

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL  
MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN  
CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-INDEX**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL  
MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN  
CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-INDEX**

**AUTOR:  
OSCAR ANDRÉS ROJAS LOGROÑO**

**DIRECTOR:  
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

**Quito, febrero 2021**

Oscar Andrés Rojas Logroño

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRASMISIÓN CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-INDEX.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Oscar Andrés Rojas Logroño** (A'1997 – M'02). Bachiller con especialidad en Técnico Electromecánico de la “Unidad Educativa Fiscomisional Pacífico Cembranos”, Lago Agrio- Ecuador (2015). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se enfoca en el estudio de Ubicación óptima de dispositivos SVC para la mejora del margen de estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión considerando el índice de estabilidad de voltaje L-INDEX. [orojos@est.ups.edu.ec](mailto:orojos@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



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

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-INDEX* realizado por OSCAR ANDRES ROJAS LOGROÑO, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2021



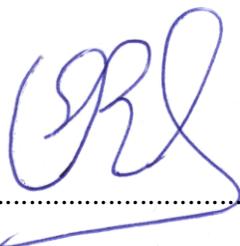
.....  
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

C.C.: 1755983184

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, OSCAR ANDRES ROJAS LOGROÑO, con documento de identificación N° 060561729-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: *UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-INDEX*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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



OSCAR ANDRÉS ROJAS LOGROÑO:

C.C.: 0605617299

Quito, febrero de 2021

## CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Introducción .....  | 2  |
| 2.    | Colocación óptima de dispositivos FACTS.....                                | 5  |
| 2.1.  | Dispositivos FACTS .....  | 7  |
| 2.2.  | Modelación de SVC .....   | 7  |
| 2.3.  | Función de costos del SVC.....  | 8  |
| 3.    | Estabilidad de voltaje en el sistema de potencia.....                       | 8  |
| 3.1.  | Índice de estabilidad de voltaje.....                                       | 9  |
| 4.    | Formulación del problema .....  | 9  |
| 4.1.  | Identificación de áreas de control de voltaje en el sistema eléctrico. .... | 10 |
| 4.2.  | Cálculo de distancias eléctricas en el SEP.....                             | 10 |
| 4.3.  | Obtención de coordenadas principales.....                                   | 12 |
| 4.4.  | Algoritmo Fuzzy C-Means .....   | 12 |
| 4.5.  | Proceso de creación de áreas de control.....                                | 13 |
| 4.6.  | Colocación óptima de dispositivos SVC.....                                  | 14 |
| 5.    | Análisis de resultados.....   | 15 |
| 5.1.  | Caso de prueba 1.....   | 15 |
| 5.1.1 | Identificación de áreas de control sobre el sistema de 30 barras IEEE.....  | 16 |
| 5.1.2 | Índice estabilidad de voltaje L-índice .....                                | 17 |
| 5.1.3 | Voltajes nodales sobre el modelo de 30 nodos IEEE.....                      | 18 |
| 5.1.4 | Cuantificación angular del sistema de 30 nodos IEEE.....                    | 18 |
| 5.1.5 | Resultados de compensación reactiva.....                                    | 18 |
| 5.2.  | Segundo caso de prueba.....   | 20 |
| 5.2.1 | Identificación de áreas de control sobre el sistema de 39 barras IEEE.....  | 20 |
| 5.2.2 | Índice estabilidad de voltaje L-índice, sistema de prueba IEEE 39.....      | 22 |
| 5.2.1 | Voltajes nodales sobre el modelo de 39 nodos IEEE.....                      | 22 |
| 5.2.1 | Cuantificación angular del sistema de 39 nodos IEEE.....                    | 23 |
| 5.2.2 | Resultados de compensación reactiva.....                                    | 23 |
| 6.    | Conclusiones .....  | 25 |
| 7.    | Trabajos futuros .....  | 25 |
| 8.    | Referencias.....  | 26 |
| 9.    | Matriz de estado del arte.....  | 30 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Colocación oportuna de dispositivos SVC en redes de transmisión. ....                              | 3  |
| Figura 2. Configuración de dispositivo SVC. ....   | 7  |
| Figura 3. Función de costo del dispositivo SVC. ....   | 8  |
| Figura 4. Procedimiento lógico para creación de áreas de control del SEP. ....                               | 11 |
| Figura 5. Sistema de 30 nodos IEEE. ....   | 16 |
| Figura 6. Colocación óptima de dispositivos SVC en áreas de control de voltaje, sistema IEEE 30 nodos. ....  | 16 |
| Figura 7. Resultados perfil de voltaje IEEE 30 nodos. ....   | 18 |
| Figura 8. Cuantificación angular del sistema IEEE 30 nodos. ....   | 18 |
| Figura 9. Perdidas de potencia reactiva sistema de 30 nodos IEEE. ....                                       | 18 |
| Figura 10. Flujo de potencia reactiva nodal de sistema de 30 barras IEEE. ....                               | 20 |
| Figura 11. Sistema de prueba de 39 nodos IEEE. ....  | 20 |
| Figura 12. Colocación óptima de dispositivos SVC en áreas de control de voltaje, sistema 39 nodos IEEE. .... | 20 |
| Figura 13. Resultados perfil de voltaje, IEEE 39 nodos. ....   | 22 |
| Figura 14. Cuantificación angular del sistema IEEE 39 nodos. ....  | 23 |
| Figura 15. Perdidas de potencia reactiva sistema de 39 nodos IEEE. ....                                      | 23 |
| Figura 16. Flujo de potencia reactiva nodal de sistema de 39 barras IEEE. ....                               | 25 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Casos de prueba .....   | 15 |
| Tabla 2. Identificación de áreas y colocación de dispositivos SVC. ....                          | 17 |
| Tabla 3. Índice de estabilidad de voltaje L-índex.....   | 17 |
| Tabla 4. Cuadro comparativo de resultados obtenidos del sistema de 30 nodos GAMS-DIgSILENT. .... | 19 |
| Tabla 5. Identificación de áreas y colocación de dispositivos SVC, caso de prueba 2. ..          | 21 |
| Tabla 6. Índice de estabilidad de voltaje L-índex, IEEE 39.....                                  | 22 |
| Tabla 7. Cuadro comparativo de resultados obtenidos del sistema de 39 nodos GAMS-DIgSILENT. .... | 23 |
| Tabla 8. Matriz de estado del arte.....  | 30 |
| Tabla 9. Indicadores del estado del arte. ....   | 34 |

# UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE L-ÍNDICE

## Resumen

En este documento se presenta una metodología que permite ubicar de forma óptima dispositivos SVC en base dos criterios, la función de costos del dispositivo SVC y el índice de estabilidad L-índice. El primer criterio permite conocer el costo asociado a la instalación de dispositivos SVC en las barras del SEP, mientras que el segundo criterio permite conocer los nodos que se encuentran cerca del colapso de voltaje.

Para llevar a cabo un análisis más detallado se procede a dividir el SEP en áreas de control de voltaje. El proceso empieza con el cálculo de la Jacobiana del sistema, posteriormente se calcula y analiza la matriz de sensibilidad para descomponer cada nodo en coordenadas principales. Por último, se aplica el algoritmo de aprendizaje no supervisado K-means para obtener áreas débilmente acopladas entre sí.

La metodología propuesta se aplica sobre los modelos de prueba de 30 y 39 nodos de la IEEE. Para validar la metodología se compara los resultados obtenidos en el software GAMS y DIgSILENT.

Se demuestra que el perfil de voltaje, comportamiento angular y pérdidas de potencia reactiva mejoran de forma sustancial ante la ubicación óptima de dispositivos SVC.

**Palabras Clave:** Índice de estabilidad de voltaje, L-índice, distancia eléctrica, matriz de sensibilidad, ubicación óptima de SVC

## Abstract

This document presents a methodology that allows for optimal placement of SVC devices based on two criteria, the cost function of the SVC device and the L-index stability index. The first criterion allows to know the cost associated to the installation of SVC devices in the SEP bars, while the second criterion allows to know the nodes that are near the voltage collapse.

To carry out a more detailed analysis, the SEP is divided into voltage control areas. The process begins with the calculation of the Jacobian of the system, then the sensitivity matrix is calculated and analyzed to break each node into main coordinates. Finally, the unsupervised learning algorithm K-means is applied to obtain weakly coupled areas.

The proposed methodology is applied to the IEEE 30 and 39 node test models. To validate the methodology, the results obtained in the GAMS and DIgSILENT software are compared.

It is demonstrated that the voltage profile, angular behavior and reactive power losses are substantially improved in the optimal location of SVC devices.

**Keywords:** Voltage stability index, L-index, electrical distance, sensitivity matrix, optimal SVC location

## 1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) crecen rápidamente, al mismo tiempo que se vuelven más vulnerables a problemas como la violación de los límites de funcionamiento, así como a los problemas de inestabilidad de voltaje. Estos problemas se asocian a las grandes distancias que debe recorrer la energía mediante el sistema de transmisión, además de la presencia cada vez mayor de fuentes de energía renovable y a la desregulación de la industria eléctrica [1].

El SEP puede volverse propenso al colapso de voltaje ante la falta de soporte de energía reactiva. Los generadores tienen la capacidad de suministrar energía reactiva, pero al igual que toda máquina sincrónica posee limitaciones, además la energía reactiva que suministra el generador no puede utilizarse de manera eficaz porque la carga se encuentra muy distante de la generación [2].

Una de las formas para evitar el colapso de voltaje es la reducción de carga. Sin embargo, en la vida real es preferible que el recorte de carga sea mínimo debido a que va en detrimento de los beneficios de las empresas distribuidoras eléctricas, así como para los consumidores.

El modelo de los mercados de energía está cambiando rápidamente de centralizados a descentralizados, en donde las fuerzas del mercado impulsan el precio de la energía fomentando una mayor competencia. En los mercados eléctricos actuales existe varios tipos de contratos, obligando que el proveedor suministre la energía establecida en el contrato ante cualquier circunstancia. Esto ocasiona que el SEP opere en condiciones de estrés, generando un escenario en donde la reducción de

carga es inevitable para mantener estables las condiciones del sistema [3].

En un escenario de energía reestructurada los usuarios requieren precios más bajos con buena calidad de energía. Para lo cual es necesario disponer de un perfil de voltaje uniforme.

Los objetivos requeridos se pueden alcanzar integrando el concepto de dispositivos FACTS, misma que es usada ampliamente cuando se trata de lograr un mayor control sobre el SEP, empleando dispositivos electrónicos de potencia. Estos dispositivos poseen la capacidad de reducir las pérdidas de transmisión, gestionar los flujos de energía, aumentar la seguridad y eficiencia del sistema [4]–[7].

Todas las ventajas asociadas a los FACTS se deben a la rápida respuesta que presentan ante perturbaciones en circunstancias críticas, así como la flexibilidad durante las condiciones normales de funcionamiento.

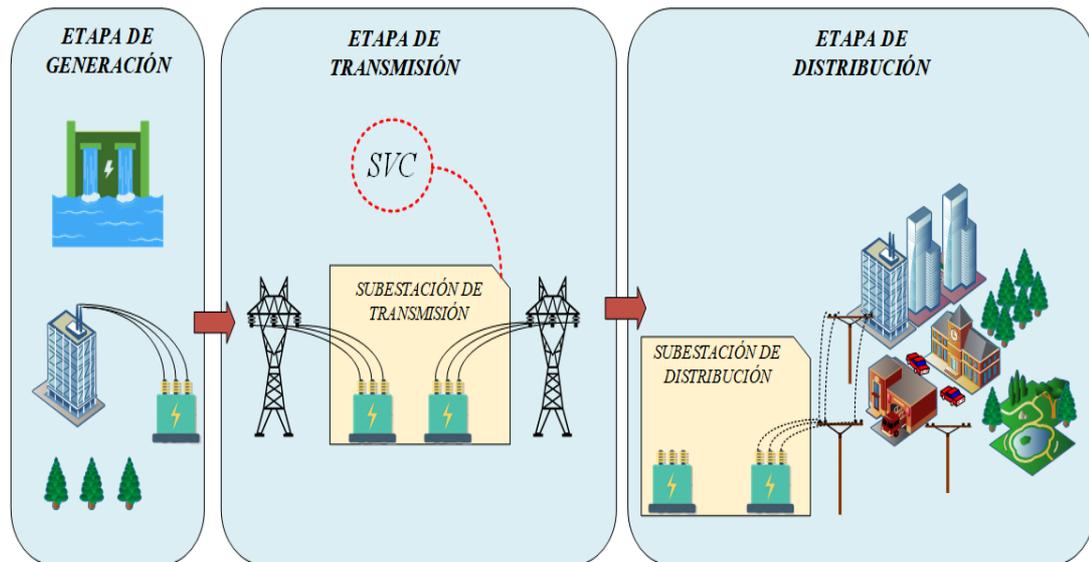
Existe varios dispositivos FACTS que son usados para diferentes fines. Uno de ellos es el dispositivo SVC, este se conecta en paralelo a los nodos del sistema. El SVC consta de varios capacitores de capacidad fija o variable, conectados en paralelo con bobinas de tal forma que puede funcionar en modo capacitivo e inductivo. Por lo que es ideal para la regulación de potencia reactiva y voltaje dentro de los SEP [8].

Existen varias investigaciones que proponen métodos para la localización óptima de dispositivos SVC con el fin de mejorar la estabilidad de voltaje del sistema.

En [9] se presenta la coordinación de dispositivos SVC así como su asignación óptima en sistemas de potencia con presencia de energías renovables. Además en [10] y [11] se

describe una metodología que permite ubicar de forma óptima los dispositivos FACTS y determinar la configuración de parámetros de cada dispositivo con el fin de solventar problemas como la capacidad de carga del sistema y la amortiguación de oscilaciones de baja frecuencia [12]. El estudio descrito en [13] realiza una modelación que

resuelve flujos de potencia al mismo tiempo que ubica dispositivos SVC de forma óptima. El autor concluye que la introducción de SVC en el sistema de potencia contribuye en gran medida a mejorar el perfil de voltaje al mismo tiempo que se reducen las pérdidas de potencia reactiva y activa.



**Figura 1.** Colocación oportuna de dispositivos SVC en redes de transmisión.

En [14] se plantea la ubicación óptima de dispositivos SVC en el SEP, en base a la cuantificación del índice de estabilidad de voltaje en el peor caso con respecto al margen de potencia reactiva. Además, analiza la influencia de la potencia activa en el margen de estabilidad de voltaje. El problema se plantea como la maximización de voltaje con restricciones de operación del SEP.

El estudio descrito en [15] realiza la ubicación óptima de dispositivos FACTS mediante técnicas de reacción Química cuasi exponencial eficiente (QOCRO). El problema se formula como una optimización multiobjetivo. El primer objetivo es minimizar el índice de estabilidad de voltaje, el

segundo es la minimización de pérdidas de potencia activa y el tercero es la minimización del desvío del voltaje nodal. El autor concluyó que, en comparación con los algoritmos genéticos, la tecnología QOCRO proporciona una respuesta muy rápida en cuanto a la ubicación del equipo SVC se refiere.

La investigación propuesta en [16] realiza una colocación óptima de FACTS, en específico toma en cuenta dispositivos TCSC, SVC y STATCOM aplicando el criterio de región. Este Estándar incluye como paso el cálculo del equivalente de Thévenin en los nodos de carga específicos para dibujar la curva P-Q-V. El gráfico muestra el límite máximo de potencia reactiva,

magnitud de voltaje y potencia activa en un plano 3D. El análisis permite conocer la línea más débil del SEP, en el cual se coloca un dispositivo FACT.

El estudio descrito en [17] propone una estrategia que permite la planeación del SEP con el fin de reducir algunos parámetros como: desvíos de voltaje nodal, pérdidas de potencia activa, pérdidas de potencia reactiva y costos de combustible. Todas estas medidas básicamente ayudan a mejorar el margen de estabilidad de voltaje del nodo y mejoran el margen de curabilidad de la línea. El problema se resuelve aplicando un algoritmo de luciérnaga que se combina con un algoritmo de búsqueda de patrones. La unión de dos algoritmos permite aumentar la eficiencia de convergencia. Esto se debe a que ambos algoritmos se complementan de manera perfecta, logrando identificar regiones débiles dentro del SEP, así como encontrar una solución subóptima. Por último, proporciona información útil acerca de las unidades críticas dentro del SEP, lo cual permite ubicar de forma oportuna los dispositivos FACTS.

La investigación descrita en [18] desarrolla una nueva técnica que permite mejorar la estabilidad de voltaje en los nodos del SEP. La técnica consiste acoplar dos algoritmos, el primer es el algoritmo de búsqueda gravitacional adaptativa (GSA), mientras que el segundo es un algoritmo de enjambre de partículas (PSO). El GSA optimiza la constante gravitacional que posteriormente es la entrada del algoritmo PSO, dando como resultado un algoritmo más robusto. El nuevo algoritmo se usa para ubicar los dispositivos FACTS, empleando como base las pérdidas de energía de las líneas y los rangos de voltaje nodal. La resolución del problema parte del cálculo de un flujo de potencia aplicando la técnica de

Newton Raphson para obtener todos los parámetros de importancia en el SEP.

La investigación descrita en [19] aplica el algoritmo de optimización de ballenas (WOA) para ubicar de forma oportuna dispositivos FACTS. El criterio para la ubicación de dispositivos es el voltaje de proximidad para ubicar dispositivos SVC. El resultado de la investigación es una reducción de pérdidas de potencia reactiva, transmisión y el costo de despacho de energía por generador. Por lo tanto, contribuye de forma directa al margen de estabilidad de voltaje.

Los estudios descritos en [20] y [21] desarrollan una interfaz gráfica que permite ubicar dispositivos FACTS de forma oportuna así como determinar parámetros óptimos para cada dispositivo. La técnica que se usa para resolver el problema son algoritmos genéticos. Los estudios plantean la posibilidad de ubicar una gran cantidad de dispositivos FACTS como: TCPST, SVC, UPFC, TCSC y TCVR. El estudio logra maximizar la capacidad de las líneas del SEP, además que el dispositivo que mejor aporta para tal fin es el UPFC.

Las investigaciones descritas hasta el momento analizan el SEP como un solo conjunto o una sola área. Pero se debe considerar que los sistemas actuales se enfrentan a retos importantes como las interconexiones que se vuelven cada vez más complejas.

Existe una relación muy importante entre el rendimiento y la disposición topológica del SEP. Esto ha contribuido al desarrollo de técnicas más eficientes para mitigar riesgos relacionados a la estabilidad de voltaje. Una de las técnicas más sobresalientes es la división del SEP en varias áreas en base al acoplamiento eléctrico con el

fin de obtener una gestión fácil y flexible del SEP [22].

En la literatura científica existen varias investigaciones que abordan el tema de sobre los métodos de separación del SEP. En [23] el autor describe un método que permite la gestión de la potencia reactiva, el programa se basa en el análisis jacobiano del sistema. Posterior al análisis se divide al SEP en subregiones mediante la identificación de nodos representativos que se convertirán en centroides dentro de cada área. Para la división de áreas del SEP se aplica el algoritmo de aprendizaje no supervisado K-means. Posterior a la agrupación cada área se somete a una formulación multiobjetivo que tiene como fin minimizar pérdidas al mismo tiempo que mejora el perfil de voltaje.

En [24] se presenta un cambio de enfoque del mercado eléctrico en donde se considera las reservas de potencia reactiva ubicadas dentro de zonas particulares de control para crear un mercado eléctrico más competitivo. El análisis se basa en la definición de distancia eléctrica para la agrupación de áreas dentro del SEP. La separación de áreas se basa en un modelo de subastas mediante la formulación de flujos óptimos de potencia. La investigación afirma que los precios de energía reactiva en cada área de control son relativamente más bajos a comparación del precio uniforme para todo el sistema.

En [25] se estudia el uso de herramientas de machine learning para hallar áreas de control dentro del SEP. El autor usa k-means como herramienta para crear áreas dentro del sistema de potencia en lugar de considerarlo como unificado. El propósito de desacoplar el SEP es obtener un mejor control de voltaje y administración de potencia reactiva. Los resultados muestran que el algoritmo de aprendizaje automático

es tan efectivo como los métodos tradicionales al agrupar nodos del SEP.

Esta investigación pretende ubicar de forma óptima dispositivos SVC, para lo cual se propone dividir al SEP en diversas áreas. La división de áreas inicia con el análisis del Jacobiano del sistema para posteriormente hallar la matriz de distancias eléctricas entre nodos del sistema. El análisis prosigue con la identificación de nodos débilmente acoplados y proceder a calcular las coordenadas principales de cada nodo, posteriormente se aplicará el algoritmo de aprendizaje no supervisado k-means para hallar las posibles áreas resultantes del SEP. Cada grupo encontrado se someterá a una formulación que involucra la función de costos del SVC, así como el índice de estabilidad de voltaje L-índice para finalmente ubicar el dispositivo SVC en la barra adecuada de cada área.

A partir de aquí la investigación se distribuye de la siguiente manera:

En la sección 2 se describe todo lo referente a los dispositivos SVC y su colocación en los sistemas eléctricos. En la sección 3 se detalla la teoría de la estabilidad de voltaje. En la sección 4 se describe la formulación del problema. En la sección 5 se presenta los resultados obtenidos de la investigación. Por último, en la sección 6 se detalla las conclusiones de la investigación y trabajos futuros.

## **2. Colocación óptima de dispositivos FACTS.**

A lo largo de los años los sistemas eléctricos de potencia han cambiado de forma importante, aumentando significativamente su complejidad. Esto se debe a los cambios imprevistos relacionados con los patrones de generación-demanda y a las actividades comerciales que de algún modo afectan a la seguridad del sistema. Por ejemplo,

la interrupción crítica de una línea o el aumento pronunciado de carga generan varios problemas como: perfiles de voltaje críticos y sobrecargas de líneas. Estos problemas pueden ocasionar consecuencias significativas como inestabilidad y en situaciones críticas un colapso general del SEP.

La reducción de carga no es una solución óptima desde el punto de vista de la fiabilidad porque afecta directamente a un grupo de usuarios, produciendo una carga crítica en el SEP. La reducción de carga es una estrategia de control que es de utilidad para disminuir la carga eléctrica del sistema con el fin de trasladar el sistema perturbado hacia un nuevo punto de equilibrio. Sin embargo, el recorte de carga se puede evitar suministrando energía reactiva de manera local en nodos específicos del sistema para mantener los límites de voltaje en niveles de estabilidad aceptables. La principal desventaja de la potencia reactiva es que no puede transmitirse a grandes distancias, por lo que es necesario disponer de un suministro local, mediante algún equipo o dispositivo.

Los Sistemas de Transmisión Flexibles de Corriente Alterna (FACTS) son una alternativa adecuada cuando se requiere el suministro de potencia reactiva de forma local. Sin embargo, se trata de dispositivos muy costosos por lo que es necesario realizar una ubicación adecuada de los dispositivos FACTS en el SEP.

Los dispositivos SVC forman parte de la familia de los dispositivos FACTS y son capaces de controlar de manera eficiente y eficaz el perfil de voltaje mediante el reajuste dinámico de la potencia reactiva en el nodo de conexión. El SVC posee la capacidad de consumir y suministrar energía reactiva según la necesidad del nodo de conexión. Si el voltaje del bus del SEP

excede el límite establecido, el SVC se comportará como un inductor. Por otro lado, si la tensión del nodo está por debajo del límite establecido en la operación normal, el dispositivo se comportará como un condensador [26].

La ubicación óptima de dispositivos SVC se basa en un análisis del SEP considerando que la complejidad del sistema. Por lo general para el análisis se toma en cuenta al sistema de potencia como unificado, sin embargo, es posible dividir al SEP en áreas de control. Esto facilita las acciones de control y por consecuencia el análisis. Un área de control se refiere a nodos específicos dentro del sistema que poseen una influencia considerable en los nodos circundantes a este. El nodo permite mejorar parámetros como el perfil de voltaje del sistema.

Para identificar áreas de control de voltaje (ACV) dentro del SEP es necesario identificar nodos que no se superpongan entre sí. Un parámetro importante para la creación de ACV es el acoplamiento eléctrico existente entre barras del sistema. Un acoplamiento débil significa que un nodo piloto no influye en gran medida a la mejora de parámetros. Por otro lado, un acoplamiento fuerte implica que un nodo central puede usarse para inducir la mejora de una variable determinada tanto del nodo piloto y por consecuencia los nodos circundantes.

La creación de áreas de control se realiza siempre y cuando exista algunos grupos de nodos o barras que posean un acoplamiento fuerte entre los integrantes de cada grupo al mismo tiempo que el acoplamiento entre grupos sea débil.

La obtención de áreas es esencial para complementar la idea central que se refiere a la ubicación óptima de dispositivos SVC. Para ello es

necesario considerar el costo asociado a la instalación de un SVC en un nodo del SEP. Por otro lado, es posible perfeccionar aún más la ubicación de los dispositivos, considerando el índice de estabilidad de voltaje L-índex. Este proporciona información importante acerca de las barras que se encuentran más próximas al colapso de voltaje [27].

El objetivo es aplicar los dos criterios descritos en cada área de control de voltaje del SEP, con el fin de ubicar de forma óptima la localización de los dispositivos SVC en cada una de las áreas.

## 2.1. Dispositivos FACTS

Los dispositivos FACTS se dividen en cuatro categorías que dependen de la conexión a la red: Controladores serie, controladores shunt, controlador en serie y controladores combinados de derivación en serie. Los controladores serie se conectan en serie con la línea de transmisión, dentro de este grupo se encuentran los TCPAR, SSSC y los dispositivos TCSC. Los dispositivos shunt se conectan en paralelo con el nodo de transmisión, dentro de este grupo se encuentran los dispositivos SVC y STATCOM. Los controladores serie combinado se conectan en subestaciones, dentro de este grupo se encuentra el dispositivo IPFC. Por último, dentro de los controladores combinados de derivación en serie se encuentran los dispositivos UPFC.

La configuración de los FACTS depende de las necesidades técnicas del sistema en donde se implementará el dispositivo. En el caso de los SVC se modela el dispositivo a modo de inyección de potencia. Este tipo de configuración no destruye la matriz de admitancias e impedancias del sistema. Esto permite un análisis mucho más sencillo del sistema [28].

## 2.2. Modelación de SVC

Los SVC son controladores que se conectan en derivación con la línea de transmisión. Pueden ser de fuente variable, impedancia variable o una combinación de ambos. El principio básico de operación es la inyección de potencia al sistema en el punto de conexión. El SVC consiste en un grupo de reactores y capacitores controlados por tiristores, funciona como una admitancia reactiva conectada en derivación. La función de dispositivos SVC es absorber o inyectar energía reactiva desde o en el nodo siempre y cuando la corriente inyectada por el controlador se encuentre en cuadratura de fase con el voltaje del nodo.

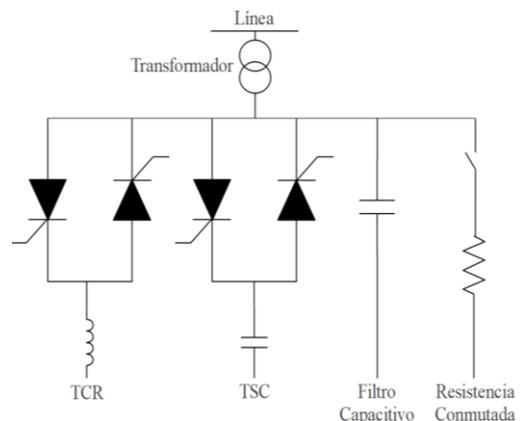


Figura 2. Configuración de dispositivo SVC.

El SVC consta de dos configuraciones, la primera es un arreglo de dos dispositivos de conmutación conectados en serie con una inductancia, esta configuración actúa cuando se requiere compensación inductiva. La segunda configuración consiste en la disposición de dos dispositivos de conmutación conectados en serie con un capacitor, esta configuración sirve cuando se requiere una compensación capacitiva.

La característica principal del SVC es que es el único dispositivo que se puede conectar tanto en los nodos como en las líneas de transmisión. Al conectar un SVC a una barra del SEP se modela como inyección de potencia, misma que se describe en la ecuación (1).

$$\Delta Q_i = Q_{SVC} \quad (1)$$

Por otro lado si el dispositivo se conecta directamente a las líneas de transmisión la modelación se realiza en base a la susceptancia del SVC [29].

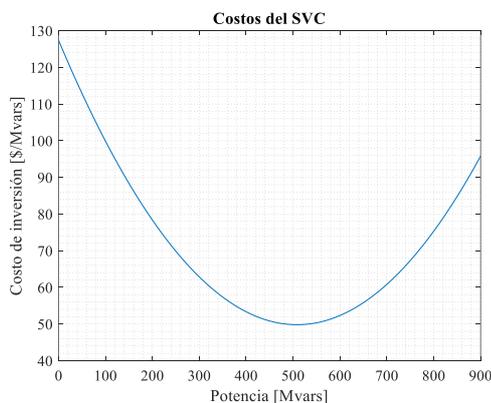
### 2.3. Función de costos del SVC.

El dispositivo SVC posee una curva característica de costo en función de la potencia reactiva requerida. La función de costo se presenta a continuación en la ecuación (2).

$$C_{SVC} = 0.003s^2 - 0.3051s + 127.38 \quad (2)$$

De la ecuación 2 la variable  $s$  corresponde a la potencia reactiva en Mvars [30] [31] [32].

En la figura 3 se presenta el gráfico de la ecuación (2).



**Figura 3.** Función de costo del dispositivo SVC.

La Figura 3 describe el comportamiento del costo de inversión del SVC en función de la potencia reactiva. Se aprecia que para potencias relativamente bajas el costo de instalación del SVC en el SEP es muy elevado. Sin embargo, a medida que la potencia reactiva requerida es mayor el costo de inversión reduce considerablemente.

Es correcto mencionar que para potencias mayores a 400 y menores a 600 es muy conveniente la ubicación de SVC en el SEP.

Por otro lado, para potencias mayores a 600 el costo de instalación del dispositivo empieza a subir de forma proporcional.

### 3. Estabilidad de voltaje en el sistema de potencia.

En todo momento las condiciones de funcionamiento del sistema de energía deben ser estables, para cumplir con los criterios operacionales y asegurar la resistencia del SEP a posibles contingencias. Actualmente los sistemas de energía a menudo operan muy cerca de sus límites de estabilidad, debido a limitaciones económicas y ambientales. Por lo tanto, el mantener el sistema funcionando de manera estable y segura es muy importante y complicado [23].

En los últimos años los investigadores y planificadores de los sistemas eléctricos han prestado mucha atención al problema de la inestabilidad de voltaje, debido a que es una de las principales fuentes de inseguridad en el SEP.

Los problemas de inestabilidad de voltaje se producen al momento que el voltaje del lado receptor disminuye muy por debajo de su valor nominal o rango admisible y posterior a En el caso de una falla o evento, incluso si se

aplica un mecanismo de recuperación como compensación de potencia reactiva, o cuando el sistema continúa oscilando sin interferencia de amortiguación, la tensión no se recuperará a la tensión nominal.

El colapso de voltaje es un proceso mediante el cual el voltaje varía de tal forma que el perfil de voltaje se sitúa fuera de los rangos admisibles e inaceptables [33].

Existen dos tipos de inestabilidad de voltaje: Inestabilidad de corto plazo y largo plazo. En la primera se produce un colapso de voltaje con una duración de algunos minutos, mientras que en la segunda se produce un colapso de voltaje en intervalos largos que pueden ser hasta horas.

El análisis de estabilidad de voltaje es de suma importancia ya que el SEP debe operar con parámetros habituales o dentro de sus rangos admisibles, durante las condiciones Normales y posterior a una falla.

Un análisis de estabilidad de voltaje proporciona información muy relevante acerca de los puntos críticos del sistema, así como la proximidad de inestabilidad de los nodos [34].

### 3.1. Índice de estabilidad de voltaje.

La investigación descrita en [35] se presenta una metodología para evaluar en tiempo real la estabilidad de voltaje empleando un indicador específico  $L_j$ , cuyo valor varia entre 0 y 1. Cuando el valor es mas cercano a 0 significa que el sistema se encuentra sin carga, mientras que cuando el valor se acerca mucho a 1 significa que el nodo está cerca del colapso de voltaje. El índice de estabilidad de voltaje se calcula en base a los resultados de un flujo de potencia.

El indicador  $L_j$  se plantea en base a la teoría de los circuitos del sistema eléctricos de potencia como se presenta en la ecuación (3)

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^g F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad (3)$$

La variable  $g$  es el número de generadores.  $V_i$  y  $V_j$  son voltajes.  $F_{ji}$  se obtiene a partir de la matriz de admitancias  $Y_{bus}$  para una condición dada.

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (4)$$

Las variables  $I_L$  y  $V_L$  se refieren a vectores de corriente y voltaje de los nodos de la carga. Por otro lado, las variables  $I_G$  y  $V_G$  son los vectores de corriente y voltaje de los nodos de generación.

El termino  $H$  se refiere una matriz que se calcula en base a la matriz de admitancias.  $Z_{LL}$ ,  $F_{LG}$ ,  $K_{GL}$  y  $Y_{GG}$  son porciones particionadas de la matriz  $Y_{bus}$ .

$$F_{LG} = -(Y_{LL})^{-1} * Y_{LG} \quad (5)$$

El indicador  $L_j$  representa una cuantificación de la distancia de inestabilidad bajo una condición de operación dada. El cálculo se lo realiza por cada nodo del sistema.

## 4. Formulación del problema

Los sistemas eléctricos están expuestos a varios cambios como el aumento de carga o disminución de esta. Estos eventos provocan una variación en la magnitud de los perfiles de voltaje,

provocando que en ciertos casos las magnitudes se sitúen fuera de los rangos admisibles y por consecuencia se pierde estabilidad. El problema planteado se resuelve instalando dispositivos que proporcionen o absorban potencia reactiva de manera local. La instalación de dispositivos FACTS permite mejorar el perfil de voltaje de la barra de conexión, además de aprovechar al máximo la capacidad de transmisión de las líneas de transmisión.

La colocación óptima de dispositivos FACTS se puede realizar considerando al SEP como una sola área, es decir unificado. Sin embargo, es posible aprovechar el concepto de distancia eléctrica para identificar nodos que sean representativos dentro del sistema, con el fin de crear áreas de control dentro de un mismo SEP. Cada área estará compuesta por nodos que posean acoplamiento eléctrico lo suficientemente fuerte entre sí, mientras que tiene poca influencia sobre grupos vecinos.

Otro parámetro de utilidad es el índice de estabilidad de voltaje L-índice, este permitirá conocer los nodos que se encuentren cerca del colapso de voltaje. Como un indicador útil de los costos asociados con la instalación del equipo, se puede obtener una ubicación más adecuada para el SVC en el SEP, mejorando así el perfil de voltaje.

Los flujos de energía del SEP se obtendrán mediante la resolución de un flujo óptimo resuelto en optimizador GAMS.

#### **4.1. Identificación de áreas de control de voltaje en el sistema eléctrico.**

La creación de áreas de control de voltaje parte del análisis de la matriz Jacobiana del sistema de potencia,

misma que es de utilidad para realizar el cálculo de la matriz de sensibilidad del sistema. Posteriormente es necesario hallar la matriz de distancias eléctricas, misma que se descompone en tres coordenadas denominadas esenciales. Posteriormente se aplicará el algoritmo de aprendizaje no supervisado k-Means con el fin de obtener varios grupos débilmente acoplados entre sí. Las consideraciones que se toman en cuenta para el proceso de agrupación son que debe existir al menos tres nodos en cada grupo, además los nodos de cada grupo deben poseer conectividad entre sí. El diagrama de flujo que ilustra el proceso lógico para la creación de áreas de control se presenta en la Figura 4.

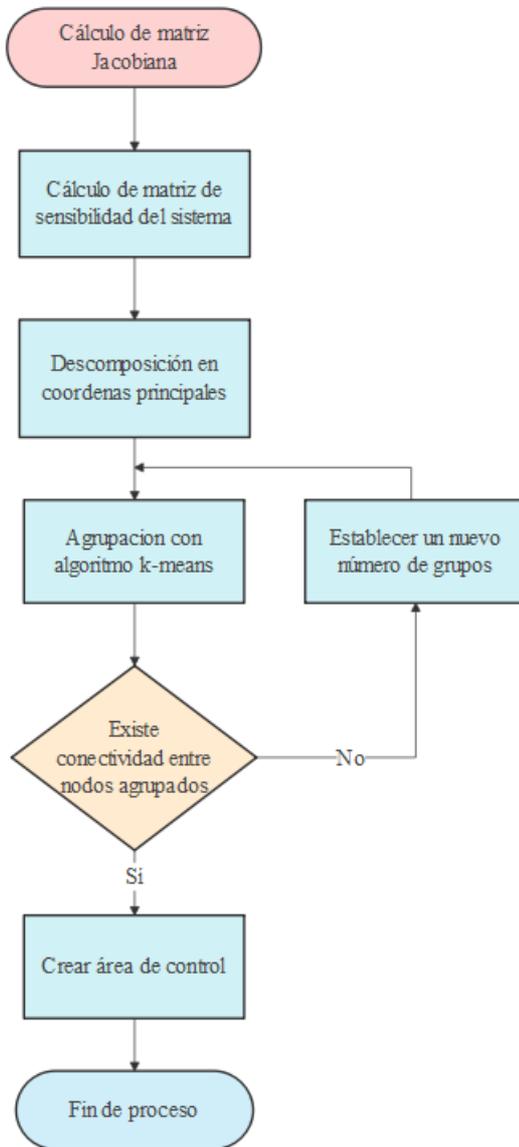
#### **4.2. Cálculo de distancias eléctricas en el SEP.**

La distancia eléctrica está relacionada directamente con la estabilidad de voltaje del sistema, además es un factor importante cuando se estudia la seguridad de voltaje [24]. La matriz de distancias eléctricas de SEP proporciona información relevante acerca de los nodos más débiles del sistema y los nodos críticos con respecto a la estabilidad de voltaje. La matriz jacobiana del sistema posee una sub matriz definida como  $\left[\frac{\partial Q}{\partial V}\right]$ , si se invierte dicha matriz se obtiene la matriz de sensibilidad de voltaje  $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$ . Los elementos de la matriz describen la variación del voltaje cuando existe inyección de potencia reactiva en los nodos de carga del SEP.

Una característica muy importante de la matriz de sensibilidad, jacobiana y matriz de variación de voltaje es que son no simétricas.

El acoplamiento existente entre nodos del sistema se puede cuantificar

mediante la atenuación existente entre dos nodos del SEP.



**Figura 4.** Procedimiento lógico para creación de áreas de control del SEP.

Esta se halla dividiendo cada elemento de la matriz de sensibilidad para los términos diagonales de la misma matriz, como se presenta en la ecuación 6 [34] [25] [24].

$$\Delta V_i = \alpha_{ij} * \Delta V_j \quad (6)$$

En donde:

$$\alpha_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial v_i}{\partial Q_j}\right)}{\frac{\partial V_j}{\partial Q_j}} \quad (7)$$

La simetría de la distancia eléctrica se logra cuando  $\alpha_{ij}$  es diferente a  $\alpha_{ji}$ .

Es posible cuantificar la distancia eléctrica entre un nodo  $i$  y un nodo  $j$  mediante la ecuación 8.

$$D_{ij} = D_{ji} = -\log(\alpha_{ij} * \alpha_{ji}) \quad (8)$$

La variable  $D_{ij}$  corresponde a la distancia entre las barras  $i$  y  $j$ . Debido a que esta distancia debe ser simétrica se aplica la ecuación 9 para tal fin.

$$D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\max(D_{i1}, \dots, D_{iN})} \quad (9)$$

El pseudocódigo que se presenta a continuación describe el procedimiento lógico para obtención de las distancias eléctricas en un SEP.

---

#### Matriz de distancias eléctricas

---

**Paso 1:** Hallar la matriz jacobiana  $J$  y extraer la matriz interna  $J_4$

$$J_4 = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right]$$

**Paso 2:** Calcular el inverso de  $J_4$ .

$$B = \left( \frac{\partial Q}{\partial V} \right)^{-1} = J_4^{-1}$$

**Paso 3:** Hallar la matriz de atenuaciones.

$$\alpha_{ij} = \frac{b_{ij}}{b_{jj}}$$

**Paso 4:** Hallar las distancias eléctricas entre cada nodo del sistema.

$$D_{ij} = -\log(\alpha_{ij}, \alpha_{ji})$$

**Paso 5:** Aplicar la ecuación 9 para normalizar las distancias eléctricas.

$$D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\max(D_{i1}, \dots, D_{iN})}$$

**Terminar**

La dimensión de la matriz resultante depende del número de nodos del sistema.

### 4.3. Obtención de coordenadas principales.

El cálculo de la matriz de coordenadas principales se basa en la matriz de distancias eléctricas. El primer paso consiste en hallar la matriz de similitud  $Q_m$ , para ello se aplica la ecuación 10 [34].

$$Q_m = -\frac{1}{2} \left[ I - \frac{L}{n} * 11' \right] * D \left[ I - \frac{L}{n} * 11' \right] \quad (10)$$

La variable  $Q_m$  se refiere a la matriz de similitud.  $I$  corresponde a la matriz identidad.  $L$  es un vector unitario, mientras que  $n$  es el número de elementos disponibles.

Las coordenadas principales de cada nodo se calculan a partir de la matriz de similitud  $Q_m$ , juntamente con los auto vectores  $V_r$  y  $A_r$  como se presenta en la ecuación 11 y 12 [34].

$$Y_r = V_r * A_r^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$X = Y_r = [Y_1 Y_2 \dots Y_Z] \quad (12)$$

Las variables  $V_r$  y  $A_r$  son auto vectores, mientras que  $Y_r$  es un arreglo que posee variables ortogonales en donde se almacenan las distancias reales.

El resultado será un arreglo, en donde la cantidad de filas depende del número de nodos del sistema mientras que las columnas son 3 debido a que se trata de tres coordenadas por nodo.

### 4.4. Algoritmo Fuzzy C-Means

Fuzzy C-means (FCM) pertenece al grupo de algoritmos de aprendizaje no supervisados que permiten agrupar datos de forma automática. FCM surge ante la necesidad de agrupar de una mejor forma aquellos datos que se encuentran cercanos a varios centroides al mismo tiempo. El algoritmo asigna un grado de pertenencia difusa por lo que un elemento puede ser parte de dos grupos con diferentes grados de pertenencia.

La principal diferencia con k-means es que FCM ejecuta particiones suaves, para posteriormente realizar una sumatoria de todos los datos con pertenencia a un grupo, obteniendo como resultado la unidad [34] [25] [24].

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{cl} u_{ij}^m \|x_i - c_j\| \quad (13)$$

En donde

$J$  es la función objetivo.

$u_{ij}$  es el grado de pertenencia del elemento  $i$  y el centroide  $j$ .

$n$  corresponde al número de elementos.

$cl$  es la cantidad de centroides.

$m$  es el peso que define el grado de participación que cada elemento aporta al resultado.

Las restricciones para la optimización se describen en las ecuaciones 14, 15 y 16

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m * x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (14)$$

$$u_{ij} = \left[ \sum_k^{cl} \left( \frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$u_{ij} = \left[ \left( \frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_1\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} + \dots + \left( \frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_2\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1} \quad (16)$$

En donde

$\|x_i - c_j\|$  se refiere a la distancia entre el elemento i y el centroide j.

$\|x_i - c_k\|$  se refiere a la distancia entre el elemento i y el centroide k [34].

---

### Fuzzy c-Means

---

**Paso 1:** Inicialización de las variables X, c, ε, m y τ

**Paso 2:** Selección del centroide más cercano a cada elemento.

**Hacer para todo**  $t = 1, \dots, \tau$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m * x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m}$$

$$u_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^c \left( \frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1}$$

**Paso 3:** Comprobar condición de parada

**Comprobar para todo**  $t$

$$\|V^{(t+1)} - V^t\| \leq \varepsilon$$

**Paso 4:** Verificar convergencia

**Si algoritmo converge**

Finalizar

**Caso contrario**

Ir al paso 2

**Terminar**

## 4.5. Proceso de creación de áreas de control.

Para la creación de áreas de control de voltaje es necesario identificar nodos representativos en el sistema, con la finalidad de inducir a la mejora del perfil de voltaje de los nodos circundantes a este.

Un aspecto muy importante para tener en cuenta es que los elementos que integren un determinado grupo deben poseer un acople débil con respecto a los integrantes de áreas vecinas. Es decir que un área no se verá afectada por los cambios que se puedan llevar a cabo en un área vecina.

El proceso empieza con el cálculo de las distancias eléctricas tal como se presenta en el siguiente pseudocódigo.

---

### Determinación de distancias eléctricas

---

**Paso 1:** Cálculo de flujo de energía.

**Paso 2:** Formación de matriz de impedancias del sistema.

**Paso 3:** Determinar la matriz de conectividad del sistema.

**Paso 4:** Determinación de Jacobiana del sistema y extracción de sub matriz J4

$$J_4 = \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right]$$

**Paso 5:** Calculo del inverso de la matriz J4.

$$B = \left( \frac{\partial Q}{\partial V} \right)^{-1} = J_4^{-1}$$

**Paso 6:** Cálculo de la matriz de atenuaciones  $\alpha_{ij}$ .

$$\alpha_{ij} = \frac{b_{ij}}{b_{jj}}$$

**Paso 7:** Determinación de matriz de distancias  $D_{ij}$ .

$$D_{ij} = -\log(\alpha_{ij}, \alpha_{ji})$$

**Paso 8:** Normalización de distancias eléctricas.

$$D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\max(D_{i1}, \dots, D_{iN})}$$

**Paso 9:** Hallar coordenadas principales a partir de la matriz  $D_{ij}$ .

$$Y_r = V_r * A_r^{\frac{1}{2}}$$

**Terminar**

La variable  $Y_r$  es un arreglo de datos que servirá como datos de entrada para el proceso de agrupación con FCM

FCM sirve para crear grupos, sin embargo, el algoritmo no considera la configuración natural del sistema. Por lo tanto, los grupos resultantes de FCM no corresponden a la disposición real del sistema.

La teoría de Goderya's describe un método que permite identificar la conectividad de los nodos agrupados con anterioridad [34].

El procedimiento se basa en el cálculo de la matriz de conectividad a partir de la matriz de incidencia del sistema como se presenta en la ecuación 17.

$$C_r = A_r^T * A_r \quad (17)$$

En donde

La variable  $C_r$  corresponde a la matriz de conectividad del sistema. Las dimensiones dependen del número de líneas  $n$  y del número de barras  $m$ .

Reescribiendo la ecuación 17 considerando las coordenadas ortogonales  $R_r$  y  $Q_r$  se tiene como resultado la ecuación 18.

$$C_r = Q_r * R_r \quad (18)$$

Es posible hallar un vector columna que compruebe la conectividad entre

nodos a partir del análisis del arreglo  $R_r$  como se muestra en la ecuación 19.

$$C_{i \ v}^i = \sum_{j=j+1}^n R_r^{(ij)} \quad (19)$$

En donde

La variable  $C_v$  se refiere a un arreglo que comprueba la conectividad y su dimensión depende del número de nodos  $n$ .

La variable  $i$  corresponde a la longitud de filas del arreglo  $R_r$ .

$R_r^{(i,j)}$  son los elementos en las posiciones  $(i, j)$  de la matriz  $R_r$ .

Algunos elementos del arreglo  $C_v$  pueden ser nulos, esto se debe a que no existiría conectividad entre los nodos en cuestión.

#### 4.6. Colocación óptima de dispositivos SVC.

Una vez creadas las áreas de control de voltajes es posible colocar dispositivos SVC en los nodos de cada grupo. Sin embargo, la solución sería demasiado costosa. Por este motivo es necesario colocar de forma óptimo dispositivos SVC mediante una formulación que involucre el costo asociado a la potencia reactiva y el índice de estabilidad de voltaje L-índice. El resultado será la colocación óptima de dispositivos SVC en cada de tal forma que con algunos dispositivos SVC se mejore el perfil de voltaje del sistema, al mismo tiempo que se reduce costos.

Los parámetros por considerar en la formulación de la función objetivo y restricciones son:

La variable  $Z_i$  es el costo requerido para instalar un SVC en el nodo  $i$ .

La variable  $X_i$  es de tipo binario, sirve para obtener la ubicación óptima de los dispositivos SVC dentro de cada área de control de voltaje.

La función  $f(x)$  representa al grupo de restricciones que deben ser maximizadas.

La función  $g(x)$  representa al grupo de restricciones que deben ser minimizadas.

$\hat{1}$  es un arreglo que contiene valores de 1.

El planteamiento para la ubicación óptima de dispositivos SVC se puede expresar de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i=1}^N Z_i * x_i * \text{Índice} \quad (20)$$

Sujeto a

$$f(x) \geq \hat{1} \quad (21)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (22)$$

La función objetivo es descrita por la ecuación 20, en esta se trata de minimizar el costo de instalación de los dispositivos SVC considerando la potencia reactiva.

Las variables de selección binarias se representan con la ecuación 21, esta función establece un valor de 1 si el dispositivo SVC se instala en el nodo i caso contrario la función adoptara un valor de 0.

Es necesario considerar que los dispositivos SVC no deben instalarse en nodos que posee conexión a generadores. La ecuación 22 controla este criterio.

El problema descrito es una formulación NP-Complete que será resuelta con el software GAMS.

## 5. Análisis de resultados.

Para comprobar la funcionalidad del procedimiento descrito en la presente investigación se hará uso de los sistemas de prueba de 30 y 39 barras que corresponde al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Para cada sistema de prueba se plantean 3 casos, en donde se mantienen los parámetros originales mientras se varia la potencia reactiva del dispositivo SVC.

**Tabla 1.** Casos de prueba

| Caso | Q(Mvars) |
|------|----------|
| 1    | 2.5      |
| 2    | 5        |
| 3    | 15       |

El computador empleado para realizar las pruebas fue una computadora de escritorio, posee un procesador Intel(R) Core (TM) i7 CPU @ 3.40 de cuarta generación, memoria RAM de 16 GB y sistema operativo Windows 10 home. Por otro lado, el software que se usó para la resolución de flujos de potencia fue GAMS versión 27.3.0 Para la creación de áreas de control de voltajes fue MATLAB V2020a. Por último, para comprobar los resultados se usó el software DIgSILENT V.15.1.7.

### 5.1. Caso de prueba 1.

El primer modelo de prueba es el sistema de 30 barras de la IEEE. El modelo consta de 6 unidades de generación, 37 líneas de transmisión, 21 cargas de impedancia constante y 36 nodos como se presenta en la Figura 5.

Se analizará el índice de estabilidad de voltaje L-índice, los perfiles de voltaje, el comportamiento angular, la potencia reactiva y las pérdidas de

potencia por los nodos. Los parámetros descritos serán considerados antes de la compensación de potencia reactiva con SVC y después de la ubicación óptima de dispositivos, según los casos de prueba descritos anteriormente en la Tabla 1.

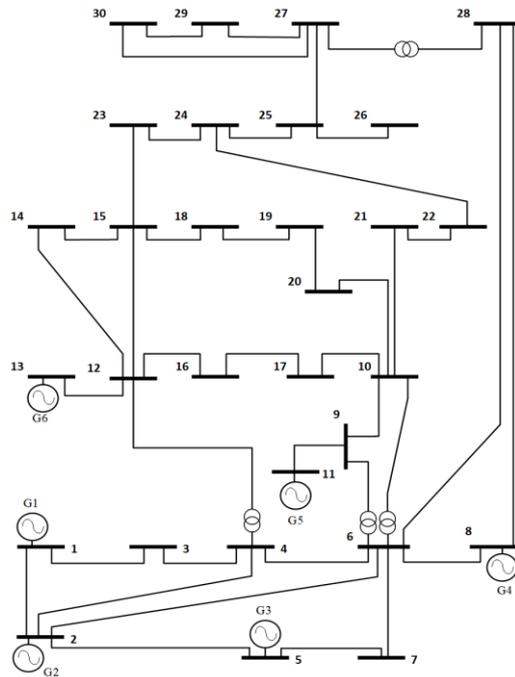


Figura 5. Sistema de 30 nodos IEEE.

### 5.1.1 Identificación de áreas de control sobre el sistema de 30 barras IEEE.

A continuación, en la Figura 6 se presenta el resultado de la identificación de áreas de control de voltaje y la colocación óptima de dispositivos SVC.

En la Figura 6 se observa que en el sistema de 30 barras se crearon 3 áreas de control de voltaje. La primera se compone de los nodos desde el 1 hasta el 11 y el nodo 28, además su centroide se ubica en el nodo 6. La segunda área se compone de los nodos desde el 12 hasta el 24, con centroide en el nodo 18. La tercera área está compuesta por los

nodos desde el 25 hasta el 30 excepto el nodo 28, y su centroide se sitúa en el nodo 27.

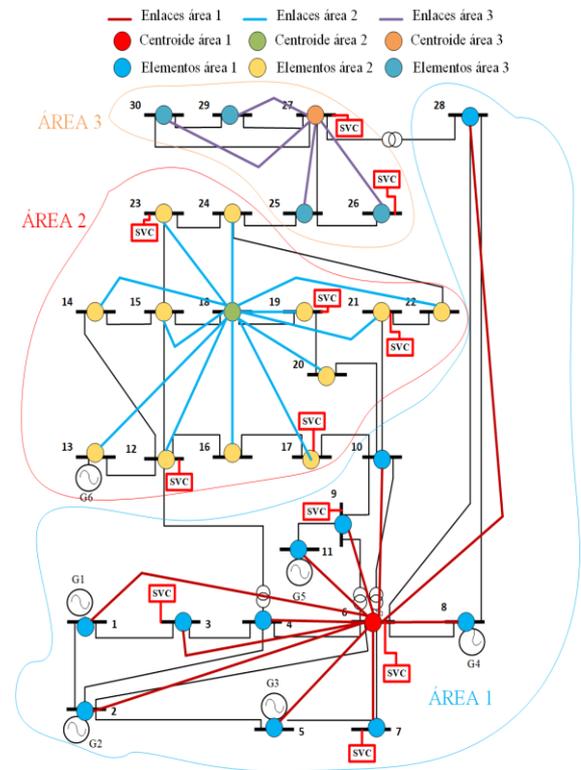


Figura 6. Colocación óptima de dispositivos SVC en áreas de control de voltaje, sistema IEEE 30 nodos.

La ubicación óptima de dispositivos SVC se divide de la siguiente forma:

En el área 1 se colocaron 4 dispositivos SVC, en los nodos 3-6-7 y 9 respectivamente.

En el área 2 se colocaron 5 dispositivos SVC, en los nodos 12-17-19-21 y 23 respectivamente.

En el área 3 se colocaron 2 dispositivos SVC, en los nodos 26 y 27 respectivamente.

A continuación, en la tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 2.** Identificación de áreas y colocación de dispositivos SVC.

| Área | Nodo | Ubicación SVC |
|------|------|---------------|
| 1    | 1    | -             |
|      | 2    | -             |
|      | 3    | 1             |
|      | 4    | -             |
|      | 5    | -             |
|      | 6    | 1             |
|      | 7    | 1             |
|      | 8    | -             |
|      | 9    | 1             |
|      | 10   | -             |
|      | 11   | -             |
|      | 28   | -             |
| 2    | 12   | 1             |
|      | 13   | -             |
|      | 14   | -             |
|      | 15   | -             |
|      | 16   | -             |
|      | 17   | 1             |
|      | 18   | -             |
|      | 19   | 1             |
|      | 20   | -             |
|      | 21   | 1             |
|      | 22   | -             |
| 23   | 1    |               |
| 24   | -    |               |
| 3    | 25   | -             |
|      | 26   | 1             |
|      | 27   | 1             |
|      | 29   | -             |
|      | 30   | -             |

## 5.1.2 Índice estabilidad de voltaje L-índice

**Tabla 3.** Índice de estabilidad de voltaje L-índice.

| Nodo | Sin SVC | Con SVC (2.5) | Con SVC (5) | Con SVC (15) |
|------|---------|---------------|-------------|--------------|
| 1    | 0.0031  | 0.0042        | 0.0112      | 0.0280       |
| 2    | 0.0033  | 0.0060        | 0.0259      | 0.0397       |
| 3    | 0.0065  | 0.0287        | 0.0273      | 0.0408       |
| 4    | 0.0112  | 0.0321        | 0.0298      | 0.0628       |
| 5    | 0.0116  | 0.0324        | 0.0632      | 0.0953       |
| 6    | 0.0377  | 0.0445        | 0.0784      | 0.1003       |
| 7    | 0.0493  | 0.0734        | 0.0932      | 0.1040       |
| 8    | 0.0526  | 0.0775        | 0.0962      | 0.1092       |
| 9    | 0.0702  | 0.0793        | 0.0978      | 0.1117       |
| 10   | 0.0720  | 0.0903        | 0.1088      | 0.1129       |
| 11   | 0.0772  | 0.0976        | 0.1130      | 0.1135       |
| 12   | 0.0820  | 0.0986        | 0.1136      | 0.1141       |
| 13   | 0.0840  | 0.0988        | 0.1155      | 0.1160       |
| 14   | 0.0841  | 0.1074        | 0.1160      | 0.1166       |
| 15   | 0.0912  | 0.1098        | 0.1215      | 0.1198       |
| 16   | 0.0935  | 0.1105        | 0.1252      | 0.1207       |
| 17   | 0.0947  | 0.1109        | 0.1260      | 0.1209       |
| 18   | 0.0948  | 0.1109        | 0.1276      | 0.1209       |
| 19   | 0.0952  | 0.1112        | 0.1289      | 0.1249       |
| 20   | 0.0963  | 0.1116        | 0.1289      | 0.1290       |
| 21   | 0.0996  | 0.1163        | 0.1364      | 0.1309       |
| 22   | 0.1042  | 0.1181        | 0.1365      | 0.1339       |
| 23   | 0.1101  | 0.1233        | 0.1403      | 0.1407       |
| 24   | 0.1162  | 0.1247        | 0.1496      | 0.1409       |
| 25   | 0.1162  | 0.1247        | 0.1584      | 0.1490       |
| 26   | 0.1182  | 0.1247        | 0.1585      | 0.1490       |
| 27   | 0.1418  | 0.1285        | 0.1585      | 0.1490       |
| 28   | 0.7217  | 0.7219        | 0.7195      | 0.7113       |
| 29   | 0.7956  | 0.7944        | 0.7922      | 0.7851       |
| 30   | 0.9441  | 0.9443        | 0.9439      | 0.9409       |

En la Tabla 3 se presenta los índices de estabilidad de voltaje L-índice para el sistema de 30 barras de la IEEE.

Los resultados del índice de estabilidad de voltaje descrito en la Tabla 3 indica que a medida que aumenta la potencia reactiva del dispositivo SVC, el perfil de estabilidad sufre mejoras sustanciales.

### 5.1.3 Voltajes nodales sobre el modelo de 30 nodos IEEE.

A continuación, en la Figura 7 se presenta el perfil de voltaje obtenido para cada uno de los casos descritos anteriormente en la Tabla 1.

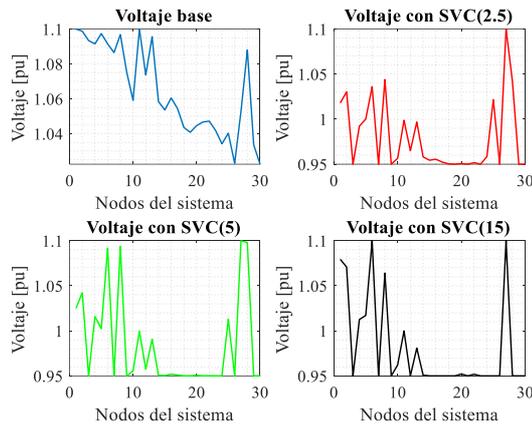


Figura 7. Resultados perfil de voltaje IEEE 30 nodos.

La Figura 7 muestra que el perfil de voltaje más favorable sucede con la instalación de dispositivos SVC a 2.5 de potencia reactiva como compensación.

### 5.1.4 Cuantificación angular del sistema de 30 nodos IEEE.

Ante la implementación de dispositivos SVC en el sistema, se aprecia que el ángulo referente al perfil de voltaje se estabiliza de forma progresiva. Esto contribuye de forma directa al

equilibrio y sincronización del SEP. Además, se comprobó que mientras mayor sea la potencia de compensación reactiva dispuesta en el dispositivo SVC, es superior la estabilización del ángulo de voltaje como se presenta en la Figura 8.

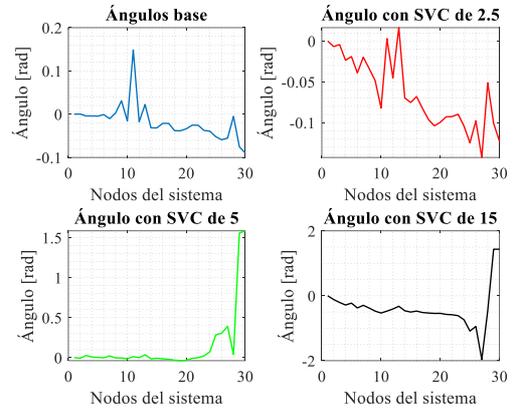


Figura 8. Cuantificación angular del sistema IEEE 30 nodos.

### 5.1.5 Resultados de compensación reactiva.

La ubicación óptima de dispositivos SVC sobre el SEP permite la reducción de pérdidas de potencia reactiva. A mayor potencia reactiva de compensación suministrada por el SVC, las pérdidas disminuyen de forma sustancial. Por otro lado, si la potencia reactiva de compensación es demasiado alta las pérdidas se incrementan.

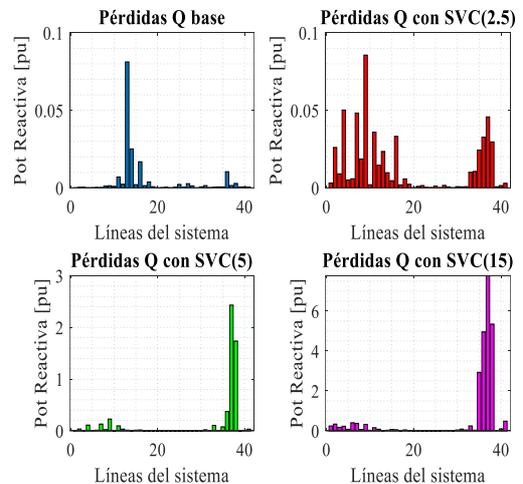


Figura 9. Pérdidas de potencia reactiva sistema de 30 nodos IEEE.

**Tabla 4.** Cuadro comparativo de resultados obtenidos del sistema de 30 nodos GAMS-DIgSILENT.

| NODO | GAMS                      | DIgSILENT | GAMS                             | DIgSILENT | GAMS                           | DIgSILENT | GAMS                            | DIgSILENT |
|------|---------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
|      | Perfil de voltaje Sin SVC |           | Perfil de tención con SVC de 2.5 |           | Perfil de tención con SVC de 5 |           | Perfil de tención con SVC de 15 |           |
| 1    | 1.100                     | 1.060     | 1.017                            | 1.060     | 1.024                          | 1.060     | 1.079                           | 1.060     |
| 2    | 1.098                     | 1.000     | 1.030                            | 0.986     | 1.042                          | 0.972     | 1.070                           | 0.921     |
| 3    | 1.093                     | 1.082     | 0.950                            | 1.082     | 0.950                          | 1.082     | 0.950                           | 1.082     |
| 4    | 1.091                     | 1.025     | 0.992                            | 1.017     | 1.015                          | 1.009     | 1.012                           | 0.979     |
| 5    | 1.097                     | 1.071     | 1.000                            | 1.071     | 1.002                          | 1.071     | 1.017                           | 1.071     |
| 6    | 1.091                     | 1.008     | 1.036                            | 0.997     | 1.091                          | 0.988     | 1.100                           | 0.951     |
| 7    | 1.086                     | 1.001     | 0.950                            | 0.989     | 0.950                          | 0.978     | 0.950                           | 0.936     |
| 8    | 1.096                     | 1.006     | 1.043                            | 0.995     | 1.093                          | 0.983     | 1.064                           | 0.941     |
| 9    | 1.075                     | 0.996     | 0.950                            | 0.982     | 0.950                          | 0.967     | 0.950                           | 0.914     |
| 10   | 1.059                     | 0.988     | 0.956                            | 0.973     | 0.955                          | 0.958     | 0.962                           | 0.904     |
| 11   | 1.100                     | 0.983     | 0.998                            | 0.966     | 0.999                          | 0.950     | 0.999                           | 0.888     |
| 12   | 1.073                     | 1.045     | 0.964                            | 1.045     | 0.957                          | 1.045     | 0.950                           | 1.045     |
| 13   | 1.095                     | 0.987     | 0.996                            | 0.970     | 0.990                          | 0.954     | 0.980                           | 0.896     |
| 14   | 1.058                     | 0.986     | 0.958                            | 0.970     | 0.950                          | 0.954     | 0.950                           | 0.895     |
| 15   | 1.053                     | 0.987     | 0.954                            | 0.970     | 0.950                          | 0.954     | 0.950                           | 0.895     |
| 16   | 1.060                     | 0.985     | 0.955                            | 0.970     | 0.951                          | 0.955     | 0.950                           | 0.900     |
| 17   | 1.054                     | 0.973     | 0.952                            | 0.953     | 0.950                          | 0.933     | 0.950                           | 0.863     |
| 18   | 1.043                     | 0.973     | 0.950                            | 0.949     | 0.950                          | 0.926     | 0.950                           | 0.845     |
| 19   | 1.040                     | 0.954     | 0.950                            | 0.921     | 0.950                          | 0.890     | 0.950                           | 0.778     |
| 20   | 1.044                     | 0.981     | 0.950                            | 0.961     | 0.950                          | 0.941     | 0.952                           | 0.870     |
| 21   | 1.046                     | 1.004     | 0.950                            | 0.999     | 0.950                          | 0.993     | 0.950                           | 0.973     |
| 22   | 1.047                     | 0.961     | 0.951                            | 0.935     | 0.950                          | 0.911     | 0.951                           | 0.825     |
| 23   | 1.041                     | 1.022     | 0.950                            | 1.018     | 0.950                          | 1.013     | 0.950                           | 0.998     |
| 24   | 1.034                     | 0.949     | 0.958                            | 0.919     | 0.950                          | 0.890     | 0.950                           | 0.789     |
| 25   | 1.040                     | 1.014     | 1.021                            | 1.010     | 1.012                          | 1.006     | 0.950                           | 0.990     |
| 26   | 1.023                     | 1.010     | 0.950                            | 1.010     | 0.950                          | 1.010     | 0.950                           | 1.010     |
| 27   | 1.052                     | 1.009     | 1.100                            | 1.006     | 1.100                          | 1.003     | 1.100                           | 0.990     |
| 28   | 1.088                     | 1.001     | 1.041                            | 0.998     | 1.097                          | 0.994     | 0.950                           | 0.982     |
| 29   | 1.033                     | 1.010     | 0.950                            | 1.010     | 0.950                          | 1.010     | 0.950                           | 1.010     |
| 30   | 1.022                     | 1.023     | 0.950                            | 1.014     | 0.950                          | 1.005     | 0.950                           | 0.972     |

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio planteados con anterioridad en la Tabla 1. Se observa que a medida que aumenta la potencia reactiva del dispositivo SVC, el perfil de voltaje mejora puesto que la

magnitud de voltaje se acerca mucho al valor de 1 en por unidad. Sin embargo, cuando la compensación reactiva es demasiado alta el perfil de voltaje tiende a empeorar. A continuación, en la Figura 10 se presenta la potencia

reactiva nodal del sistema de 30 nodos de la IEEE.

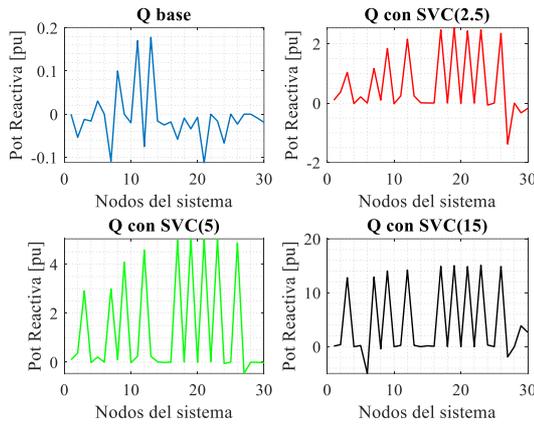


Figura 10. Flujo de potencia reactiva nodal de sistema de 30 barras IEEE.

## 5.2. Segundo caso de prueba.

El segundo modelo de prueba es el sistema de 39 barras de la IEEE. El modelo consta de 10 unidades de generación, 46 líneas de transmisión y 9 transformadores como se presenta en la Figura 11.

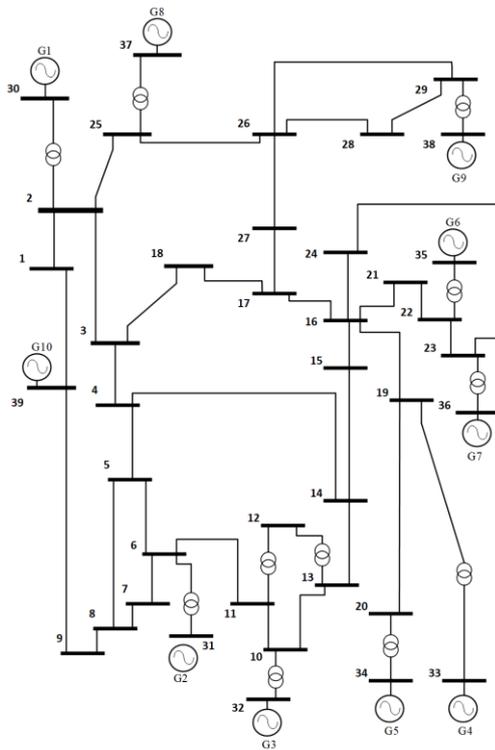


Figura 11. Sistema de prueba de 39 nodos IEEE.

Se analizará el índice de estabilidad de voltaje L-índice, los perfiles de voltaje, el comportamiento angular, la potencia reactiva y las pérdidas de potencia por los nodos. Los parámetros descritos serán considerados antes de la compensación de potencia reactiva con SVC y después de la ubicación óptima de dispositivos, según los casos de prueba descritos anteriormente en la Tabla 1.

### 5.2.1 Identificación de áreas de control sobre el sistema de 39 barras IEEE.

A continuación, en la Figura 12 se presenta el resultado de la identificación de áreas de control de voltaje y la colocación óptima de dispositivos SVC.

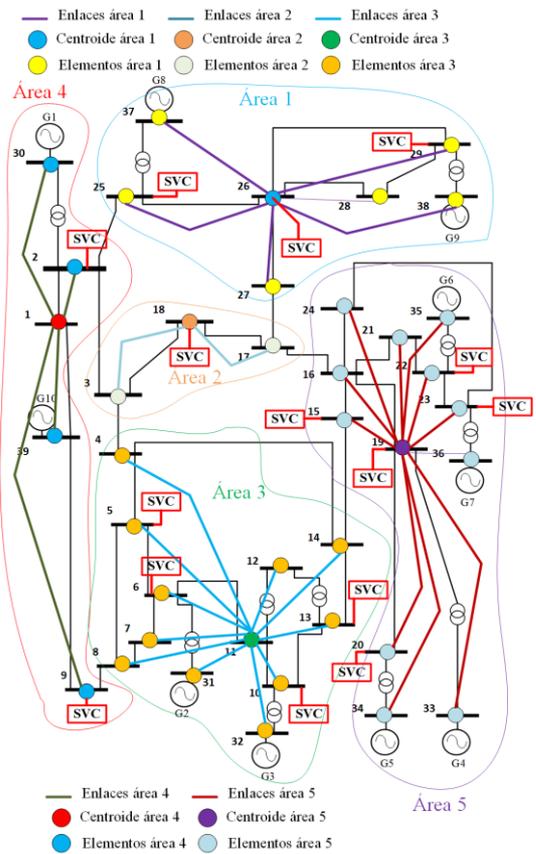


Figura 12. Colocación óptima de dispositivos SVC en áreas de control de voltaje, sistema 39 nodos IEEE.

En la Figura 12 se observa que en el sistema de 39 barras se crearon 5 áreas de control de voltaje. La primera se compone de los nodos desde el 25 hasta el 29, nodo 37 y 38, además su centroide se ubica en el nodo 26. La segunda área se compone de los nodos 3-17 y 18, con centroide en el nodo 18. La tercera área está compuesta por los nodos desde el 4 hasta el 8 y desde el 10 hasta 14, y su centroide se sitúa en el nodo 11. El área 4 se compone de los nodos 1-2-9-30 y 39, con centroide en 1. Por último, el área 5 se compone de los nodos 15-16-19-20-21-22-23-24-33-34-35 y 36, con centroide en 19.

La ubicación óptima de dispositivos SVC se divide de la siguiente forma:

- En el área 1 se ubicaron 3 dispositivos SVC, en los nodos 25-27 y 29 respectivamente.
- En el área 2 se colocó un dispositivo SVC, ubicado en el nodo 18.
- En el área 3 se colocaron 4 dispositivos SVC, ubicados en los nodos 5-6-10 y 13 respectivamente.
- En el área 4 se colocaron 2 dispositivos SVC, ubicados en los nodos 2 y 9 respectivamente.
- En el área 5 se colocaron 5 dispositivos SVC, ubicados en los nodos 15-19-20-22 y 23 respectivamente.

A continuación, en la Tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 5.** Identificación de áreas y colocación de dispositivos SVC, caso de prueba 2.

| Área | Nodo | Ubicación de SVC |
|------|------|------------------|
| 1    | 25   | 1                |
|      | 26   | -                |
|      | 27   | 1                |

|    |    |   |
|----|----|---|
|    | 28 | - |
|    | 29 | 1 |
|    | 37 | - |
|    | 38 | - |
| 2  | 3  | - |
|    | 17 | - |
|    | 18 | 1 |
| 3  | 4  | - |
|    | 5  | 1 |
|    | 6  | 1 |
|    | 7  | - |
|    | 8  | - |
|    | 10 | 1 |
|    | 11 | - |
|    | 12 | - |
|    | 13 | 1 |
|    | 14 | - |
| 4  | 1  | - |
|    | 2  | 1 |
|    | 9  | 1 |
|    | 30 | - |
|    | 39 | - |
| 5  | 15 | 1 |
|    | 16 | - |
|    | 19 | 1 |
|    | 20 | 1 |
|    | 21 | - |
|    | 22 | 1 |
|    | 23 | 1 |
|    | 24 | - |
|    | 33 | - |
|    | 34 | - |
|    | 35 | - |
| 36 | -  |   |

## 5.2.2 Índice estabilidad de voltaje L-índice, sistema de prueba IEEE 39.

En la Tabla 6 se presenta los índices de estabilidad de voltaje L-índice para el sistema de 39 barras de la IEEE.

**Tabla 6.** Índice de estabilidad de voltaje L-índice, IEEE 39.

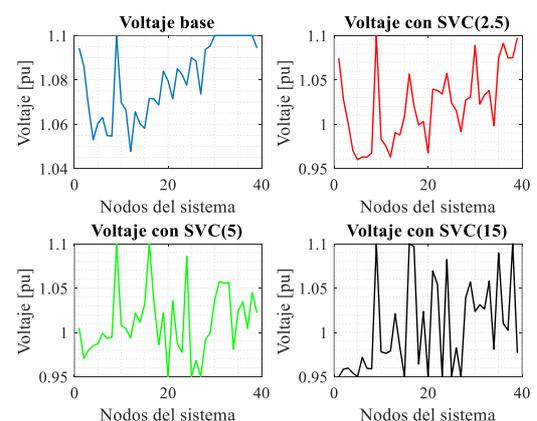
| Nodo | Sin SVC | Con SVC (2.5) | Con SVC (5) | Con SVC (15) |
|------|---------|---------------|-------------|--------------|
| 1    | 0.0287  | 0.0210        | 0.0052      | 0.0110       |
| 2    | 0.0323  | 0.0449        | 0.0145      | 0.0155       |
| 3    | 0.0376  | 0.0649        | 0.0244      | 0.0251       |
| 4    | 0.0379  | 0.0686        | 0.0511      | 0.0371       |
| 5    | 0.0547  | 0.0705        | 0.0533      | 0.0452       |
| 6    | 0.0553  | 0.0740        | 0.0731      | 0.0581       |
| 7    | 0.0592  | 0.0755        | 0.0744      | 0.0594       |
| 8    | 0.0592  | 0.0776        | 0.0765      | 0.0760       |
| 9    | 0.0602  | 0.0825        | 0.0781      | 0.0781       |
| 10   | 0.0625  | 0.0982        | 0.0825      | 0.0791       |
| 11   | 0.0725  | 0.0982        | 0.0857      | 0.0791       |
| 12   | 0.0850  | 0.1001        | 0.0950      | 0.0826       |
| 13   | 0.0865  | 0.1036        | 0.0984      | 0.0840       |
| 14   | 0.0876  | 0.1074        | 0.0984      | 0.1012       |
| 15   | 0.0886  | 0.1134        | 0.1002      | 0.1182       |
| 16   | 0.0971  | 0.1161        | 0.1085      | 0.1267       |
| 17   | 0.0978  | 0.1230        | 0.1141      | 0.1283       |
| 18   | 0.1011  | 0.1354        | 0.1160      | 0.1295       |
| 19   | 0.1024  | 0.1356        | 0.1172      | 0.1304       |
| 20   | 0.1039  | 0.1380        | 0.1194      | 0.1317       |
| 21   | 0.1051  | 0.1402        | 0.1227      | 0.1345       |
| 22   | 0.1084  | 0.1436        | 0.1230      | 0.1393       |
| 23   | 0.1102  | 0.1459        | 0.1236      | 0.1415       |
| 24   | 0.1105  | 0.1533        | 0.1259      | 0.1419       |
| 25   | 0.1132  | 0.1589        | 0.1264      | 0.1422       |
| 26   | 0.1153  | 0.1660        | 0.1337      | 0.1486       |
| 27   | 0.1161  | 0.1675        | 0.1355      | 0.1492       |

|    |        |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 28 | 0.1164 | 0.1685 | 0.1355 | 0.1562 |
| 29 | 0.1173 | 0.1709 | 0.1381 | 0.1573 |
| 30 | 0.1218 | 0.1741 | 0.1497 | 0.1712 |
| 31 | 0.1355 | 0.1764 | 0.1725 | 0.1836 |
| 32 | 0.7671 | 0.7604 | 0.7614 | 0.7747 |
| 33 | 0.8345 | 0.8305 | 0.8290 | 0.8385 |
| 34 | 0.8493 | 0.8460 | 0.8442 | 0.8525 |
| 35 | 0.8758 | 0.8735 | 0.8712 | 0.8797 |
| 36 | 0.8872 | 0.8845 | 0.8823 | 0.8902 |
| 37 | 0.9125 | 0.9099 | 0.9090 | 0.9155 |
| 38 | 0.9308 | 0.9281 | 0.9281 | 0.9331 |
| 39 | 0.9454 | 0.9426 | 0.9436 | 0.9473 |

Los resultados del índice de estabilidad de voltaje descrito en la Tabla 6 indica que a medida que aumenta la potencia reactiva del dispositivo SVC, el perfil de estabilidad sufre mejoras sustanciales.

## 5.2.1 Voltajes nodales sobre el modelo de 39 nodos IEEE.

A continuación, en la Figura 13 se presenta el perfil de voltaje obtenido para cada uno de los casos descritos anteriormente en la Tabla 1.



**Figura 13.** Resultados perfil de voltaje, IEEE 39 nodos.

La Figura 13 muestra que el perfil de voltaje más favorable sucede con la instalación de dispositivos SVC a 2.5 de potencia reactiva como compensación.

### 5.2.1 Cuantificación angular del sistema de 39 nodos IEEE.

Ante la implementación de dispositivos SVC en el sistema, se aprecia que el ángulo referente al perfil de voltaje se estabiliza de forma progresiva. Esto contribuye de forma directa al equilibrio y sincronización del SEP. Además, se comprobó que mientras mayor sea la potencia de compensación reactiva dispuesta en el dispositivo SVC, es superior la estabilización del ángulo de voltaje como se presenta en la Figura 14.

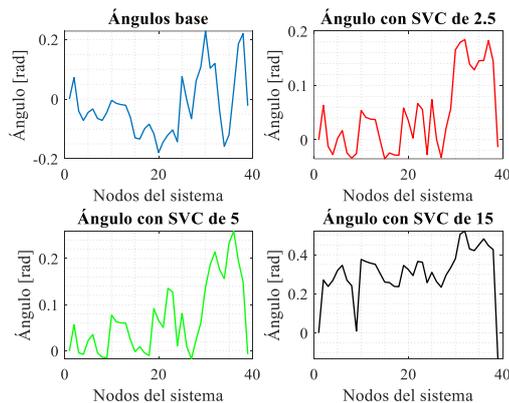


Figura 14. Cuantificación angular del sistema IEEE 39 nodos.

### 5.2.2 Resultados de compensación reactiva.

La ubicación óptima de dispositivos SVC sobre el SEP permite la reducción de pérdidas de potencia reactiva. A mayor potencia reactiva de compensación suministrada por el SVC, las pérdidas disminuyen de forma sustancial. Por otro lado, si la potencia reactiva de compensación es demasiado alta las pérdidas se incrementan como se muestra en la Figura 15.

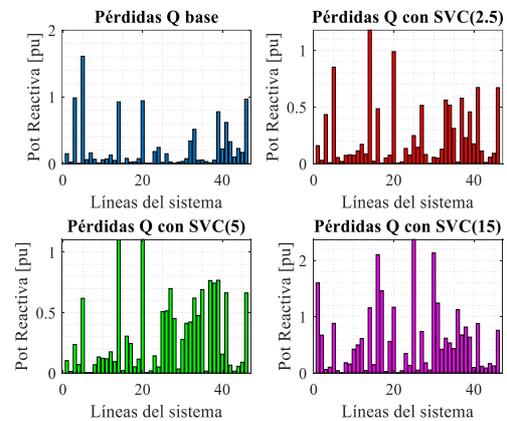


Figura 15. Pérdidas de potencia reactiva sistema de 39 nodos IEEE.

En la Tabla 7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio planteados con anterioridad en la Tabla 1.

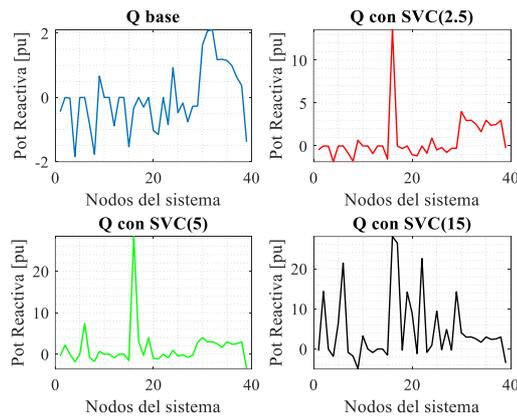
Tabla 7. Cuadro comparativo de resultados obtenidos del sistema de 39 nodos GAMS-DIgSILENT.

| Nodo | GAMS                      | DIgSILENT | GAMS                            | DIgSILENT | GAMS                          | DIgSILENT | GAMS                           | DIgSILENT |
|------|---------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
|      | Perfil de voltaje sin SVC |           | Perfil de voltaje con SVC (2.5) |           | Perfil de voltaje con SVC (5) |           | Perfil de voltaje con SVC (15) |           |
| 1    | 1.094                     | 1.047     | 1.074                           | 1.047     | 1.005                         | 1.047     | 0.950                          | 1.046     |
| 2    | 1.086                     | 1.049     | 1.028                           | 1.048     | 0.971                         | 1.047     | 0.959                          | 1.044     |
| 3    | 1.068                     | 1.03      | 1.001                           | 1.029     | 0.980                         | 1.028     | 0.960                          | 1.023     |
| 4    | 1.053                     | 1.004     | 0.970                           | 1.003     | 0.985                         | 1.001     | 0.954                          | 0.996     |

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5  | 1.060 | 1.005 | 0.960 | 1.004 | 0.987 | 1.003 | 0.950 | 0.997 |
| 6  | 1.063 | 1.008 | 0.963 | 1.006 | 0.999 | 1.005 | 0.972 | 1     |
| 7  | 1.055 | 0.997 | 0.963 | 0.996 | 0.993 | 0.995 | 0.960 | 0.989 |
| 8  | 1.055 | 0.996 | 0.967 | 0.995 | 0.995 | 0.994 | 0.959 | 0.989 |
| 9  | 1.100 | 1.028 | 1.100 | 1.027 | 1.100 | 1.026 | 1.100 | 1.023 |
| 10 | 1.070 | 1.017 | 0.983 | 1.016 | 1.008 | 1.015 | 0.978 | 1.01  |
| 11 | 1.066 | 1.013 | 0.976 | 1.011 | 1.004 | 1.01  | 0.976 | 1.005 |
| 12 | 1.048 | 1     | 0.963 | 0.999 | 0.994 | 0.998 | 0.979 | 0.992 |
| 13 | 1.066 | 1.014 | 0.990 | 1.013 | 1.022 | 1.012 | 1.021 | 1.006 |
| 14 | 1.060 | 1.012 | 0.988 | 1.01  | 1.012 | 1.009 | 0.983 | 1.004 |
| 15 | 1.058 | 1.015 | 1.009 | 1.014 | 1.032 | 1.013 | 0.950 | 1.007 |
| 16 | 1.072 | 1.032 | 1.057 | 1.031 | 1.100 | 1.03  | 1.100 | 1.025 |
| 17 | 1.071 | 1.034 | 1.021 | 1.032 | 1.034 | 1.031 | 1.097 | 1.026 |
| 18 | 1.069 | 1.031 | 0.999 | 1.03  | 0.986 | 1.028 | 0.964 | 1.023 |
| 19 | 1.084 | 1.05  | 1.003 | 1.049 | 1.022 | 1.049 | 1.024 | 1.046 |
| 20 | 1.080 | 0.991 | 0.968 | 0.991 | 0.950 | 0.99  | 0.950 | 0.988 |
| 21 | 1.072 | 1.032 | 1.039 | 1.031 | 1.036 | 1.03  | 1.069 | 1.026 |
| 22 | 1.085 | 1.05  | 1.038 | 1.049 | 0.987 | 1.048 | 1.054 | 1.046 |
| 23 | 1.082 | 1.045 | 1.034 | 1.044 | 0.978 | 1.043 | 0.950 | 1.04  |
| 24 | 1.078 | 1.037 | 1.057 | 1.036 | 1.086 | 1.035 | 1.082 | 1.031 |
| 25 | 1.090 | 1.058 | 1.024 | 1.057 | 0.950 | 1.056 | 0.950 | 1.053 |
| 26 | 1.088 | 1.052 | 1.015 | 1.051 | 0.968 | 1.05  | 0.983 | 1.046 |
| 27 | 1.074 | 1.038 | 0.991 | 1.036 | 0.950 | 1.035 | 0.950 | 1.03  |
| 28 | 1.094 | 1.05  | 1.027 | 1.049 | 0.992 | 1.049 | 1.039 | 1.046 |
| 29 | 1.095 | 1.05  | 1.031 | 1.049 | 0.999 | 1.049 | 1.057 | 1.046 |
| 30 | 1.100 | 1.048 | 1.089 | 1.048 | 1.037 | 1.048 | 1.024 | 1.048 |
| 31 | 1.100 | 0.982 | 1.023 | 0.982 | 1.058 | 0.982 | 1.031 | 0.982 |
| 32 | 1.100 | 0.983 | 1.033 | 0.983 | 1.055 | 0.983 | 1.026 | 0.983 |
| 33 | 1.100 | 0.997 | 1.038 | 0.997 | 1.056 | 0.997 | 1.058 | 0.997 |
| 34 | 1.100 | 1.012 | 0.998 | 1.012 | 0.981 | 1.012 | 0.981 | 1.012 |
| 35 | 1.100 | 1.049 | 1.075 | 1.049 | 1.024 | 1.049 | 1.090 | 1.049 |
| 36 | 1.100 | 1.064 | 1.091 | 1.064 | 1.035 | 1.064 | 1.010 | 1.064 |
| 37 | 1.100 | 1.028 | 1.075 | 1.028 | 1.004 | 1.028 | 1.002 | 1.028 |
| 38 | 1.100 | 1.026 | 1.075 | 1.026 | 1.045 | 1.026 | 1.100 | 1.026 |
| 39 | 1.094 | 1.03  | 1.098 | 1.03  | 1.022 | 1.03  | 0.977 | 1.03  |

Se observa que a medida que aumenta la potencia reactiva del dispositivo SVC, el perfil de voltaje mejora puesto que la magnitud de voltaje se acerca mucho al valor de 1 en por unidad.

A continuación, en la Figura 16 se presenta la potencia reactiva nodal del sistema de 39 nodos de la IEEE.



**Figura 16.** Flujo de potencia reactiva nodal de sistema de 39 barras IEEE.

## 6. Conclusiones

La colocación de dispositivos SVC de forma óptima parte del análisis de la matriz Jacobiana del SEP. Esta matriz posee información muy útil como el arreglo de sensibilidad, mismo que es una parte esencial para aplicar el concepto de distancia eléctrica. La descomposición del SEP en subáreas es de mucha ayuda, ya que permite realizar un análisis más preciso sobre comportamiento del perfil de voltaje y el índice de estabilidad de voltaje.

La creación de áreas dentro del SEP se basa en el análisis de la matriz de sensibilidad, esto permite identificar el nivel de acoplamiento eléctrico existente entre nodos del sistema. Agrupar nodos con acoplamiento eléctrico significativo entre ellos permite crear áreas aisladas entre sí, lo

que implica que cualquier acción individual llevada a cabo en un área determinada no afecta a sus áreas vecinas. Por lo tanto, fue de gran ayuda para mejorar los perfiles de voltaje de forma individual por área, en base a la compensación local que ofrecen los dispositivos SVC como se demostró en el primer caso de prueba, así como en el segundo.

Para la creación de áreas de control de voltaje es esencial asociar de forma correcta la disposición de nodos originales del SEP con los nodos dispuestos para el estudio. Porque el procedimiento para la creación de áreas no considera los nodos con conexión a generadores. Si se comete un error en la asociación de los nodos originales con los aplicados al estudio da como resultado la creación de áreas carentes de conectividad.

Considerar como criterio único la función de costo para la instalación de dispositivos SVC es válido. Sin embargo, al adicionar un criterio como el índice de estabilidad de voltaje L-índice permite que la colocación de dispositivos SVC sea más precisa, tal como se demostró en las tablas 2-3 para el caso de prueba 1, y las tablas 3-4 para el caso de prueba 2.

La presencia de dispositivos SVC en el SEP contribuyo a la mejora del perfil de voltaje puesto que los valores de voltaje tienden a situarse muy cerca del valor 1 pu. Por otro lado, contribuye a que el comportamiento angular de voltaje se estabilice.

## 7. Trabajos futuros

La investigación desarrollada a lo largo de este documento demuestra una forma eficiente de ubicar dispositivos SVC en un SEP, en base a la curva de costo del SVC y el índice de estabilidad de voltaje L-índice. Además, separar al

SEP en varias áreas de control de voltaje, permite describir un proceso de análisis más fino y detallado a comparación de la perspectiva del SEP unificado. Sin embargo, a futuro se propone agregar al estudio una cantidad más significativa de dispositivos FACTS como STATCOM, UPFC, TCSC y TCVR para comprobar si es posible lograr una mejora sustancial del SEP a un precio razonable.

Un aspecto importante por resaltar es que la potencia de compensación empleada para los dispositivos SVC se la propuso de manera estándar según la curva de costos del SVC, con lo cual no se tiene la certeza que sea un parámetro óptimo para la compensación.

A futuro se puede trabajar en una formulación que permita hallar la parametrización óptima para los dispositivos SVC ubicados de forma oportuna, con esto se comprobaría si existe un ahorro sustancial de costos y una mejora en los perfiles de voltajes e índice de estabilidad de voltaje L-índice.

## 8. Referencias

- [1] K. J. Devi and N. Madhuri<sup>2</sup>, "Optimal Allocation of SVC for Enhancement of Voltage Stability Using Harmony Search Algorithm," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, pp. 6693–6701, 2015, doi: 10.15662/ijareeie.2015.0407122.
- [2] S. Rahimzadeh and M. T. Bina, "Looking for optimal number and placement of FACTS devices to manage the transmission congestion," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 437–446, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.019.
- [3] T. T. Lie and W. Deng, "Optimal flexible AC transmission systems (FACTS) devices allocation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 125–134, 1997, doi: 10.1016/S0142-0615(96)00036-1.
- [4] K. Z. Heetun, S. H. E. A. Aleem, and A. F. Zobaa, "Voltage stability analysis of grid-connected wind farms with FACTS: Static and dynamic analysis," *Energy Policy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1080/23317000.2015.1128369.
- [5] M. Gupta, V. Kumar, G. K. Banerjee, and N. K. Sharma, "Mitigating Congestion in a Power System and Role of FACTS Devices," *Adv. Electr. Eng.*, vol. 2017, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1155/2017/4862428.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] H. A. Devi and S. Padma, "Optimal Location and Parameter Setting of FACTS Devices based on WIPSO and ITLBO for Power System Security Enhancement under Single Contingency," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 6, pp. 177–185, 2017, doi: 2249 – 8958.
- [9] M. Nadeem *et al.*, "Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm," *Energies*, vol. 13, no. 3,

- pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/en13030753.
- [10] M. G. Hemeida, H. Rezk, and M. M. Hamada, “A comprehensive comparison of STATCOM versus SVC-based fuzzy controller for stability improvement of wind farm connected to multi-machine power system,” *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 935–951, 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0559-6.
- [11] M. Darabian and A. Jalilvand, “A power control strategy to improve power system stability in the presence of wind farms using FACTS devices and predictive control,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 85, pp. 50–66, 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.08.002.
- [12] M. Basiri-Kejani and E. Gholipour, “Two-level procedure based on HICAGA to determine optimal number, locations and operating points of SVCs in Isfahan-Khuzestan power system to maximise loadability and minimise losses, TVD and SVC installation cost,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 16, pp. 4158–4168, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0651.
- [13] B. Singh and G. Agrawal, “Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in Matlab/Simulink environments,” *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418–434, 2018, doi: 10.1016/j.egy.2018.07.004.
- [14] J. S. Huang, Z. H. Jiang, and M. Negnevitsky, “Loadability of power systems and optimal SVC placement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 167–174, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.064.
- [15] S. Dutta, S. Paul, and P. K. Roy, “Optimal allocation of SVC and TCSC using quasi-oppositional chemical reaction optimization for solving multi-objective ORPD problem,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 83–98, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2016.12.007.
- [16] P. Sharma and A. Kumar, “Thevenin’s equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 119–127, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.026.
- [17] B. Mahdad and K. Srairi, “Security optimal power flow considering loading margin stability using hybrid FFA-PS assisted with brainstorming rules,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 35, pp. 291–309, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.06.037.
- [18] S. R. Inkollu and V. R. Kota, “Optimal setting of FACTS devices for voltage stability improvement using PSO adaptive GSA hybrid algorithm,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 1166–1176, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.01.011.
- [19] S. Raj and B. Bhattacharyya, “Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 40, pp. 131–143, 2018, doi: 10.1016/j.swevo.2017.12.008.
- [20] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 764–778, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2210253.
- [21] K. Lavanya and P. Shobha Rani, “A Review on Optimal Location and Parameter Settings of FACTS Devices in Power Systems Era: Models, Methods,” *Int. J. Mod. Trends Sci. Technol.*, vol. 02, no. 11, pp. 2–112, 2016, [Online]. Available: <http://www.ijmtst.com>.

- [22] M. Baranwal and S. M. Salapaka, "Clustering of power networks: An information-theoretic perspective," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2017, pp. 3323–3328, doi: 10.23919/ACC.2017.7963460.
- [23] N. E. Gomez Ramirez, "Metodología de gestión de potencia reactiva para mejorar el margen de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia descentralizados," Universidad Nacional de Colombia Facultad, 2014.
- [24] J. Zhong, E. Nobile, A. Bose, and K. Bhattacharya, "Localized reactive power markets using the concept of voltage control areas," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1555–1561, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.831656.
- [25] S. Satsangi, A. Saini, and A. Saraswat, "Clustering based voltage control areas for localized reactive power management in deregulated power system," in *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, vol. 51, no. Seiscon, pp. 1348–1354.
- [26] 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.
- [27] A. goleman, daniel; boyatzis, Richard; Mckee, "Structural analysis of the electrical system: Application to secondary voltage control in France," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 1989, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [28] S. Do Nascimento and M. M. Gouvêa, "Voltage Stability Enhancement in Power Systems with Automatic Facts Device Allocation," *Energy Procedia*, vol. 107, no. September 2016, pp. 60–67, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.129.
- [29] J. Vivekananthan and R. Karthick, "Voltage Stability Improvement and Reduce Power System Losses By Bacterial Foraging Optimization Based Location of Facts Devic Es Voltage Stability Improvement and Reduce Power System Losses By Bacterial Foraging Optimization Based Location of Facts Device," *Int. Electr. Eng. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 1034–1040, 2013.
- [30] 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.
- [31] P. A. Achig, "Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica," Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [32] D. Pérez, "Ubicación Óptima de Dispositivos Facts En Redes Eléctricas De Transmisión Mediante Búsqueda Inteligente," Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [33] 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.
- [34] L. E. B. Guerrero, "Identificación de áreas de control en el sistema nacional interconectado.," Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [35] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the voltage stability of

a power system,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 346–354, 1986, doi: 10.1109/TPWRD.1986.4308013.

## 9. Matriz de estado del arte

Tabla 8. Matriz de estado del arte.

| ITEM | DATOS |  | TEMÁTICA |   |  |  | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA<br>FUNCIONES OBJETIVO |                                     |   |                                     |                                     | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA          |  |                                     |                                     | PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA |                          |                                     |                                     | SOLUCIÓN PROPUESTA       |                           |                                     |                          |                                     |  |  |                                     |                                     |                                     |  |                          |
|------|-------|--|----------|---|--|--|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|
|      | AÑO   | Título del artículo  | CITAS    | Estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión | Ubicación óptima de dispositivos FACTS | Parámetros óptimos de dispositivos FACTS | Planificación de flujos de potencia            | Minimización de pérdidas            | Maximización de la cargabilidad del sistema | Minimización de costos              | Derivaciones de voltaje             | Flujos de potencia                  | Maximización de capacidad de transmisión | Perfiles de voltaje                 | Potencia Reactiva                   | Potencia reactiva                    | Costo de instalación     | Cargabilidad de líneas              | Heurística                          | Algoritmos genéticos     | Algoritmo de corte mínimo | Metaheurísticas                     | Programación MINLP       | Número óptimo de dispositivos FACTS | Ubicación óptima de dispositivos FACTS | Parametrización óptima de dispositivos FACTS | Minimización de costos              | Minimización de pérdidas            | Mejora del perfil de voltaje        | Separación del SEP en áreas de control |                          |
| 1    | 2018  | Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm                       | 18       | <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 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 checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/>                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>               |                          |
| 2    | 2016  | Optimal setting of FACTS devices for voltage stability improvement using PSO adaptive GSA hybrid algorithm             | 35       | <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 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 type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>    | <input checked="" type="checkbox"/>          | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/> |
| 3    | 2015  | Security optimal power flow considering loading margin stability using hybrid FFA-PS assisted with brainstorming rules | 11       | <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 checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input 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"/> |
| 4    | 2016  | Thevenin's equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC           | 14       | <input checked="" type="checkbox"/>               | <input checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/>                 | <input type="checkbox"/>                       | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <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 checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>               | <input type="checkbox"/> |
| 5    | 2016  | Loadability enhancement with FACTS devices using gravitational search algorithm  | 4        | <input checked="" type="checkbox"/>               | <input checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/>                 | <input type="checkbox"/>                       | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>                    | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input 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 checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/>                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>               | <input type="checkbox"/> |
| 6    | 2016  | Comparison of BBO, WIPSO & PSO techniques for the optimal placement of FACTS   | 0        | <input checked="" type="checkbox"/>               | <input type="checkbox"/>               | <input type="checkbox"/>                 | <input type="checkbox"/>                       | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>         | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>                 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/>    | <input type="checkbox"/>                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>               |                          |







**Tabla 9.** Indicadores del estado del arte.

