

**MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN
SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE
SVC**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN
SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE
SVC**

**AUTOR:
ALEX MAURICIO GUASCAL REINOSO**

**DIRECTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito, junio 2020

Alex Mauricio Guascal Reinoso

MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Alex Mauricio Guascal Reinoso (Y'1992-M'06). Se graduó de Tecnólogo Eléctrico en el Instituto Tecnológico Superior De Tecnologías Apropriadas, Ecuador 2015. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Es miembro de la Comisión de Educación y Capacitación del Comité de Empresa EEQ (Empresa Eléctrica Quito). Actualmente se desempeña como Operador 1 de Centrales Eléctricas - Quito, Ecuador. Su trabajo se basa en la mejora del margen de estabilidad de tensión en sistemas de potencia basado en la ubicación óptima de SVC. aguascal@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981-M'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de doctor en ingeniería de la Universidad Politécnica Bolivariana – Medellín, Colombia. Es profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – Smart Grid Research Group). dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC*” realizado por Alex Mauricio Guascal Reinoso, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., junio de 2020

.....
Diego Francisco Carrión Galarza
C-C.: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Alex Mauricio Guascal Reinoso, con documento de identificación N° 1718137902, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC*”, 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., junio de 2020

.....
Alex Mauricio Guascal Reinoso:

C.C.: 1718137902

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Ubicación de dispositivos FACTS.....	6
2.1. Configuración de Dispositivo SVC.....	7
2.2. SVC (Compensador estática variable)	7
2.3. Función de costos del SVC.	8
3. Estabilidad de tensión.	8
3.1. Límite de estabilidad de tensión.....	8
4. Formulación del problema	9
4.1. Reconocimiento de zonas de control de tensión en el sistema (ACV)	9
4.2. Cálculo de distancia eléctrica en el SEP.	9
4.3. Descomposición de la matriz en coordenadas principales.....	11
4.4. Fuzzy C Means (FCM).....	11
4.5. K-Means	12
4.6. k-medoids.....	12
4.7. Agrupación del SEP en áreas de control.	13
4.8. Ubicación óptima de FACTS.	14
5. Análisis de resultados.....	15
5.1. Escenario 1.....	15
5.1.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 9 nodos.	16
5.1.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 9 nodos.....	16
5.1.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 9 nodos.	16
5.1.4 Finalidad de equilibrio reactivo.	17
5.2. Escenario 2.....	18
5.2.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 14 nodos.	18
5.2.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 14 nodos.....	19
5.2.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 14 nodos.	19
5.2.4 Finalidad de equilibrio reactivo.	19
5.3. Escenario 3.....	20
5.3.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 30 nodos.	20
5.3.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 30 nodos.....	22
5.3.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 30 nodos.	22
5.3.4 Finalidad de equilibrio reactivo.	22
6. Conclusiones	24

7. Trabajos futuros	24
8. Referencias	25
9. Matriz de estado del arte	28
10. Anexos	33
10.1 Anexo 1 Datos Técnicos del Sistema de 14 Barras IEEE.....	33
10.2 Anexo 1 Datos Técnicos del Sistema de 30 Barras IEEE.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elección de mejor ubicación de los equipos FACTS en la red de transmisión de energía.....	3
Figura 2. Configuración de dispositivo SVC.....	8
Figura 3. Costo de instalación de dispositivo SVC.....	8
Figura 4. Creación de ACV.....	10
Figura 5. Modelo IEEE de 9 barras.....	15
Figura 6. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 9 nodos.	16
Figura 7. Perfil de tensión sistema de 9 nodos IEEE.	16
Figura 8. Comportamiento angular de sistema IEEE 9 nodos.	17
Figura 9. Pérdida de potencia reactiva en sistema de prueba IEEE 9 nodos.	17
Figura 10. Potencia real en sistema de prueba IEEE 9 nodos.....	17
Figura 11. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 9 nodos.	17
Figura 12. Modelo IEEE de 14 barras.....	18
Figura 13. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 14 nodos.....	19
Figura 14. Magnitud de tensión sistema de prueba IEEE 14 nodos.	19
Figura 15. Resultado angular en sistema de prueba IEEE 14 nodos.....	19
Figura 16. Pérdida de potencia reactiva sistema en sistema de prueba IEEE 14 nodos. .	20
Figura 17. Potencia real en sistema de prueba IEEE 14 nodos.....	20
Figura 18. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 14 nodos.	20
Figura 19. Modelo IEEE de 30 barras.....	21
Figura 20. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 30 nodos.....	22
Figura 21. Magnitud de tensión sistema de prueba IEEE 30 nodos.	22
Figura 22. Resultado angular en sistema de prueba IEEE 30 nodos.....	22
Figura 23. Pérdida de potencia reactiva sistema de 30 nodos IEEE.	22
Figura 24. Potencia real en sistema de prueba IEEE 30 nodos.....	23
Figura 25. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 30 nodos.	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios propuestos.	15
Tabla 2. Separación de áreas escenario 1.....	16
Tabla 3. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 9 nodos IEEE.	18
Tabla 4. Separación de áreas escenario 2.....	19
Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 14 nodos IEEE.	21
Tabla 6. Separación de áreas escenario 3.....	21
Tabla 7. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 30 nodos IEEE.	23
Tabla 8. Matriz de estado del arte.	28
Tabla 9. Indicadores del estado del arte.	31
Tabla 10. Datos técnicos niveles de voltaje de nodos modelo IEEE 14 nodos.....	33
Tabla 11. Datos técnicos de nodos modelo IEEE 14 nodos.....	33
Tabla 12. Datos técnicos transformadores modelo IEEE 14 nodos.....	33
Tabla 13. Datos técnicos generadores modelo IEEE 14 nodos.....	33
Tabla 14. Datos técnicos de líneas del sistema IEEE 14 nodos.....	34
Tabla 15. Datos técnicos nodos del sistema IEEE 30 nodos	35
Tabla 16. Niveles de voltaje del sistema IEEE 30 nodos.....	35
Tabla 17. Datos técnicos transformadores del sistema IEEE 30 nodos.	36
Tabla 18. Datos técnicos generadores del sistema IEEE 30 nodos.....	36
Tabla 19. Datos técnicos de las líneas del sistema IEEE 30 nodos.....	36

MEJORA DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA BASADO EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS SVC

Resumen

La investigación en curso describe el procedimiento lógico para la mejora del margen de estabilidad de tensión en sistemas de potencia en base a la ubicación óptima de dispositivos SVC, para ello se divide al sistema en áreas de control analizando la matriz de sensibilidad, aplicando el criterio de distancia eléctrica y una técnica de aprendizaje no supervisado (K-Means), obteniendo áreas débilmente acopladas entre sí. La ubicación de SVC en todas las barras de las áreas resultantes implica un costo muy elevado, por lo que se plantea una ubicación óptima en base a la optimización del costo asociado a la instalación del dispositivo SVC en cada nodo del sistema, logrando obtener un redireccionamiento del flujo de potencia con el menor número de dispositivos posible. El método se adecua para los modelos demostrativos IEEE de 30, 14 y 9 barras con el fin de comprobar su efectividad, empleando el software GAMS y posteriormente DIgSILENT para la comparación de resultados. Se logra ubicar los dispositivos SVC de forma óptima en cada área de control, minimizando costos, mejorando perfiles de tensión, así como sus ángulos, la potencia real y la potencia reactiva se redistribuyen para perfeccionar el rango de estabilidad de los perfiles de tensión.

Palabras Clave: Margen de estabilidad, perfil de voltaje, distancia eléctrica, matriz de sensibilidad, ubicación óptima de SVC, estabilidad de voltaje

Abstract

The ongoing investigation describes the logical procedure to improve the voltage stability margin in power systems based on the optimal location of SVC devices, for which the system is divided into control areas, analyzing the sensitivity matrix, applying the criteria electric distance and an unsupervised learning technique (K-Means), obtaining areas that are weakly coupled to each other. The location of SVC in all the bars of the resulting areas implies a very high cost, which is why an optimal location is proposed based on the optimization of the cost associated with the installation of the SVC device at each node of the system, achieving a redirection of power flow with as few devices as possible. The method is suitable for IEEE 30, 14 and 9 bar demonstration models in order to verify its effectiveness, using the GAMS software and later DIgSILENT for the comparison of results. The SVC devices are optimally located in each control area, minimizing costs, improving voltage profiles, as well as their angles, real power and reactive power are redistributed to improve the stability range of the voltage profiles.

Keywords: Stability range, voltage profile, electrical distance, sensitivity matrix, optimal SVC location, voltage stability

1. Introducción

Hoy en día, debido al crecimiento normal de la demanda y la inclusión de autos eléctricos, los sistemas de energía eléctrica se expanden constantemente. Es correcto mencionar que el desarrollo del SEP se relaciona directamente con el crecimiento de un país, este desarrollo se refleja en el incremento gradual de la carga que debe ser cubierta por las distintas empresas abastecedoras de energía. La energía que proporcionan las empresas distribuidoras debe cumplir ciertos parámetros de calidad, como la frecuencia y voltaje [1].

En la actualidad los mercados de energía son cada vez más competitivos, lo que implica la necesidad de un SEP más robusto. Los participantes de los mercados de energía pretenden comprar energía entre áreas, para ello usan las redes de transmisión, estas tienen limitaciones técnicas, por lo que es necesario transferir cantidades óptimas de energía mediante el sistema de transmisión para así obtener más ingresos, a consecuencia de ello el SEP a menudo opera muy cerca de los márgenes de estabilidad y capacidad de carga, provocando así que las líneas se congestionen [2].

La operación y mantenimiento del SEP se vuelve cada vez más complejo, los problemas de estabilidad de pequeña y gran perturbación son de mayor atención ante la complejidad del SEP, como consecuencia se debe invertir una mayor cantidad de dinero, para la operación y el mantenimiento de este. La inestabilidad de voltaje es uno de los problemas más importantes dentro del SEP, puesto que el colapso de voltaje es la causa principal de apagones en la red. Al existir una demanda creciente el problema de sobrecarga afecta a las líneas de transmisión, estas no pueden hacer frente al crecimiento de la demanda

produciendo una inestabilidad de voltaje y convirtiéndolo a este en un problema de interés.

Las empresas de transporte de energía eléctrica brindan soluciones al problema de estabilidad de voltaje que por lo general son costosas y requieren mucho tiempo lo cual no es viable, por ejemplo, la construcción de nuevas líneas de transmisión. Por otro lado, existen varias medidas operativas que se pueden tomar en cuenta para solucionar el problema, entre las opciones se encuentran: cambios topológicos de la red mediante la conmutación de líneas y el control del flujo tanto activo como reactivo [3].

Para superar el problema de la inestabilidad de voltaje, existe un método alternativo, que incluye la introducción de sistemas de transmisión flexibles CA(FACTS) en el sistema de potencia, cuyas características permiten la regulación de energía real, energía reactiva y voltaje, gracias a sus características de capacidad de compensación continua y control rápido, de esta forma se reduce el flujo de las líneas sobrecargadas y se mantiene los voltajes de los nodos en niveles deseados. Los FACTS pueden mejorar los márgenes de estabilidad de pequeñas y grandes señales. El control de potencia de los FACTS ocurre en condiciones normales y de perturbación. Los FACTS ayudan a reducir los flujos en las líneas muy cargadas, reducir pérdidas de energía, mejorar la estabilidad y rendimiento del sistema sin necesidad de una reprogramación de generación o cambios de topología de la red [4] [5].

Los FACTS encajan en el enfoque alternativo, ya que poseen la habilidad de mejorar la eficiencia de las redes existentes, mediante la redistribución de los flujos de línea, de tal manera que no excedan los límites térmicos establecidos de la red. El resultado directo del uso de los FACTS será un

aumento de la capacidad de carga, mayor seguridad y una mejor estabilidad de los perfiles de tensión [6].

Los dispositivos FACTS funcionan suministrando o absorbiendo potencia reactiva, así como también reduciendo o aumentando tensión y controlando la impedancia en serie de la línea de transmisión o ángulo de fase. Pero los beneficios de los dispositivos FACTS varían según el tipo, el tamaño, el número de dispositivos y de la ubicación en el sistema de transmisión. Es por eso por lo que existen muchos artículos de investigación acerca del área de

localización de dichos dispositivos con el fin de mejorar la operación del SEP.

En [7] y [8] realiza una interfaz gráfica para la ubicación de los dispositivos FACTS usando la técnica de optimización mediante algoritmos genéticos (GA), lo hace de una manera completa, ya que aborda la posibilidad de colocar varios tipos de FACTS simultáneamente: UPFC, TCSC, TCVR, TCPST y SVC. El estudio encontró la mejor posición y valor de los equipos descritos, maximizando así la capacidad de carga del SEP. Menciona que los dispositivos UPFC son los más efectivos cuando desea maximizar la cargabilidad del SEP.

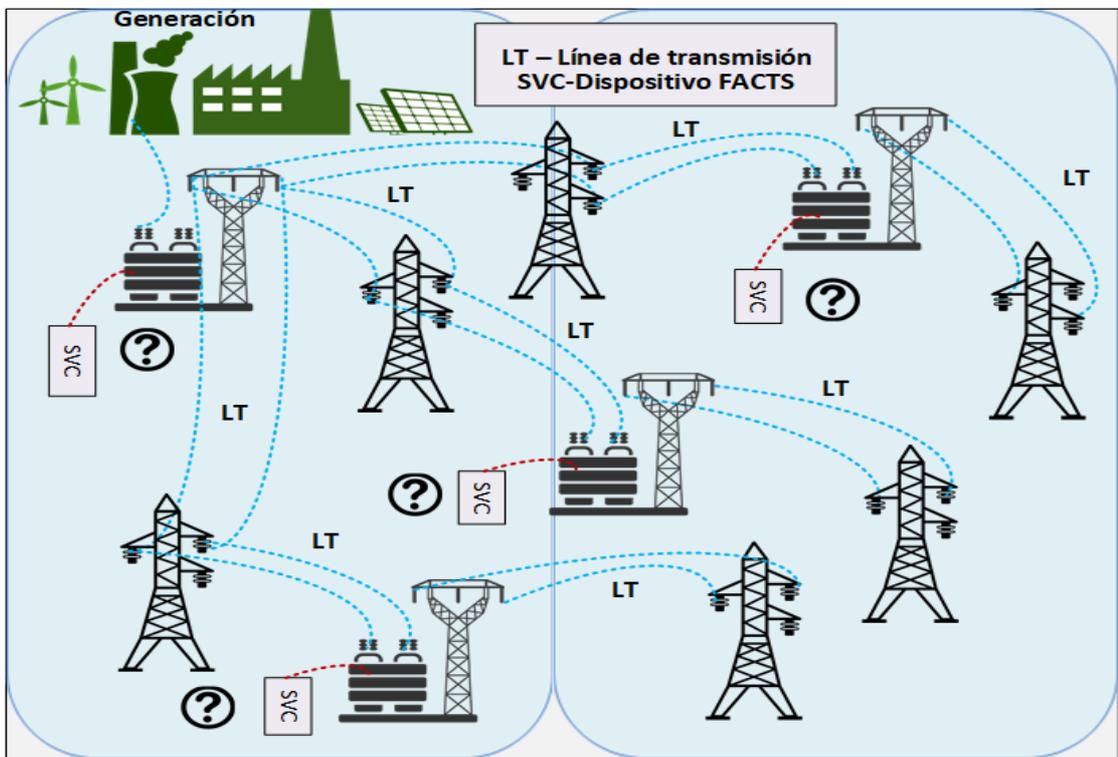


Figura 1. Elección de mejor ubicación de los dispositivos FACTS en redes de transmisión.

En [9] usa la metaheurística WOA (Algoritmo de optimización de ballenas), proporcionando la mejor ubicación para los equipos TCSC y SVC mediante un criterio específico. Para la ubicación de SVC emplea un criterio de colapso de tensión de proximidad y para la ubicación de TCSC analiza el flujo de potencia. Los criterios seleccionados permiten reducir pérdidas de transmisión,

pérdidas de potencia reactiva, el costo general del funcionamiento del sistema, conservando así la curva de tensión dentro del límite admisible.

En [10] se analiza una técnica novedosa de cómo conservar estable la tensión en los nodos del sistema de transmisión. La técnica incluye el uso de algoritmos basados en optimización de nube de partículas denominada (PSO) y búsqueda adaptativa por

gravedad (GSA) para ubicar dispositivos FACTS en el SEP. El GSA se usa para optimizar la constante gravitacional usada por el PSO, proporcionando una robustez mucho mayor al momento de ubicar los dispositivos FACTS, en base a rangos de tensión nodal y las pérdidas de energía de las líneas de transmisión. Como punto de partida se calcula un flujo de carga aplicando Newton Raphson con el fin de determinar todos los parámetros de importancia en el SEP. El autor demuestra que existe una ubicación óptima de dispositivos FACTS, así como una óptima parametrización, por lo tanto, existe una minimización de pérdidas y mejora en los perfiles de voltaje nodal.

En [11], se propone una estrategia para la planificación del sistema de energía, cuya finalidad es minimizar el costo del combustible, las pérdidas de potencia y los desvíos de tensión nodal, lo que contribuye de forma directa a mejorar el margen de estabilidad y el margen de carga del SEP. La técnica que aplica es un algoritmo de luciérnaga (FFA) juntamente con un algoritmo de búsqueda de patrones. El autor afirma que la unión de los dos algoritmos es altamente eficiente gracias a que los algoritmos se mejoran mutuamente con el ajuste dinámico de la solución subóptima, además permite identificar regiones débiles dentro del sistema, también permite identificar unidades críticas en términos de costo y seguridad de operación, lo que proporciona al experto la capacidad de decidir en qué lugar puede colocarse dispositivos FACTS para mejorar la estabilidad de voltaje nodal.

En [11] propone la mejor localización de FACTS (TCSC, SVC y STATCOM) observando el área estable de tensión (AVSR) del sistema. La AVSR consiste en aplicar un equivalente Thévenin en el nodo de

carga con la finalidad de dibujar la curva P-Q-V, la cual muestra el límite máximo y la amplitud mínima de voltaje, energía real y potencia reactiva en el plano tridimensional. El análisis permite verificar la línea más débil, para en él, uno de los dispositivos FACTS. El estudio demuestra una mejora en el área de estabilidad de tensión del SEP.

En [12] realiza una ubicación óptima de dispositivos FACTS aplicando la técnica denominada Reacción Química cuasi oposicional eficiente(QOCRO), misma que se emplea para resolver problemas multiobjetivo. El estudio se basa en la ubicación óptima de tres objetivos principales, el primero es minimizar las pérdidas de potencia real, el segundo es la minimización de la desviación de tensión nodal y la tercera es minimizar el índice de tensión de estabilidad. El estudio afirma que la respuesta y la velocidad de convergencia que brinda QOCRO para ubicar dispositivos FACTS, en específico SVC y TCS es superior a otros métodos multiobjetivo como los algoritmos genéticos.

En [13] J. Huang propone determinar la mejor posición de SVC's teniendo en cuenta la capacidad de carga del sistema de energía, para lograrlo realiza una evaluación de la estabilidad de tensión en el peor de los casos del margen de potencia reactiva, convirtiéndolo en un índice. Por otro lado, analiza el efecto de la potencia real en la carga para evaluar la estabilidad del voltaje. El problema lo formula como una maximización de la estabilidad de voltaje, sujeto a las condiciones de operación crítica del SEP

En [14] Bindeshwar Singh propone el mejor lugar del SVC mediante un OPF. El problema se formula como la minimización de pérdidas de energía real y potencia reactiva del sistema,

empleando el método de Newton Raphson (NRLF). El autor concluye que al ubicar los SVC en el sistema contribuye en gran medida a la minimización de pérdidas.

Todos los estudios descritos se enfocan en la ubicación de dispositivos FACTS, observando al SEP como uno solo sistema, es decir como una sola área, sin embargo, es necesario considerar que el SEP moderno se enfrenta a grandes retos, puesto que las interconexiones de elementos son cada vez más complejas. Existe una relación bastante significativa entre la estructura topológica y el rendimiento del SEP, lo que ha llevado a la creación de estrategias más eficientes para manejar y mitigar riesgos relacionados con el SEP [15]. Una de las estrategias consiste en la descomposición de un SEP grande en grupos más pequeños débilmente acoplados, lo cual facilita la gestión fácil y flexible de los sistemas de transmisión, para lo cual se requiere emplear clasificaciones interpretables de la red en cuestión.

Existen varios estudios que tratan sobre métodos para separar el SEP en áreas, en [16] Sarán Satsangri aplicó la herramienta de aprendizaje no supervisada k-Means para separar los SEP en varios campos de mando de tensión, así administrar energía reactiva para comparar con la técnica jerárquica convencional. El autor concluye que k-Means es igual de efectivo que el método convencional, para clasificar al SEP en áreas.

En [17] Jin Zhong presenta un diseño de mercado eléctrico competitivo tomando en cuenta servicios auxiliares de potencia reactiva, localizado en las zonas de control de voltajes individuales. Para ello emplea el concepto de distancia eléctrica para identificar las diferentes áreas de control dentro del SEP. El

modelo que propone se basa en subasta uniforme, mediante el modelo de flujo óptimo de potencia modificado. La finalidad es separar al SEP en áreas de control, para obtener precios uniformes para diversos componentes de los servicios de potencia reactiva. El autor afirma que los precios de los servicios de energía reactiva en las zonas de oferta más bajo siguen siendo inferiores aun en las zonas donde los precios de oferta son más altos, es decir que de acuerdo con los mercados localizados por las áreas de control de tensión son más razonables que un sistema desregulado en comparación con el precio uniforme para todo el sistema.

En [18] Nelson Gómez propuso un método de optimización multi objeto con énfasis en perfeccionar el rango de equilibrio de tensión. El método incluye la división del SEP en zonas de regulación de tensión, por lo tanto, se analiza la matriz de distancia eléctrica. El autor hace uso del algoritmo k-Means para hallar las áreas de control en base a la matriz de distancias eléctricas. Los grupos obtenidos del proceso de agrupación están sujetos a la optimización de objetivos múltiples para reducir las pérdidas e índice de estabilidad de tensión. El autor concluye que al dividir el SEP en áreas de control se puede reducir pérdidas de potencia activa.

En la presente investigación se propone la ubicación de dispositivos FACTS, bajo la división de zonas de supervisión de voltaje, misma que se realizará mediante el análisis de la matriz de distancias, con el fin de obtener grupos que se encuentren débilmente acoplados eléctricamente. En cada zona de supervisión se realizará la técnica para optimizar los costos relacionado con la instalación de equipos SVC para obtener la mejor ubicación.

La investigación en curso se divide en 5 secciones:

La sección 2 presenta la esencia del área de control de voltaje y la localización de los equipos FACTS en redes de transmisión. La sección 3 publica el planteamiento del problema. La sección 4 es el análisis de todos los resultados obtenidos del estudio. Por último, la sección 5 presenta las conclusiones obtenidas de esta investigación.

2. Ubicación de dispositivos FACTS.

La demanda eléctrica va en aumento sin cesar, por lo que las redes de transmisión deben mejorar de forma sustancial para mantener el ritmo de desarrollo y abastecer la demanda creciente. La construcción de nuevas líneas de transmisión no son una solución óptima para la continua expansión de SEP, puesto que conlleva un tiempo de construcción e instalación, además implica la inmovilización de capitales que podrían ser invertidos en otros proyectos eléctricos. Debido a este problema surge una nueva alternativa que permite usar de forma más eficiente el sistema de transmisión ya implementado, se trata de los dispositivos FACTS.

Los FACTS son técnicamente factibles porque pueden solucionar muchos problemas que presentan las líneas de transmisión, como mejorar la estabilidad de régimen permanente y transitoria de las líneas de gran longitud, puesto que las líneas de transmisión no pueden recibir potencia cerca de su capacidad nominal y límite térmico, debido a que los límites de estabilidad de tensión son significativamente bajos.

Cuando el SEP se encuentra en funcionamiento normal, existen flujos a través de todas las barras del sistema, los flujos presentes en cada

una de las barras son distintos, pero se encuentran dentro de los límites permitidos para que el SEP opere de forma adecuada y por lo tanto que exista estabilidad.

Al tener eventos en el SEP como aumento de demanda o aumento de generación las variables que proporcionan el flujo de potencia se alteran, de tal forma que pueden quedar fuera de los rangos normales de operación.

Los FACTS ayudan a perfeccionar el rango de tensión de cualquier nodo, ya sea que tenga un nivel elevado del voltaje o un nivel bajo de voltaje. La función de los dispositivos es inyectar o consumir potencia reactiva según se lo requiera, puesto que pueden ser configurados como reactores o como inductores. Si en una barra se presenta un voltaje que sobrepasa el límite admitido se conecta un reactor (SVR), por el contrario, si se presenta un voltaje que este por debajo del límite admitido se conecta un inductor (SVC).

La presencia de FACTS en los sistemas de potencia perfecciona el rango tensión, sin embargo, la instalación de cada uno de los dispositivos se asocia a un costo en dólares, este costo depende de la capacidad, por lo que la instalación de FACTS en todas las barras SEP, representaría un costo muy elevado. Es por este motivo que es necesario optimizar el proceso de ubicación de dispositivos FACTS. El proceso de optimización se lo realiza aprovechando la ventaja de acoplamiento eléctrico, con el fin de obtener diversas áreas de control que serán conformadas por aquellos nodos que tienen un alto acoplamiento entre sí, de esta forma se podrá ubicar dispositivos FACTS en cada área de control únicamente en barras específicas del sistema para perfeccionar los rangos de tensión de

cada área y por consecuencia del SEP en general.

El SEP es un sistema complejo que consta de muchas conexiones entre dispositivos, por lo que para realizar acciones de control es posible clusterización del SEP en zonas de control, siendo así más fácil y manejable las acciones sobre este. Determinar las áreas de control de voltaje (AVC) para cualquier SEP consiste en un proceso de identificación de grupos de nodos sin superposición. Los grupos que se forman son áreas de control de voltaje siempre y cuando estén suficientemente desacoplados eléctricamente de sus áreas vecinas. Cada AVC está conformado por aquellos nodos que poseen acoplamientos eléctricos significativos entre ellos. La idea principal es que el perfil de tensión de cada ACV puede ser controlada de forma efectiva por los dispositivos FACTS colocados específicamente en cada área, además que cada zona es muy poco influenciada por otra zona vecina.

Existen varios trabajos que proponen metodologías para la determinación de la distancia eléctrica. En [19] se evidencia un método sistemático de dos etapas para identificar los ACV del sistema eléctrico Frances. El método consiste en el cálculo de la distancia eléctrica entre los nodos del SEP, posterior a ello emplea un algoritmo de agrupamiento jerárquico para clasificar el SEP en áreas y decidir el territorio de cada ACV.

2.1. Configuración de Dispositivo SVC

Los dispositivos FACTS pueden ser configurados de diversas formas, sin embargo, configurarlo como inyección de potencia es bastante conveniente para analizar los efectos de los SVC dentro del SEP, puesto que este tipo de

configuración no destruye la matriz de impedancia ni de admitancia característica del SEP, por lo tanto, el cálculo se vuelve más sencillo [20].

Los dispositivos FACTS se pueden clasificar según el tipo de compensación, donde se tiene tres tipos: Controles shunt, controles serie y controles combinados. Dentro de los dispositivos shunt se encuentran los SVC y los STATCOM, en los dispositivos serie se encuentran TCSC, TCPST y TCVR. Por último, dentro de los dispositivos combinados se encuentra el UPFC.

Cada dispositivo mencionado es aplicable a cualquier SEP, dependiendo de las necesidades técnicas y el presupuesto disponible. La configuración de los dispositivos SVC se muestran en la Figura 2.

2.2. SVC (Compensador estática variable)

El SVC pertenece a los controladores shunt que puede operar como compensador capacitivo o como compensador reactivo según la necesidad. Este dispositivo se conecta en paralelo a los nodos del SEP, cuando está configurado en modo capacitivo el dispositivo absorberá potencia reactiva, en otras palabras, será efectivo en el momento que la curva de voltaje exceda el límite permitido. Por otro lado, si el dispositivo está configurado en modo inductivo proporcionara potencia reactiva al nodo conectado, esto será efectivo en el tiempo que la curva de voltaje se encuentre por debajo del límite permitido [21] [22] [23].

La configuración del SVC consta de una susceptancia en derivación con dos elementos de conmutación ideales en paralelo, el primero es una capacitancia para la compensación capacitiva y la segunda es una inductancia para la compensación inductiva. El SVC tiene una

característica importante, puesto que es el único dispositivo que se puede conectar a los nodos y a las líneas de transmisión.

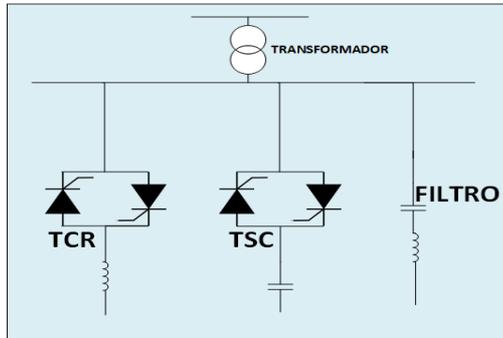


Figura 2. Configuración de dispositivo SVC.

Cuando se conecta el SVC a un nodo se configura como una potencia reactiva que se inyecta a la barra, misma que es descrita por la ecuación (1).

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

Por el contrario, si se conecta el dispositivo SVC en una línea de transmisión, la configuración se convierte en una derivación de la línea de transmisión, pero modificado en base a la susceptancia del SVC [24] [25] [26].

2.3. Función de costos del SVC.

La ubicación de un dispositivo SVC en el SEP implica un costo asociado a la potencia reactiva de operación, mismo que se describe en la ecuación (2).

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

En donde s es la potencia reactiva del SVC es en Mvars [27] [28] [29].

La inversión que representa la instalación de un dispositivo SVC en cualquier nodo del sistema se presenta en la figura 3, en donde es posible apreciar que para potencias bajas el costo de instalación del SVC es muy elevado, sin embargo, para potencias

iguales o mayores a 400 Mvars el costo del SVC es muy bajo. Por lo tanto, es factible colocar dispositivos SVC desde una potencia específica, puesto que si se considera potencias muy bajas representaría un costo muy elevado.

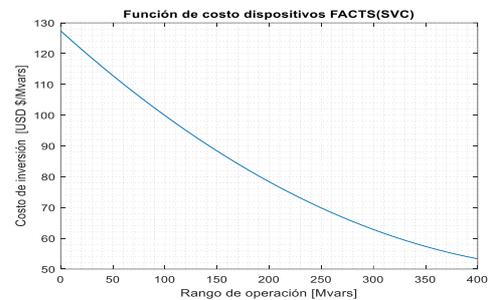


Figura 3. Costo de instalación de dispositivo SVC.

3. Estabilidad de tensión.

Se refiere a la habilidad del SEP para mantener los voltajes estables en cada nodo, después de ser sometido alguna contingencia. La estabilidad de voltaje se produce cuando el voltaje y la potencia reactiva se pueden controlar todo el tiempo. Cuando existe la incapacidad del SEP para suministrar la demanda, conduce a una inestabilidad de voltaje [30].

La inestabilidad de voltaje se puede presentar de forma rápida (corto plazo produciendo un colapso de voltaje durando pocos segundos) o de forma lenta (largo plazo produciendo un colapso de voltaje en un intervalo de minutos hasta horas). El sistema debe garantizar los rangos adecuados de tensión para la operación normal del sistema y después de una perturbación, por lo que es necesario un estudio de la estabilidad de tensión del SEP.

El estudio proporciona información importante como los flujo existentes en el SEP, límites de estabilidad de tensión, puntos críticos del sistema y la proximidad a la inestabilidad [18].

3.1. Límite de estabilidad de tensión.

El trabajo de la potencia reactiva es mantener el campo magnético

requerido para que los equipos electromagnéticos operen de forma normal, además de mantener la amplitud de voltaje en los nodos del sistema, siendo necesario garantizar el abastecimiento de potencia reactiva. Se utiliza un suministro de inyección de potencia reactiva fijado en cero y conectada en paralelo con el nodo de carga para medir la reserva de potencia reactiva [18] [4].

El equilibrio de potencia en el nodo de carga incluye la capacidad inyectada por la fuente de compensación, como se describe en las ecuaciones (3) y (4).

$$0 = P_{ci} - P_{Di} + \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin(\partial_i - \partial_j) \quad (3)$$

$$0 = Q_{ci} - Q_{Di} + \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \cos(\partial_i - \partial_j) + \frac{V_i^2}{X_{ij}} \quad (4)$$

En donde

- P_{ci} Es la potencia activa consumida por el nodo i.
- P_{Di} Es la potencia activa de reserva del nodo i.
- Q_{ci} Potencia Q utilizada por la barra i.
- Q_{Di} Es la potencia reactiva de reserva del nodo i.
- X_{ij} Resistencia aparente entre i y j.
- ∂_i Ángulo operativo de la barra i.

Al realizar una variación continua de la potencia reactiva se corregirán los flujos de carga.

4. Formulación del problema

Al surgir un evento en el SEP como crecimiento de la carga o disminución de esta, los perfiles de voltaje de las barras pueden verse afectados, quedando fuera de los límites permitidos y como consecuencia perdiendo estabilidad de voltaje. La solución a este tipo de problemas es instalando dispositivos FACTS en la

red de transmisión, estos dispositivos permiten mejorar el perfil de voltaje, además son muy útiles para aumentar la capacidad de carga del sistema entre otras cosas.

Para que los equipos FACTS estén en la mejor posición se aprovecha la distancia eléctrica entre las barras del SEP, para separarlo en áreas de control. Cada área de control se compone de aquellas barras que se encuentran fuertemente acopladas eléctricamente, de esta forma cada área de control tendrá muy poca influencia sobre un área vecina.

Una vez que se obtiene las áreas de control se realizará el análisis de potencia reactiva de cada área de control, con el fin de calcular los costos asociados a la instalación de los dispositivos FACTS en cada barra del SEP y minimizarlos mediante la ubicación óptima. Los datos de potencia reactiva y las curvas de voltaje se obtendrán mediante el software GAMS utilizando un flujo de potencia óptimo (OPF).

4.1. Reconocimiento de zonas de control de tensión en el sistema (ACV)

La identificación de ACV incluye la resolución de la matriz de distancia eléctrica, que debe descomponerse en tres coordenadas principales. Posterior a ello se aplicará el algoritmo de aprendizaje no supervisado k-Means para obtener la agrupación de las barras del sistema en clústeres. Para que existan un ACV es necesario que al menos se disponga de tres barras que posean conectividad entre ellas.

La figura 4 muestra el proceso para la creación de un ACV [31] [32] [33].

4.2. Cálculo de distancia eléctrica en el SEP.

El termino técnico distancia eléctrica ha sido empleado en diversos problemas relacionados con mercados

de energía y estabilidad de tensión[17]. La matriz de distancias eléctricas identifica circuitos débiles en el sistema, y los puntos críticos de colapso de voltaje, esta matriz involucra la sub matriz $\left[\frac{\partial Q}{\partial V}\right]$, la cual forma parte de la matriz jacobiana J del sistema. Al calcular la inversa de J se obtiene $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$ (arreglo de sensibilidad de tensión). Las características específicas para las matrices es que son reales y no simétricas.

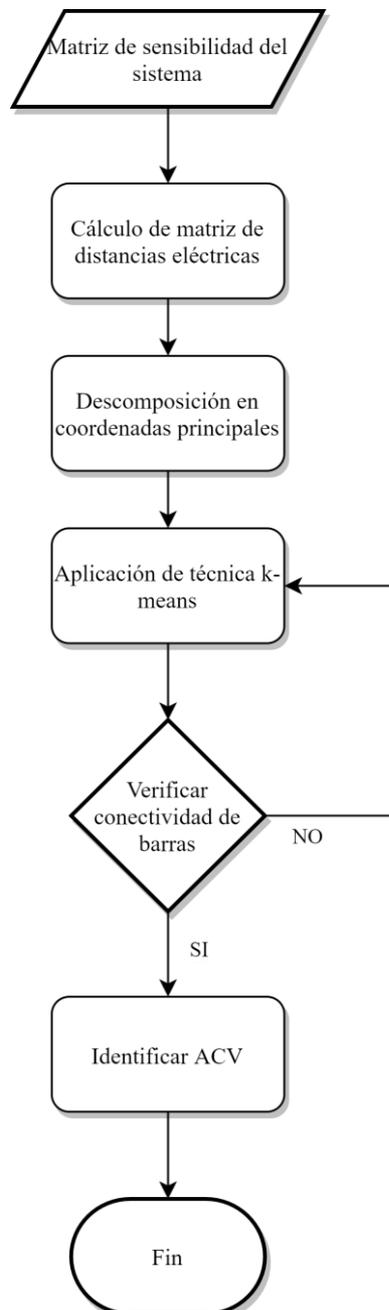


Figura 4. Creación de ACV.

Cuando se inyecta potencia reactiva en cualquier barra del sistema, los elementos de la matriz de sensibilidad $\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$ revela la difusión de los cambios de tensión en relación con un nodo específico del sistema.

El valor absoluto del acoplamiento entre nodos del sistema de potencia se puede cuantificar como la atenuación máxima de los mismos. La atenuación se puede obtener en función de la relación entre la matriz de sensibilidad y los términos diagonales de la misma matriz [30] [16] [17], como se describe en la ecuación (5).

$$\Delta V_i = \alpha_{ij} * \Delta V_j \quad (5)$$

En donde:

$$\alpha_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial v_i}{\partial Q_j}\right)}{\frac{\partial V_j}{\partial Q_j}} \quad (6)$$

Por lo general $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$, puesto que de esta forma se obtiene simetría en la distancia eléctrica.

Para cuantificar distancia entre dos nodos i y j se emplea la ecuación (7).

$$D_{ij} = D_{ji} = -\log(\alpha_{ij} * \alpha_{ji}) \quad (7)$$

En donde

D_{ij} distancia eléctrica positiva y simétrica entre i y j.

Para normalizar la distancia eléctrica se emplea la ecuación (8).

$$D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\max(D_{i1}, \dots, D_{iN})} \quad (8)$$

A continuación, se muestra el proceso para el cálculo de la distancia eléctrica en los nodos del SEP.

Cálculo de distancias eléctricas

Paso 1 Calcular la matriz Jacobiana J y obtener la sub-matriz J4

$$J_4 = \begin{bmatrix} \partial Q \\ \partial V \end{bmatrix}$$

Paso 2 Invertir la matriz J4.

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

Paso 3 Obtener la matriz de atenuaciones α_{ij} .

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

Paso 4 Calcular la matriz de distancias del sistema D_{ij} .

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

Paso 5 Normalizar la matriz de distancias eléctricas.

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

Terminar

El tamaño de la matriz resultante de la distancia normalizada D es $nd * nd$, donde nd la cantidad de nodos en el sistema.

4.3. Descomposición de la matriz en coordenadas principales.

Al obtener la matriz de distancia eléctrica normalizada, la matriz Qm se puede construir [30], utilizando la fórmula (9).

$$Qm = -\frac{1}{2} \left[I - \frac{L}{n} * 11' \right] * D \left[I - \frac{L}{n} * 11' \right] \quad (9)$$

En donde

Qm	Es la matriz de similitud.
I	Es la matriz identidad.
L	Es el vector unitario.
n	Es el número de elementos.

La matriz de similitud contiene la variabilidad entre elementos.

Con el empleo de los autovalores A_r y los auto vectores V_r de la matriz de similitud Qm, se calcula las coordenadas principales con el fin de generar una matriz de datos multidimensional como se describe en las ecuaciones (10) y (11) [30].

$$Y_r = V_r * A_r^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$X = Y_r = [Y_1 Y_2 \dots Y_Z] \quad (11)$$

En donde

Y_r Es la matriz de coordenadas principal, que contiene variables ortogonales que preservan la distancia real.

V_r son los auto vectores.

A_r son los auto valores.

La matriz resultante posee las dimensiones de $n_d \times X_3$, en donde n_d es el numero de barras del SEP.

4.4. Fuzzy C Means (FCM)

El algoritmo de aprendizaje no supervisado FCM es una variación del método k-Means, debido a que en muchas ocasiones un dato puede estar muy cerca a varios clústeres, de tal forma que resulta difícil agruparlo en un solo grupo. FCM es una técnica que utiliza particiones difusas para localizar clústeres, su característica especial es que cada dato puede pertenecer a un clúster con membresía, así los datos pueden relacionarse a múltiples agrupaciones con membresía entre 1 y 0.

A diferencia de k-means, Fuzzy C Means ejecuta una distribución sutil, donde la adición de todos los datos de dominio de cualquier dato a todos los clústeres será igual a 1 como se describe en la ecuación (12) [30] [16] [17].

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_j^{cl} u_{ij}^m \|x_i - c_j\| \quad (12)$$

En donde

J Es la función por minimizar.

u_{ij} Es el grado de pertenencia de dato i y el clúster j.

n Datos totales de entrada.

cl Cantidad de grupos.

m Valor correspondiente al grado de influencia de cada miembro del clúster (afecta al

resultado final).

d_{ij} Distancia entre el dato i y el centroide j del clúster c_j

La minimización de la función es posible si se cumple con las ecuaciones (13) (14) y (15).

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m * x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} \quad (13)$$

$$u_{ij} = \left[\sum_k \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$u_{ij} = \left[\left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_1\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} + \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_2\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} + \dots + \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_l\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1} \quad (15)$$

En donde

$\|x_i - c_j\|$ Es la distancia entre el dato i y el clúster j .
 $\|x_i - c_k\|$ Es la distancia entre el dato i y el centro k [30].

4.5. K-Means

K-Means es un método de clusterización que consiste en una agrupación de n datos en k clústeres. Un elemento forma parte de un clúster cuando la distancia media calculada es la menor encontrada con respecto al resto de los elementos. La distancia euclidiana es usada para el proceso de clusterización de k-Means [34].

El proceso de clusterización inicia con la determinación de los k clústeres, se asume el centro de cada uno para posteriormente determinar la distancia desde el centro de cada grupo hacia cada elemento, hasta agruparlos en base a la mínima distancia. El proceso es repetitivo hasta que no exista cambio alguno dentro de los grupos. [35] [36] A continuación, se presenta el pseudocódigo de k-Means.

k-Means	
Paso 1	Inicialización de los centros de cada clúster. Hacer para todo $i = 1, \dots, k$ $u_i = \text{valor random}$
Paso 2	Selección del centroide más cercano a cada elemento. Hacer para todo $i, j = 1, \dots, n$ $c_i = \{j: d(x_j u_i) \leq d(x_j u_i)\}$
Paso 3	Hallar los elementos de cada clúster. Hacer para todo i $u_i = \frac{1}{C_i} \sum_{j=1}^n x_j$
Paso 4	Verificar convergencia Si algoritmo converge Finalizar Caso contrario Ir al paso 2
Terminar	

La distancia euclidiana de cada elemento a ser agrupado se describe mediante la ecuación (16).

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n \sqrt{(z_{kj} - v_{ki})^2} \quad (16)$$

En donde

D_{ij} Es la distancia entre el elemento i y el centroide j .
 z_{kj} Es la matriz de elementos a ser clasificados.
 v_{ki} Es la matriz de centroides.

4.6. k-medoids

El algoritmo k-medoids es similar al algoritmo k-Means, son algoritmos particionales, parten de un conjunto de datos para formar clústeres, cuyo objetivo principal es minimizar la distancia entre los elementos de cada grupo y el centroide. La principal diferencia con el algoritmo k-Means es que k-medoids elige como referencia un objeto ya existente en el clúster al que le denomina medoid. El número de grupos es conocido a priori [34].

La metodología de Silhouette es una herramienta para determinar la cantidad k de grupos y permite validar e interpretar con coherencia los elementos de cada clúster hallado.

La agrupación por k -medoids es más robusto que k -meas debido a que reduce la adición parcial de distancias, a diferencia de k -meas la cual reduce el cuadrado de las distancias euclidianas. El proceso de k -medoids consiste en la creación de particiones alrededor de los medoids, como se describe en el proceso lógico a continuación. [35] [36]

k-medoids	
Paso 1	Inicialización de los centros de cada clúster. Hacer para todo $i = 1, \dots, k$ $u_i = \text{valor random}$
Paso 2	Selección del centroide más cercano a cada elemento. Hacer para todo $i, j = 1, \dots, n$ $c_i = \{j: d(x_j u_i) \leq d(x_j u_i)\}$
Paso 3	Hallar los elementos de cada clúster. Hacer para todo i $u_i = \frac{1}{C_i} \sum_{j=1}^n \varphi, x_j$
Paso 4	Verificar convergencia Si algoritmo converge Finalizar Caso contrario Ir al paso 2
Terminar	

El costo por minimizar se lo calcula mediante la distancia de Manhattan descrita en la ecuación (17).

$$cost(x, c) = \sum_{i=1}^d |x_i - c_i| \quad (17)$$

En donde

x Es el conjunto de datos a ser clasificados.

- c Es el medoid.
- d Agrupación del SEP en áreas de control.

4.7. Agrupación del SEP en áreas de control.

La agrupación en áreas consiste en elegir nodos centrales que tengan efecto en los perfiles de voltaje de su alrededor, si existe esa condición se puede decir que se creara un área.

Cálculo de distancias eléctricas	
Paso 1:	Calcular flujo óptimo de potencia
Paso 2:	Calcular la matriz de impedancias del SEP.
Paso 3:	Calcular la matriz de conectividad del SEP
Paso 4	Calcular la matriz Jacobiana J y obtener la sub-matriz J_4 $J_4 = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]$
Paso 5	Invertir la matriz J_4 . $B = \left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)^{-1} = J_4^{-1}$
Paso 6	Obtener la matriz de atenuaciones α_{ij} . $\alpha_{ij} = \frac{b_{ij}}{b_{jj}}$
Paso 7	Calcular la matriz de distancias del sistema D_{ij} . $D_{ij} = -\log(\alpha_{ij}, \alpha_{ji})$
Paso 8	Normalizar la matriz de distancias eléctricas. $D_{ij} = \frac{D_{ij}}{\max(D_{i1}, \dots, D_{iN})}$
Paso 9	Descomponer la matriz D_{ij} en coordenadas principales $Y_r = V_r * A_r^{\frac{1}{2}}$
Terminar	

Algo importante de la agrupación por áreas es que los integrantes de cada tienen un acople débil con integrantes de otra área vecina, es decir que no se verá afectado por ella. La base para la creación de áreas de

control es el cálculo de la matriz de distancias, para ello se presenta el procedimiento lógico para el cálculo de distancias eléctricas.

La matriz resultante serán los datos de entrada para optimización mediante FCM.

Con FCM se pretende analizar los datos para crear ACV, pero el algoritmo no toma en cuenta la configuración natural del SEP, por lo que los grupos resultantes del algoritmo no corresponden necesariamente a la red real del SEP. Por esta razón es necesario agregar un procedimiento adicional al algoritmo de aprendizaje no supervisado FCM.

El sistema de Goderya's determinara la conectividad entre nodos. [30].

El procedimiento consiste en el cálculo de la matriz de conectividad C_r , a partir de la matriz de incidencia A_r del SEP como se describe en la ecuación (18).

$$C_r = A_r^T * A_r \quad (18)$$

En donde

C_r Es la matriz de conectividad del SEP, siendo de dimensión $m \times n$, en donde m es el número de líneas y n es el número de barras correspondientes al área r

A_r matriz de incidencia.

Debido a que Q_r y R_r representa las coordenadas ortogonales de C_r , la matriz se reescribe como la ecuación (19).

$$C_r = Q_r * R_r \quad (19)$$

Analizando la matriz R_r se define el vector columna de comprobación de conectividad como se presenta en la ecuación (20).

$$C_{i \ y}^{i=1...n} = \sum_{j=j+1}^n R_r^{(i,j)} \quad (20)$$

En donde

C_v es el vector $n \times 1$ de comprobación de conectividad.

i Son las filas de la matriz R_r

$R_r^{(i,j)}$ Son los elementos (i, j) de la matriz R_r .

La cantidad de elementos nulos de C_v representa las áreas que se forman por falta de conectividad. Una vez obtenidos los resultados del procedimiento se aplica el algoritmo FCM para finalmente obtener las áreas de control.

4.8. Ubicación óptima de FACTS.

Cuando se tiene varias áreas de control dentro del SEP, sería posible instalar dispositivos FACTS en cada barra de cada área, pero eso representaría un costo bastante elevado. Por esta razón se analiza los flujos de potencia reactiva de cada ACV formado con el fin de colocar dispositivos FACTS únicamente en barras representativas lo que reduciría considerablemente el costo asociado a la instalación.

La problemática se plantea como una optimización, en donde el objetivo es minimizar el costo asociado a la instalación de dispositivos FACTS con el fin de reducir dispositivos instalados en cada ACV, para ello es necesario hacer uso de la conexión entre los nodos. El resultado de la optimización será la mejora del perfil del voltaje del SEP.

Para ello se considera los siguientes parámetros:

Z_i Es el costo i asociado de colocación del equipo FACT.

X_i Es la variable de elección binaria, para la ubicación de FACTS en cada una de las

barras de cada ACV.

$f(x)$ Es el conjunto de restricciones de maximización.

$g(x)$ Es la agrupación de condicionamientos de minimización sujetas a la función objetivo.

$\hat{1}$ Conjunto de entradas con valor 1

El planteamiento del problema se lo es descrito mediante:

$$\min \sum_{i=1}^N Z_i * x_i \quad (21)$$

Sujeto a

$$f(x) \geq \hat{1} \quad (22)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (23)$$

La ecuación (21) representa la función objetivo que trata de minimizar el costo asociado a la instalación de FACTS en las barras del SEP, considerando la potencia reactiva de cada ACV. La ecuación (22) representa las variables binarias de selección, es decir si un FACT se instala en la barra i la función $f(x)$ adopta un valor de 1, caso contrario adoptara un valor de 0. Las restricciones se obtienen de la matriz de conectividad de cada ACV formado en el SEP.

La ecuación (23) adoptara un valor de 0 si en la barra i existe un generador.

El problema expresado es una formulación NP-Complete, por lo que para la resolución se empleara un sistema de modelación algebraica general (GAMS).

5. Análisis de resultados.

La presentación de resultados se describe con 3 escenarios correspondiente a los sistemas del de prueba IEEE de 9,30 y 14 barras respectivamente y 5 parámetros

diferentes, en donde se mantiene los valores iniciales mientras se varia la potencia asociada al dispositivo SVC como describe la Tabla 1.

Tabla 1. Estudios propuestos.

Caso	Q(Mvar)
1	2.5
2	5
3	15
4	20
5	25

El hardware disponible para la solución de los escenarios fue laptop Dell G7. El software empleado para la resolución de flujos óptimos de potencia fue GAMS versión 25.1.3 con solver K-nitro, MATLAB 2019b para la división del SEP en ACV y DIgSilent V.15.1.7 para la comprobación de resultados.

5.1. Escenario 1.

El modelo elegido para el análisis corresponde al modelo de prueba IEEE de 9 barras, mismo que consta de 3 generadores, 12 nodos, 6 vías de transmisión, 3 cargas constantes y 6 transformadores, como se muestra en la Figura 5.

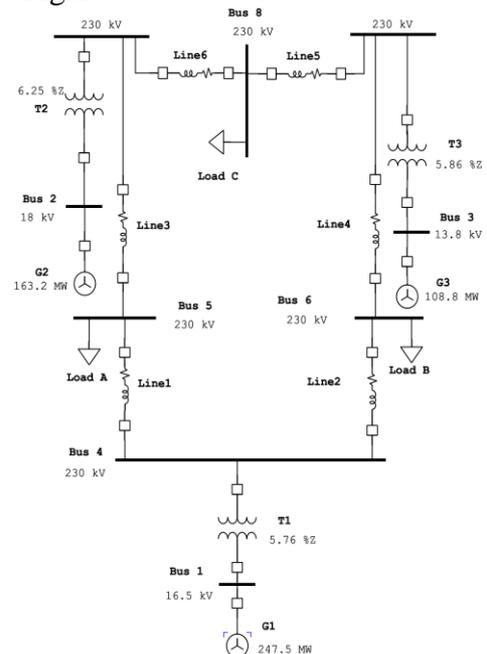


Figura 5. Modelo IEEE de 9 barras.

Los parámetros para analizar son: magnitud de tensión, característica angular, pérdida energía, flujo de energía a través de las líneas, costo de OPF y valor de instalación del equipo SVC, cada uno de los parámetros en mención serán descritos antes y después de la ubicación de los dispositivos SVC para cada uno de los escenarios descritos anteriormente en la Tabla 1.

5.1.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 9 nodos.

La Figura 6 muestra el resultado de la creación de áreas de control para el caso de 9 nodos. Se observa que se crearon 2 áreas de control, la primera consta de los nodos 1,4,5 y 6, con centroide en el nodo 4, mientras que la segunda consta de los nodos 2,3,7,8 y 9, con centroide en el nodo 8. La mejor posición del equipo SVC del área 1 es en el nodo 4, mientras que para el área 2 se ubica en los nodos 7 y 9 como se resume en la Tabla 2.

5.1.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 9 nodos.

La Figura 7 expone la compensación de energía reactiva inicial y posterior a la inyección de potencia.

Tabla 2. Separación de áreas escenario 1.

Área	Nodo	Ubicación SVC
1	1	
	4	X
	5	
	6	
2	2	
	3	
	7	X
	8	
	9	X

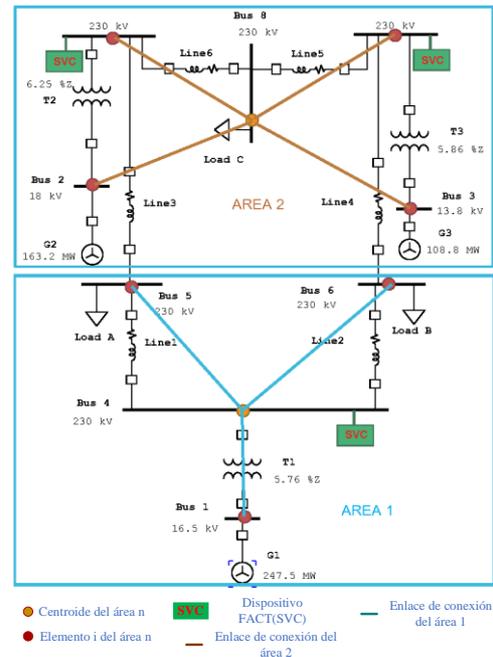


Figura 6. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 9 nodos.

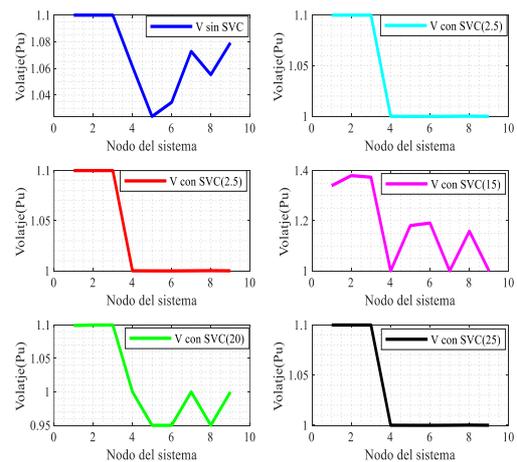


Figura 7. Perfil de tensión sistema de 9 nodos IEEE.

5.1.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 9 nodos.

El comportamiento angular que presenta el SEP ante la implementación de un SVC muestra que el ángulo correspondiente al perfil de tensión se estabiliza, contribuyendo a que el SEP se mantenga sincronizado y en equilibrio como se presenta en la Figura 8.

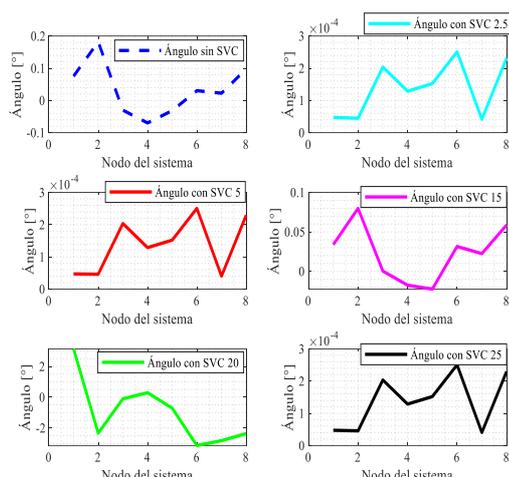


Figura 8. Comportamiento angular de sistema IEEE 9 nodos.

5.1.4 Finalidad de equilibrio reactivo.

Instalar equipos SVC en ciertas barras del sistema reduce las pérdidas de potencia reactiva a comparación del sistema sin la presencia de dispositivos SVC como se presenta en la Figura 9.

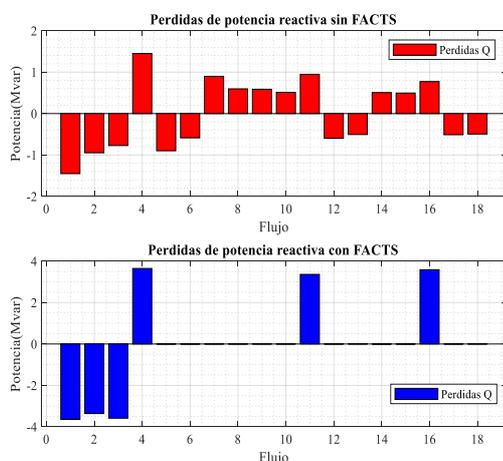


Figura 9. Perdida de potencia reactiva en sistema de prueba IEEE 9 nodos.

Los flujos de potencia real y aparente se muestran en las Figura 10 y Figura 11 respectivamente.

La Figura 10 muestra que en presencia de equipos SVC, la potencia real que fluye a través del nodo se redistribuirá, lo que indica que es posible obtener más potencia a través de la línea de transmisión.

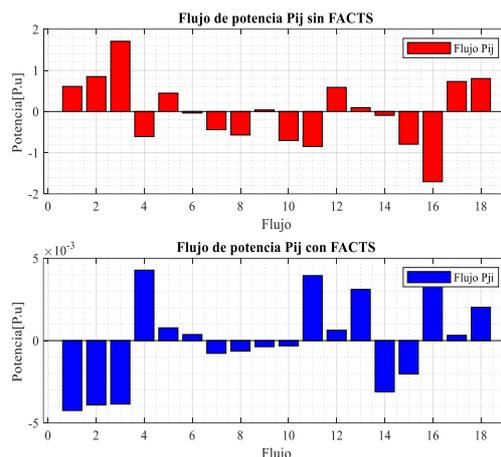


Figura 10. Potencia real en sistema de prueba IEEE 9 nodos.

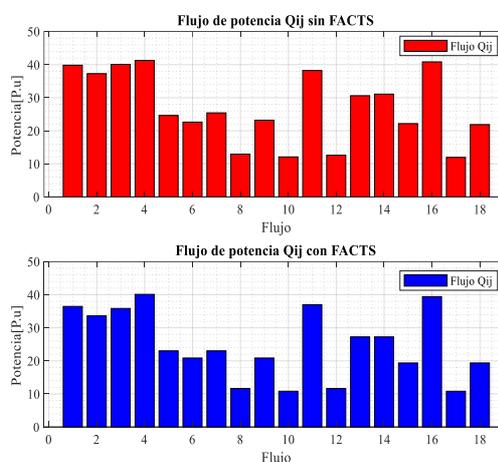


Figura 11. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 9 nodos.

La Figura 11 muestra que el flujo de potencia aparente a través de los nodos se reduce ante la presencia de equipos SVC, lo cual indica que la compensación que proporciona el dispositivo mejora el perfil de tensión de manera significativa cada área de control del SEP.

La Tabla 3 enumera los resultados obtenidos para cada caso de estudio, se observa que en todos los escenarios se obtiene una compensación significativa del perfil de tensión en los nodos 4,7,8 debido a que en dichos nodos se ubicaron los dispositivos SVC, además los nodos que forman parte de cada grupo presentan una mejora significativa de tensión puesto que poseen un valor de 1 p.u.

Tabla 3. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 9 nodos IEEE.

Nodo	GAMS						PowerFactory					
	Sin SVC	Con SVC					Sin SVC	Con SVC				
Tensión		2.5	5	15	20	25		2.5	5	15	20	25
1	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040
2	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
3	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.016	1.014	1.013	1.006	1.003	0.999
4	1.061	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.032	1.031	1.029	1.023	1.020	1.017
5	1.023	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
6	1.034	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.013	1.011	1.009	1.003	1.000	0.996
7	1.072	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.026	1.024	1.023	1.016	1.013	1.010
8	1.055	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.994	0.992	0.985	0.982	0.979
9	1.079	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.026	1.024	1.022	1.016	1.013	1.009

5.2. Escenario 2.

El modelo elegido para el análisis corresponde al modelo de prueba IEEE de 14 barras, mismo que consta de 5 generadores, 12 nodos, 17 vías de transmisión, 8 cargas constantes y 8 transformadores, como se muestra en la Figura 12 .

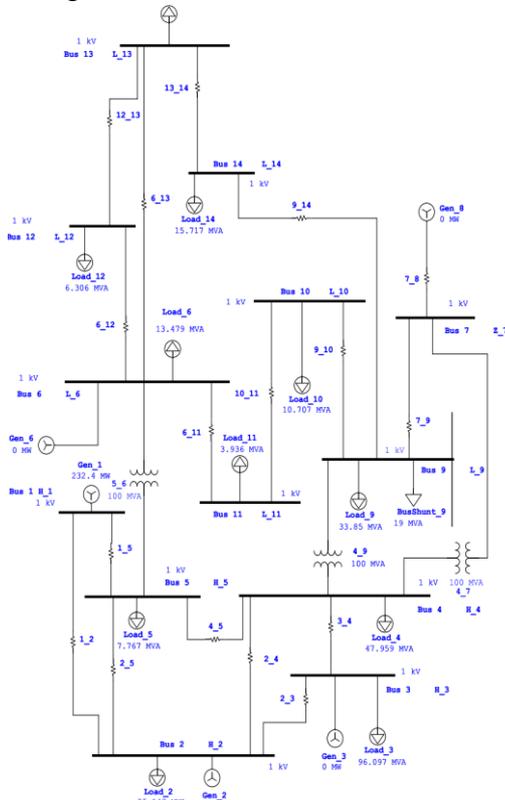


Figura 12. Modelo IEEE de 14 barras.

Los parámetros para analizar son: magnitud de tensión, característica angular, pérdida de energía, flujo de energía a través de las líneas, costo de OPF y valor de instalación del equipo SVC, cada uno de los parámetros en mención serán descritos antes y después de la ubicación de los dispositivos SVC para cada uno de los escenarios descritos anteriormente en la Tabla 1.

5.2.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

La Figura 13 muestra el resultado de la creación de áreas de control para el caso de 14 nodos. Se observa que se crearon 3 áreas de control, la primera consta de los nodos 1,2,3,4,5,7 y 8, con centroide en el nodo 3, la segunda consta de los nodos 6,9,10 y 11, con centroide en el nodo 11, mientras que la tercera consta de los nodos 12,13 y 14 con centroide en el nodo 14. La mejor posición del equipo SVC del área 1 es en los nodos 4,5 y 7, en el área 2 se ubica en los nodos 9 y 11, por último, en el área 3 se ubica en el nodo 13 como se resume en la Tabla 4.

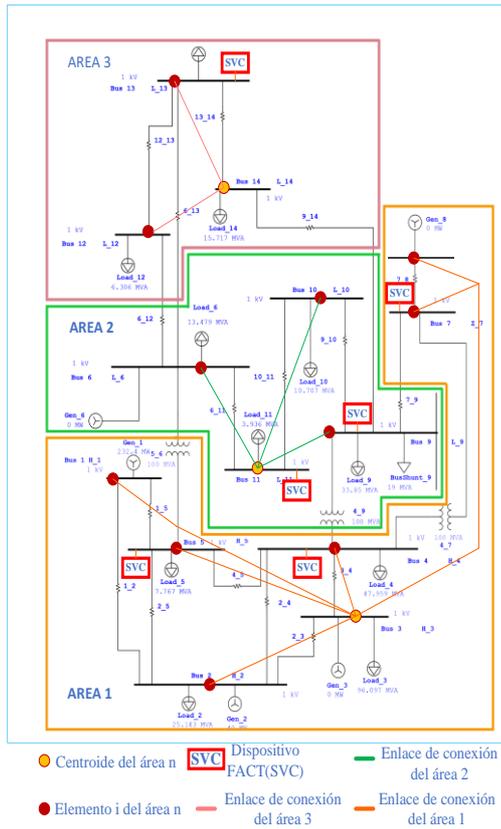


Figura 13. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

Tabla 4. Separación de áreas escenario 2.

Área	Nodo	Ubicación SVC
1	1	
	2	
	3	
	4	X
	5	X
	7	X
2	6	
	9	X
	10	
	11	X
3	12	
	13	X
	14	

5.2.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

La Figura 14 expone la compensación de energía reactiva inicial y posterior a la inyección de potencia.

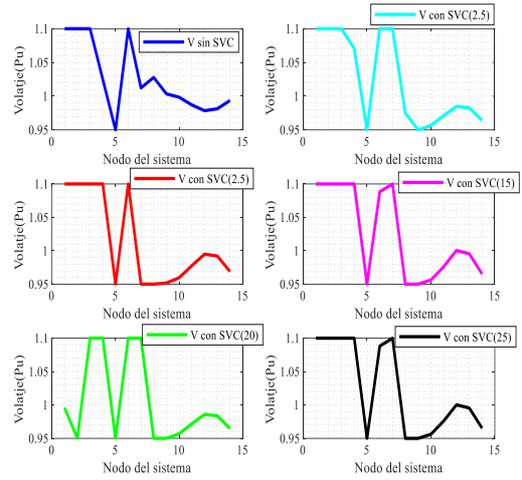


Figura 14. Magnitud de tensión sistema de prueba IEEE 14 nodos.

5.2.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 14 nodos.

El comportamiento angular que presenta el SEP ante la implementación de un SVC muestra que el ángulo correspondiente al perfil de tensión se estabiliza, contribuyendo a que el SEP se mantenga sincronizado y en equilibrio, la Figura 15 expone lo descrito.

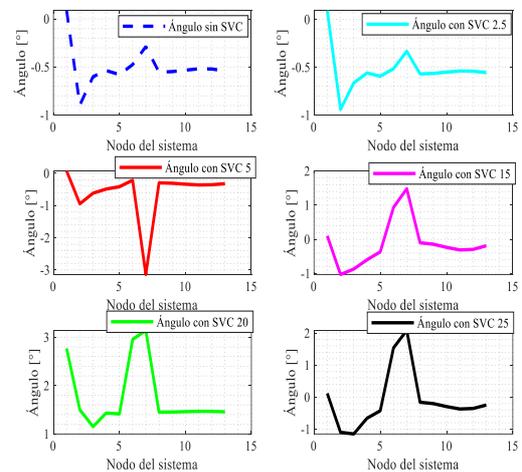


Figura 15. Resultado angular en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

5.2.4 Finalidad de equilibrio reactivo.

Instalar equipos SVC en ciertas barras del sistema reduce las pérdidas de potencia reactiva a comparación del sistema sin la presencia de dispositivos SVC como se expone en la Figura 16.

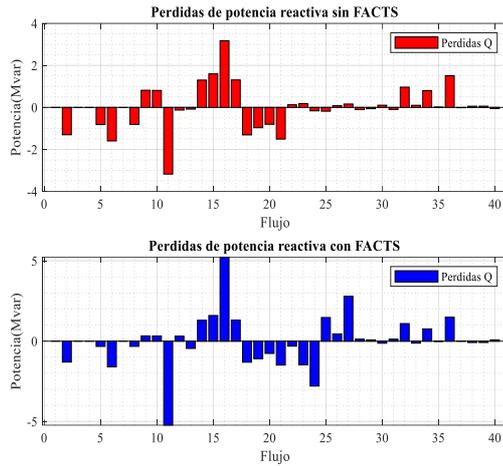


Figura 16. Perdida de potencia reactiva sistema en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

Los flujos de potencia real y aparente se muestran en las Figura 17 y Figura 18 respectivamente.

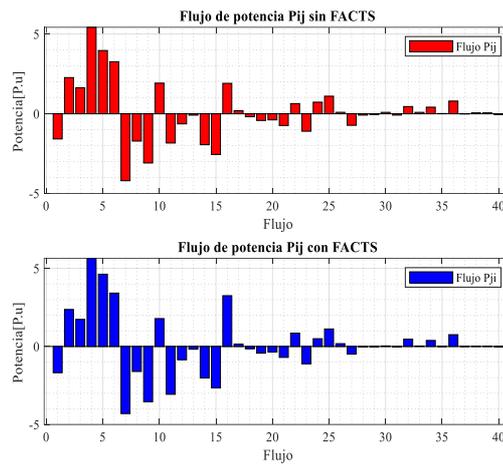


Figura 17. Potencia real en sistema de prueba IEEE 14 nodos.

La Figura 17 muestra que en presencia de equipos SVC, la potencia activa que fluye a través del nodo se redistribuirá, lo que indica que es posible obtener más potencia a través de la línea de transmisión.

En la Tabla 5 enumera los resultados obtenidos para cada caso de estudio, se observa que en todos los escenarios se obtiene una compensación significativa del perfil de tensión en todos los nodos, puesto que presentan valores cercanos a 1 p.u.

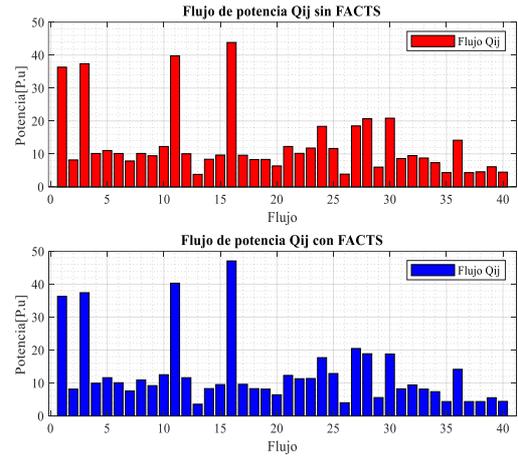


Figura 18. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 14 nodos.

La Figura 18 muestra que el flujo de energía aparente a través de los nodos se reduce ante la presencia de equipos SVC, lo cual indica que la compensación que proporciona el dispositivo mejora el perfil de tensión de manera significativa cada área de control del SEP.

5.3. Escenario 3.

El modelo elegido para el análisis corresponde al modelo de prueba IEEE de 30 barras, mismo que consta de 6 generadores, 36 nodos, 37 vías de transmisión, 21 cargas constantes y 10 transformadores, como se muestra en la Figura 19.

Los parámetros para analizar son: magnitud de tensión, característica angular, pérdida de energía, flujo de energía a través de las líneas, costo de OPF y valor de instalación del equipo SVC, cada uno de los parámetros en mención serán descritos antes y después de la ubicación de los dispositivos SVC para cada uno de los escenarios descritos anteriormente en la Tabla 1.

5.3.1 Creación de ACV y mejor localización para SVC en sistema de prueba IEEE 30 nodos.

La Figura 20 muestra el resultado de la creación de áreas de control para el caso de 30 nodos. Se observa que se

Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 14 nodos IEEE.

Nodo	GAMS						PowerFactory					
	Sin SVC	Con SVC					Sin SVC	Con SVC				
Tensión		2.5	5	15	20	25		2.5	5	15	20	25
1	1.100	1.100	1.100	1.100	0.996	1.100	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
2	1.100	1.100	1.100	1.100	0.950	1.100	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045
3	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
4	1.024	1.070	1.100	1.100	1.100	1.100	1.019	1.016	1.013	1.001	0.996	0.990
5	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	1.020	1.018	1.015	1.005	1.001	0.996
6	1.100	1.100	1.100	1.088	1.100	1.088	1.070	1.070	1.070	1.070	1.070	1.070
7	1.012	1.100	0.950	1.100	1.100	1.100	1.062	1.057	1.051	1.031	1.021	1.011
8	1.027	0.974	0.950	0.950	0.950	0.950	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090
9	1.003	0.950	0.952	0.950	0.950	0.950	1.056	1.049	1.043	1.016	1.003	0.990
10	0.998	0.956	0.960	0.956	0.957	0.956	1.051	1.045	1.038	1.012	1.000	0.988
11	0.986	0.971	0.978	0.976	0.972	0.976	1.057	1.051	1.045	1.022	1.011	1.000
12	0.978	0.984	0.995	1.000	0.986	1.000	1.055	1.053	1.052	1.045	1.041	1.038
13	0.981	0.982	0.992	0.996	0.984	0.995	1.050	1.047	1.044	1.031	1.024	1.018
14	0.993	0.964	0.969	0.965	0.965	0.965	1.036	1.030	1.025	1.004	0.994	0.984

crearon 3 áreas de control, la primera consta de los nodos 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 y 28, con centroide en el nodo 6, la segunda consta de los nodos 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24, con centroide en el nodo 18, por último, el área 3 consta de los nodos 25, 26, 27, 29 y 30, con centroide en el nodo 27. La mejor posición del equipo SVC del área 1 es en los nodos 3, 4, 7, 9, 28, para el área 2 se ubica en los nodos 12, 17, 19, 21, 24, mientras que para el área 3 se ubica en los nodos 26 y 30 como se resume en la Tabla 6.

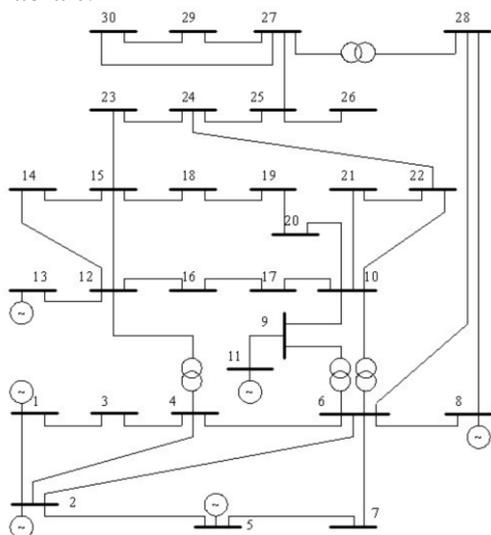


Figura 19. Modelo IEEE de 30 barras.

Tabla 6. Separación de áreas escenario 3.

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

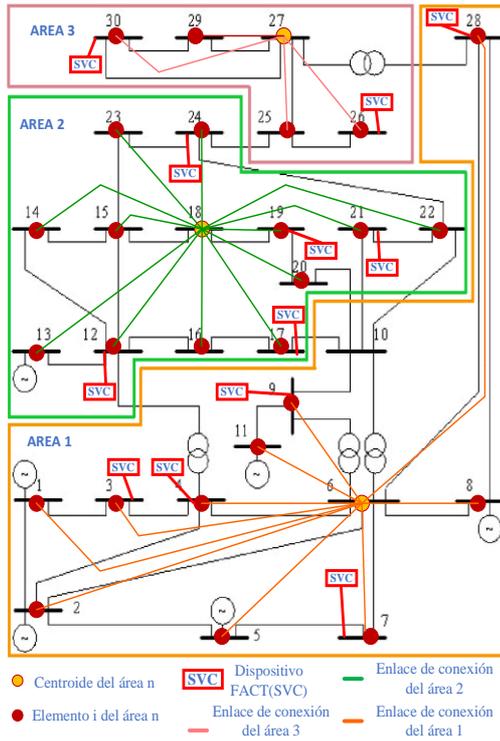


Figura 20. Áreas de control y mejor localización de equipo SVC en sistema de prueba IEEE 30 nodos.

5.3.2 Característica de tensión en sistema de prueba IEEE 30 nodos.

La Figura 21 expone la compensación de energía reactiva inicial y posterior a la inyección de potencia.

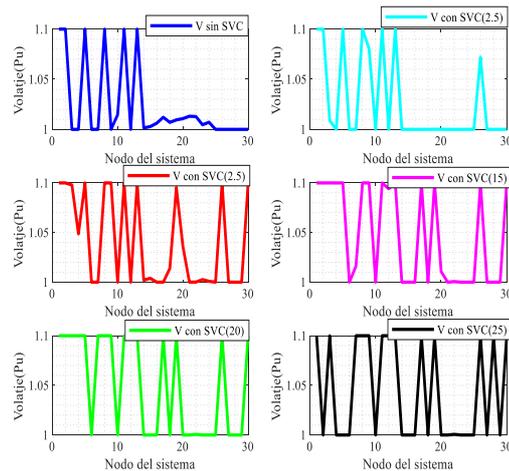


Figura 21. Magnitud de tensión sistema de prueba IEEE 30 nodos.

5.3.3 Comportamiento angular en el modelo IEEE de 30 nodos.

El comportamiento angular que presenta el SEP ante la

implementación de un SVC muestra que el ángulo correspondiente al perfil de tensión se estabiliza, contribuyendo a que el SEP se mantenga sincronizado y en equilibrio, la Figura 22 expone lo descrito.

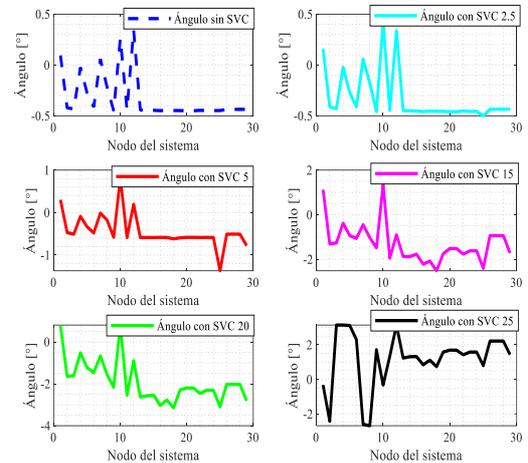


Figura 22. Resultado angular en sistema de prueba IEEE 30 nodos

5.3.4 Finalidad de equilibrio reactivo.

La instalación de dispositivos SVC en ciertas barras del sistema ocasiona que las pérdidas de potencia reactiva disminuyan a comparación del sistema sin la presencia de dispositivos SVC, redistribuyéndose de manera simétrica a lo largo de todo el SEP y expuesto en la Figura 23.

Los flujos de potencia real y aparente se muestran en las Figura 24 y Figura 25 respectivamente.

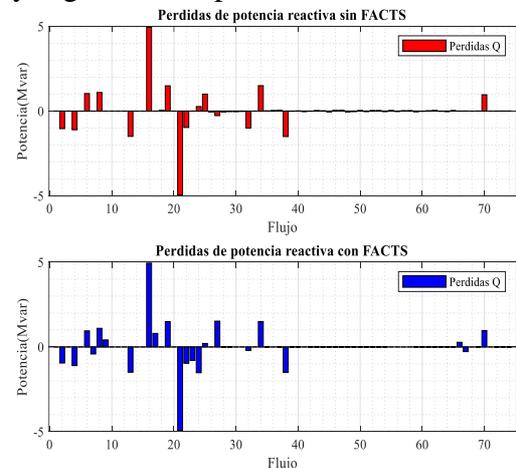


Figura 23. Pérdida de potencia reactiva sistema de 30 nodos IEEE.

Tabla 7. Comparación de resultados obtenidos entre GAMS y PowerFactory, sistema 30 nodos IEEE.

Nodo	GAMS					PowerFactory						
	Sin SVC	Con SVC				Sin SVC	Con SVC					
Tensión		2.5	5	15	20	25		2.5	5	15	20	25
1	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
2	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.000	1.000	0.986	0.972	0.921	0.898	0.876
3	1.000	1.009	1.098	1.100	1.100	1.100	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
4	1.000	1.000	1.049	1.100	1.100	1.000	1.025	1.017	1.009	0.979	0.965	0.952
5	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.000	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.008	0.997	0.988	0.951	0.934	0.918
7	1.000	1.000	1.000	1.016	1.100	1.100	1.001	0.989	0.978	0.936	0.916	0.898
8	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.006	0.995	0.983	0.941	0.922	0.903
9	1.000	1.080	1.100	1.100	1.100	1.100	0.996	0.982	0.967	0.914	0.889	0.866
10	1.015	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.988	0.973	0.958	0.904	0.879	0.855
11	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	0.983	0.966	0.950	0.888	0.860	0.834
12	1.000	1.000	1.000	1.094	1.100	1.100	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045
13	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	0.987	0.970	0.954	0.896	0.869	0.843
14	1.001	1.000	1.002	1.000	1.000	1.000	0.986	0.970	0.954	0.895	0.868	0.843
15	1.003	1.000	1.004	1.000	1.000	1.000	0.987	0.970	0.954	0.895	0.868	0.843
16	1.006	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.985	0.970	0.955	0.900	0.875	0.852
17	1.012	1.000	1.000	1.100	1.100	1.100	0.973	0.953	0.933	0.863	0.831	0.801
18	1.007	1.000	1.014	1.000	1.000	1.000	0.973	0.949	0.926	0.845	0.809	0.776
19	1.009	1.000	1.095	1.100	1.100	1.100	0.954	0.921	0.890	0.778	0.729	0.685
20	1.011	1.000	1.036	1.011	1.000	1.000	0.981	0.961	0.941	0.870	0.839	0.810
21	1.013	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.004	0.999	0.993	0.973	0.964	0.955
22	1.013	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001	0.961	0.935	0.911	0.825	0.788	0.753
23	1.005	1.000	1.003	1.000	1.000	1.000	1.022	1.018	1.013	0.998	0.990	0.982
24	1.007	1.000	1.001	1.000	1.000	1.000	0.949	0.919	0.890	0.789	0.745	0.704
25	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.014	1.010	1.006	0.990	0.982	0.975
26	1.000	1.072	1.100	1.100	1.100	1.100	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.009	1.006	1.003	0.990	0.984	0.978
28	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.100	1.001	0.998	0.994	0.982	0.976	0.971
29	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010
30	1.000	1.000	1.100	1.100	1.100	1.100	1.023	1.014	1.005	0.972	0.956	0.942

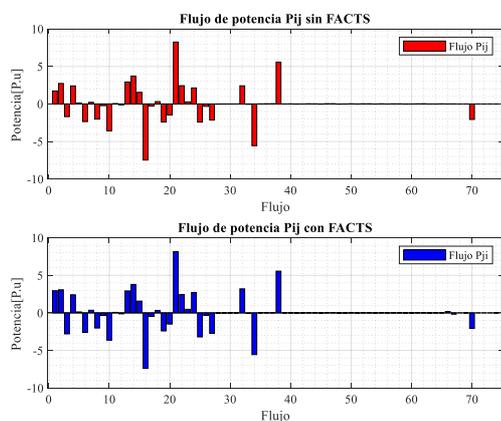


Figura 24. Potencia real en sistema de prueba IEEE 30 nodos.

La Figura 24 muestra que en presencia de equipos SVC, la potencia real que fluye a través del nodo se redistribuirá, lo que indica que es posible obtener más potencia a través de la línea de transmisión.

En la Tabla 7 se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio planteados, se observa que para potencias altas de compensación la magnitud de tensión empeora.

La Figura 25 muestra que el flujo de potencia aparente a través de los nodos se reduce ante la presencia de equipos SVC, lo cual indica que la compensación que proporciona el dispositivo mejora el perfil de tensión de manera significativa cada área de control del SEP.

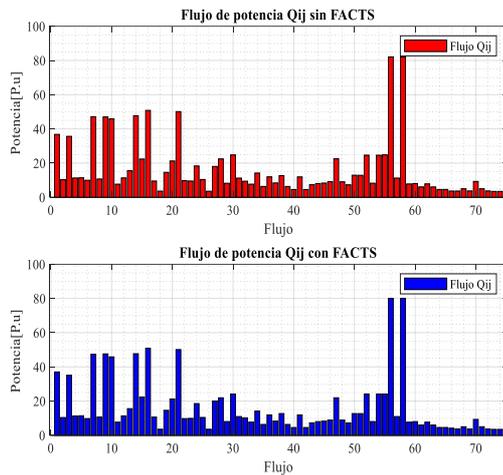


Figura 25. Potencia aparente que fluye por el sistema de prueba IEEE 30 nodos.

6. Conclusiones

La ubicación óptima de equipos SVC se puede lograr analizando la matriz de sensibilidad del SEP, misma que es la base para aplicar el concepto de distancia eléctrica. El fin de encontrar áreas débilmente acopladas unas de otras aplicando una técnica de aprendizaje no supervisado es efectivo puesto que se logró encontrar áreas de control, en donde existe un nodo representativo que tiene influencia para mejorar el perfil de tensión de sí mismo y de los nodos circundantes como se demostró en el escenario 1, escenario 2 y escenario 3.

Para la creación de áreas de control es muy importante asociar de forma adecuada los nodos originales del SEP con los nodos sometidos a estudio, puesto que para la creación de áreas no se considera los nodos asociados a generadores, por lo que una confusión en la asociación de nodos conlleva a una creación de grupos carentes de conectividad entre sí.

Para sistemas de prueba de mayor envergadura conviene que las potencias de compensación sean bajas, puesto que para potencias demasiado elevadas el perfil de voltaje cae de forma significativa como se presentó en la Tabla 7, mientras que para sistemas de baja envergadura las potencias elevadas no presentan problemas con el perfil de voltaje como se presentó en la Tabla 3.

Como se muestra en el escenario 1, la presencia de equipos SVC en el SEP generalmente ayudan a mejorar la distribución de voltajes en todas las barras del sistema, en donde el algoritmo propuesto para la ubicación óptima proporciono como resultado 3 dispositivos SVC en dos áreas distintas, logrando obtener un perfil de voltaje de 1(p.u) en todos los nodos excepto los asociados a los generadores.

Al ajustar la posición óptima del equipo SVC, se puede mejorar el margen de estabilidad de voltaje, basado en el análisis del área de control del SEP débilmente acoplada, la posición óptima del equipo se encuentra en el nodo representativo de cada área de acuerdo con el costo asociado con la instalación del equipo. Dado que el ángulo correspondiente al nodo de ubicación del dispositivo en el SEP ha mejorado sustancialmente, se concluye que el equipo instalado ayuda a la mejora del margen de estabilidad de voltaje, además contribuye a que este se mantenga sincronizado y en equilibrio.

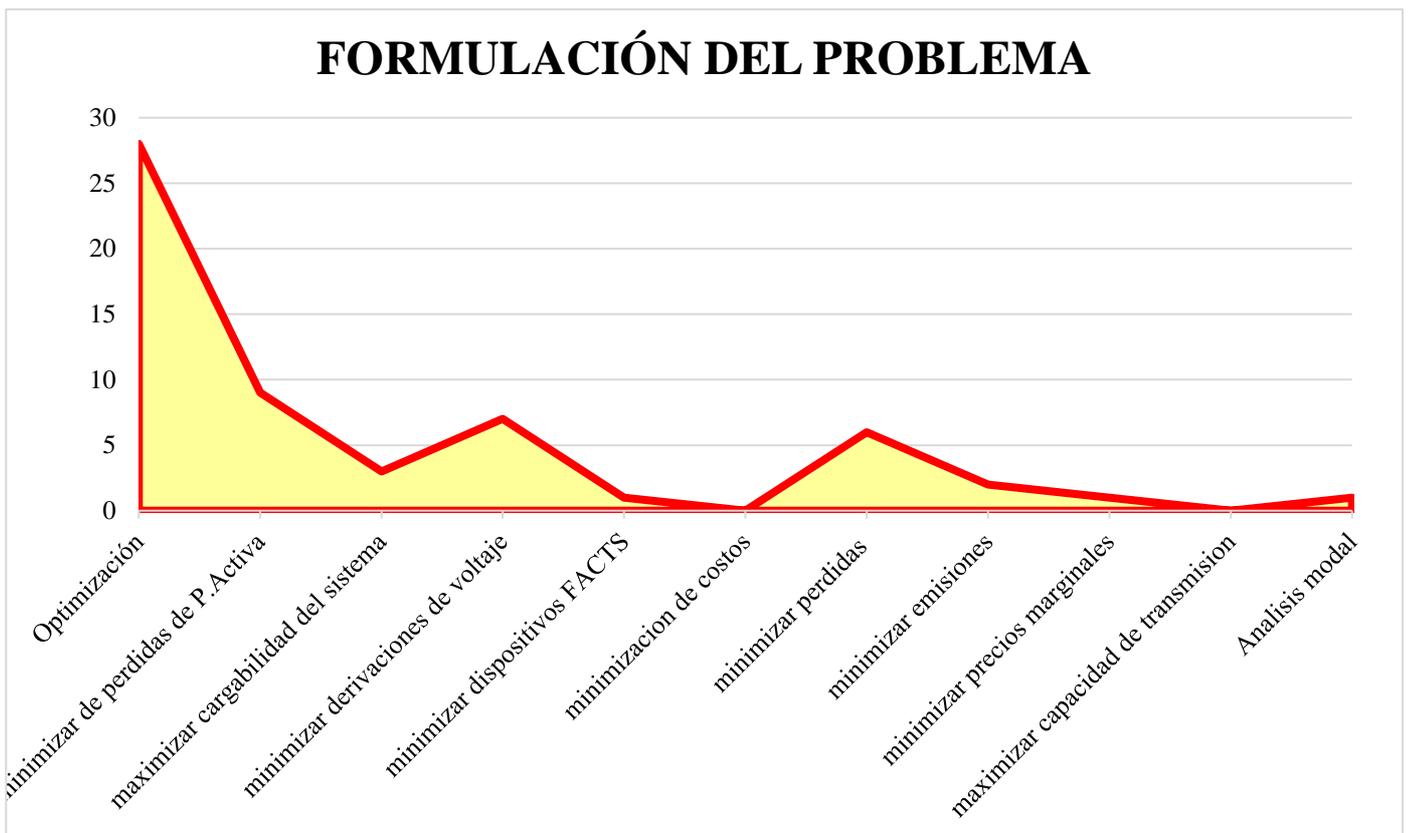
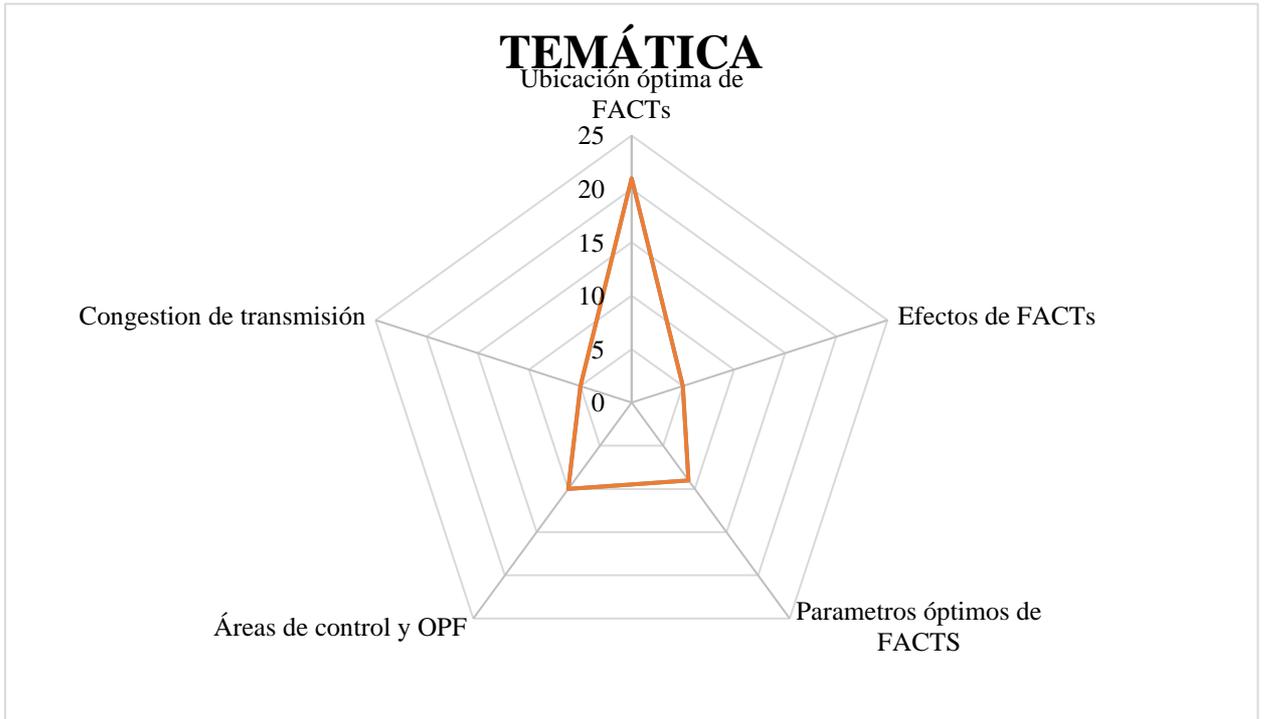
7. Trabajos futuros

La presente investigación describió un método para ubicación óptima de dispositivos SVC en base a la distinción del arreglo de sensibilidad, para el entendimiento del acople eléctrico existente, útil en la división del SEP en áreas de control. Los resultados proporcionan una ubicación

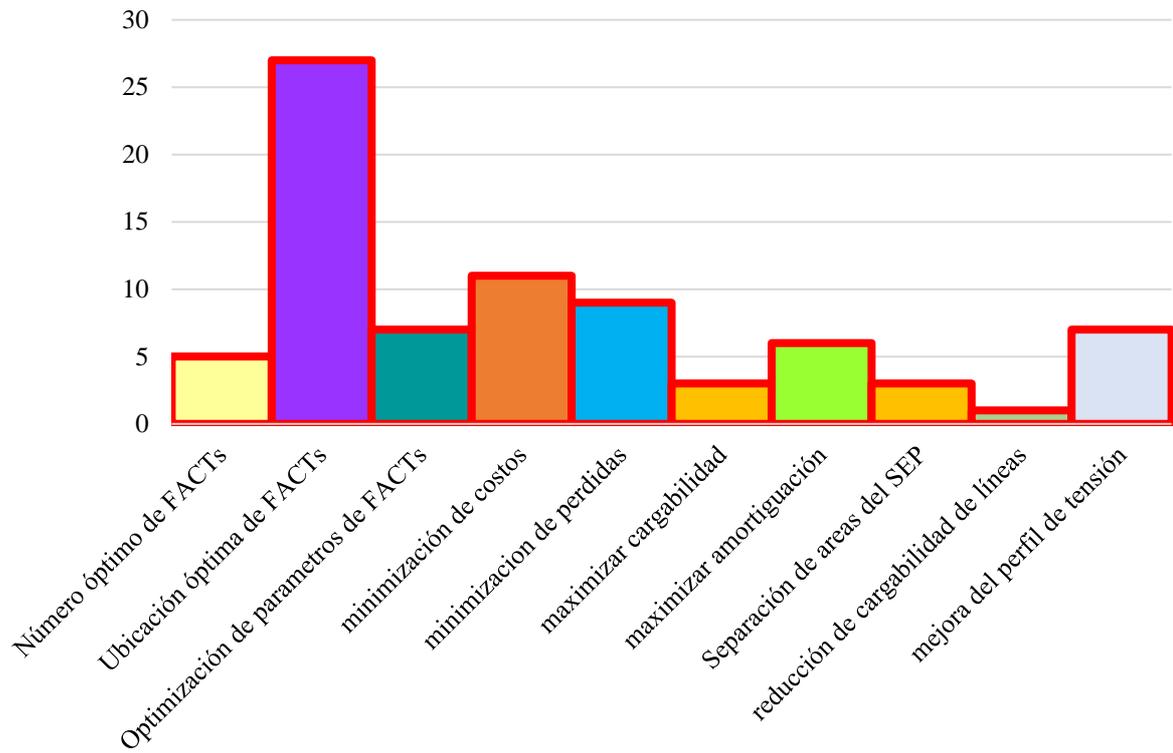
- 10.1016/j.jestch.2016.01.011.
- [11] P. Sharma and A. Kumar, "Thevenin's equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 119–127, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.026.
- [12] S. Dutta, S. Paul, 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.
- [13] 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.
- [14] 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.egypro.2018.07.004.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] N. E. Gomez Ramirez, "Metodologia 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] D. Carrión, E. García, J. González, A. Isaac, J. Lopez, and R. Hincapie, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución," *Energía*, 2016, doi: 10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.11.
- [22] D. Carrion, J. W. Gonzalez, I. A. Isaac, G. J. Lopez, and H. A. Cardona, "Load Characterization Based on Voltage and Current Phasorial Measurements in Micro-Grids," in *Proceedings - 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2017*, 2018, vol. 2017-Novem, pp. 1–6, doi: 10.1109/INCISCOS.2017.23.
- [23] P. Escudero and D. Carrión, "Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC Expansion of a transmission system using LOPF-AC," *Inge Cuc*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018.
- [24] J. Vivekananthan and R. Karthick,

- “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.
- [25] D. Carrion and J. W. Gonzalez, “Optimal PMU location in electrical power systems under N-1 contingency,” in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 2018, vol. 2018-Decem, no. 1, pp. 165–170, doi: 10.1109/INCISCOS.2018.00031.
- [26] D. F. Carrión Galarza and J. W. González Sánchez, “Ubicación óptima de PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en sistemas eléctricos de potencia,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019, doi: 10.29019/enfoqueute.v10n1.437.
- [27] 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.
- [28] P. A. Achig, “Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [29] David Alberto Pérez Cruz, “Ubicación Óptima De Dispositivos Facts En Redes Eléctricas De Transmisión Mediante Búsqueda Inteligente,” Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [30] L. E. B. Guerrero, “Identificación de áreas de control en el sistema nacional interconectado,” Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [31] J. J. P. Calupña, “Planeación óptima de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión basado en optimización no lineal entera mixta,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [32] D. Carrión, E. Inga, J. W. Gonzalez, and R. Hincapié, “Optimal geographical placement of phasor measurement units based on clustering techniques,” *Proc. - 2016 51st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2016*, vol. 2017-January, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114003.
- [33] A. Sanchez and D. Carrion, “Modeling of the behavior power flow on transmission lines based on voltage and current synchronopasors,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1142–1149, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8362149.
- [34] S. X. Q. Novillo and J. A. G. Hernández, “Despliegue óptimo de redes inalámbricas para la infraestructura de medición inteligente de energía eléctrica,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [35] P. S. Contreras Ortiz and X. M. Alvarez Mora, “Aplicación De Técnicas De Clustering Y Detección De Anomalías Para La Clasificación De Consumos De Energía Eléctrica,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [36] K. A. Yanguicela Caiza, “Ubicación óptima de medidores sincrofasoriales en sistemas de transmisión usando técnicas de clusterización,” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.

Tabla 9. Indicadores del estado del arte.



SOLUCIÓN DADA MEDIANTE



10. Anexos

10.1 Anexo 1 Datos Técnicos del Sistema de 14 Barras IEEE

Tabla 10. Datos técnicos niveles de voltaje de nodos modelo IEEE 14 nodos.

NODO	VOLTAJE(KV)
1-5	13.2
6,9	14:33
7	1
8	11

Tabla 11. Datos técnicos de nodos modelo IEEE 14 nodos

NODO	P(MW)	Q(MVAR)
1	0	0
2	21.7	12.7
3	94.2	19
4	47.8	-3.9
5	7.6	1.6
6	11.2	7.5
7	0	0
8	0	0
9	29.5	16.6
10	9	5.8
11	3.5	1.8
12	6.1	1.6
13	13.8	5.8
14	14.9	5

Tabla 12. Datos técnicos transformadores modelo IEEE 14 nodos

TRANSFORMADOR	N INICIO	NFIN	S(MVA)
1	4	7	100
2	4	9	100
3	5	6	100
4	7	8	100
5	7	9	100

Tabla 13. Datos técnicos generadores modelo IEEE 14 nodos

TRANSFORMADOR	NODO	PMAX(MW)	QMAX(MVAR)
G1	1	400	240
G2	2	80	60
G3	3	80	60
G4	6	80	60
G5	8	80	60

Tabla 14. Datos técnicos de líneas del sistema IEEE 14 nodos

NODO	NINI	NFIN	R(PU)	X(PU)	B(PU)
L1	1	2	0.01938	0.05917	0.0264
L2	1	5	0.05403	0.22304	0.0246
L3	2	3	0.04699	0.19797	0.0219
L4	2	4	0.05811	0.17632	0.0187
L5	2	5	0.05695	0.17388	0.017
L6	3	4	0.06701	0.17103	0.0173
L7	4	5	0.01335	0.04211	0.0064
L8	4	7	0	0.20912	0
L9	4	9	0	0.55618	0
L10	5	6	0	0.25202	0
L11	6	11	0.09498	0.1989	0
L12	6	12	0.12291	0.25581	0
L13	6	13	0.06615	0.13027	0
L14	7	8	0	0.17615	0
L15	7	9	0	0.11001	0
L16	9	10	0.03181	0.0845	0
L17	9	14	0.12711	0.27038	0
L18	10	11	0.08205	0.19207	0
L19	12	13	0.22092	0.19988	0
L20	13	14	0.17093	0.34802	0

10.2 Anexo 1 Datos Técnicos del Sistema de 30 Barras IEEE

Tabla 15. Datos técnicos nodos del sistema IEEE 30 nodos

NODO	P(MW)	Q(MVAR)
1	0	0
2	21.7	12.7
3	2.4	1.2
4	7.6	1.6
5	94.2	19
6	0	0
7	22.8	10.9
8	30	30
9	0	0
10	5.8	2
11	0	0
12	11.2	7.5
13	0	0
14	6.2	1.6
15	8.2	2.5
16	3.5	1.8
17	9	5.8
18	3.2	0.9
19	9.5	3.4
20	2.2	0.7
21	17.5	11.2
22	0	0
23	3.2	1.6
24	8.7	6.7
25	0	0
26	3.5	2.3
27	0	0
28	0	0
29	2.4	0.9
30	10.6	2.9

Tabla 16. Niveles de voltaje del sistema IEEE 30 nodos.

NODO	VOLTAJE(KV)
1-8,28	132
9	1
10,12,14- 21,29,30	33
11,13	11

Tabla 17. Datos técnicos transformadores del sistema IEEE 30 nodos.

TRANSFORMADOR	INICIO	FIN	S(MVA)
1	6	9	400
2	6	10	100
3	9	11	100
4	9	10	100
5	4	12	100
6	12	13	100
7	28	27	100

Tabla 18. Datos técnicos generadores del sistema IEEE 30 nodos.

TRANSFORMADOR	NODO	PMAX	QMAX
G1	1	360	300
G2	2	140	100
G3	5	100	80
G4	8	300	80
G5	11	300	50
G6	13	300	50

Tabla 19. Datos técnicos de las líneas del sistema IEEE 30 nodos.

NODO	NINI	NFIN	R(PU)	X(PU)	B(PU)
L1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528
L2	1	3	0.0452	0.1652	0.0408
L3	2	4	0.057	0.1737	0.0368
L4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084
L5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418
L6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374
L7	4	6	0.0119	0.0414	0.009
L8	5	7	0.046	0.116	0.0204
L9	6	7	0.0267	0.082	0.017
L10	6	8	0.012	0.042	0.009
L11	6	9	0	0.208	0
L12	6	10	0	0.556	0
L13	9	11	0	0.208	0
L14	9	10	0	0.11	0
L15	4	12	0	0.256	0
L16	12	13	0	0.14	0
L17	12	14	0.1231	0.2559	0
L18	12	15	0.0662	0.1304	0
L19	12	16	0.0945	0.1987	0
L19	14	15	0.221	0.1997	0

NODO	NINI	NFIN	R(PU)	X(PU)	B(PU)
L20	16	17	0.0524	0.1923	0
L21	15	18	0.1073	0.2185	0
L22	18	19	0.0639	0.1292	0
L23	19	20	0.034	0.068	0
L24	10	20	0.0936	0.209	0
L25	10	17	0.0324	0.0845	0
L26	10	21	0.0348	0.0749	0
L27	10	22	0.0727	0.1499	0
L28	21	22	0.0116	0.0236	0
L29	15	23	0.1	0.202	0
L30	22	24	0.115	0.179	0
L31	23	24	0.132	0.27	0
L32	24	25	0.1885	0.3292	0
L33	25	26	0.2544	0.38	0
L34	25	27	0.1093	0.2087	0
L35	28	27	0	0.396	0
L36	27	29	0.2198	0.4153	0
L37	27	30	0.3202	0.6027	0
L38	29	30	0.2399	0.4533	0
L39	8	28	0.0636	0.2	0.0428
L40	6	28	0.0169	0.0599	0.013
L41	1	2	0.0192	0.0575	0.0528