema.....	9
3.1 Ubicación óptima de TCSC.....	9
3.2 Restricciones	10
3.2.1 Perfil de voltaje.	10
3.2.2 Desviación promedio de voltaje.....	10
3.2.3 Reactancia del dispositivo TCSC.....	10
3.3 Pseudocódigo de flujo de potencia utilizando Newton-Raphson.....	10
3.4 Pseudocódigo de optimización por enjambre de partículas.	11
3.4 Modelo de prueba.....	12
4. Análisis y Resultados.....	12
4.1 Análisis de convergencia de función objetivo.....	13
4.2 Análisis de perfil de voltaje.....	13
4.3 Análisis de pérdidas de potencia activa y reactiva.	14

4.4 Análisis de desviación promedio de voltaje.....	16
5. Trabajos Futuros	16
6. Conclusiones.....	16
7. Referencias	16
7.1 Matriz de estado de arte.	22
7.2 Indicadores de la matriz de estado de arte.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente de una línea de transmisión.....	4
Figura 2. Modelo TCSC.	6
Figura 3. Modo de operación Bloqueo.	7
Figura 4. Modo de operación Bypass.	7
Figura 5. Diagrama de flujo de PSO.....	9
Figura 6. Modelo de 39 barras IEEE.	12
Figura 7. Modelo de 39 barras IEEE con TCSC.	13
Figura 8. Minimización de pérdidas de potencia respecto a iteraciones del algoritmo.	13
Figura 9. Perfil de voltaje.	14
Figura 10. Pérdidas de potencia activa.	15
Figura 11. Pérdidas de potencia reactiva.	15
Figura 12. Desviación de voltaje promedio.....	16
Figura 13. Indicador de la temática – Estado del arte.....	28
Figura 14. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.	28
Figura 15. Indicador de solución – Estado del arte.	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de variables.....	10
Tabla 2. Flujo de potencia utilizando Newton-Raphson.	10
Tabla 3. Descripción de variables.....	11
Tabla 4. Implementación de algoritmo PSO.....	11
Tabla 3. Perfil de voltaje en cada nodo.....	13
Tabla 4. Pérdidas de potencia activa en las líneas.	14
Tabla 5. Pérdidas de potencia reactiva en las líneas.	15
Tabla 6. Matriz de estado de arte.....	22

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

Resumen

El presente artículo da a conocer la implementación de una metaheurística con la cual se busca ubicar de la mejor manera el dispositivo compensador en serie controlado por tiristores (TCSC), ya que es uno de los FACTS más utilizado en la actualidad debido a su versatilidad de compensación y control de flujos de potencia en sistemas de transmisión. El estudio se realiza a partir del análisis del flujo de potencia antes y después de la compensación, la cual se realizará mediante el TCSC. La ubicación óptima del dispositivo se encontrará a través del método de optimización por enjambre de partículas (PSO) bajo restricciones y limitaciones técnicas que permitirán encontrar la mejor posición para ubicar el dispositivo garantizando la confiabilidad del sistema. En este caso de estudio se utilizará el modelo IEEE de 39 barras. Los resultados obtenidos posterior a la compensación se compararán con los parámetros iniciales con lo cual se podrá verificar la mejora en el perfil de voltaje y la minimización de pérdidas de potencia activa y reactiva al menor costo de instalación en el sistema eléctrico.

Palabras Clave: Compensador en serie controlado por tiristores, optimización de enjambre de partículas, pérdidas de potencia, perfil de voltaje, sistemas de transmisión AC flexible.

Abstract

This article presents the implementation of a metaheuristic with which it is tried to locate in the best way the thyristor-controlled series compensation device, because it is one of the most used FACTS today due to its compensation versatility and control of load flows in transmission systems. The study is carried out from the analysis of the power flow before and after the compensation, which will be carried out through the TCSC, where the optimal location of the device will be found through the particle swarm optimization method (PSO) under restrictions and technical limitations that will allow finding the best position to locate the device, guaranteeing the reliability of the system. In this case study the IEEE 39 bar model will be used.

The results obtained after the compensation will be compared with the initial parameters with which it will be possible to verify the improvement in the voltage profile and the minimization of active and reactive power losses at the lowest installation cost in the electrical system.

Keywords: Thyristor controlled series compensation, particle swarm optimization, power losses, voltage profile, flexible AC transmission system.

1. Introducción

El aumento continuo de la demanda de energía eléctrica a partir del cambio de consumo de la energía tradicional por nuevas tecnologías ha producido que los equipos de transmisión y distribución se mantengan en servicio constante, donde como resultado los transformadores y líneas de transmisión están cada vez más cargados generando ciertos inconvenientes como pérdidas de potencia, perturbaciones de voltajes y corrientes [1]. Para solucionar estos inconvenientes se ha determinado distintas maneras como el diseño e implementación de nuevas líneas de transmisión o conexión de diferentes dispositivos de compensación o de control con el fin de mantener la calidad de energía eléctrica exigida por las empresas distribuidoras [2].

La implementación de nuevas líneas de transmisión tiene como principal restricción el tema financiero por lo cual no siempre es una solución viable [3]. Para minimizar las pérdidas en las líneas de transmisión, mantener un perfil de voltaje adecuado y mejorar la capacidad de transferencia de energía se han implementado distintas técnicas de compensación, donde, la ubicación y el dimensionamiento de la compensación deben ser las adecuadas al dispositivo que se va a utilizar [4].

Los dispositivos flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) son el método de solución más utilizado en la actualidad debido a la gran posibilidad de controlar los voltajes con los dispositivos en derivación y los flujos de potencia con los dispositivos en serie e incluso se utilizan para minimizar pérdidas de potencia activa en el sistema como resultado de los controles principales o directamente como objetivo principal [2].

La evaluación de la pérdida de potencia del sistema de transmisión ayuda a optimizar el rendimiento general del sistema al evaluar los beneficios tanto económicos como técnicos de este [1].

El cálculo y análisis de la dimensión o capacidad del dispositivo deben ser los adecuados, pues si se ingresa una capacidad mayor a la necesaria se produciría un sobrevoltaje generando mayor nivel de pérdidas tanto técnicas como económicas al sistema [4]. A partir de distintos estudios, las técnicas de metaheurística son las más utilizadas para encontrar el dimensionamiento y la ubicación óptima de los compensadores que se ingresarán al sistema [5], [6].

Existen distintas metaheurísticas que se pueden utilizar para los problemas de optimización y esto se ha demostrado a través de distintos autores como por ejemplo en [7] se utiliza la técnica de algoritmos genéticos (GA) para encontrar la ubicación óptima de un dispositivo compensador de reactivos estático (SVC) para minimizar los costos de instalación y generación del sistema. En [8] se emplea la técnica del algoritmo competitivo imperialista (ICA) para determinar la ubicación y parámetros de control óptimos de dispositivos FACTS mejorando el rendimiento del sistema. En [9] se utiliza el algoritmo de alimentación bacteriana adaptativa cuadrática (QABFA) para localizar la ubicación y capacidad óptimos de los dispositivos SVC para aumentar la capacidad de carga del sistema o como en [10] que se maneja el algoritmo de búsqueda gravitacional (GSA) para implementar un compensador estático síncrono para minimizar las pérdidas de potencia.

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) se diferencia

de las metaheurísticas antes mencionadas al contar con un menor tiempo de respuesta y convergencia. El PSO examina de forma eficiente la población de búsqueda permitiendo realizar una optimización concreta y rápida sobre la función objetivo donde la partícula utiliza la mejor posición localizada por sí misma y la mejor posición localizada por las partículas cercanas y con ello ubicarse en sentido de una solución óptima que determinará el valor de pérdida mínima de potencia en el sistema de acuerdo a la función objetivo [11], [12].

El estudio que se llevará a cabo considera la temática de mejorar los parámetros eléctricos de la transmisión de energía. Se realizará el análisis y la implementación de un dispositivo FACTS con la finalidad de minimizar pérdidas de potencia activa y conseguir un perfil de voltaje cercano al 1 [p.u.] en el sistema de transmisión utilizando el método de optimización por enjambre de partículas a través del software Matlab. El artículo se organizará de la siguiente manera: en el capítulo 2, se desarrollan definiciones básicas para una mejor comprensión del documento. El capítulo 3, presentará la formulación del problema y el algoritmo que se ha planteado para la solución de esta problemática. Dentro del capítulo 4, se presentará el análisis de resultados que se han obtenido a través del desarrollo de la solución para el problema planteado y por último, el capítulo 5 presentará las conclusiones del estudio realizado.

2. Marco Teórico

2.1 Sistema de transmisión eléctrica.

El sistema de transmisión es aquel que tiene como propósito la transmisión de energía eléctrica a los distribuidores y grandes consumidores, así como asistir a los intercambios internacionales [13].

La energía eléctrica es transferida por conductores denominados líneas de transmisión las cuales están constituidas por estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes y cables de guarda [14], [15].

Estas líneas de transmisión poseen propiedades específicas para la transmisión de energía eléctrica donde el voltaje de línea que se transporta oscila aproximadamente entre 115kV y 800kV [14].

Para que el diseño de una línea de transmisión sea adecuado e implementable este debe cumplir con ciertos criterios [13]:

- La cantidad de potencia activa que tendrá que transmitir.
- La distancia a la que se debe transportar la energía.
- El costo de implementar la línea de transmisión.
- Consideraciones estéticas, accesibilidad, congestión urbana y crecimiento de la demanda.

2.1.1 Líneas de transmisión.

Las líneas de transmisión son vulnerables a variaciones del tiempo debido a su exposición al medio ambiente lo cual se ha convertido en un punto débil para el funcionamiento seguro y estable de una red eléctrica, debido a estos eventos los parámetros que componen la línea deben ser los adecuados [16].

Las líneas de transmisión se modelan a partir de cuatro parámetros: resistencia, reactancia inductiva, capacitancia y conductancia; por lo general a este último parámetro se lo suele despreciar [17], [18].

Los parámetros de una línea de transmisión son de suma importancia dentro del sistema eléctrico ya que estos valores se los utiliza en distintas aplicaciones como en el diseño, la operación y en la protección de estas [17].

Determinar los componentes adecuados de la línea de transmisión es un problema

de optimización no lineal que cuenta con muchas soluciones matemáticas pero una sola solución física la cual tiene que cumplir con dos condiciones: coherencia física y error mínimo de reconstrucción [17], [19].

El error mínimo de reconstrucción referencia a la relación aproximada entre los parámetros físicos y los valores medidos mientras que la coherencia física tiene que cumplir con que la resistencia unitaria debe ser mayor a la resistencia unitaria de un conductor nuevo y la inductancia y capacitancia unitarias únicamente pueden tener una variación leve ya que dependen de la geometría de las líneas [19].

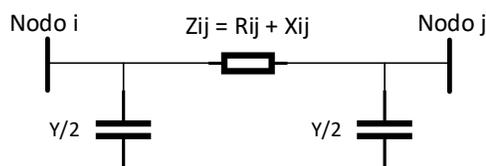


Figura 1. Circuito equivalente de una línea de transmisión.

2.1.2 Pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia que se puedan presentar en las líneas de transmisión llegan a obstaculizar el flujo de carga o potencia en la red, lo que afecta las tasas de crecimiento de la carga anual, la inflación de la inversión en el sistema de potencia y la programación de potencia óptima [20], [21].

La limitación principal de las líneas de transmisión es su tendencia a generar grandes cantidades de potencia reactiva [1] mientras que las pérdidas de potencia activa en el sistema son alrededor de 3 a 5% de la generación total, sin embargo, este porcentaje de pérdidas de potencia representa una cantidad considerable en términos de megavatios (MW) [22].

Las pérdidas de potencia se deben principalmente a las pérdidas en las líneas de transmisión y transformadores [23],

[24]. Donde la mayor afectación en las líneas de transmisión se debe a efectos físicos como el flujo de corriente eléctrica el cual se puede controlar y mantener en niveles aceptables sin producir una cantidad exagerada de pérdidas de potencia [25]. Estas pérdidas en la red de transporte de energía eléctrica se pueden clasificar en pérdidas técnicas y no técnicas [26].

Pérdidas técnicas.

Las pérdidas técnicas son aquellos efectos físicos conocidos de la transmisión de energía eléctrica, es decir, las pérdidas existentes en las líneas de transmisión y transformadores del sistema y se pueden reducir a niveles aceptables [26]–[28].

Pérdidas no técnicas.

Se consideran pérdidas no técnicas a las pérdidas cuyo origen son resultado de robos, mediciones inexactas, registros deficientes o errores en los cálculos en si por lo cual son menos significantes para el sistema de transmisión [26].

Las pérdidas de potencia se han determinado como costos financieros con lo cual se ha producido la necesidad de determinar la cantidad de estas mediante cálculo o estimación, esta última permitiendo determinar los tipos de pérdidas en las líneas de transmisión [25], [26].

Pérdidas por efecto Joule.

El efecto Joule es el causante principal de las pérdidas en las líneas de transmisión debido al flujo de corriente que circula por las líneas y el efecto de calentamiento que esto produce [25], [26].

Pérdidas por efecto corona.

Las pérdidas por efecto corona se dan principalmente cuando el voltaje en las líneas de transmisión es mayor que el valor crítico del aire lo cual produce que el aire

alrededor de las líneas se ionice y se generen estas pérdidas de potencia [26].

Pérdidas en aisladores.

Este tipo de pérdidas en las líneas de transmisión se presentan mayormente en líneas de transmisión antiguas o donde la contaminación ambiental a lo largo de la línea es significativa. En este tipo de pérdidas se necesita una atención especial pues si el aislamiento se encuentra en mal estado se vuelve más sensible a la variación del tiempo [26].

2.2 Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).

En los sistemas eléctricos convencionales se consideran a las líneas de transmisión como inflexibles pues presentan poca posibilidad de controlar el flujo de potencia como consecuencia de que la configuración y los parámetros de la red son fijos [29].

El flujo de potencia entre los terminales de una línea de transmisión sin pérdidas se calcula a través de [29]:

$$P_{ij} = V_i V_j \frac{\text{sen}(\theta_{ij})}{X_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

P_{ij} es la potencia activa que se transfiere por medio de la línea conectada entre los nodos ij .

V_i, V_j son las magnitudes de voltaje.

θ_{ij} es la desigualdad del ángulo.

X_{ij} es la reactancia de la LT.

Ciertas limitaciones en el transporte de energía eléctrica y la necesidad de poder controlar el flujo de potencia fue el incentivo necesario para comenzar a utilizar la electrónica de potencia aplicada principalmente a los dispositivos FACTS [30].

El objetivo de la aplicación de dispositivos FACTS es mejorar el desempeño de la red mediante el control

del flujo de potencia a través por la línea de transmisión pues estos compensadores utilizan dispositivos electrónicos como tiristores y diodos [29].

Los dispositivos FACTS prevén la posibilidad de obtener la mayor utilidad del sistema de transmisión maximizando la capacidad de transferencia de potencia, reduciendo pérdidas y manteniendo un flujo de potencia controlado con los niveles de carga adecuados y muy cerca de los límites térmicos de la línea de transmisión aceptables [29], [31].

Existe una gran variedad de dispositivos FACTS los cuales se dividen según las acciones que tengan sobre el sistema, se pueden clasificar como: dispositivos de compensación en paralelo, shunt o derivación, dispositivos de compensación en serie y dispositivos desfasadores [12], [30], [32]–[34].

Los dispositivos FACTS de compensación en serie en el sistema son:

- Controlador Interlineal de Flujo de Potencia (IPFC).
- Compensador Estático Síncrono en Serie (SSSC).
- Compensador en Serie Controlado por Tiristores (TCSC).
- Reactor en Serie Conmutado por Tiristores (TSSR).

Dentro de los dispositivos FACTS de compensación en paralelo se encuentran:

- Compensador Estático Síncrono (STATCOM).
- Compensador de Reactivos Estático (SVC).
- Reactor Conmutado por Tiristores (TCR).
- Compensador Conmutado por Tiristores (TSC).

- Reactor Conmutado por Tiristores (TSR).

Por último, los dispositivos FACTS de compensación combinada son:

- Controlador de Potencia de Interfase (IPC).
- Transformador Cambiador de Fase Controlado por Tiristores (TCPST).
- Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC).

2.3 Compensador serie controlador por tiristores (TCSC).

El TCSC es un compensador de reactancia variable el cual está conformado por bancos de condensadores en derivación en conjunto con un reactor controlado por tiristores (TCR) y se modela por un capacitor y un inductor en paralelo, se caracteriza principalmente por su extenso rango de operación, pronta respuesta, y alta confiabilidad [35].

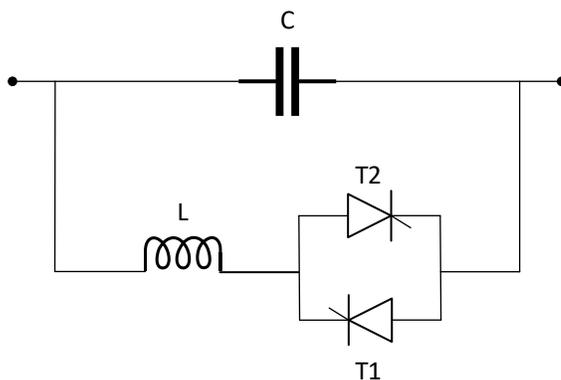


Figura 2. Modelo TCSC. [Autor]

Este dispositivo realiza una compensación capacitiva o inductiva variando la reactancia de la línea de transmisión, de manera que la disminuye o aumenta respectivamente al tipo de compensación que este empleando el dispositivo [36]. Implementar el TCSC en serie con la línea de transmisión disminuye

la reactancia de la línea produciendo que la potencia máxima que se puede transferir por esa línea aumente y se reduzcan las pérdidas de potencia reactiva [37].

El principio de funcionamiento del TCSC es modificar la reactancia de la línea de transmisión al insertar inductancias o capacitancias en serie consiguiendo variar el flujo de potencia [38].

El TCSC es uno de los dispositivos de compensación que ofrece claros beneficios técnicos al sistema de transmisión siendo uno de los más económicos, entre estos beneficios se encuentran [39]:

- Permite el control del flujo de corriente y potencia a través de la línea de transmisión en sistemas eléctricos aumentando la estabilidad transitoria y amortiguando las oscilaciones de potencia [40].
- Permite obtener mayores niveles de compensación al no contribuir con oscilaciones subsíncronas.
- Cuenta con una topología de conexión bastante sencilla para su instalación en el sistema de transmisión.

Se utiliza este dispositivo debido a que permite solventar problemas de estabilidad de voltaje, mejorar el amortiguamiento de potencia, la estabilidad transitoria y el incremento del flujo de potencia a través de los conductores. El TCSC no cuenta con el problema de desgaste mecánico ya que emplea dispositivos de accionamiento estático a base de tiristores permitiendo mejorar los límites térmicos, reducir y limitar sobrecargas y mejorar los flujos existentes [35].

2.3.1 Modos de operación del TCSC.

Con la aplicación del TCSC se busca conseguir un compensador variable de manera continua empleando un TCR que

corresponderá a una reactancia inductiva variable y será controlada por el ángulo de disparo δ , de manera que la impedancia para el TCSC se represente como un circuito LC. Este circuito se forma por una reactancia variable inductiva X_L y una reactancia fija capacitiva X_C en paralelo [41].

El TCSC presenta tres modos de operación dependiendo del valor del ángulo δ que controla la reactancia inductiva X_L , estos son:

Modo bloqueo.

Este modo de operación se presenta cuando el ángulo de disparo es 180° donde la corriente que circula a través del reactor controlado por tiristores es cero. La compensación se comporta como una reactancia serie capacitiva, donde, los tiristores no conducen ya que no se producen señales de disparo para la compuerta por lo tanto no hay componente inductiva en el TCSC y este se comporta como un banco de condensadores en serie fijo [42]–[44].

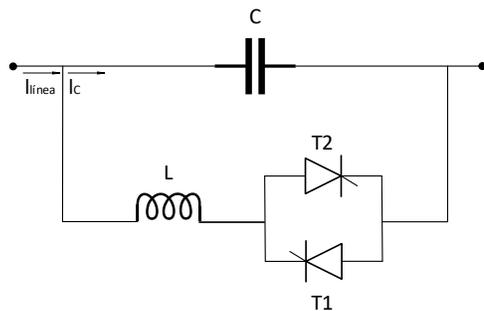


Figura 3. Modo de operación Bloqueo. [Autor]

Modo bypass.

Este modo de operación se presenta cuando el ángulo de disparo es de 90° y se producen señales de activación continuas hacia las compuertas de los tiristores generando que estos conduzcan de manera permanente donde la mayor parte de la corriente circula a través del TCR y se lo utiliza cuando hay mínima carga para evitar sobrevoltajes del sistema. La conducción

constante de los tiristores prioriza el efecto del reactor controlado por tiristores sobre el del condensador con lo cual se genera un efecto de una reactancia inductiva pequeña en el TCSC [42]–[45].

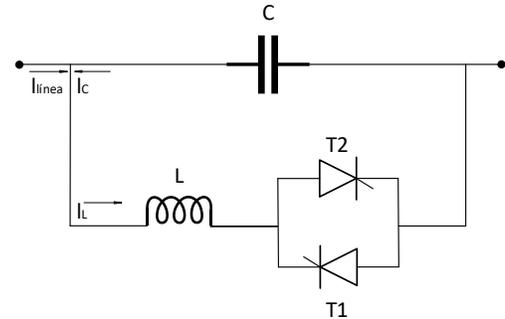


Figura 4. Modo de operación Bypass. [Autor]

Modo vernier.

Para este modo de operación las válvulas son controladas por el ángulo de disparo y se lo determina como el principal modo de operación del TCSC.

A través del control del ángulo de disparo se puede controlar de manera efectiva la corriente que circula a través del reactor controlado por tiristores. Dependiendo de la magnitud de la corriente, el TCSC puede contar con una reactancia puramente capacitiva o inductiva [42].

El TCSC puede aumentar la tensión de compensación sobre el valor que genera el propio banco de condensadores, es decir, el TCSC permite incrementar la reactancia nominal del condensador o del reactor de compensación serie [42].

2.3.2 Función de costos de TCSC.

La función de costos de instalación del TCSC se formula a través de la siguiente ecuación [46]:

$$IC = C_{TCSC} * S * 1000 \quad (2)$$

Donde:

IC es el costo de instalación del dispositivo TCSC en [US\$].

C_{TCSC} es el costo del dispositivo TCSC en [US\$/kVAr].

El costo de los dispositivos TCSC se calcula mediante la función [46]:

$$C_{TCSC} = 0.0015 S^2 - 0.713 S + 153.75 \text{ [US$ /kVAr]} \quad (3)$$

$$S = |Q_2 - Q_1| \quad (4)$$

Donde:

S es el rango operativo del dispositivo TCSC en [MVar]

Q_1 es la potencia reactiva en la línea antes de la instalación del TCSC en [MVar].

Q_2 es la potencia reactiva en la línea después de la instalación del TCSC en [MVar].

2.4 Algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO).

Este algoritmo fue desarrollado por Kennedy y Eberhart en el año 1995 y se basa en el comportamiento sociocognitivo de enjambres en el medio natural. El principio del algoritmo se enfoca en la búsqueda heurística para optimizar un problema mejorando y actualizando continuamente la solución de partículas después de cada iteración, donde, la variable de solución ira tomando el mejor resultado conforme el algoritmo se desarrolle [11].

PSO comienza con un grupo de partículas y luego empieza a buscar soluciones óptimas en cada actualización del algoritmo. En cada iteración se utilizan dos posibles resultados, el primero es la mejor solución que se ha tenido hasta el momento al cual se lo denomina “pbest” y el segundo es el mejor valor que se ha obtenido hasta ese momento por cualquier partícula en la población, es decir es el

mejor valor global y se lo denomina “gbest” [47].

Las partículas de la población cuentan con una posición (F_x, F_y) y con una velocidad (V_x, V_y) las cuales se actualizan con cada iteración de la siguiente manera [48]:

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + c_1 r_1 * (pbest_i - s_i^k) + c_2 r_2 * (gbest_i - s_i^k) \quad (5)$$

$$f_i^{k+1} = f_i^k + v_i^{k+1} \quad (6)$$

Donde:

v_i^{k+1} es la velocidad de la partícula para la iteración sucesiva.

v_i^k es la velocidad de la partícula en la iteración actual.

w es el valor de la inercia.

c_1 y c_2 son coeficientes de aceleración.

r_1 y r_2 son coeficientes que pueden variar entre 1 y 0.

f_i^{k+1} es la posición de la partícula para la iteración sucesiva.

f_i^k es la posición de la partícula en la iteración actual.

La constante de inercia ira cambiando conforme al número de iteración en el que se encuentre utilizando la ecuación 7 donde los valores de peso de inercia mínimo y máximo son 0.4 y 0.9 respectivamente [49].

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (7)$$

Donde:

w_{max} es el peso máximo que puede tener como valor de inercia.

w_{min} es el peso mínimo que puede tener como valor de inercia.

$iter_{max}$ es la iteración establecida como condición de parada.

iter es la iteración vigente.

El proceso a través del cual se desarrolla el algoritmo de optimización de enjambre de partículas es [50]:

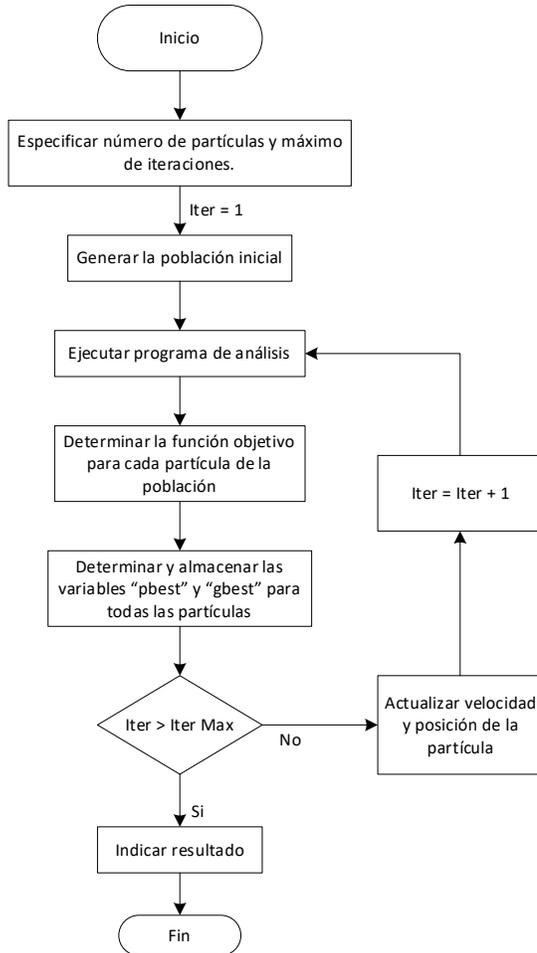


Figura 5. Diagrama de flujo de PSO.

3. Planteamiento y Metodología del Problema

Se ha establecido implementar una metodología que permita localizar la mejor ubicación de dispositivos de compensación TCSC (compensador en serie controlado por tiristores) de tal manera que mejoren los parámetros del SEP como; perfiles de voltaje y pérdidas de potencia. Los parámetros del SEP se obtendrán a través de la ejecución de flujos de potencia

aplicando el método de Newton-Raphson, los cuales permitirán ubicar la posición más adecuada para el dispositivo empleando el algoritmo de enjambre de partículas a través del software Matlab.

La metaheurística planteada toma en cuenta restricciones y limitaciones para el correcto desarrollo de la solución al problema con lo cual se localizará la ubicación idónea para la implementación del dispositivo al menor costo de instalación asegurando el correcto funcionamiento del sistema.

3.1 Ubicación óptima de TCSC.

Los dispositivos FACTS pueden ubicarse de manera aleatoria en cualquier parte del SEP, sin embargo, para que la ubicación sea la adecuada y proporcione las mejores soluciones al sistema se deben tomar en cuenta distintos parámetros como niveles de voltaje o potencia activa y reactiva que circulan por los nodos y líneas del sistema.

Las pérdidas de potencia activa representan una pérdida económica a largo plazo por lo cual es necesario poder estimar con gran precisión la magnitud de estas y así poder tomar medidas generando su minimización. Las pérdidas de potencia activa en un SEP se pueden calcular de la siguiente manera [51]:

$$P_{pérdidas} = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (8)$$

Donde:

n es el número total de las líneas de transmisión.

G_{ij} es la conductancia entre el nodo i y j en (S).

V_i y δ_i son la magnitud y ángulo del voltaje en la barra i respectivamente.

V_j y δ_j son la magnitud y ángulo del voltaje en la barra j respectivamente.

3.2 Restricciones

3.2.1 Perfil de voltaje.

Para que el funcionamiento del SEP sea el adecuado los niveles de voltaje deben encontrarse en $\pm 10\%$ de la tensión nominal que maneja el sistema [51].

$$\begin{aligned} V_{i \min} &\leq V_i \leq V_{i \max} \\ 0.9 &\leq V_i \leq 1.1 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

V_i es el voltaje en el nodo i .

$V_{i \min}$ es el límite mínimo de voltaje en [p.u.].

$V_{i \max}$ es el límite máximo de voltaje en [p.u.].

3.2.2 Desviación promedio de voltaje.

La desviación promedio de voltaje indica el valor medio del comportamiento de los voltajes diferente al valor nominal de 1 [p.u.] por lo que se busca reducirlo para que no se exista gran diferencia entre la desviación promedio y el voltaje nominal.

$$DPV = \sum_{i=1}^N \frac{|V_{nom} - V_i|}{N} \quad (10)$$

Donde:

V_{nom} y V_i son el voltaje nominal y del nodo respectivamente en [p.u.].

N es la cantidad de nodos para el SEP.

3.2.3 Reactancia del dispositivo TCSC.

Para evitar que la compensación del dispositivo sea demasiada, el rango de operación del TCSC se maneja entre:

$$-0.8 X_L \leq X_{TCSC} \leq 0.2 X_L \quad (11)$$

Donde:

X_{TCSC} es la reactancia agregada a la línea por la ubicación del TCSC en [p.u.].

X_L es la reactancia en [p.u.] de la línea donde se encuentra ubicado el TCSC [51].

3.3 Pseudocódigo de flujo de potencia utilizando Newton-Raphson.

El flujo de potencia se ha resuelto a través del método de Newton-Raphson mismo que se encarga de mejorar sucesivamente valores desconocidos mediante aproximaciones obteniendo como resultados los valores de voltaje y ángulo en cada nodo, potencia activa y reactiva a través de las líneas al igual que las pérdidas de potencia en estas. El pseudocódigo utilizado para la implementación del método de Newton Raphson es el siguiente.

Tabla 1. Descripción de variables.

Nomenclatura	Descripción
Rij	Resistencia de la línea de transmisión.
Xij	Reactancia de la línea de transmisión.
Y	Efecto capacitivo de la línea de transmisión.
PG	Potencia activa generada.
QG	Potencia reactiva generada.
PD	Potencia activa demandada.
QD	Potencia reactiva demandada.
SL	Barra slack.
PV	Barra PV.
PQ	Barra PQ.

Tabla 2. Flujo de potencia utilizando Newton-Raphson.

Pseudocódigo del Flujo de Potencia por Newton-Raphson

Paso I: Asignación de valores de impedancias de las líneas (Rij, Xij, Y), generación (PG, QG), carga (PD, QD) y tipo de barra (SL, PV, PQ).

Paso II: Cálculo de la matriz Ybarra

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \vdots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

$$Y_{ij} = Z_{ij}^{-1}$$

$$Y_{ij} = -Y_{ij}$$

$$Y_{ii} = \sum Y_i$$

Paso III: Cálculo de ΔP y ΔQ

$$\Delta P = P^{esp} - P^{cal}$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q^{cal}$$

$$P_i^{cal} = \sum_j^n V_i * V_j * [G_{ij} * \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} * \sen(\theta_{ij})]$$

$$Q_i^{cal} = \sum_j^n V_i * V_j * [G_{ij} * \sen(\theta_{ij}) - B_{ij} * \cos(\theta_{ij})]$$

Paso IV: Construcción de la matriz Jacobiana

$$J = \begin{bmatrix} Jac1 & Jac2 \\ Jac3 & Jac4 \end{bmatrix}$$

$$Jac1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix}$$

$$Jac2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \end{bmatrix}$$

$$Jac3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix}$$

$$Jac4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix}$$

Paso V: Cálculo de derivadas parciales de la iteración sucesiva.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & V * \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & V * \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\Delta V} \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix}^{k+1} = - \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k$$

Paso VI: Cálculo de nuevos valores de voltaje y ángulo

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k$$

Paso VII: Comparación de error de la potencia activa y reactiva de la iteración siguiente con respecto a la tolerancia para los nodos

$$|\Delta P_i^k| \leq \varepsilon = 0.001 \text{ y } |\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon = 0.001$$

Paso VIII: Mostrar resultados
Voltaje y ángulo de cada nodo, potencia activa, reactiva y pérdidas del sistema.

Paso IX: Fin

3.4 Pseudocódigo de optimización por enjambre de partículas.

El algoritmo ayuda a obtener la ubicación óptima del dispositivo que se va a instalar satisfaciendo a la función objetivo y se ejecuta una vez se hayan obtenido los resultados del flujo de potencia.

Tabla 3. Descripción de variables.

Nomenclatura	Descripción
iter	Cantidad de iteraciones.
pop	Cantidad de partículas en la población.
pbest	Posición local.
gbest	Posición global.
w	Factor de inercia.
v	Velocidad de la partícula.
f	Posición de la partícula.
c	Coefficiente de aceleración.
r	Coefficiente aleatorio.

Tabla 4. Implementación de algoritmo PSO

Algoritmo PSO.	
Paso I:	Asignación de valores de número de iteraciones, iter= 50; número de partículas de la población, pop= 30;
Paso II:	Ingreso de datos del sistema eléctrico.
Paso III:	Ejecución de flujo de potencia utilizando Newton-Raphson descrito en Tabla 1.
Paso IV:	Determinación de pérdidas de potencia activa

Paso V: Crear la población con una velocidad y posición al azar en el espacio de solución.

Paso VI: Evaluar la función objetivo por cada partícula.

$$f(x) = \min \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}]$$

Paso VII: Determinar el pbest y el gbest.

Paso VIII: Actualizar la velocidad y posición de la partícula.

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + c_1 r_1 * (pbest_i - s_i^k) + c_2 r_2 * (gbest_i - s_i^k)$$

$$f_i^{k+1} = f_i^k + v_i^{k+1}$$

Paso IX: Considerar restricciones y limitaciones

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

$$-0.8 X_L \leq X_{TCSC} \leq 0.2 X_L$$

Paso X: Actualizar pbest y gbest
Si $Iter < Iter_{max}$ volver al Paso VI. caso contrario seguir al Paso XII.

Paso XI: Cálculo de nuevo flujo de potencia por Newton-Raphson descrito en la Tabla 1.

Paso XII: Fin.
Mostrar ubicación óptima para el dispositivo, pérdidas de potencia, costo de instalación.

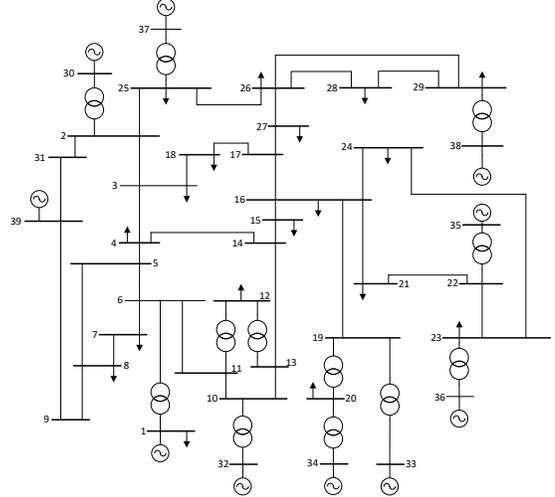


Figura 6. Modelo de 39 barras IEEE.

4. Análisis y Resultados

Se realiza el análisis correspondiente al comportamiento de los parámetros resultantes del flujo de potencia antes y después de la ubicación del dispositivo compensador en el sistema de prueba de 39 barras.

A través del análisis del comportamiento del algoritmo con distintos valores para el número de iteraciones y de partículas se llegó a la conclusión de que utilizando 50 iteraciones se puede llegar a la mejor solución con una cantidad de 30 partículas como población.

Para este caso con la cantidad de iteraciones y partículas establecido el algoritmo empleado indica que la mejor posición para la ubicación del dispositivo compensador es en la línea 37 misma que se encuentra entre el nodo 23 y 24, con una reactancia de -0.018 [p.u.] donde el costo de instalación del dispositivo TCSC es de \$13771.044.

3.4 Modelo de prueba.

El modelo de prueba que se utilizará para la ubicación del dispositivo TCSC de manera óptima a través del algoritmo antes mencionado es el sistema de transmisión de IEEE de 39 barras mismo que se puede observar en la Figura 6. Los parámetros del sistema se han tomado de [52].

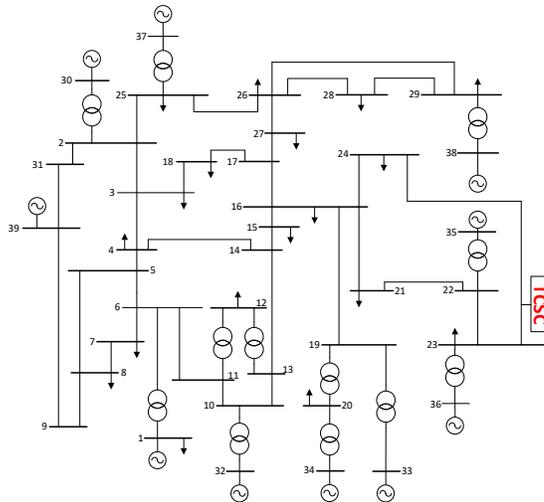


Figura 7. Modelo de 39 barras IEEE con TCSC.

4.1 Análisis de convergencia de función objetivo.

El algoritmo PSO busca llegar a la optimización del objetivo en cada iteración, donde por cada iteración el valor va cambiando hasta obtener una posible solución óptima. En la Figura 8. se puede apreciar el número de iteraciones necesarios para que el algoritmo evidencie que las pérdidas de potencia activa disminuyen otorgando la mejor solución para el problema planteado.

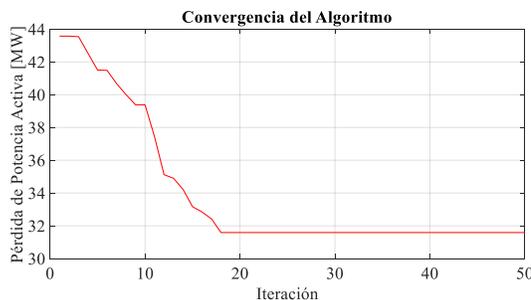


Figura 8. Minimización de pérdidas de potencia respecto a iteraciones del algoritmo.

4.2 Análisis de perfil de voltaje.

Para realizar el análisis de perfil de voltaje se ha comparado el sistema antes y después de instalar el dispositivo TCSC. El perfil de voltaje para este sistema ya era bastante bueno pues el voltaje en cada nodo ya se encontraba en 1 [p.u.] o muy cerca de este

por lo cual su mejora es mínima sin superar la restricción de voltaje. En la Tabla 3. se puede apreciar la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla 3. Perfil de voltaje en cada nodo.

Nodos	Sin TCSC	Con TCSC
1	0.982	0.982
2	1.0487	1.0519
3	1.0312	1.0146
4	1.0055	1.0157
5	1.0076	1.0156
6	1.0096	1.0173
7	1.0000	1.0091
8	0.9997	1.0088
9	1.0390	1.0414
10	1.0188	1.0254
11	1.0145	1.0216
12	1.0018	1.0122
13	1.0158	1.0231
14	1.0132	1.0213
15	1.0167	1.0248
16	1.0328	1.0387
17	1.0346	1.0408
18	1.0319	1.0383
19	1.0502	1.0529
20	0.9911	0.9938
21	1.0325	1.0384
22	1.0503	1.0535
23	1.0453	1.0489
24	1.0383	1.0432
25	1.0578	1.0609
26	1.0528	1.0579
27	1.0386	1.0452
28	1.0505	1.0542
29	1.0502	1.0528
30	1.0499	1.0499
31	1.0395	1.0417
32	0.9841	0.9841
33	0.9972	0.9972
34	1.0123	1.0123
35	1.0494	1.0494
36	1.0636	1.0636
37	1.0275	1.0275
38	1.0265	1.0265
39	1.03	1.03

Como se puede observar en la Figura 9. los resultados obtenidos para el

funcionamiento del sistema con el TCSC instalado es positivo pues existe un aumento en el perfil de voltaje manteniendo el rango permisible de $\pm 10\%$ con lo cual no se genera pérdida de estabilidad en el sistema.

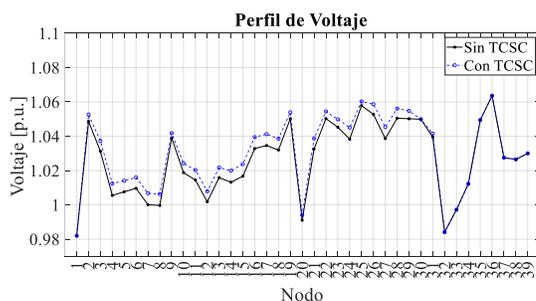


Figura 9. Perfil de voltaje.

4.3 Análisis de pérdidas de potencia activa y reactiva.

Las pérdidas de potencia activa y reactiva se ven afectadas debido a la compensación realizada por el dispositivo TCSC. En la Tabla 4. se presentan las pérdidas de potencia activa en el caso base y el sistema compensado donde se puede observar la reducción que las pérdidas han tenido posterior a la instalación del dispositivo. Sin embargo, en la línea 16 se puede apreciar un incremento mínimo en las pérdidas de potencia. En general para el sistema se ha obtenido como promedio de compensación un total de 0.2607 [MW].

Tabla 4. Pérdidas de potencia activa en las líneas.

Línea	Nodo Inicial	Nodo Final	Sin TCSC	Con TCSC
1	1	6	0	0
2	2	3	1.3298	0.9639
3	2	25	4.3398	3.1542
4	2	30	0	0
5	2	31	0.9768	0.7117
6	3	4	0.1995	0.1849
7	3	18	0.0172	0.0135
8	4	5	0.3085	0.2133
9	4	14	0.5693	0.4126
10	5	6	0.5705	0.4028
11	5	8	0.9286	0.6694

12	6	7	1.2542	0.9018
13	6	11	0.7208	0.5229
14	7	8	0.1917	0.1358
15	8	9	0.3084	0.2469
16	9	39	0.0197	0.0266
17	10	11	0.4353	0.3181
18	10	13	0.4062	0.2868
19	10	32	0	0
20	11	12	0.0293	0.0288
21	12	13	0.0338	0.0335
22	13	14	0.8769	0.6179
23	14	15	0.0514	0.0364
24	15	16	0.8194	0.6452
25	16	17	0.3375	0.2423
26	16	19	3.0753	2.2073
27	16	21	0.8209	0.5888
28	16	24	0.0296	0.0294
29	17	18	0.261	0.1898
30	17	27	0.0155	0.0129
31	19	20	0.2183	0.1556
32	19	33	2.8931	2.0765
33	20	34	2.5094	1.8277
34	21	22	2.7811	1.9967
35	22	23	0.0247	0.1954
36	22	35	0	0
37	23	24	2.5281	1.8092
38	23	36	1.43	1.0247
39	25	26	0.1258	0.0870
40	25	37	1.6572	1.1995
41	26	27	0.9194	0.6788
42	26	28	0.7885	0.5701
43	26	29	1.9138	1.3825
44	28	29	1.5561	1.1229
45	29	38	5.2337	3.7808
46	31	39	0.0662	0.0585

En la Figura 10. se puede apreciar la reducción de pérdidas de potencia activa que se ha tenido en las líneas respecto a la instalación del compensador por lo cual también han disminuido las pérdidas totales de potencia activa en el SEP, las cuales fueron de 43.5726 [MW] para el caso base y posterior a la optimización han disminuido a 31.5877 [MW].

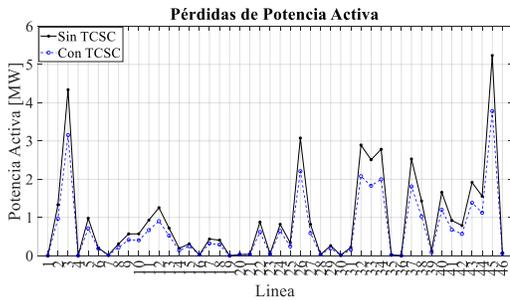


Figura 10. Pérdidas de potencia activa.

Las pérdidas de potencia reactiva se ven igualmente afectadas debido a la compensación del dispositivo. En la Tabla 5. se presenta la comparativa de las pérdidas en el caso base y en el sistema compensado donde se puede observar una reducción de pérdidas en gran escala. Sin embargo, existen otras líneas que sufren un aumento de estas siendo la línea 37 la más crítica respecto al incremento de pérdidas. Posterior a la optimización se ha obtenido un promedio total de compensación de 2.9696 [MVar].

Tabla 5. Pérdidas de potencia reactiva en las líneas.

Nodos	Nodo Inicial	Nodo Final	Sin TCSC	Con TCSC
1	1	6	124.4979	89.6537
2	2	3	12.3729	16.8886
3	2	25	10.8657	12.4203
4	2	30	14.4949	10.4914
5	2	31	64.6977	68.2479
6	3	4	19.6967	20.2267
7	3	18	22.5442	22.8683
8	4	5	8.6607	10.3655
9	4	14	4.901	7.6174
10	5	6	3.0013	0.7647
11	5	8	16.7304	20.7549
12	6	7	7.821	2.2698
13	6	11	5.7829	8.2798
14	7	8	5.5931	6.3406
15	8	9	34.6763	36.0086
16	9	39	127.9407	128.1125
17	10	11	2.8545	4.1989
18	10	13	3.1781	4.54536
19	10	32	95.7398	68.6543
20	11	12	0.7972	0.7821
21	12	13	0.9192	0.9098
22	13	14	7.8931	11.0199

23	14	15	37.0832	37.07764
24	15	16	9.4	11.4608
25	16	17	10.0491	11.4444
26	16	19	4.5002	6.4052
27	16	21	13.3204	17.5766
28	16	24	6.7109	6.8081
29	17	18	11.025	12.0397
30	17	27	34.3515	34.8334
31	19	20	4.3029	3.0618
32	19	33	58.6877	42.1232
33	20	34	50.1889	36.5566
34	21	22	20.8493	6.8446
35	22	23	19.8709	20.1226
36	22	35	60.5779	43.4839
37	23	24	1.0388	10.8249
38	23	36	77.7914	55.7434
39	25	26	57.8662	58.7258
40	25	37	64.0794	46.3799
41	26	27	16.5471	19.3898
42	26	28	77.6586	81.0145
43	26	29	92.7823	99.7388
44	28	29	10.6862	15.624
45	29	38	102.0581	73.7248
46	31	39	78.6485	79

En la Figura 11. se puede apreciar la reducción de pérdidas de potencia reactiva que se ha tenido en las líneas respecto a la ubicación del compensador donde las pérdidas totales de potencia reactiva en el caso base eran de 1518.7338 [MVar] las cuales se han visto afectadas por la optimización realizada disminuyendo así a 1382.1318 [MVar], por otro lado, se puede observar que la reducción de pérdidas más crítica se encuentra en las líneas 1, 19 y 45 con 37.8442, 27.0855 y 28.3333 [MVar] respectivamente.

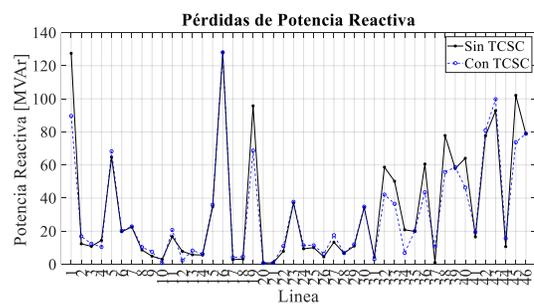


Figura 11. Pérdidas de potencia reactiva.

4.4 Análisis de desviación promedio de voltaje.

En la Figura 12. se puede observar la desviación promedio de voltaje para el caso base y para el sistema compensado, donde se puede notar que el DPV incrementa en un valor mínimo pues en todos los nodos se encuentra un voltaje sobre el 1 [p.u.]. En el caso base se tiene un DPV de 0.0291 mientras que para el sistema compensado se tiene un DPV de 0.0332 debido al perfil de voltaje compensado y sobre la unidad cumpliendo con el valor máximo de voltaje permisible.

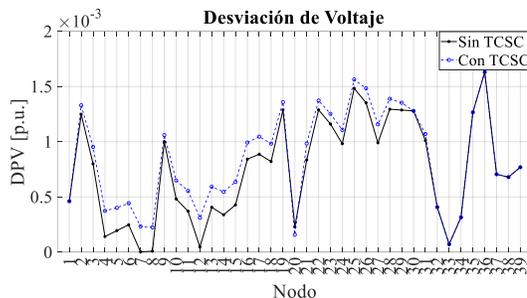


Figura 12. Desviación de voltaje promedio.

5. Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos de este estudio generan la posibilidad de nuevas investigaciones tales como:

- Utilizar evolución diferencial, algoritmos genéricos, ACO entre otras metaheurísticas para encontrar la ubicación óptima de TCSC.
- Determinar los parámetros internos del TCSC para mejorar la compensación del dispositivo.
- Ubicación óptima de múltiples dispositivos TCSC minimizando costos de instalación.

6. Conclusiones

Con la ayuda de los dispositivos FACTS se pueden controlar distintas variables del sistema eléctrico de potencia, para este trabajo se ha utilizado el compensador en serie controlado por tiristores que controla el flujo de potencia de las líneas de transmisión, mismo que se puede configurar según las necesidades que presente el sistema, mejorando la calidad de energía del sistema eléctrico.

A través de la implementación del algoritmo PSO y la cantidad de iteraciones adecuadas se ha demostrado la eficacia y rendimiento del algoritmo para localizar la ubicación óptima del dispositivo FACTS en la cual ha cumplido con las restricciones establecidas. Esto se puede verificar al comparar los resultados del flujo de potencia obtenido antes y después de la conexión del dispositivo TCSC donde se puede observar una gran mejoría en el sistema respecto a la minimización de las pérdidas de potencia y el perfil de voltaje.

La aplicación de métodos heurísticos para solucionar problemas de optimización es efectiva mientras el objetivo sea localizar una solución local pues estos métodos no necesariamente encuentran un óptimo global a diferencia de los métodos de fuerza bruta, en este caso el algoritmo de enjambre de partículas ha presentado la mejor solución para el espacio de búsqueda planteado en el modelo de prueba.

7. Referencias

- [1] T. W. May, Y. M. Yeap, and A. Ukil, "Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 637–641, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2016.7848080.
- [2] G. Fandi, Z. Muller, L. Straka, and J. Svec, "FACTS devices influence

- on power losses in transmission systems,” *Proc. 2014 15th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2014*, pp. 29–33, 2014, doi: 10.1109/EPE.2014.6839431.
- [3] M. Nadeem, M. Z. Zeb, K. Imran, and A. K. Janjua, “Optimal Sizing and Allocation of SVC and TCSC in Transmission Network by combined Sensitivity index and PSO,” *2019 Int. Conf. Appl. Eng. Math. ICAEM 2019 - Proc.*, pp. 111–116, 2019, doi: 10.1109/ICAEM.2019.8853759.
- [4] S. Mustafa, A. Arief, and M. B. Nappu, “Optimal capacitor placement and economic analysis for reactive power compensation to improve system’s efficiency at Bosowa Cement Industry, Maros,” *2018 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICOIACT 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 778–783, 2018.
- [5] S. A. Sani, G. A. Bakare, Y. S. Haruna, A. I. Isa, and U. Musa, “Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems using Improved Bacterial Foraging Algorithm,” *IEEE PES/IAS PowerAfrica Conf. Power Econ. Energy Innov. Africa, PowerAfrica 2019*, pp. 233–237, 2019, doi: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928867.
- [6] P. Sánchez, A. Ramos, J. Ferrer, J. Barquín, and P. Linares, “Modelos matemáticos de optimización,” *Univ. Pontif. Comillas*, 2010.
- [7] and M. I. M. M.M.El Metwally, A.A.El Emary, F.M.El Bendary, “Optimal Allocation Of FACTS Devices In Power System Using Genetic Algorithms,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 3–6, 2008.
- [8] R. Vanitha, J. Baskaran, and S. Kamalsakthi, “Implementation of Imperialist Competitive Algorithm for Optimal Allocation of FACTS Devices to Enhance the Power System Performance,” *2016 Int. Conf. Comput. Power, Energy Inf. Commun.*, no. 1, pp. 832–836, 2016.
- [9] A. K. Alhejji, F. Salem, and M. I. Mosaad, “Optimal Location and Size of SVC Devices in Interconnected Electrical Power System Using Quadratic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm,” *IEEE Int. Conf. Electro Inf. Technol.*, vol. 2018-May, pp. 817–821, 2018, doi: 10.1109/EIT.2018.8500253.
- [10] A. S. Siddiqui, T. Deb, and F. Iqbal, “Optimal location of FACTS device using meta heuristic search algorithm,” *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015*, pp. 4–7, 2016, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443412.
- [11] I. Dubey and M. Gupta, “Uniform mutation and SPV rule based optimized PSO algorithm for TSP problem,” *Proc. 2017 4th Int. Conf. Electron. Commun. Syst. ICECS 2017*, vol. 17, pp. 168–172, 2017, doi: 10.1109/ECS.2017.8067862.
- [12] G. Gutierrez, A. Aguila, D. González, and L. Ortiz, “Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 3, pp. 465–472, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082717.
- [13] T. Wildi and R. Navarro Salas, *Maquinas electricas y sistemas de*

- potencia (6a. ed.)*. Pearson Educacion, 2007.
- [14] M. Alcazar Ortega, C. S. Canas Penuelas, and G. Escrive Escrive, *Generacion, transporte y distribucion de energia electrica*. Editorial de la Universidad Politecnica de Valencia, 2019.
- [15] A. Aguila, “Medidas para minimizar las pérdidas de energía en circuitos de distribución.,” Universidad de Ciego de Ávila, Cuba, 2010.
- [16] E. A. Al-Ammar *et al.*, “Comprehensive impact analysis of ambient temperature on multi-objective capacitor placements in a radial distribution system,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 717–727, 2021.
- [17] F. J. Balbas Garcia, *Sistemas de energia electrica en alta tension*. Editorial de la Universidad de Cantabria, 2017.
- [18] Y. Zhang and Y. Liao, “Optimal Line Parameter Estimation Method for Mid-Compensated Transmission Lines,” *51st North Am. Power Symp. NAPS 2019*, 2019, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000274.
- [19] C. Ye, S. Feng, P. Xu, and J. Liu, “Transmission Line Parameter Identification Considering Non-Synchronized Time of Fault Recording Information,” *Proc. 2018 2nd IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2018*, no. Imceec, pp. 1749–1753, 2018, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469344.
- [20] M. Moradi, H. Abdi, S. Lumbreras, A. Ramos, and S. Karimi, “Transmission Expansion Planning in the presence of wind farms with a mixed AC and DC power flow model using an Imperialist Competitive Algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 493–506, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.05.025.
- [21] S. L. Gbadamosi and N. I. Nwulu, “A comparative analysis of generation and transmission expansion planning models for power loss minimization,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100456, 2021, doi: 10.1016/j.segan.2021.100456.
- [22] N. Hasan, Ibraheem, and Y. Pandey, “Transmission loss allocation in restructured power system with optimization loss criterion,” *2018 2nd IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2018*, pp. 61–64, 2018, doi: 10.1109/ICPEICES.2018.8897400.
- [23] R. Pérez, R. Rodrigues, and A. Aguila, “Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 460–466, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8327400.
- [24] A. A. Téllez, A. Robayo, I. Isaac, G. López, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living energy Transit.*, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [25] T. Paulraj, I. S. Sherin, and M. A. Prakash, “Mitigation of power loss in transmission and distribution line using STATCOM,” *Proc. 2016 Int. Conf. Adv. Commun. Control Comput. Technol.*

- ICACCCT 2016, no. 978, pp. 432–435, 2017, doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831676 .
- [26] I. Pavicic, I. Ivankovic, A. Zupan, R. Rubesa, and M. Rekcic, “Advanced prediction of technical losses on transmission lines in real time,” *2019 2nd Int. Colloq. Smart Grid Metrol. SMAGRIMET 2019 - Proc.*, pp. 1–7, 2019, doi: 10.23919/SMAGRIMET.2019.8720394.
- [27] A. Aguila and J. Wilson, “Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
- [28] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [29] J. M. Ramirez, G. N. Caicedo Delgado, and R. E. Correa, *Sistemas de transmision flexibles FACTS*. Programa Editorial Universidad del Valle, 2010.
- [30] Francisco Perez, “Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna,” *Prism. Tecnol.*, vol. 4, no. 1, pp. 25–28, 2013.
- [31] M. N. Iqbal, A. Mahmood, A. Amin, and H. Arshid, “Voltage regulation and power loss minimization by using unified power flow control device,” *2019 Int. Conf. Eng. Emerg. Technol. ICEET 2019*, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1109/CEET1.2019.8711866.
- [32] S. M. Medina and A. Aguila, “Óptima Compensación de Potencia Reactiva en Redes de Distribución Radiales considerando periodo de diseño Optimal Compensation of Reactive Power in Radial Distribution Networks considering design period,” *2019 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 108–115, 2019, doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00026.
- [33] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. 9, p. e08061, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [34] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review,” *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00746.
- [35] D. Céron, “CONTROL DESCENTRALIZADO PARA FACTS (SVC Y TCSC) EN SISTEMAS DE POTENCIA,” *Univ. los Andes*, no. 1, pp. 17–20, 2009.
- [36] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, no. July 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6343906.
- [37] K. Shanmukha Sundar and H. M. Ravikumar, “Selection of TCSC

- location for secured optimal power flow under normal and network contingencies,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 29–37, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.09.002.
- [38] I. C. Toledo, “Un Criterio Óptimo Para Coordinar Estabilizadores En Sistemas Eléctricos De Potencia,” *Cinvestav I.P.N*, no. 1, 2002.
- [39] D. L. Pravallika and B. V. Rao, “Flower Pollination Algorithm Based Optimal Setting of TCSC to Minimize the Transmission Line Losses in the Power System,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 92, pp. 30–35, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.07.319.
- [40] F. A. Castillo Munoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795819.
- [41] M. Chikkadesai, D. Allu, and G. D. Kamalapur, “Comparative Analysis of TCSC and STATCOM in Power System,” *3rd Int. Conf. Electr. Electron. Commun. Comput. Technol. Optim. Tech. ICEECCOT 2018*, no. December, pp. 185–190, 2018, doi: 10.1109/ICEECCOT43722.2018.9001544.
- [42] L. G. G. Narain, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE PRESS, 2015.
- [43] P. Barua and M. Quamruzzaman, “Comparison between TCSC, SVC and TCSC, STATCOM based compensation on east-west interconnectors of Bangladesh power system,” *4th Int. Conf. Electr. Eng. Inf. Commun. Technol. iCEEICT 2018*, pp. 5–8, 2019, doi: 10.1109/CEEICT.2018.8628054.
- [44] K. S. Kumar, S. Balamurugan, and N. Janarthanan, “Enhancement of TCSC characteristics,” *2017 Int. Conf. Intell. Comput. Instrum. Control Technol. ICICICT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1369–1372, 2018, doi: 10.1109/ICICICT1.2017.8342769.
- [45] J. M. Johnson and A. Yadav, “Fault Detection and Classification Technique for HVDC Transmission Lines Using KNN,” *Lect. Notes Networks Syst.*, vol. 10, no. Lm, pp. 245–253, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-3920-1_25.
- [46] S. A. Jumaat, I. Musirin, M. M. Othman, and H. Mokhlis, “Placement and sizing of thyristor controlled series compensator using PSO based technique for loss minimization,” *2012 IEEE Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2012 - Conf. Proc.*, no. May 2014, pp. 285–290, 2012, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230876.
- [47] K. S. Praveena, K. Bhargavi, and K. R. Yogeshwari, “Comparision of PSO Algorithm and Genetic Algorithm in WSN using NS-2,” *Int. Conf. Curr. Trends Comput. Electr. Electron. Commun. CTCEEC 2017*, pp. 513–516, 2018, doi: 10.1109/CTCEEC.2017.8455121.
- [48] O. Ivanov, B. C. Neagu, and M. Gavrilas, “A parallel PSO approach for optimal capacitor placement in electricity distribution networks,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Mod. Power Syst. MPS 2017*, no. Mps, pp. 1–5, 2017,

- doi: 10.1109/MPS.2017.7974387.
- [49] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.173.
- [50] D. Pal, P. Verma, D. Gautam, and P. Indait, "Improved optimization technique using hybrid ACO-PSO," *Proc. 2016 2nd Int. Conf. Next Gener. Comput. Technol. NGCT 2016*, no. October, pp. 277–282, 2017, doi: 10.1109/NGCT.2016.7877428.
- [51] R. Agrawal, S. K. Bharadwaj, and D. P. Kothari, "Transmission Loss and TCSC Cost Minimization in Power System using Particle Swarm Optimization," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 4, no. December, pp. 2321–5526, 2016, doi: 10.17148/IJIREEICE.2016.4360.
- [52] "Description of case39." .

7.1 Matriz de estado de arte.

Tabla 6. Matriz de estado de arte.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.																										
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DEL FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC	
1	2017	Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems.	23	✗		✗			✗				✗			✗					✗	✗				
2	2014	FACTS devices influence on power losses in transmission systems.	5	✗		✗		✗					✗	✗		✗		✗	✗			✗	✗			✗
3	2019	Optimal Sizing and Allocation of SVC and TCSC in Transmission Network by combined Sensitivity index and PSO.	4	✗	✗		✗		✗		✗		✗		✗											✗
4	2018	Optimal capacitor placement and economic analysis for reactive power compensation to improve system's efficiency at Bosowa Cement Industry Maros.	1	✗		✗		✗		✗			✗		✗	✗		✗				✗	✗			
5	2019	Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems using Improved Bacterial Foraging Algorithm.	0	✗				✗										✗	✗			✗	✗			
6	2010	Modelos matemáticos de optimización.	0	✗			✗	✗			✗							✗	✗			✗	✗			
7	2008	Optimal Allocation of FACTS Devices in Power System Using Genetic Algorithms.	21		✗			✗		✗		✗			✗	✗	✗	✗						✗		

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNATA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC	
8	2016	Implementation of Imperialist Competitive Algorithm for Optimal Allocation of FACTS Devices to Enhance the Power System Performance.	3		☒	☒		☒		☒				☒			☒	☒	☒			☒	☒			
9	2018	Optimal Location and Size of SVC Devices in Interconnected Electrical Power System Using Quadratic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm.	1		☒	☒		☒		☒				☒				☒	☒			☒				
10	2015	Optimal Location of FACTS device using meta heuristic search algorithm.	5		☒	☒		☒		☒				☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒	
11	2017	Uniform mutation and SPV rule based optimized PSO algorithm for TSP problem.	3				☒	☒				☒						☒	☒			☒				
12	2007	Máquinas eléctricas y sistemas de potencia (6a. Ed.).	0	☒	☒	☒				☒				☒		☒	☒									
13	2019	Generación, transporte y distribución de energía eléctrica.	0	☒	☒	☒				☒				☒		☒	☒									
14	2021	Comprehensive impact analysis of ambient temperature on multi-objective capacitor placements in a radial distribution system.	2	☒		☒				☒				☒			☒									

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TITULO DEL ARTICULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC
15	2017	Sistemas de energía eléctrica en alta tensión.	0	☒									☒												
16	2019	Optimal line parameter estimation method for mid-compensated transmission lines.	0	☒									☒												
17	2018	Transmission Line Parameter Identification Considering Non-Synchronized Time of Fault Recording Information.	4	☒									☒												
18	2016	Transmission Expansion Planning in the presence of wind farms with a mixed AC and DC power flow model using an Imperialist Competitive Algorithm.	27	☒	☒	☒			☒							☒									
19	2021	A comparative analysis of generation and transmission expansion planning models for power loss minimization.	2	☒	☒	☒			☒							☒					☒				
20	2018	Transmission loss allocation in restructured power system with optimization loss criterion.	0	☒		☒			☒							☒					☒				
21	2017	Mitigation of power loss in transmission and distribution line using STATCOM.	1	☒	☒	☒			☒			☒				☒					☒				

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC	
22	2019	Advanced prediction of technical losses on transmission lines in real time.	1	✗	✗	✗				✗			✗				✗					✗				
23	2010	Sistemas de transmisión flexibles FACTS.	0		✗	✗		✗											✗							
24	2013	Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna.	0		✗			✗											✗	✗						
25	2019	Voltage regulation and power loss minimization by using unified power flow control device.	0	✗	✗	✗		✗		✗				✗			✗		✗	✗						
26	2009	Control descentralizado para FACTS (SVC y TCSC) en sistemas de potencia.	0				✗	✗	✗		✗				✗				✗	✗						✗
27	2012	Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS.	9					✗	✗						✗				✗	✗						✗
28	2012	Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies.	43	✗		✗		✗	✗								✗		✗	✗		✗	✗			✗

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC	
29	2002	Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores en sistemas eléctricos de potencia.	0	✗		✗	✗	✗	✗			✗					✗		✗	✗		✗	✗			✗
30	2016	Flower pollination algorithm based optimal setting of TCSC to minimize the transmission line losses in the power system.	6	✗	✗			✗											✗	✗						
31	2018	Comparative Analysis of TCSC and STATCOM in Power System.	1	✗			✗	✗	✗		✗				✗				✗	✗						
32	2015	Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems.	0	✗				✗	✗						✗				✗	✗						
33	2018	Comparison between TCSC, SVC and TCSC, STATCOM based compensation on east-west interconnectors of Bangladesh power system.	1	✗				✗	✗						✗				✗	✗						
34	2017	Enhancement of TCSC characteristics.	1	✗				✗	✗						✗				✗	✗						
35	2018	Fault Detection and Classification Technique for HVDC Transmission Lines Using KNN.	0	✗				✗	✗						✗				✗	✗						

UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES UTILIZANDO ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	FLUJO DE POTENCIA AC	PÉRDIDAS DE POTENCIA	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA	UBICACIÓN ÓPTIMA DE COMPENSADOR TCSC	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	COSTOS DE INSTALACIÓN	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	COSTO	PERFIL DE VOLTAJE	REACTANCIA TCSC	DESVIACIÓN PROMEDIO DE VOLTAJE	PÉRDIDAS TOTALES DE POTENCIA	METAHEURÍSTICAS	DISPOSITIVOS FACTS	COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES	ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	OPTIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	MEJORA DE PERFILES DE VOLTAJE	MENOR COSTOS DE INSTALACIÓN	UBICACIÓN ÓPTIMA TCSC
36	2014	Placement and sizing of thyristor-controlled series compensator using PSO based technique for loss minimization.	9		☒		☒	☒			☒	☒	☒						☒	☒				☒	☒
37	2018	Comparison of PSO Algorithm and Genetic Algorithm in WSN using NS-2.	1				☒		☒			☒						☒			☒	☒	☒	☒	☒
38	2017	A parallel PSO approach for optimal capacitor placement in electricity distribution networks.	6				☒		☒			☒						☒			☒	☒	☒	☒	☒
39	2016	Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm.	0				☒		☒			☒						☒			☒	☒	☒	☒	☒
40	2017	Improved optimization technique using hybrid ACO-PSO.	11				☒		☒			☒						☒			☒	☒	☒	☒	☒
41	2016	Transmission Loss and TCSC Cost Minimization in Power System using Particle Swarm Optimization.	1	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒
CANTIDAD:			27	17	19	11	24	15	17	3	11	6	15	8	6	18	11	23	15	7	18	14	7	13	

7.2 Indicadores de la matriz de estado de arte.

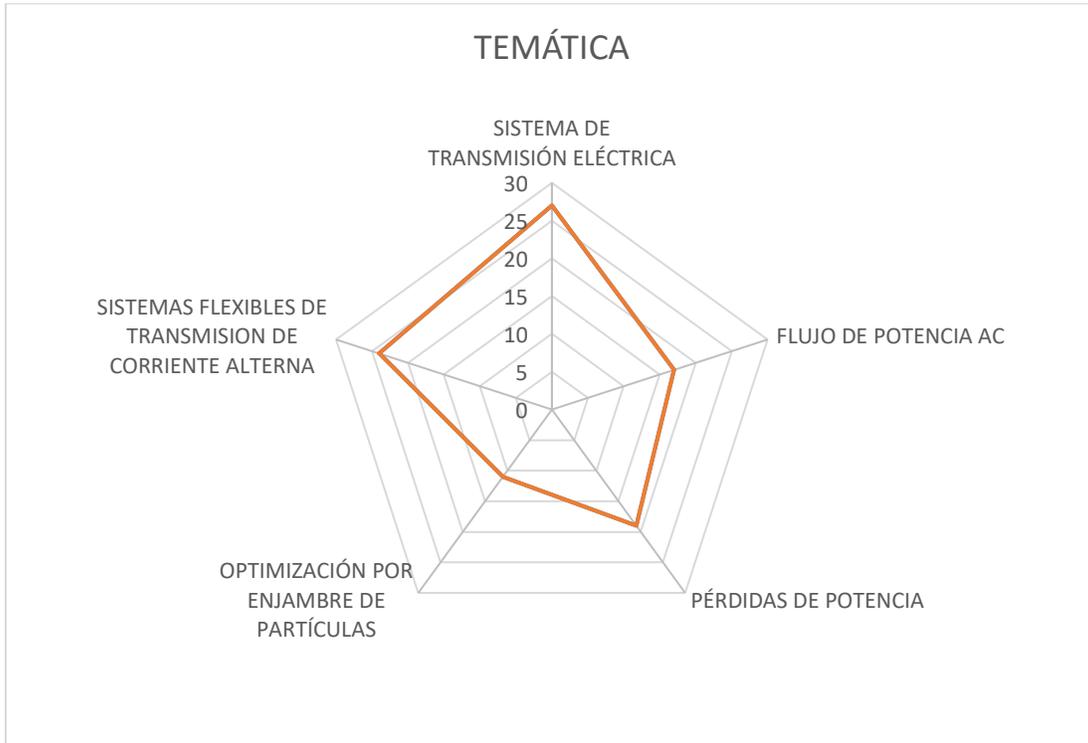


Figura 13. Indicador de la temática – Estado del arte.

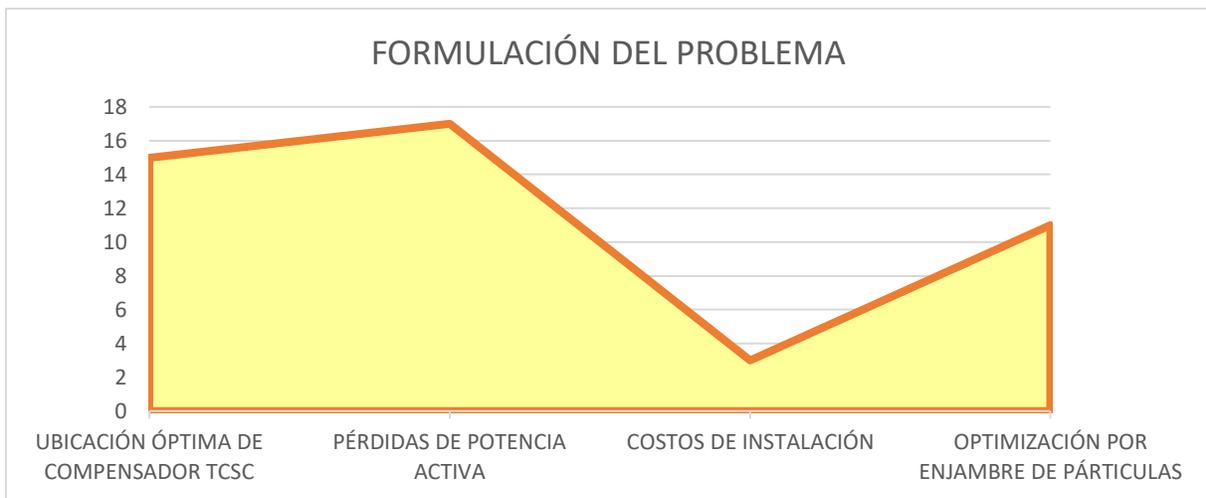


Figura 14. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.

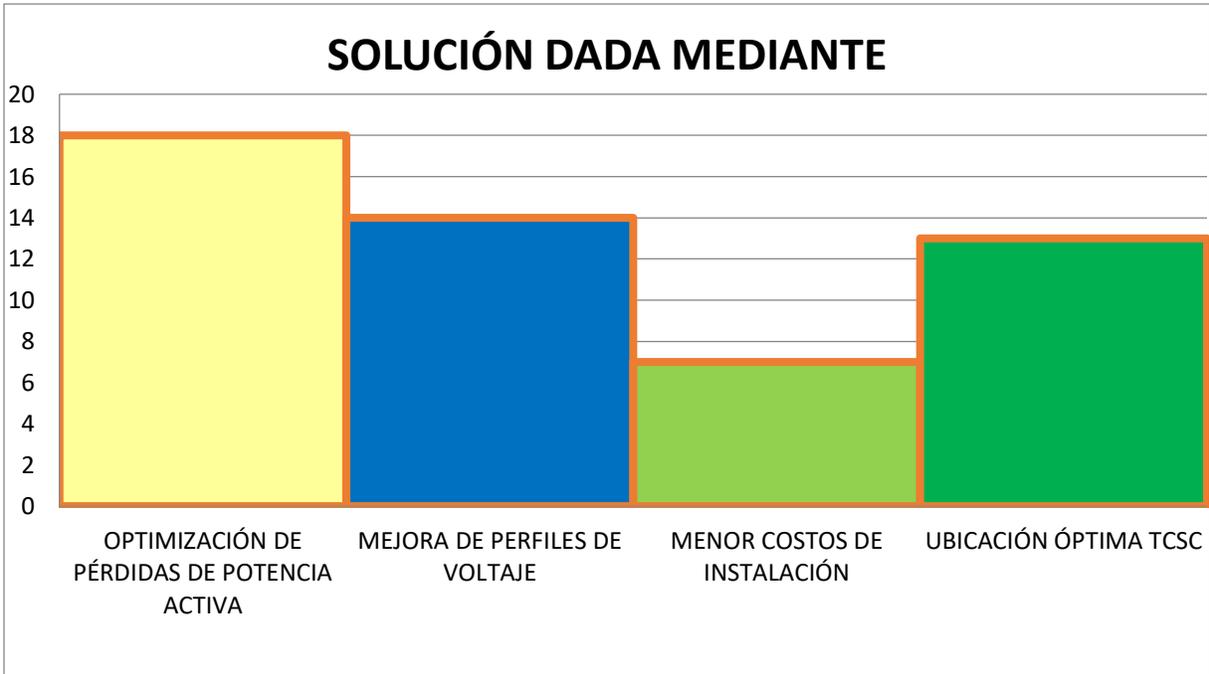


Figura 15. Indicador de solución – Estado del arte.