

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA
BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA
BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA**

**AUTOR:
CRISTINA ALEJANDRA MORENO PÉREZ**

**DIRECTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, Julio 2018

Cristina Alejandra Moreno Pérez

UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2018

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.

Cristina Alejandra Moreno Pérez (Y'1994 – M'11). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa “Fernández Salvador Villavicencio Ponce” de la ciudad de Quito. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la ubicación óptima de SVCs en sistemas eléctricos de transmisión.



cmorenop@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Jorge Paúl Muñoz Pilco (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2014, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico. Además, cursó estudios de posgrado como becario de Fundación Carolina en la Universidad Pública de Navarra, Pamplona – España, 2017, obteniendo el título de Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana.

jmunoz@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

©2018 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Ubicación óptima de SVCs en sistemas eléctricos de transmisión para la compensación de potencia reactiva basada en programación no lineal entera mixta* realizado por Cristina Alejandra Moreno Pérez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2018



.....

Jorge Paúl Muñoz Pilco

Cédula de identidad: 1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Cristina Alejandra Moreno Pérez, con documento de identificación N° 1727061671, 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 SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA”, 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.

Firma



.....

Nombre: Cristina Alejandra Moreno Pérez

Cédula: 1727061671

Fecha: Quito, Julio 2018

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Compensación de Potencia Reactiva	3
2.1 Problemas en el SEP	4
3. Dispositivos usados para la Compensación de Potencia Reactiva	4
3.1 Static VAR Compensator SVC	5
4. Mixed Integer Nonlinear Programming MINLP	6
5. Formulación del Problema.....	6
5.1 Función objetivo del problema	6
5.2 Restricciones del problema	7
5.3 Modelo matemático a optimizar	8
5.4 Descripción del caso de estudio	8
6. Análisis de Resultados	9
6.1 Escenario 1	9
6.2 Escenario 2.....	11
7. Conclusiones.....	13
7.1 Trabajos Futuros	14
8. Referencias.....	14
8.1 Estado del arte.....	17
8.2 Resumen de Indicadores	22
9. Anexos	23
9.1 Anexo 1	23
9.2 Anexo 2.....	24
9.3 Anexo 3.....	26
9.4 Anexo 4.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación óptima de SVCs en el sistema de transmisión.....	3
Figura 2. Esquema de un SVC.	5
Figura 3. Función de costos de implementación de SVCs.....	6
Figura 4. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 1 SVC	10
Figura 5. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 3 SVCs.....	10
Figura 6. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 6 SVCs.....	10
Figura 7. Pérdidas de potencia activa en el escenario 1	11
Figura 8. Costos de inversión de los SVCs en el escenario 1	11
Figura 9. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 1 SVC	12
Figura 10. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 3 SVCs.....	12
Figura 11. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 6 SVCs.....	13
Figura 12. Pérdidas de potencia activa en el escenario 2.....	13
Figura 13. Costos de inversión de SVCs en el escenario 2.....	13
Figura 14. Sistema de 30 barras de la IEEE.....	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo para la ubicación óptima de SVCs en sistemas eléctricos de transmisión	9
Tabla 2. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 1 dispositivo.....	9
Tabla 3. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 3 dispositivos.....	10
Tabla 4. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 6 dispositivos.....	10
Tabla 5. Pérdidas de potencia activa en pu del escenario 1	11
Tabla 6. Costos de inversión de los SVCs en el escenario1	11
Tabla 7. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 1 dispositivo.....	11
Tabla 8. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 3 dispositivos.....	12
Tabla 9. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 6 dispositivos.....	12
Tabla 10. Pérdidas de potencia activa en pu del escenario 2.	13
Tabla 11. Costos de inversión de los SVCs en el escenario2.	13
Tabla 12. Niveles de voltaje en las barras del sistema.....	24
Tabla 13. Valores de la carga del sistema.....	24
Tabla 14. Datos de los transformadores del sistema.....	24
Tabla 15. Datos de los generadores del sistema.....	24
Tabla 16. Datos de las líneas del sistema.....	25
Tabla 17. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 1 SVC.....	26
Tabla 18. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 3 SVCs.....	26
Tabla 19. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 6 SVCs.....	27
Tabla 20. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 1 SVCs.....	28
Tabla 21. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 3 SVCs.....	28
Tabla 22. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 6 SVCs.....	29

UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTREA MIXTA

Resumen

La estabilidad de los sistemas de transmisión actualmente se ha convertido en un tema de estudio de gran importancia con el objetivo de conseguir un sistema robusto, que pueda mantenerse operando a lo largo del tiempo asegurando índices básicos de confiabilidad y calidad de servicio. Es así que el mantener los niveles de voltaje adecuados dentro de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es importante. La integración de dispositivos compensadores de reactivos resulta ser una opción al momento de mejorar la estabilidad del sistema, sin embargo, los costos que estos tienen en el mercado son elevados. El presente artículo, desarrolla un modelo para la óptima ubicación de SVCs mediante el uso de técnicas de optimización, basado en programación no lineal entera mixta.

El algoritmo es validado en el sistema de 30 barras de la IEEE; aplicando restricciones de operación, minimizando los costos de implementación de los compensadores para encontrar la mejor ubicación de estos dispositivos en el sistema mejorando su estabilidad al menor costo.

Palabras Clave: Balance de potencia, Potencia reactiva, Sistema de transmisión, Estabilidad, Perfiles de voltaje, Técnicas de optimización.

Abstract

The stability of transmission systems currently has become a topic of study of great importance with the objective of achieving a robust system that can be maintained over time ensuring basic reliability indexes. Thus, maintaining adequate voltage levels within the power electrical systems (SEP) is important. The integration of reactive compensators devices is an option when improving the stability of the system, however the cost they have in the market are high. The present paper develops a model for the optimal location of SVCs through the use of optimization techniques, based on mixed integer nonlinear programming.

The algorithm is validated in the 30-bus system of the IEEE; applying operating restrictions, minimizing the costs of implementation of the compensators to find the best location of these devices in the system, improving their stability at the lowest cost.

Keywords: Power balance, Reactive power, Transmission system, Stability, Voltage profiles, Optimization techniques.

1. Introducción

El desarrollo y evolución continua de los sistemas eléctricos de potencia ha traído consigo problemas de estabilidad, los cuales se ven reflejados en la calidad y el costo de la energía [1].

El uso de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS por sus siglas en inglés), ha permitido mejorar el control del flujo de potencia y los voltajes en las barras, mejorando la estabilidad de la red [2], [3]. Los FACTS, son dispositivos de estado sólido, que incorporan electrónica de potencia, capaces de controlar uno o más parámetros eléctricos en los sistemas de transmisión AC [4], [5]. Teniendo como objetivo principal la obtención de un sistema de corriente alterna con un alto nivel de flexibilidad y seguridad [6], [7]. La concepción del término FACTS en el campo eléctrico ha introducido nuevos enfoques y técnicas para mejorar la confiabilidad de los sistemas de transmisión [8]. En específico, el SVC que debido a su bajo costo en comparación con otros dispositivos que hacen uso de la misma tecnología, es la mejor opción para mejorar la estabilidad del SEP [9].

Los SVC, son dispositivos de inyección o absorción de potencia reactiva, que permiten mejorar la estabilidad de voltaje. La estabilidad de voltaje se define como la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de mantener valores aceptables de voltaje en todos los nodos, lo que significa que existe un correcto balance entre la potencia reactiva generada y la consumida [10]. El control de voltaje en la barra lo realiza automáticamente el dispositivo, cuando detecta valores bajos de voltaje, inyecta reactivos y cuando los valores son altos, absorbe reactivos [11]. En la actualidad, la industria energética prefiere con mayor frecuencia el uso de estos dispositivos por los beneficios técnicos y factibilidad de integración que ofrecen.

Uno de los problemas que se presenta actualmente en el SEP es la congestión de las líneas de transmisión producto del crecimiento progresivo que presenta la demanda en los últimos años provocando que la carga aumente y exista un desbalance entre la potencia generada y consumida. Como solución a esta problemática previo al desarrollo de los SVCS se proponía el cambio de topología de la red, y construcción de nuevas líneas de transmisión evitando de esta manera sobrecargar las existentes. No obstante, la construcción de nuevas líneas, es una solución poco factible, debido a factores ambientales, económicos y geográficos [12], [13].

Es por eso que la planificación adecuada para la ubicación de los SVCs ayuda a mitigar ese problema [14]. Sin embargo, a pesar de todas las ventajas técnicas que los SVCs brindan al sistema es de suma importancia tomar en cuenta otras consideraciones como la ubicación de los dispositivos. Estos no pueden ser implementados en todas las barras del SEP ya que el costo que estos tienen en el mercado es elevado [15], por esta razón se realiza un análisis mediante técnicas de optimización para encontrar la ubicación óptima de los compensadores estáticos.

La Figura 1 muestra de forma esquemática el diseño para la ubicación óptima de dispositivos SVCs en los sistemas de transmisión con el objetivo de mejorar los perfiles de voltaje de un SEP; para la solución del problema se desarrolla un algoritmo basado en programación no lineal entera mixta que realiza la optimización en función de los costos de instalación de los SVCs. Para realizar el estudio es necesario obtener información operativa del sistema producto de un flujo de potencia, en función a los datos y bajo las restricciones de operación del SEP; se encontrará la barra en donde los niveles de voltaje no estén dentro de los valores aceptables. Los valores permisibles de

voltaje en los nodos se encuentran en el rango de 0.90 y 1.10; así como el rango de los ángulos son -45° como valor mínimo y $+45^\circ$ como valor máximo. Tanto los valores permitidos de voltajes como los ángulos son tomados del Apéndice A de la IEEE, “Datos para el

sistema de 30 barras de la IEEE” [16]. De esta manera se garantiza que la implementación de los SVCs en el sistema ayude a la mejora del mismo al más bajo costo de instalación.

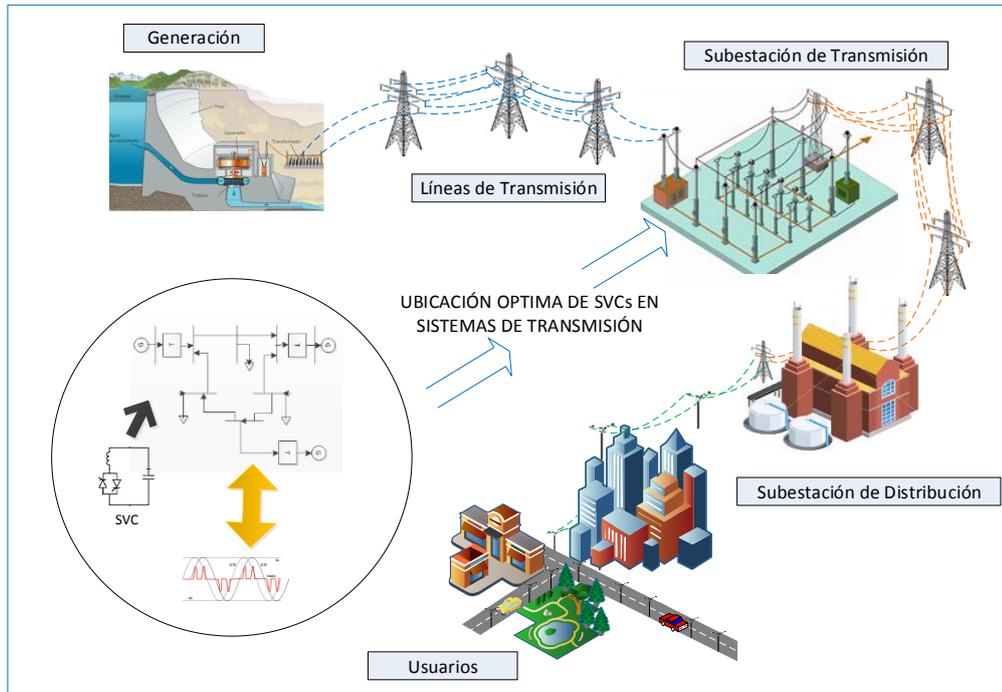


Figura 1. Ubicación óptima de SVCs en el sistema de transmisión.

La investigación cuenta con secciones organizadas de la siguiente manera.

En la sección 2 se define la potencia reactiva y enumera algunos de los problemas solucionados con la compensación de está. En la sección 3 se mencionan los dispositivos usados para la compensación de potencia reactiva. En la sección 4 se detalla el tipo de programación (MINLP) utilizado para la solución del problema. En la sección 5 se describe la formulación del problema y el algoritmo usado para la optimización. En la sección 6 se muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo. Posteriormente en la sección 7 se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la investigación y los trabajos futuros que pueden derivarse del mismo.

2. Compensación de Potencia Reactiva

La potencia reactiva Q es el flujo de energía que, en forma alternada, va hacia la carga y regresa de ella, la cual es consumida por los aparatos eléctricos que están formados por elementos reactivos.

El desequilibrio de la misma en los sistemas eléctricos provoca que los voltajes de cada uno de los nodos oscilen, causando que el sistema tienda a ser inestable [17]. Para evitar el colapso de voltaje y tratando de mantener los niveles de los mismos en rangos admisibles para el correcto funcionamiento del SEP, es necesario el control de Q [18].

El control de Q se realiza reduciendo la carga o suministrando potencia

reactiva adicional al sistema. El suministro de potencia se conoce como compensación de potencia reactiva, este método hoy en día es usado con mayor frecuencia, y se basa en la ubicación de dispositivos compensadores de reactivos en las barras del SEP controlando de esta manera los voltajes; este método es rápido, eficiente y confiable; el cuál aplicado de la manera correcta, ayuda a la mejora o solución de ciertos problemas que se presentan en la red.

2.1 Problemas en el SEP

La necesidad de satisfacer la demanda y la integración de nuevas centrales de energías con tecnologías del tipo convencionales y no convencionales donde el recurso es poco estable, ha traído consigo consecuencias para el SEP, entre ellas la inestabilidad del sistema provocado por las fluctuaciones del recurso, y la sobrecarga de las líneas, lo cual produce que los voltajes en las barras oscilen fuera de los límites de operación establecidos produciendo inestabilidad del voltaje. Este es uno de los problemas comunes que se produce en el SEP. La estabilidad de voltaje es la capacidad de un sistema de mantener los voltajes de todos sus nodos, dentro de valores admisibles bajo condiciones de operación normal y después de haber sido sometido frente a perturbaciones [19]. Uno de los factores que afecta la estabilidad de voltaje es el incremento de carga abrupta, lo cual produce sobrecarga en las líneas de transmisión.

Otro de los problemas que presentan los sistemas es la inestabilidad angular. La estabilidad angular es la habilidad de los generadores (máquinas sincrónicas) interconectados en un sistema eléctrico de mantenerse en sincronismo, sin embargo la estabilidad angular, se puede ver afectada bajo perturbaciones que ocurren continuamente en el sistema producidas por variaciones constantes de carga y generación del SEP.

Los problemas mencionados anteriormente pueden ser corregidos mediante la utilización de elementos que permitan compensar Q en la red.

3. Dispositivos usados para la Compensación de Potencia Reactiva

El desarrollo de la tecnología ha proporcionado alternativas para mejorar el funcionamiento de los sistemas de transmisión, una de estas alternativas son los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS). La tecnología FACTS, por sus características de rapidez de respuesta frente a perturbaciones y su versatilidad de control, son la mejor solución para ayudar a mejorar la operación de los sistemas de transmisión [20]. Estos proporcionan un control rápido y continuo del flujo de potencia en el SEP, ayudando de este modo al control del voltaje en los nodos críticos, controlando el ángulo de fase de las líneas o modificando las impedancias de las líneas de transmisión [21].

Dependiendo de la forma en que se conectan los FACTS al sistema, se realiza el tipo de compensación, ya sea en paralelo o en serie. La compensación en serie es utilizada para disminuir la reactancia de las líneas de transmisión, aumentando la capacidad de transmisión y la estabilidad del sistema. Algunos de los dispositivos usados para realizar este tipo de compensación son: Los capacitores e inductores fijos en serie, estos dispositivos son conectados en serie a las líneas de transmisión y el aporte de reactivos se mantiene constante. Los capacitores en serie controlados por tiristores (TSCS) son equipos que incrementan el amortiguamiento de la red cuando se interconectan varios sistemas de potencia de gran magnitud.

La compensación en paralelo es utilizada para el control del voltaje en un

nodo, independiente de las líneas conectadas al mismo, ayuda a mejorar la transferencia de potencia reactiva en el sistema y a mantener los niveles de voltaje dentro de los rangos admisibles de operación bajo condiciones de carga extrema [22]. Algunos de los dispositivos que permiten realizar este tipo de compensación son: Los reactores controlados por tiristores (TCR), los cuales controlan la corriente de compensación por medio de la variación de la reactancia que es controlada por el ángulo de disparo de los tiristores del dispositivo [23]. El condensador conmutado por tiristores (TSC), es un dispositivo el cual controla la potencia de compensación inyectada por medio del ciclo de trabajo del tiristor [24]. El compensador de VAR estático (SVC), estos equipos son usados para proveer potencia reactiva de manera rápida, controlar sobre voltajes ante la salida de la carga y mejorar la estabilidad del sistema de transmisión [25], [26]. Su velocidad de respuesta es casi instantánea. Debido a que el caso de estudio se centra en la compensación de reactivos mediante SVCs, en la siguiente sección se detalla su funcionamiento y características importantes para el desarrollo de este trabajo.

3.1 Static VAR Compensator SVC

Los SVCs son empleados en los sistemas de transmisión con el fin de aumentar la capacidad de transporte y estabilidad de las líneas. El control del voltaje es progresivo y rápido, este se realiza mediante la compensación o absorción de potencia reactiva, en el punto de la red en el que se desee actuar [27].

Está compuesto por un condensador conmutado por tiristores (TSC), una reactancia controlada por tiristores (TCR), condensadores fijos y filtros LC [28], [29]. El esquema y los componentes de los dispositivos compensadores de reactivos se muestran en la Figura 2. Cuando trabaja en el

modo capacitivo el equipo proporciona potencia reactiva y en el modo inductivo el equipo absorbe potencia reactiva.

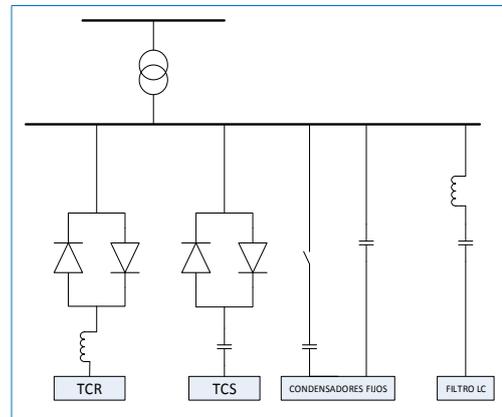


Figura 2. Esquema de un SVC.

Los SVCs se ubican en las barras del SEP en donde se requiera mejorar el voltaje, tomando ciertas restricciones como la cantidad de Q producida por el compensador y los niveles de voltaje permitidos en la barra. No es posible ubicar un dispositivo de compensación de reactivos en las barras donde existan generadores.

1) *Costos del SVC:* La función de costos de un SVC, como lo establecen en [12], [14], [33]. Los cuales determinan que el costo de cada dispositivo se da por la función cuadrática que depende de la potencia reactiva. Se encuentra definida por la ecuación (2):

$$C_{SVC} = 0.0003S^2 - 0.3051S + 127.38 [USD/kVAr] \quad (1)$$

Donde

S Capacidad del SVC en kVAr en la barra i

Para realizar la inversión en equipos de compensación reactivos se toma en cuenta el tamaño de la instalación, ya que si la cantidad de VAR es muy bajo, la inversión será muy alta en comparación a los beneficios que se espera obtener, como se observa en la Figura 3.

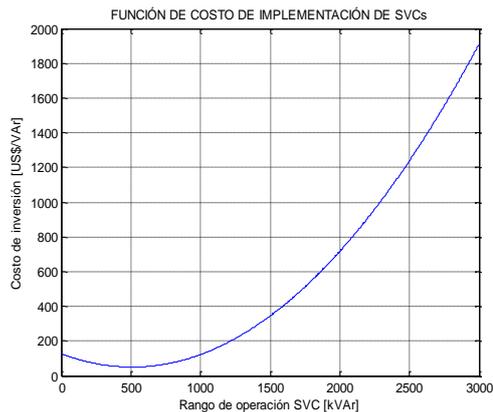


Figura 3. Función de costos de implementación de SVCs

Como se observa, si la cantidad de kVAr es menor a 500 la implementación del dispositivo no es recomendable, ya que el costo de inversión es igual, a implementar un equipo con un rango de kVAr entre 500 y 1000. Para el análisis de los casos de estudio se considera entre 5 y 10 MVar los rangos del dispositivo SVC.

4. Mixed Integer Nonlinear Programming MINLP

La Programación Entera No Lineal Mixta (MINLP, por sus siglas en inglés), se utiliza para resolver problemas de optimización no lineal, que involucran variables continuas y variables enteras binarias. Las variables continuas son utilizadas para modelar el problema, utilizando datos o parámetros, en este caso se utiliza este tipo de variables en las restricciones del problema.

Las variables enteras binarias son variables de decisión que solo pueden adoptar los valores 0 o 1, son utilizadas para resolver problemas de elección de eventos, para el problema propuesto se utiliza en la elección de las barras, donde se debe implementar los dispositivos SVCs.

La resolución de problemas de optimización no lineales, es compleja ya que por lo general son problemas no convexos, es decir que tienen varias soluciones posibles; es por eso que el uso de softwares para su resolución es muy

común. Para este caso se utiliza el Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS, por sus siglas en inglés). Este es un software de alto nivel que permite al usuario resolver problemas de programación lineal, no lineal y problemas de optimización de enteros mixtos.

La estructura básica que el software utiliza para los modelos matemáticos son: conjuntos, variables, datos, ecuaciones, modelo y salida [30].

Además proporciona un gran número de solucionadores dependiendo del tipo de problema y las necesidades del programador [31]. Para el caso propuesto se utilizó el solver denominado “BONMIN”, el cual es un algoritmo de programación básica mixta no lineal de fuente abierta, se encuentra integrado por cinco algoritmos diferentes basados en aproximación externa.

5. Formulación del Problema

Como objetivo se desea determinar la ubicación óptima de SVCs en el sistema de transmisión, minimizando los costos de implementación y las pérdidas de potencia, mediante técnicas de optimización,

El problema de optimización que se desea resolver se encuentra bajo restricciones y límites de operación, que garantizan el correcto funcionamiento del SEP. El planteamiento del problema mantiene una estructura general, que está integrada por las funciones objetivos que se desea cumplir y sujeta a una serie de restricciones lineales, no lineales, de igualdad y desigualdad [32]. Se detalla a continuación:

5.1 Función objetivo del problema

Realizar la optimización de un problema conlleva plantear una función objetivo, reconocer las variables y las restricciones a las cuales esta será sujeta. Para casos de ubicación óptima se desea tener beneficios en la estabilidad de la

red además de la reducción costos. Para este caso se plantean dos funciones objetivos, las cuales vienen dadas por la ecuación (2) y la ecuación (3).

1) *Función objetivo costos*: La función objetivo corresponde a la minimización de costos de implementación de SVCs en el sistema.

$$\min \sum_{l=1}^N Z_l * X_l \quad (2)$$

Donde:

Z_l Costo de la instalación de los SVCs
 X_l Variable binaria del problema

La variable binaria se definirá en función de 1 o 0, esto representa si es necesaria la implementación del SVC en la barra. La variable tomara el valor de 1 o 0 dependiendo de si cumple o no con las restricciones del problema.

2) *Función objetivo pérdidas de potencia*: La función objetivo corresponde a la minimización de pérdidas de potencia activa en el sistema.

$$\min \left(\sum_{l=1}^N P_{g,l} - \sum_{l=1}^N P_{c,l} \right) \quad (3)$$

Donde:

$P_{g,i}$ Potencia activa generada en la barra i.
 $P_{c,i}$ Potencia activa demandada en la barra i

5.2 Restricciones del problema

Tomando en cuenta que el objetivo del SVC es controlar en el sistema variables tales como: el flujo de la potencia activa y reactiva en las líneas, y los voltajes de cada una de las barras, se debe considerar ciertas restricciones, entre ellas:

1) *Restricción de balance de potencia*: El balance de potencia activa y reactiva se debe realizar en cada uno de los nodos del sistema, ya que la cantidad de potencia que ingresa al nodo debe estar

equilibrado con la misma cantidad de potencia que circula por el sistema en el mismo nodo [33]. La ecuación del balance de potencia para n barras se encuentra dada por la ecuación (4) y (5):

$$P_{g,i} - P_{c,i} = \sum_{k=1}^n V_i V_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (4)$$

$$Q_{g,i} - Q_{c,i} = \sum_{k=1}^n V_i V_k [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (5)$$

Donde:

$P_{g,i}$ y Q_G Potencia activa y reactiva generada en la barra i
 $P_{c,i}$ y Q_C Potencia activa y reactiva demandada en la barra i
 G_{ik} y B_{il} Componentes imaginarios y reales del elemento Y_{ik} de la matriz de admitancias
 V_i Voltaje en la barra i
 V_k Voltaje en la barra k
 δ_i Angulo en la barra i
 δ_k Angulo en la barra k

2) *Limitación de los voltajes en las barras*: Para mantener el sistema de potencia funcionando estable, el voltaje de los nodos deben mantenerse alrededor de un valor nominal. La ecuación (6) describe esta limitación:

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (6)$$

3) *Limitación de los ángulos en las barras*: Los ángulos deben encontrarse dentro de rangos de valores permisibles para el funcionamiento del SEP los cuales dependen de la operación permanente de la línea. La ecuación (7) describe esta limitación:

$$\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max} \quad (7)$$

4) *Limitación de generación de potencia activa*: Debido a factores económicos y técnicos, como la estabilidad dinámica y las pérdidas por calor en el sistema, la potencia mecánica

de los generadores debe encontrarse bajo límites de operación, limitando a su vez la producción de potencia activa de generación [32]. La ecuación (8) describe esta limitación:

$$P_{j,min} \leq P_j \leq P_{j,max} \quad (8)$$

Donde:

P_j Potencia activa del generador j.

5) *Limitación de generación de potencia reactiva:* Debido a factores técnicos la potencia reactiva de los generadores debe encontrarse bajo límites de operación que son determinados por la curva de capacidad [32]. La ecuación (9) describe esta limitación:

$$Q_{j,min} \leq Q_j \leq Q_{j,max} \quad (9)$$

Donde:

Q_j Potencia reactiva del generador j.

6) *Limitación de potencia reactiva de los SVCs:* Los dispositivos compensadores de reactivos deben operar bajo sus límites de capacidad, los cuales son definidos por el proveedor y tomando en cuenta, que algunos países regulan los límites de inyección de reactivos a la red. La ecuación (10) describe esta limitación:

$$Q_{svc,min} \leq Q_{svc} \leq Q_{svc,max} \quad (10)$$

Donde:

Q_{svc} Potencia reactiva del SVC.

5.3 Modelo matemático a optimizar

Tomando en cuenta las funciones objetivos y restricciones del problema, el modelo matemático a ser resuelto para obtener la óptima ubicación de SVCs en el sistema de transmisión propuesto está determinado por:

$$FO1 = \min \sum_{i=1}^N Z_i * X_i \quad (11)$$

$$FO2 = \min \left(\sum_{i=1}^N P_{g,i} - \sum_{i=1}^N P_{c,i} \right) \quad (12)$$

Bajo las restricciones:

$$P_{g,i} - P_{c,i} = \sum_{i=1}^n V_i V_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (13)$$

$$Q_{g,i} - Q_{c,i} = \sum_{i=1}^n V_i V_k [G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (14)$$

$$0.90 \leq V_i \leq 1.10 \quad (15)$$

$$45^\circ \leq \delta_i \leq 45 \quad (16)$$

$$P_{j,min} \leq P_j \leq P_{j,max} \quad (17)$$

$$Q_{j,min} \leq Q_j \leq Q_{j,max} \quad (18)$$

$$5 \leq Q_{svc} \leq 10 \quad (19)$$

5.4 Descripción del caso de estudio

El sistema utilizado para la simulación consiste de 30 barras, 41 líneas, 21 cargas, 6 generadores, 4 transformadores y 2 bancos de capacitores. Sin embargo para la simulación, no se utilizó los bancos de capacitores, ya que el objetivo del algoritmo se centra en la compensación de reactivos, y al tener compensación previa se limita al programa. El sistema con el cuál se desarrolló el algoritmo se muestra en el Anexo 1.

Los datos del sistema para el caso de estudio se obtuvieron del Apéndice A de la IEEE, "Datos para el sistema de 30 barras de la IEEE" [16], los cuales se detallan en el Anexo 2.

Los datos mostrados del sistema del caso de estudio son utilizados para realizar la simulación del algoritmo realizado en GAMS. El cual cumple con las funciones objetivos, bajo las restricciones del

modelo matemático planteado. El pseudocódigo del algoritmo se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Algoritmo para la ubicación óptima de SVCs en sistemas eléctricos de transmisión

Algoritmo para la ubicación óptima de SVCs en sistemas eléctricos de transmisión	
Paso 1:	Inicio algoritmo.
Paso 2:	Introducir valores de escalares y set parámetros (generadores, nodos y líneas).
Paso 3:	Calcular la matriz de admitancias.
Paso 4:	Definir las variables para el problema de optimización.
Paso 5:	Ingreso de las funciones objetivos a minimizar.
	Para $j = 1$ hasta n
	$\min \sum_{l=1}^N Z_l * X_l$ $\min \left(\sum_{l=1}^N P_{g,l} - \sum_{l=1}^N P_{c,l} \right)$
	Fin Para
Paso 6:	Definir las restricciones de igualdad (balance de potencia reactiva y potencia activa) Definir las restricciones de desigualdad (voltajes, ángulos, potencia de generación, potencia de los SVCs)
Paso 7:	Visualizar los resultados obtenidos por medio del reporte.
Paso 8:	Fin

6. Análisis de Resultados

Para el estudio de resultados que presenta el algoritmo se simuló en dos escenarios. El escenario 1 mantiene los parámetros iniciales del sistema de 30

barras de la IEEE; al escenario 2 se modificó las cargas con el fin de analizar la compensación en el sistema cuando el valor de la demanda se aproxima al valor de la generación.

Además, cada uno de los escenarios cuenta con tres casos. En cada uno de los casos se tiene un número máximo de dispositivos SVC, de esta manera se puede comparar voltajes, costos y pérdidas de potencia en diferentes condiciones.

6.1 Escenario 1

El escenario 1 mantiene los datos originales del sistema de 30 barras de la IEEE. Antes de la simulación del algoritmo propuesto para la óptima ubicación de los equipos, se simula el flujo de potencia, para obtener los voltajes del sistema sin compensación.

En cada caso se tiene la comparación del sistema sin compensación y del sistema compensado por los dispositivos SVC.

1) *Caso 1:* En el caso 1 el máximo número de SVCs que se puede colocar es 1, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 17 del Anexo 3. En la Figura 4 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 2. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 1 dispositivo.

NODO	SVC [MVar]
3	5

Como se observa en la Tabla 2 el dispositivo se ubica en el nodo 3 con una potencia de 5 MVar; el valor de potencia reactiva y la ubicación del equipo en el sistema, es determinado por el software en función de las restricciones del problema, este realiza un serie de iteraciones hasta encontrar el valor que él cree óptimo para la solución del caso. Al ser un solo dispositivo, se observa que los valores de los voltajes del sistema compensado, no varía mucho en relación a los valores del sistema sin

compensación.

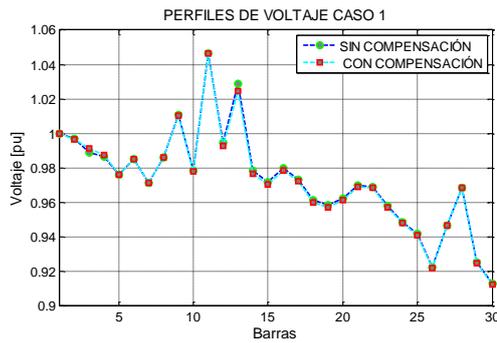


Figura 4. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 1 SVC

2) *Caso 2:* En el caso 2 el número máximo de dispositivos de SVC que se puede colocar es 3, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 18 del Anexo 3. En la Figura 5 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 3. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 3 dispositivos.

NODO	SVCs [MVar]
18	5
24	10
26	5

Como se observa en la Tabla 3 los dispositivos se ubica en los nodos 18,24 y 26, teniendo así una potencia de 20 MVar en total. En este caso los voltajes del sistema compensado, tienen una mayor variación en relación a los valores del sistema sin compensación. Además la mayoría de los voltajes en los nodos sobre pasan el 0.95 pu.

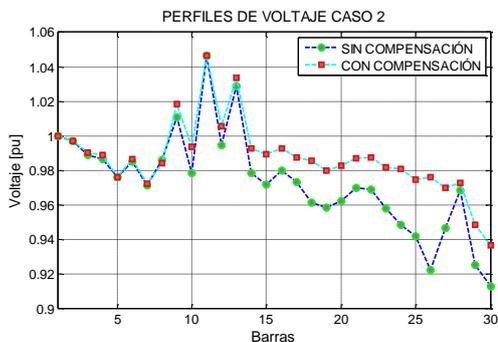


Figura 5. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 3 SVCs

3) *Caso 3:* En el caso 3 el máximo número de dispositivos de SVC que se puede colocar es 6, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 19 del Anexo 3. En la Figura 6 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Como se observa en la Tabla 4 el dispositivo se ubica en 6 nodos con una potencia de 45 MVar en total. Los voltajes mejoran significativamente en comparación al sistema sin compensación o al caso 1 donde se utiliza un solo dispositivo.

Tabla 4. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 6 dispositivos

NODO	SVCs [MVar]
3	5
7	10
15	10
21	10
26	5
30	5

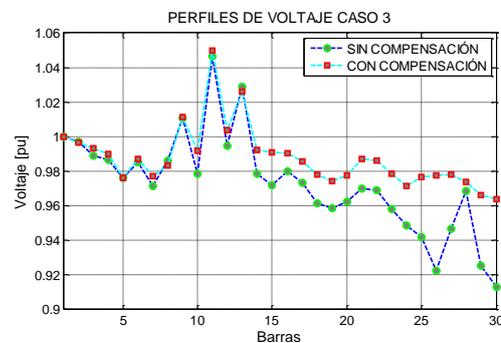


Figura 6. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 6 SVCs

Los valores de las pérdidas de potencia activa del escenario 1 se puede observar en la Tabla 5 y en la Figura 7. En los resultados se observa que las pérdidas de potencia disminuyen en el caso 2 y 3, debido a que la compensación de potencia reactiva es mayor a diferencia del caso 1 y del sistema sin compensación. La inyección de potencia reactiva ayuda a re direccionar el flujo de potencia, mejorando de esta manera la

distribución de potencia activa y a su vez minimizando las pérdidas de la misma.

Tabla 5. Pérdidas de potencia activa en pu del escenario 1

Pérdidas P [pu]	
FP	0.0420
Caso 1	0.0420
Caso 2	0.0399
Caso 3	0.0397

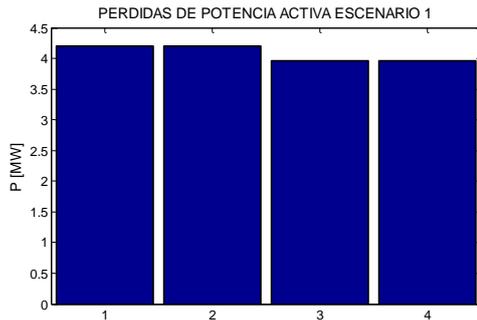


Figura 7. Pérdidas de potencia activa en el escenario 1

Los costos de la inversión de SVCs del escenario 1 se pueden ver en la Tabla 6 y en la Figura 8. Como se logra observar el mayor costo se tiene en el caso 3, debido a la cantidad de dispositivos y potencia en MVar de cada uno de ellos.

Tabla 6. Costos de inversión de los SVCs en el escenario 1

Costo SVC [USD/kVAr]	
Caso 1	125862.000
Caso 2	376029.769
Caso 3	751079.887

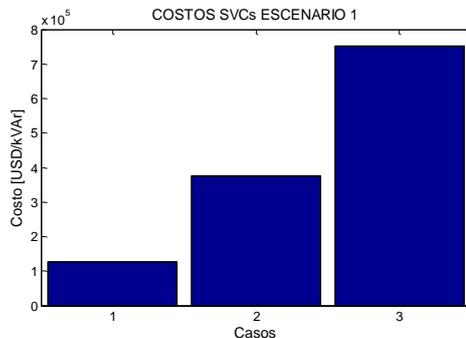


Figura 8. Costos de inversión de los SVCs en el escenario 1

En función de la mejora de los perfiles de voltajes y minimización de las pérdidas de potencia, el caso 3 es el más óptimo dentro de la simulación, a pesar de que sea la mayor inversión del escenario 1. La decisión de implementación de los dispositivos, frecuente se elige en función de la cantidad de dinero que se designe para el proyecto.

6.2 Escenario 2

En el escenario 2 se modificó los valores de la carga, aumentando el 40% del valor original de la carga del sistema de 30 barras de la IEEE. Esto se realizó con el fin de poder analizar los resultados del sistema en un estado crítico, donde los valores de la carga se aproximen a los valores de la potencia generada. Antes de la simulación del algoritmo propuesto para la óptima ubicación de los equipos, se simula el flujo de potencia, para obtener los voltajes del sistema sin compensación. En cada caso se tiene la comparación del sistema sin compensación y del sistema compensado por los dispositivos SVC.

1) *Caso 1:* En el caso 1 el máximo número de dispositivos de SVC que se puede colocar es 1, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 20 del Anexo 4. En la Figura 9 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 7. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 1 dispositivo.

NODO	SVCs [MVar]
30	10

Como se observa en la Tabla 7 el dispositivo se ubica en el nodo 30 con una potencia de 10 MVar. Analizando los valores de voltaje de cada nodo, se puede notar que el algoritmo en este caso, ubica al SVC en el nodo donde el voltaje es uno de los más bajos. Además si se compara con los resultados del escenario 1 donde la carga no fue

modificada, el perfil de voltaje que se obtiene en este caso es mucho mejor, a pesar de que en los dos se utilices un solo dispositivo.

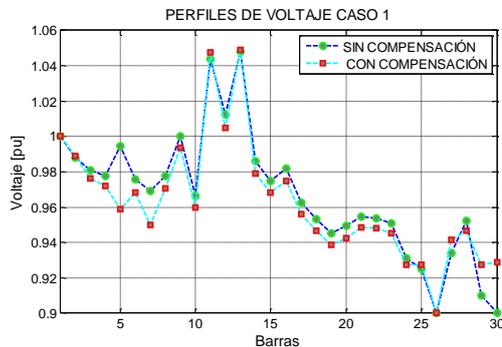


Figura 9. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 1 SVC

2) *Caso 2:* En el caso 2 el máximo número de dispositivos de SVC que se puede colocar es 3, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 21 del Anexo 4. En la Figura 10 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 8. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 3 dispositivos.

NODO	SVCs [MVar]
19	10
24	10
30	8

Como se observa en la Tabla 8 los dispositivos se ubica en los nodos 19, 24 y 30; teniendo así una potencia de 28 MVar en total. En este caso los voltajes del sistema compensado, tienen una mayor variación en relación a los valores del sistema sin compensación. Además en comparación con el sistema original, el algoritmo ubica a uno de los dispositivos en el nodo 24, donde se encuentra un banco de capacitores, el cual para la simulación no fue utilizado.

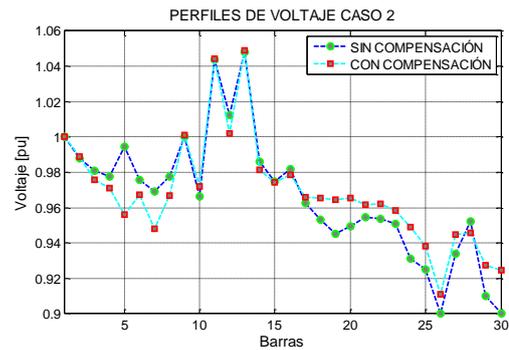


Figura 10. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 3 SVCs

3) *Caso 3:* En el caso 3 el máximo número de dispositivos de SVC que se puede colocar es 6, obteniendo los resultados que se muestra en la Tabla 22 del Anexo 4. En la Figura 11 se observa los perfiles de voltaje del sistema antes y después de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 9. Ubicación y tamaño del SVC con un máximo de 6 dispositivos.

NODO	SVCs [MVar]
17	10
19	10
21	10
24	10
26	5
30	6

Como se observa en la Tabla 9 los dispositivos se ubican en 6 nodos con una potencia de 51 MVar en total. Los voltajes mejoran significativamente en comparación al sistema sin compensación. Sin embargo en comparación con el caso 3 del escenario 1, el perfil de voltaje es mucho mejor que en este, esto se debe a que en este escenario, se aumentó la carga. Para obtener valores de voltajes similares al del escenario 1 se debería realizar la simulación del algoritmo con más dispositivos SVC, de esta manera la compensación reactiva sería mayor y el perfil de voltaje mejoraría.

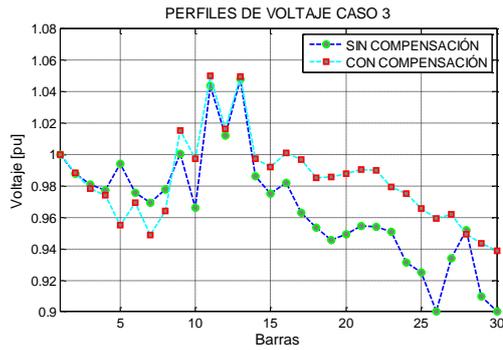


Figura 11. Vpu sin compensar Vs Vpu compensado con 6 SVCs

Los valores de las pérdidas de potencia activa del escenario 1 se puede observar en la Tabla 10 y en la Figura 12. En los resultados se observa que las pérdidas de potencia disminuyen en los tres casos. Sin embargo en el caso 3 es donde las pérdidas de potencia es menor, esto se debe a que en este caso la compensación de potencia reactiva es mayor en comparación a los otros casos.

Tabla 10. Pérdidas de potencia activa en pu del escenario 2.

	Pérdidas P [pu]
FP	0.149767869
Caso 1	0.145594916
Caso 2	0.140567123
Caso 3	0.137773425

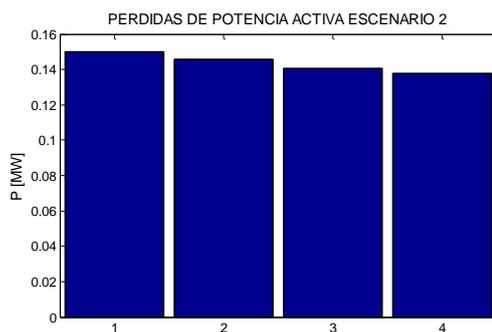


Figura 12. Pérdidas de potencia activa en el escenario 2

Los costos de la inversión de SVCs del escenario 2 se pueden ver en la Tabla 11 y en la Figura 13. Como se logra observar el mayor costo se tiene en el caso 3, debido a la cantidad de dispositivos y a la potencia en MVar de cada uno de ellos.

Tabla 11. Costos de inversión de los SVCs en el escenario 2.

	Costo SVC [USD/kVar]
Caso 1	124514.762
Caso 2	373858.309
Caso 3	748925.038

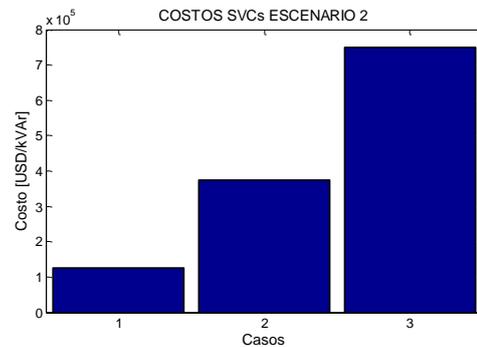


Figura 13. Costos de inversión de SVCs en el escenario 2

En función de la mejora de los perfiles de voltajes y minimización de las pérdidas de potencia, el caso 3 es el más óptimo dentro de la simulación, a pesar de que sea la mayor inversión del escenario 2.

7. Conclusiones

La ubicación óptima de dispositivos SVC es viable mediante el algoritmo presentado, el cual en función de una serie de restricciones, encuentra la mejor ubicación en las barras y el tamaño de operación de los equipos, encontrando el menor costo de implementación y disminuyendo las pérdidas de potencia activa. La simulación realizada en dos escenarios, permitió observar que la ubicación de los SVCs para cada caso propuesto es diferente, esto se debe a que el optimizador encuentra la respuesta óptima en función del número máximo de compensadores reactivos que se presenta en cada caso, además de la demanda que en cada escenario se plantea cubrir.

El aumento del 40% de la carga en el escenario 2 se realizó para que el estudio y análisis de la simulación, se

realice en estado crítico del sistema, esto ayuda a obtener valores de voltaje muy bajos en cada nodo y observar la mejora de perfil de voltaje cuando el SEP ya se encontraba compensado.

Al comparar las simulaciones de los dos escenarios, se puede observar que la diferencia de carga que los dos tienen influye en el tamaño de los dispositivos, ya que a pesar que la cantidad de equipos en los dos escenarios para cada caso es la misma, el valor de MVAr es mayor en los casos del escenario 2.

Los resultados muestran que al realizar la compensación de potencia reactiva en el sistema, los perfiles de voltaje mejoran, las pérdidas de potencia disminuyen; lo cual ayuda a mejorar la estabilidad, confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico de transmisión

7.1 Trabajos Futuros

Como continuación de este artículo, existen diversas opciones en las que se puede trabajar. Además se recomienda algunas opciones para desarrollar y mejorar el modelo. Estos se detallan a continuación:

- Para mejorar el algoritmo se recomienda incluir restricciones adicionales, como la cargabilidad de las líneas, los TAPS de los transformadores entre otros aspectos que influyen en la operación del sistema eléctrico de potencia, con el fin de obtener resultados acercados a la realidad.
- Se recomienda la investigación de otros métodos para la solución de problemas no lineales.
- Realizar un estudio de los problemas que existen al implementar dispositivos basados en electrónica de potencia, como es la inyección de armónicos en la red.

8. Referencias

[1] S. Keskes, N. Bouchiba, S. Sallem, L. Chrifi-Alaoui, and M. Kammoun, "Transient stability

enhancement and voltage regulation in SMIB power system using SVC with PI controller," *2017 6th Int. Conf. Syst. Control. ICSC 2017*, pp. 115–120, 2017.

[2] L. R. Dkrr *et al.*, "Optimal Location Identification of FACTS devices through Genetic Algorithm and the network Structural Techniques," vol. 5, pp. 5–9, 2016.

[3] M. R. Shaik and A. S. Reddy, "Optimal placement and sizing of FACTS device to overcome contingencies in power systems," *Int. Conf. Signal Process. Commun. Power Embed. Syst. SCOPES 2016 - Proc.*, pp. 838–842, 2017.

[4] Y. Valle, S. Member, J. C. Hernandez, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, "Particle Swarn and Placement Optimization," vol. 0, pp. 1–6, 2006.

[5] Q. Yu, "Applications of flexible AC transmissions system (FACTS) technology in SmartGrid and its EMC impact," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2014–Septe, no. September, pp. 392–397, 2014.

[6] H. Shayeghi, M. Moradzadeh, A. Ghasemi, and L. Vandevelde, "Simultaneous optimal placement and parameter-tuning of SVC, TCSC and PSS using Honey-Bee Mating Optimization," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, no. 1, pp. 0–4, 2013.

[7] N. Archana and R. Vidhyapriya, "Location of multi-type facts devices under contingency: An intelligent approach using modified ABC," *2016 Int. Conf. Adv. Electr. Electron. Syst. Eng. ICAEES 2016*, no. 5, pp. 477–483, 2017.

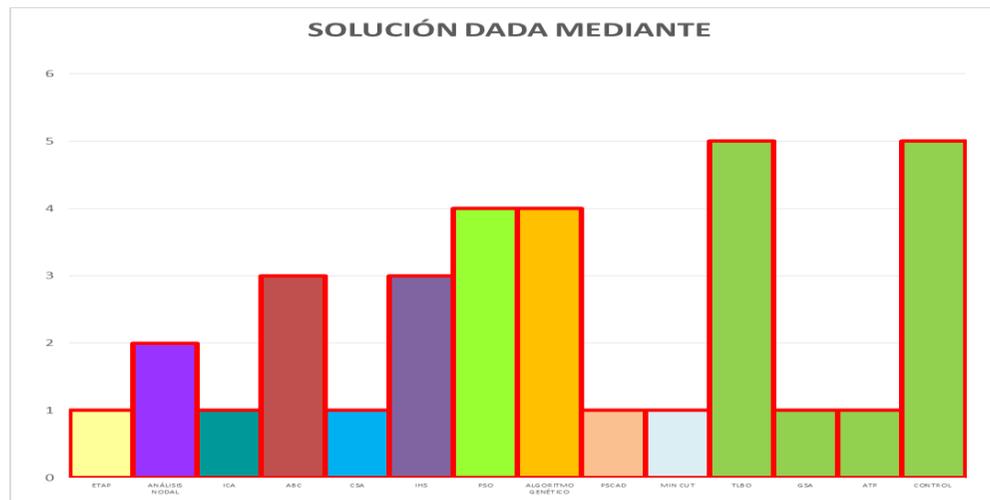
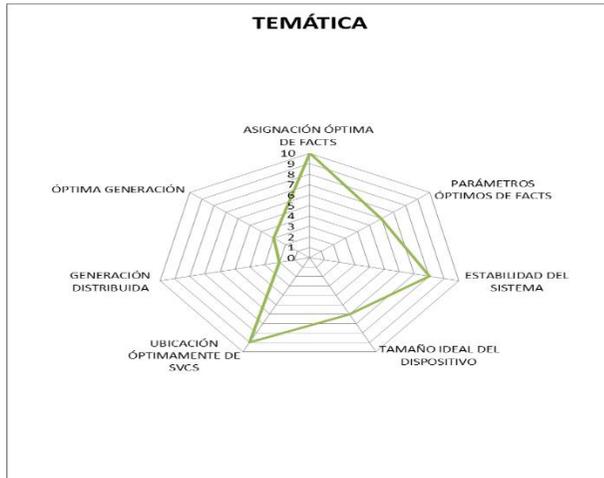
- [8] T. Duong, Y. Jiangang, and V. Truong, "Application of min cut algorithm for optimal location of FACTS devices considering system loadability and cost of installation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 979–987, 2014.
- [9] A. A. Abdulrazzaq, M. Eremia, L. Toma, and C. A. Mandis, "Optimal location and size of SVC for power losses minimization and voltage security improvement," *2015 9th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2015*, pp. 858–863, 2015.
- [10] E. Engineering and E. Engineering, "Improving Voltage Stability of Power System Using Facts Device," pp. 1–5, 2017.
- [11] R. M. Idris and H. S. Loh, "Modelling and simulation of STATCOM ramp; SVC," *Proceeding - 2013 IEEE Student Conf. Res. Dev. SCORED 2013*, no. December, pp. 16–17, 2015.
- [12] R. Agrawal, S. K. Bharadwaj, and D. P. Kothari, "Optimal location and sizing of SVC considering transmission loss and installation cost using TLBO," *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015*, no. 1, pp. 0–5, 2016.
- [13] R. Vanitha, J. Baskaran, and S. Kamalsakthi, "Enhance the Power System Performance," *2016 Int. Conf. Comput. Power, Energy Inf. Commun.*, no. 1, pp. 832–836, 2016.
- [14] I. Pisica, C. Bulac, L. Toma, and M. Eremia, "Optimal SVC Placement in Electric Power Systems Using a Genetic Algorithms Based Method," *2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest*, no. 2, pp. 1–6, 2009.
- [15] M. Rani and A. Gupta, "Steady state voltage stability enhancement of power system using facts devices," *6th IEEE Power India Int. Conf.*, pp. 1–6, 2014.
- [16] IEEE, "Appendix - A DATA FOR IEEE-30 BUS TEST SYSTEM," *IEEE*, p. 30, 1961.
- [17] B. K. Johnson, S. Member, J. M. Appikonda, G. Venkataramanan, and S. Member, "Reactive Compensation Needs for Superconducting Transmission Systems," vol. 19, no. 3, pp. 2066–2069, 2009.
- [18] D. Á. Jácome and A. Aguila, "LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP," *Universidad Politécnica Salesiana*, 2017.
- [19] G. K. Morison, "Voltage Stability Analysis Using Static," *Power*, vol. 8, no. 3, pp. 1159–1171, 1993.
- [20] B. Bhattacharyya and S. Kumar, "Approach for the solution of transmission congestion with multi-type FACTS devices," pp. 1–8, 2016.
- [21] S. Biswas and P. K. Nayak, "State-of-the-art on the protection of FACTS compensated high-voltage transmission lines : a review," vol. 3, pp. 21–30, 2018.
- [22] S. C. Selvi, "(SVC) in Power System along with Wind Power Generation," 2017.
- [23] R. A. Hooshmand, M. J. Morshed, and M. Parastegari, "Congestion management by determining optimal location of

- series FACTS devices using hybrid bacterial foraging and Nelder-Mead algorithm,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 28, pp. 57–68, 2015.
- [24] D. A. Pérez and D. F. Carrión, “UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE BÚSQUEDA INTELIGENTE,” Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [25] A. Rath, S. R. Ghatak, and P. Goyal, “Optimal allocation of Distributed Generation (DGs) and static VAR compensator (SVC) in a power system using Revamp Voltage Stability Indicator,” *2016 Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2016*, 2017.
- [26] T. Joseph, C. E. Ugalde-Loo, J. U. N. Liang, and P. Coventry, “Asset management strategies for power electronic converters in transmission networks: Application to HVdc and,” vol. 4, no. February, pp. 1–19, 2018.
- [27] W. Electric and C. Rtalrj, “STATIC REACTIVE COMPENSATION FOR POWER TRANSMISSION SYSTEMS,” no. 10, 1982.
- [28] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, “Optimal placement and sizing of Static Var Compensators in power systems using Improved Harmony Search Algorithm,” no. 7, pp. 214–218, 2011.
- [29] S. Achary, S. Behera, and E. Engineering, “Modelling and Simulation of Impact of SVC on Distance Protection of EHV Transmission Line,” *Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst.*, 2016.
- [30] F. Benhamida, I. Ziane, and S. Souag, “A Quadratic Programming Optimization for Dynamic Economic Load Dispatch: comparison with GAMS,” 2013.
- [31] B. Das, “Cost optimization of a hybrid energy storage system using GAMS Department of Electrical Engineering,” pp. 89–92, 2017.
- [32] I. J. Romero and S. R. Espinosa, “FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA REACTIVA BASADO EN ÓPTIMO DESPACHO DE CARGA USANDO GAMS,” Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [33] K. P. Nguyen, G. Fujita, N. D. Tuyen, V. N. Dieu, and T. Funabashi, “Optimal placement and sizing of SVC by using various meta-heuristic optimization methods,” *Proc. - ICPERE 2014 2nd IEEE Conf. Power Eng. Renew. Energy 2014*, vol. 2, no. 2, pp. 7–12, 2014.

8.1 Estado del arte.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVCS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE TRANSMISIÓN PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA BASADA EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA																																																
ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA																													
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE FACTS	PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FACTS	ESTABILIDAD DEL SISTEMA	TAMAÑO IDEAL DEL DISPOSITIVO	UBICACIÓN ÓPTIMAMENTE DE SVCS	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	ÓPTIMA GENERACIÓN	ACTUACIÓN DE FRENTE A UNA	MAXIMIZAR LA CAPACIDAD DE	RYSI	MEJORAR LA ESTABILIDAD DEL	DISMINUIR LOS COSTOS	MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE	MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE	TIEMPO	VELOCIDAD	POTENCIA DE GENERACIÓN	SUSCEPTANCIAS DEL SVC	POTENCIA REACTIVA	FLUJO DE POTENCIA	LIMITACIÓN DE LAS LINEAS DE	LIMITACIÓN DE LOS VOLTAJES EN	RANGO DE OPERACIÓN DE LOS SVCS	TÉCNICAS COMPUTACIONALES	ALGORITMO	META-HEURISTIC	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	SIMULACIÓN	TÉCNICAS DE CONTROL	MÉTODOS CONVENCIONALES	IMPLEMENTACIÓN	ETAP	ANÁLISIS NODAL	ICA	ABC	CSA	IHS	PSO	ALGORITMO GENÉTICO	PSCAD	MIN CUT	TLBO	GSA	ATP	CONTROL	
1	2018	ASSET MANAGEMENT STRATEGIES FOR POWER ELECTRONIC CONVERTERS IN TRANSMISSION NETWORKS: APPLICATION TO HVDC AND FACTS DEVICES	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	2018	STATE-OF-THE-ART ON THE PROTECTION OF FACTS COMPENSATED HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES: A REVIEW	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>											
3	2017	TRANSIENT STABILITY ENHANCEMENT AND VOLTAGE REGULATION IN SMIB POWER SYSTEM USING SVC WITH PI CONTROLLER	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					

8.2 Resumen de Indicadores



9. Anexos

9.1 Anexo 1

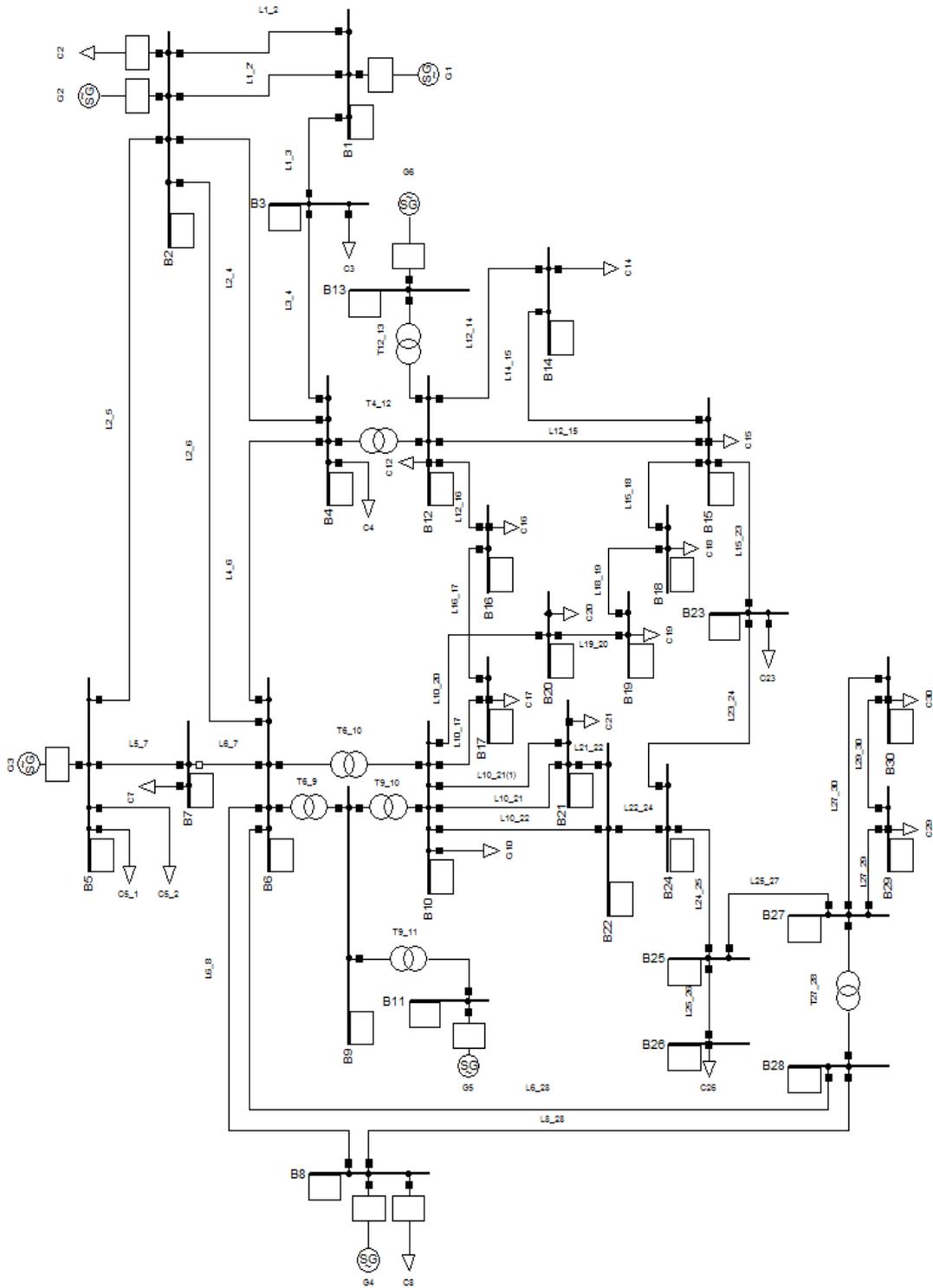


Figura 14. Sistema de 30 barras de la IEEE

9.2 Anexo 2

Tabla 12. Niveles de voltaje en las barras del sistema.

Nodo	Voltaje (kV)
1-8, 28	132
9	1
10,12,14-27, 29,30	33
11,13	11

Tabla 13. Valores de la carga del sistema.

Carga	Nodo	P (MW)	Q (Mvar)
Carga 2	2	21.7	12.7
Carga 3	3	2.4	1.2
Carga 4	4	7.6	1.6
Carga 5	5	94.2	19
Carga 7	7	22.8	10.9
Carga 8	8	30	30
Carga 10	10	5.8	2
Carga 12	12	11.2	7.5
Carga 14	14	6.2	1.6
Carga 15	15	8.2	2.5
Carga 16	16	3.5	1.8
Carga 17	17	9	5.8
Carga 18	18	3.2	0.9
Carga 19	19	9.5	3.4
Carga 20	20	2.2	0.7
Carga 21	21	17.5	11.2
Carga 23	23	3.2	1.6
Carga 24	24	8.7	6.7
Carga 26	26	3.5	2.3
Carga 29	29	2.4	0.9
Carga 30	30	10.6	1.9

Tabla 14. Datos de los transformadores del sistema.

Transformador	Ninicial	Nfinal	Potencia (MVA)
T1	6	9	100
T2	6	10	100
T3	9	11	100
T4	9	10	100
T5	4	12	100
T6	12	13	100
T7	28	27	100

Tabla 15. Datos de los generadores del sistema.

Generadores	Nodo	Pmax (MW)	Qmax (Mvar)
G1	1	200	0
G2	2	80	50
G3	5	50	40
G4	8	35	30
G5	11	30	15
G6	13	40	15

Tabla 16. Datos de las líneas del sistema.

Línea	Ninicial	Nfinal	RL (pu)	XL (pu)	B (pu)
L1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264
L2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204
L3	2	4	0.057	0.1737	0.0184
L4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042
L5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209
L6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187
L7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045
L8	5	7	0.046	0.116	0.0102
L9	6	7	0.0267	0.082	0.0085
L10	6	8	0.012	0.042	0.0045
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
L20	14	15	0.221	0.1997	0
L21	16	17	0.0824	0.1932	0
L22	15	18	0.107	0.2185	0
L23	18	19	0.0639	0.1292	0
L24	19	20	0.034	0.068	0
L25	10	20	0.0936	0.209	0
L26	10	17	0.0324	0.0845	0
L27	10	21	0.0348	0.0749	0
L28	10	22	0.0727	0.1499	0
L29	21	22	0.0116	0.0236	0
L30	15	23	0.1	0.202	0
L31	22	24	0.115	0.179	0
L32	23	24	0.132	0.27	0
L33	24	25	0.1885	0.3292	0
L34	25	26	0.2544	0.38	0
L35	25	27	0.1093	0.2087	0
L36	28	27	0	0.369	0
L37	27	29	0.2198	0.4153	0
L38	27	30	0.3202	0.6027	0
L39	29	30	0.2399	0.4533	0
L40	8	28	0.0636	0.2	0.0214
L41	6	28	0.169	0.0599	0.0065

9.3 Anexo 3

Tablas de resultados escenario 1.

Caso 1:

Tabla 17. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 1 SVC.

Nodo	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9971	0.9968
3	0.9889	0.9914
4	0.9868	0.9878
5	0.9763	0.9760
6	0.9851	0.9853
7	0.9715	0.9715
8	0.9863	0.9861
9	1.0107	1.0105
10	0.9787	0.9781
11	1.0465	1.0465
12	0.9949	0.9930
13	1.0288	1.0246
14	0.9784	0.9766
15	0.9721	0.9706
16	0.9801	0.9787
17	0.9733	0.9725
18	0.9614	0.9601
19	0.9584	0.9573
20	0.9626	0.9617
21	0.9699	0.9692
22	0.9690	0.9684
23	0.9583	0.9570
24	0.9489	0.9481
25	0.9418	0.9413
26	0.9226	0.9221
27	0.9470	0.9467
28	0.9687	0.9687
29	0.9253	0.9250
30	0.9128	0.9125

Caso 2:

Tabla 18. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 3 SVCs.

Nodo	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9971	0.9969
3	0.9889	0.9906
4	0.9868	0.9888
5	0.9763	0.9760
6	0.9851	0.9866
7	0.9715	0.9723
8	0.9863	0.9844
9	1.0107	1.0185
10	0.9787	0.9938
11	1.0465	1.0465
12	0.9949	1.0055
13	1.0288	1.0338
14	0.9784	0.9926
15	0.9721	0.9894
16	0.9801	0.9927
17	0.9733	0.9878
18	0.9614	0.9859
19	0.9584	0.9801
20	0.9626	0.9827
21	0.9699	0.9871
22	0.9690	0.9875
23	0.9583	0.9820
24	0.9489	0.9810
25	0.9418	0.9750
26	0.9226	0.9762
27	0.9470	0.9698
28	0.9687	0.9727
29	0.9253	0.9488
30	0.9128	0.9366

Caso 3:

Tabla 19. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 6 SVCs.

Nodo	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9971	0.9965
3	0.9889	0.9932
4	0.9868	0.9900
5	0.9763	0.9761
6	0.9851	0.9870
7	0.9715	0.9773
8	0.9863	0.9832
9	1.0107	1.0112
10	0.9787	0.9917
11	1.0465	1.0500
12	0.9949	1.0035
13	1.0288	1.0260
14	0.9784	0.9924
15	0.9721	0.9908
16	0.9801	0.9906
17	0.9733	0.9857
18	0.9614	0.9783
19	0.9584	0.9742
20	0.9626	0.9778
21	0.9699	0.9869
22	0.9690	0.9861
23	0.9583	0.9787
24	0.9489	0.9716
25	0.9418	0.9765
26	0.9226	0.9777
27	0.9470	0.9783
28	0.9687	0.9736
29	0.9253	0.9663
30	0.9128	0.9640

9.4 Anexo 4

Tablas de resultados escenario 2.

Caso 1:

Tabla 20. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 1 SVCs.

Nodo	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9881	0.9888
3	0.9810	0.9764
4	0.9775	0.9719
5	0.9943	0.9587
6	0.9759	0.9682
7	0.9694	0.9499
8	0.9778	0.9705
9	1.0003	0.9936
10	0.9662	0.9598
11	1.0438	1.0476
12	1.0123	1.0048
13	1.0482	1.0488
14	0.9863	0.9790
15	0.9751	0.9681
16	0.9819	0.9747
17	0.9629	0.9561
18	0.9534	0.9465
19	0.9454	0.9386
20	0.9494	0.9427
21	0.9546	0.9484
22	0.9539	0.9479
23	0.9509	0.9452
24	0.9314	0.9274
25	0.9253	0.9275
26	0.9000	0.9000
27	0.9340	0.9413
28	0.9522	0.9465
29	0.9099	0.9275
30	0.9000	0.9288

Caso 2:

Tabla 21. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 3 SVCs.

Nodo	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9881	0.9889
3	0.9810	0.9758
4	0.9775	0.9712
5	0.9943	0.9561
6	0.9759	0.9672
7	0.9694	0.9482
8	0.9778	0.9667
9	1.0003	1.0011
10	0.9662	0.9721
11	1.0438	1.0445
12	1.0123	1.0022
13	1.0482	1.0491
14	0.9863	0.9812
15	0.9751	0.9745
16	0.9819	0.9784
17	0.9629	0.9659
18	0.9534	0.9653
19	0.9454	0.9647
20	0.9494	0.9654
21	0.9546	0.9619
22	0.9539	0.9621
23	0.9509	0.9582
24	0.9314	0.9492
25	0.9253	0.9382
26	0.9000	0.9110
27	0.9340	0.9448
28	0.9522	0.9457
29	0.9099	0.9274
30	0.9000	0.9246

Caso 3:

Tabla 22. Comparación de Vpu sin compensar y Vpu compensado con 6 SVCs.

	Vpu sin SVCs	Vpu con SVCs
1	1.0000	1.0000
2	0.9881	0.9886
3	0.9810	0.9782
4	0.9775	0.9740
5	0.9943	0.9551
6	0.9759	0.9692
7	0.9694	0.9490
8	0.9778	0.9641
9	1.0003	1.0155
10	0.9662	0.9976
11	1.0438	1.0500
12	1.0123	1.0164
13	1.0482	1.0497
14	0.9863	0.9972
15	0.9751	0.9920
16	0.9819	1.0011
17	0.9629	0.9967
18	0.9534	0.9852
19	0.9454	0.9859
20	0.9494	0.9877
21	0.9546	0.9905
22	0.9539	0.9901
23	0.9509	0.9794
24	0.9314	0.9752
25	0.9253	0.9658
26	0.9000	0.9596
27	0.9340	0.9622
28	0.9522	0.9493
29	0.9099	0.9435
30	0.9000	0.9389