

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE
POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE
POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**Autor:
EDGAR STALIN PILATASIG MINCHALA**

**Tutor:
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

Quito, Julio 2019

Edgar Stalin Pilatasig Minchala

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS
DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Edgar Stalin Pilatasig Minchala (Y'1992-M'08). Nació en Quito, Ecuador el 11 de agosto de 1992, realizó sus estudios de bachillerato en el Instituto Tecnológico Superior Sucre con la especialidad Eléctrico-Industrial. Es egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en mejoramiento de perfiles de tensión en sistemas de distribución.
epilatasigm@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Rogelio Alfredo Orizondo Martinez (Y'1972 -SM10). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Área de interés: electrónica de potencia especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana.
rorizondo@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.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*Modelamiento y Simulación de equipos tipo D-FACTS de potencia en serie para sistemas de distribución*) realizado por (Edgar Stalin Pilatasig Minchala), 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 2019



.....
Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

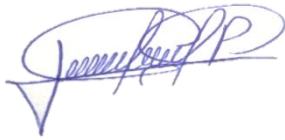
Cédula de identidad: 1757424195

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Edgar Stalin Pilatasig Minchala, con documento de identificación N° 1726524471, 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: “Modelamiento y Simulación de equipos tipo D-FACTS de potencia en serie para sistemas de distribución”, 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: Edgar Stalin Pilatasig Minchala

Cédula: 1726524471

Fecha: Julio 2019

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	5
2. Marco teórico	6
2.1 Modelos del SSSC	6
2.2 Modelo funcional de un SSSC	6
2.3 Modos de control de un SSSC	8
2.4 Modelación de un SSSC mediante inyecciones de potencia regulado con el método de newton.	9
2.5 Modelo D-SSSC.....	9
2.6 Ventajas de implementar un D-SSSC en el sistema.....	10
2.7 Circuito equivalente y restricciones de flujos de potencia.....	10
2.8 Ecuaciones de flujo de potencia de una unidad D-SSSC.....	10
2.9 Otros beneficios operativos y económicos de un D-SSSC	11
3. Modelos matemáticos del D-SSSC.	12
3.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].	12
3.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345 [V].	13
4. Resultados	16
4.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].	16
4.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345[V].	16
5. Análisis de resultados.....	17
6. Conclusión	17
7. Trabajos futuros	18
8. Referencias.....	18
8.1. Matriz del estado del arte	21
8.2 Resumen e indicadores del estado del arte.....	26
9. Anexos	28
9.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].	28
9.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345 [V].	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un SSSC conectado entre las barras n y k.	5
Figura 2. Diagrama de un D-SSSC conectado entre las barras i-j.	5
Figura 3. Modelo del SSSC con fuente corriente.....	6
Figura 4. SSSC mediante componentes de inyección de corriente.....	6
Figura 5. Diagrama funcional de un SSSC.	7
Figura 6. Circuito equivalente de un SSSC por fase.....	7
Figura 7. Diagrama de un SSSC conectado entre las barras 'i' y 'j'.....	7
Figura 8. Circuito equivalente del SSSC.	9
Figura 9. Estructura de un D-SSSC.	10
Figura 10. Principio de operación de un D-SSSC.....	10
Figura 11. Compensación trifásica.....	10
Figura 12. Circuito equivalente monofásico del convertidor D-SSSC.	10
Figura 13. Modelo 1.....	13
Figura 14. Modelo 2.....	14
Figura 15. Magnitud de voltaje en la barra 14 en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 1.....	16
Figura 16. Pérdidas totales del sistema en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 1.....	16
Figura 17. Lugar geométrico de la potencia para la barra 13 modelo 1.....	16
Figura 18. Lugar geométrico de la potencia para la barra 14 modelo 1.....	16
Figura 19. Magnitud de voltaje en la barra 14 en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 2.....	16
Figura 20. Pérdidas totales del sistema en función del ángulo modelo 2.	17
Figura 21. Lugar geométrico de la potencia para la barra 13 modelo 2.....	17
Figura 22. Lugar geométrico de la potencia para la barra 14 modelo 2.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de las potencias consumidas por las cargas del sistema.	15
Tabla 2: Datos de las tensiones de los transformadores del sistema.....	15
Tabla 3: Datos de las tensiones de los generadores del sistema.	15
Tabla 4: Datos de las líneas del sistema.....	15

ANEXOS

Anexo 1. Lugar geométrico de la potencia para la barra 9 modelo 1.	28
Anexo 2. Lugar geométrico de la potencia para la barra 17 modelo 1.	28
Anexo 3. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_PV modelo 1.....	28
Anexo 4. Lugar geométrico de la potencia para la barra 6 modelo 1.	28
Anexo 5. Lugar geométrico de la potencia para la barra 7 modelo 1.	28
Anexo 6. Lugar geométrico de la potencia para la barra 8 modelo 1.	29
Anexo 7. Lugar geométrico de la potencia para la barra 4 modelo 1.	29
Anexo 8. Lugar geométrico de la potencia para la barra 5 modelo 1.	29
Anexo 9. Lugar geométrico de la potencia para la barra 2 modelo 1.	29
Anexo 10. Lugar geométrico de la potencia para la barra 3 modelo 1.	29
Anexo 11. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC1 modelo 1.	29
Anexo 12. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC2 modelo 1.	30
Anexo 13. Lugar geométrico de la potencia para la barra 15 modelo 1.	30
Anexo 14. Lugar geométrico de la potencia para la barra 16 modelo 1.	30
Anexo 15. Lugar geométrico de la potencia para la barra 9 modelo 2.	30
Anexo 16. Lugar geométrico de la potencia para la barra 17 modelo 2.	30
Anexo 17. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_PV modelo 2.....	30
Anexo 18. Lugar geométrico de la potencia para la barra 6 modelo 2.	31
Anexo 19. Lugar geométrico de la potencia para la barra 7 modelo 2.	31
Anexo 20. Lugar geométrico de la potencia para la barra 8 modelo 2.	31
Anexo 21. Lugar geométrico de la potencia para la barra 4 modelo 2.	31
Anexo 22. Lugar geométrico de la potencia para la barra 5 modelo 2.	31
Anexo 23. Lugar geométrico de la potencia para la barra 2 modelo 2.	31
Anexo 24. Lugar geométrico de la potencia para la barra 3 modelo 2.	32
Anexo 25. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC1 modelo 2.	32
Anexo 26. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC2 modelo 2.	32
Anexo 27. Lugar geométrico de la potencia para la barra 15 modelo 2.	32
Anexo 28. Lugar geométrico de la potencia para la barra 16 modelo 2.	32

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Resumen

Este artículo presenta un estudio sobre un compensador estático síncrono en serie para distribución (D-SSSC). El D-SSSC permite controlar los flujos de potencia activa y el flujo de potencia reactiva en las líneas de distribución del sistema. La simulación de un D-SSSC en un sistema de distribución eléctrico se realizó mediante el entorno de programación MATLAB-Simulink para dos modelos: modelo 1, una fuente de voltaje en el devanado primario conectado en serie al devanado secundario de un transformador y modelo 2, una fuente de tensión acoplada a una impedancia en serie a la línea de distribución. Para ambos modelos, las magnitudes de tensión corresponden al 10% y al 5% de la tensión nominal de la red principal a la que está conectado el sistema de distribución eléctrico. Las simulaciones fueron realizadas sobre un sistema radial desbalanceado propio de las redes de distribución. Los resultados de la simulación muestran la capacidad del equipo para controlar el perfil de voltaje; también se obtienen las pérdidas totales del sistema en función de la fuente de tensión del ángulo D-SSSC, también se obtiene la tensión en la barra D-SSSC en función de la fuente de tensión del ángulo D-SSSC y las curvas de operación de las potencias P y Q.

Palabras Clave: Control de flujo de potencia activa, control de flujo de potencia reactiva, Compensador Estático Sincrónico Serie de Distribución, perfil de voltaje, SSSC.

Abstract

This article presents a study on a synchronous static compensator in series for distribution (D-SSSC). The D-SSSC allows to control the flows of active power and the flow of reactive power in the distribution lines of the system. The simulation of a D-SSSC in an electrical distribution system was made by the MATLAB-Simulink programming environment for two models: model 1, a voltage source in the primary winding connected in series to the secondary winding of a transformer and model 2, a voltage source coupled to an impedance in series to the distribution line. For both models, the voltage magnitudes correspond to 10% and 5% of the nominal voltage of the main network to which the electrical distribution system is connected. The simulations were performed on an unbalanced radial system typical of distribution networks. The results of the simulation show the ability of the equipment to control the voltage profile; the total system losses are also obtained as a function of the voltage source of the D-SSSC angle, the voltage in the D-SSSC bar is also obtained as a function of the voltage source of the D-SSSC angle and the operating curves of the powers P and Q.

Keywords: Active power control, reactive power control, Distribution Series Static Synchronous Compensator, voltage profile, SSSC.

1. Introducción

Los Controladores de Potencia Flexible en Corriente Alterna, abreviados por sus siglas en inglés (FACTS) son controladores fundamentados en la electrónica de potencia, que se han propuesto para modificar el comportamiento del sistema eléctrico de potencia (SEP). Los controladores FACTS se clasifican según lo indicado en [1]. Estos equipos pueden controlar el voltaje de una barra y regular los flujos de potencia activa y flujos de potencia reactiva en una línea de transmisión. Al incidir en algunos parámetros y variables del SEP pueden ser usados en las fases de operación y planificación de los sistemas eléctricos de energía modernos [2]. Los controladores FACTS más importantes son el compensador síncrono estático (STATCOM), el compensador estático síncrono en serie (SSSC) y el controlador de flujo de potencia unificado (UPFC). En años recientes, se ha planteado su aplicación para niveles de voltajes propios de subtransmisión y distribución primaria. Este es el caso del compensador estático síncrono en serie para distribución (D-SSSC). Dos dispositivos FACTS pueden proporcionar una compensación capacitiva en serie que son: el condensador en serie controlado por tiristor (TCSC) y el compensador estático síncrono en serie. El STATCOM puede ser una buena solución para resolver el problema de la compensación reactiva, armónicos en las cargas no lineales y la corrección del factor de potencia en las corrientes de carga [3]. Los controladores de serie combinados como los controladores de flujo de potencia interlínea (IPFC), proveen una compensación reactiva en serie para cada línea, también realizan la transferencia de potencia real entre las líneas por medio de un enlace de alimentación [4].

El SSSC está conformado por un condensador de CC, un VSC y un controlador conectado a la línea de transmisión por medio de un transformador. El circuito equivalente de un SSSC se muestra en la Figura 1.

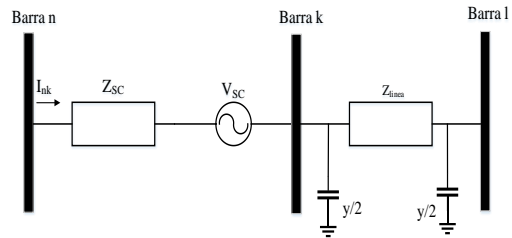


Figura 1. Diagrama de un SSSC conectado entre las barras n y k.

En este trabajo se sugiere el uso del dispositivo compensador estático síncrono en serie distribuido, para mejorar el perfil de voltaje en las redes eléctricas de distribución y controlar el flujo de potencias para esa línea. Así mismo los dispositivos D-SSSC no requiere de inversión de aislamiento de voltaje, los componentes electrónicos de potencia en los módulos D-SSSC están separados eléctricamente del sistema por medio de un transformador [5]. Cada módulo D-SSSC está formado por una fuente de voltaje monofásica desfasada arbitrariamente, conectada en serie con una impedancia de cortocircuito del transformador por cada fase. La Figura 2 muestra un circuito equivalente.

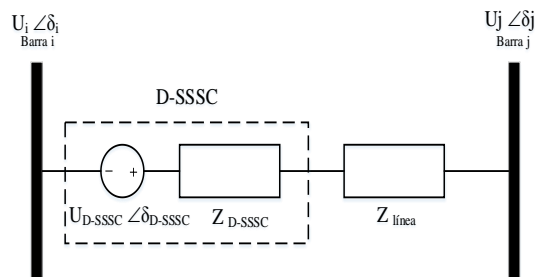


Figura 2. Diagrama de un D-SSSC conectado entre las barras i-j.

2. Marco teórico

A continuación, se presenta los modelos para un SSSC, conectado entre dos barras para un sistema de transmisión.

2.1 Modelos del SSSC

El propósito principal de agregar el SSSC entre las barras n y k , es mantener el flujo de energía a través de la línea a un valor específico, siendo k una barra auxiliar entre las barras existentes y considerándolo como el punto de referencia de la dirección del flujo de potencia [6]. El flujo de potencia que circula a través de la línea de transmisión puede ser regulado por medio del V_{sc} . Además, V_{sc} del SSSC se puede convertir en una fuente de corriente I_{sc} , como se muestra a continuación en la Figura 3.

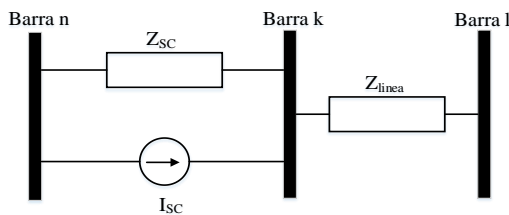


Figura 3. Modelo del SSSC con fuente corriente.

La fuente de corriente en serie entre las barras n y k , también puede ser reemplazada por dos fuentes de corriente de derivación, en las barras n y k , como se muestra en la Figura 4.

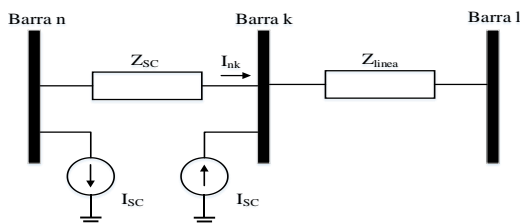


Figura 4. SSSC mediante componentes de inyección de corriente.

Cuando un SSSC inyecta un voltaje alterno que conduce una corriente de línea, emula a una reactancia inductiva que se encuentra en serie a la línea de transmisión, causando que el flujo de energía y la corriente de la línea disminuyan a medida que aumenta el nivel de compensación. Así se considera que el SSSC está funcionando en modo inductivo. Cuando un SSSC inyecta una tensión alterna que retrasa la corriente de línea, emula a una reactancia capacitiva, lo que hace que el flujo de energía y la corriente de la línea aumenten a medida que aumenta el nivel de compensación funcionando así el SSSC en modo capacitivo [6].

2.2 Modelo funcional de un SSSC

El SSSC va conectado en serie a la línea de transmisión. Además, está conformado por: un transformador de acoplamiento, un VSC y un condensador de CC. El transformador de acoplamiento inyecta un voltaje en serie a la línea de transmisión. El diagrama funcional del SSSC se muestra en la Figura 5. Además, se muestra en la Figura 6 el circuito equivalente de un SSSC donde R_{CC} y X_{CC} son la resistencia y la reactancia de fuga del transformador de acoplamiento. El circuito equivalente de un SSSC incorporado entre dos barras 'i' y 'j' de una red de sistema de alimentación se muestra en la Figura 7. El SSSC está representado por una fuente de voltaje V_{SE} , que se conecta a con un transformador de acoplamiento con impedancia Z_T , en serie a la línea de transmisión [16].

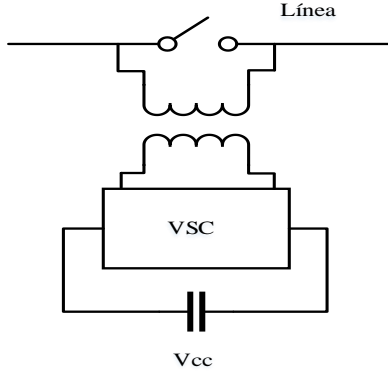


Figura 5. Diagrama funcional de un SSSC.



Figura 6. Circuito equivalente de un SSSC por fase.

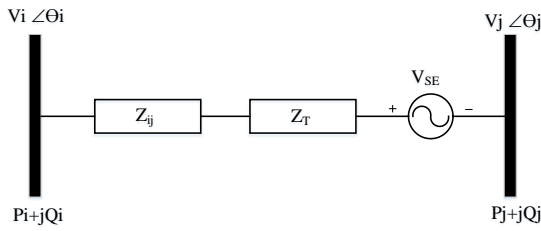


Figura 7. Diagrama de un SSSC conectado entre las barras 'i' y 'j'.

Para cambiar la impedancia de la línea de transmisión al cual está conectado el dispositivo SSSC, el SSSC debe generar e insertar una tensión en serie. Las ecuaciones para los flujos de potencia de la línea de transmisión se dan a continuación.

$$P_{ij} = V_i * V_j * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij}) - V_i^2 * Y_{ij} * \cos\phi_{ij} + V_i * V_{SE} * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_{SE} - \phi_{ij}) \quad (1)$$

$$P_{ji} = V_j * V_i * Y_{ij} * \cos(\theta_j - \theta_i - \phi_{ij}) - V_j^2 * Y_{ij} * \cos\phi_{ij} - V_j * V_{SE} * Y_{ij} * \cos(\theta_j - \theta_{SE} - \phi_{ij}) \quad (2)$$

$$\phi_{ij})$$

$$Q_{ij} = V_i * V_j * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j - \phi_{ij}) + V_i^2 * Y_{ij} * \sin\phi_{ij} + V_i * V_{SE} * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_{SE} - \phi_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ji} = V_j * V_i * Y_{ij} * \sin(\theta_j - \theta_i - \phi_{ij}) + V_j^2 * Y_{ij} * \sin\phi_{ij} - V_j * V_{SE} * Y_{ij} * \sin(\theta_j - \theta_{SE} - \phi_{ij}) \quad (4)$$

$$P_{SE} = -V_{SE} * V_j * Y_{ij} * \cos(\theta_{SE} - \theta_j - \phi_{ij}) - V_{SE}^2 * Y_{ij} * \cos\phi_{ij} + V_i * V_{SE} * Y_{ij} * \cos(\theta_{SE} - \theta_i - \phi_{ij}) \quad (5)$$

SSSC es más efectivo que el STATCOM, para mejorar el control de flujo de potencia activa y reactiva en un sistema de transmisión [6]. Por lo tanto, la potencia SSSC inyectada debe agregarse al flujo de línea calculado en ambos nodos en la inserción del SSSC. Al hacerlo, se obtiene el flujo de línea con el SSSC insertado [7].

La compensación capacitiva en serie es usada en líneas de transmisión largas, con la finalidad de mantener la impedancia de la línea de transmisión del SEP estable, además esta compensación aumenta la capacidad de transferencia de potencia y la estabilidad transitoria [8]. Los condensadores dieléctricos se han instalado como una forma económica y eficiente para proporcionar compensación capacitiva en serie. Entre los métodos de control de flujo de potencia, el método de control de potencia activa ha sido el más reconocido [9].

Para el monitoreo del flujo de potencia del sistema de transmisión el SSSC tiene dos esquemas. En el primer esquema denominado esquema de emulación de reactancia, es cuando el SSSC realiza una

función de la impedancia de la línea de transmisión, esto se logra controlando la tensión de cuadratura del SSSC [10] [17]. En el segundo esquema de control, llamado esquema de control de voltaje de cuadratura, el SSSC introduce un voltaje de cuadratura en la línea de transmisión, pudiendo así invertir el flujo de potencia del SEP, este esquema muestra un rendimiento superior al esquema de control de emulación de reactancia [18].

Las magnitudes de los voltajes de barra, están normalmente reguladas dentro del rango aceptable, que es del $\pm 5\%$ del 1 por unidad. La diferencia de ángulo de fase entre dos barras (δ) es normalmente baja, para satisfacer la condición de estabilidad del ángulo. La potencia activa de sistema depende de la reactancia de la línea (X_L). Si el voltaje administrado por el SSSC se retrasa con respecto a la corriente de línea en 90 grados, se obtiene una compensación de voltaje capacitiva en serie a la línea de transmisión. Pero, si el voltaje administrado por el SSSC lleva la corriente de línea en 90 grados, se logra una compensación inductiva en serie. El alto valor del capacitor de almacenamiento, es adecuado para la compensación de líneas largas, con el fin de mantener la estabilidad dinámica a largo plazo. En el caso de sistemas de distribución, el compensador estático síncrono en serie, es necesario disminuir el valor del condensador de almacenamiento, con el objetivo de lograr rentabilidad y estabilidad dinámica a corto y largo plazo para eliminar la resonancia subcrónica [10].

El SSSC tiene una velocidad de respuesta de control de flujo de potencia muy rápida (en el orden de milisegundos). El compensador estático síncrono en serie, puede resolver exitosamente problemas relacionados a sobrecarga de líneas de carga pesada y de transformadores. El tamaño de la carga tiene poco efecto en la capacidad de regulación de un SSSC, cuando se instala un

conjunto de SSSC en una sola línea, el SSSC opera principalmente en el modo de potencia activa fija o potencia activa limitada [19] [20].

El IPFC es la versión más sencilla de este tipo de controlador, consiste en dos convertidores de CC a CA. Los IPFC permiten controlar los flujos de potencia P y Q de la línea de transmisión del SEP. Los IPFC en una subestación, están conectados con dos líneas de transmisión en serie, a través de transformadores. En condiciones de alta demanda, puede presentarse una reducción importante en los voltajes del SEP. Esta situación se presenta por la reducción de la potencia reactiva [11]. La selección del SSSC se puede lograr relacionando la potencia de la línea de transmisión con la ecuación (6) y la Figura 6 [12].

$$P = \frac{V_S * V_R}{X_L - \frac{V_C}{I}} * \sin\delta \quad (6)$$

Donde P es el flujo de potencia activo en el sistema.

V_S voltaje final de envío

V_R voltaje final de recepción

V_C voltaje inyectado

δ ángulo entre el extremo emisor y el extremo receptor

X_L impedancia de la línea

2.3 Modos de control de un SSSC

El SSSC que se ve como fuente de voltaje, es capaz de producir un voltaje de CA trifásico a la frecuencia fundamental con diferente ángulo de fase y magnitud [13]. Las descripciones matemáticas de los cuatro modos de control del SSSC [14], se presentan a continuación en referencia a la Figura 8.

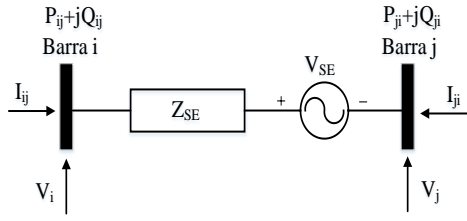


Figura 8. Circuito equivalente del SSSC.

$$\text{Re}(V_{SE} * I_{ji}^*) = 0 \quad (7)$$

2.3.1 Modo 1: control del flujo de potencia activa.

Su restricción es la siguiente:

$$P_{ji} - P_{ji}^{\text{espec}} = 0 \quad (8)$$

Donde P_{ji}^{espec} es la referencia de control de flujo de potencia activa especificada.

2.3.2 Modo 2: control del flujo de potencia reactiva.

Su restricción es la siguiente:

$$Q_{ji} - Q_{ji}^{\text{espec}} = 0 \quad (9)$$

Donde Q_{ji}^{espec} es la referencia de control de flujo de potencia reactiva especificada.

2.3.3 Modo 3: control de voltaje de barra.

Su restricción es la siguiente:

$$V_i - V_i^{\text{espec}} = 0 \quad \text{o} \quad V_j - V_j^{\text{espec}} = 0 \quad (10)$$

Donde V_i^{espec} y V_j^{espec} son las referencias de control de tensión de las barras.

2.3.4 Modo 4: control de impedancia (reactancia).

En este modo, V_{SE} está regulado para controlar la reactancia equivalente del SSSC a una referencia de reactancia especificada.

$$X_{\text{comp}} - X_{\text{comp}}^{\text{espec}} = 0 \quad (11)$$

Donde $X_{\text{comp}}^{\text{espec}}$ es la referencia de reactancia especificada. Mientras X_{comp} es una función de las variables de estado V_i, V_j, V_{SE} .

2.4 Modelación de un SSSC mediante inyecciones de potencia regulado con el método de newton.

En el método de newton se debe obtener una función que tiene la propiedad de ser igual a cero, cuando se cumplen los objetivos del problema, esta función es generalmente no lineal, además este método utiliza la sensibilidad de primer orden para tratar de encontrar numéricamente el cero que proporcionara la solución al problema, también es llamada función de criterios. Este modelo es más útil que el modelo convencional ya que este modelo tiene mejor convergencia que el método convencional [15].

2.5 Modelo D-SSSC

Un D-SSSC es un dispositivo SSSC diseñado para operar en distribución [21]. La Figura 9 muestra la estructura interna de un D-SSSC.

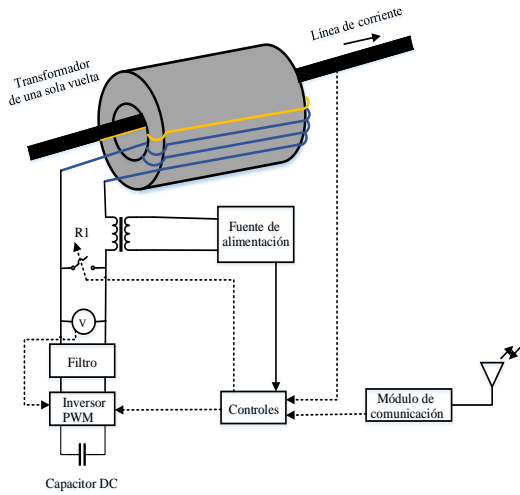


Figura 9. Estructura de un D-SSSC.

2.6 Ventajas de implementar un D-SSSC en el sistema.

La implementación de un dispositivo D-SSSC, nos proporciona una capacidad compensatoria según la demanda y carga futura existente. Menor gasto inicial en electrónica de potencia, fácil mantenimiento y reparación. Además de una mayor fiabilidad del sistema de distribución [22]. La Figura 10 muestra el circuito equivalente para un SSSC que también es válido para un D-SSSC.

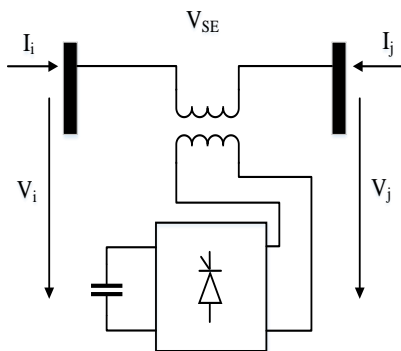


Figura 10. Principio de operación de un D-SSSC.

2.7 Circuito equivalente y restricciones de flujos de potencia

El modelado de un D-SSSC, está basado en el modelado de un SSSC. Las tres unidades D-SSSC monofásicas se colocan de manera independiente en serie a la línea de distribución primaria del sistema, como se muestra a continuación en la Figura 11.

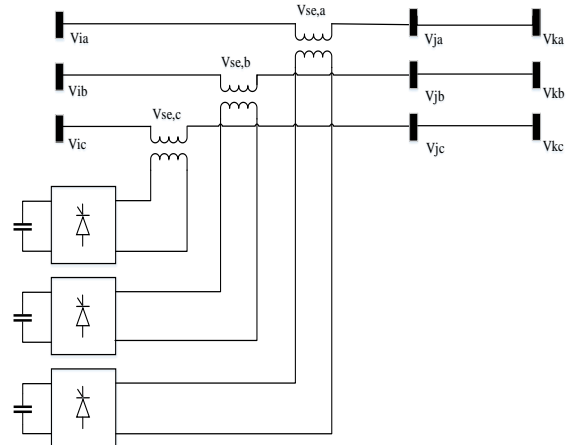


Figura 11. Compensación trifásica.

2.8 Ecuaciones de flujo de potencia de una unidad D-SSSC.

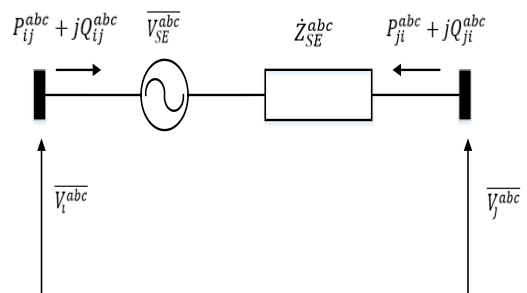


Figura 12. Circuito equivalente monofásico del convertidor D-SSSC.

$$\begin{aligned}
 P_{ij}^{abc} &= V_i^{2(abc)} * g_{ii}^{abc} - V_i^{abc} * \\
 &V_j^{abc} (g_{ij}^{abc} * \cos(\theta_i^{abc} - \theta_j^{abc}) + \\
 &b_{ij}^{abc} * \sin(\theta_i^{abc} - \theta_j^{abc})) - V_i^{abc} * \\
 &V_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} * \cos(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) + \\
 &b_{ij}^{abc} * \sin(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij}^{abc} &= -V_i^{2(abc)} * b_{ii}^{abc} - V_i^{abc} * \\
V_j^{abc} (g_{ij}^{abc} * \sin(\theta_i^{abc} - \theta_j^{abc}) - \\
b_{ij}^{abc} * \cos(\theta_i^{abc} - \theta_j^{abc})) - V_i^{abc} * \\
V_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} * \sin(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) - \\
b_{ij}^{abc} * \cos(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{ji}^{abc} &= V_j^{2(abc)} * g_{jj}^{abc} - V_i^{abc} * \\
V_j^{abc} (g_{ij}^{abc} * \cos(\theta_j^{abc} - \theta_i^{abc}) + \\
b_{ij}^{abc} * \sin(\theta_j^{abc} - \theta_i^{abc})) + V_j^{abc} * \\
V_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} * \cos(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) + \\
b_{ij}^{abc} * \sin(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ji}^{abc} &= -V_j^{2(abc)} * b_{ii}^{abc} - V_i^{abc} * \\
V_j^{abc} (g_{ij}^{abc} * \sin(\theta_j^{abc} - \theta_i^{abc}) - \\
b_{ij}^{abc} * \cos(\theta_j^{abc} - \theta_i^{abc})) + V_j^{abc} * \\
V_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} * \sin(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) - \\
b_{ij}^{abc} * \cos(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) \quad (15)
\end{aligned}$$

$$g_{ij}^{abc} + jb_{ij}^{abc} = \frac{1}{Z_{SE}^{abc}} \quad (16)$$

$$g_{ii}^{abc} = g_{jj}^{abc} = g_{ij}^{abc} \quad (17)$$

$$b_{ii}^{abc} = b_{jj}^{abc} = b_{ij}^{abc} \quad (18)$$

Al insertar la unidad D-SSSC en el SEP, se necesitan dos restricciones adicionales de energía para resolver la magnitud de voltaje y el ángulo de fase. Siendo la segunda restricción la de flujo de potencia activa P, de la línea de distribución compensada dada por (19) (20) y (21) respectivamente.

$$IP = \text{Re}\{\bar{V}_{SE}^{abc} * \bar{I}_{ji}^{abc*}\} = 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
\text{Re}\{\bar{V}_{SE}^{abc} * \bar{I}_{ji}^{abc*}\} &= -\bar{V}_i^{abc} * \\
\bar{V}_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} \cos(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) - b_{ij}^{abc}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sin(\theta_i^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) + \bar{V}_j^{abc} * \\
\bar{V}_{SE}^{abc} (g_{ij}^{abc} * \cos(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc}) + \\
b_{ij}^{abc} * \sin(\theta_j^{abc} - \theta_{SE}^{abc})) \quad (20)
\end{aligned}$$

$$P_{ji}^{abc} - P_{ji}^{abc,espec} = 0 \quad (21)$$

Los equipos D-SSSC, realizan cambios en la impedancia de la línea de distribución para mejorar la capacidad de traspaso de energía. Estos dispositivos pueden trabajar con o sin equipos de comunicaciones. El D-SSSC mantiene el normal funcionamiento del sistema eléctrico incluso durante condiciones de falla, lo que mejora la confiabilidad y seguridad de la red de distribución [22] [23].

2.9 Otros beneficios operativos y económicos de un D-SSSC.

Una línea de distribución con múltiples módulos D-SSSC, puede obtener beneficios significativos a nivel de sistema [24], entre los que podemos mencionar son :

- Reduce la congestión del sistema.
- Aumenta la capacidad de transferencia disponible (ATC) del sistema.
- Mejora la confiabilidad y la capacidad del sistema en caso de contingencias.
- Mejora la estabilidad del sistema.

Esto se puede hacerlo con un menor costo de capital y de operación, que la mayoría de las soluciones convencionales. El funcionamiento de los módulos D-SSSC, se puede coordinar desde el centro de control del sistema, para realizar una variedad de funciones de optimización o condiciones de operación [24] [29] [30] que incluyen:

- a) Mantener las líneas fuera de la congestión o por debajo del límite térmico.
- b) Reconfigurar los flujos de corriente, para compensar las líneas disparadas.
- c) Disminución de la susceptibilidad a la resonancia sub-sincrónica.
- d) Reducción marginal de las corrientes de falla.
- e) Amortiguación de las oscilaciones del sistema.

Desde una perspectiva operativa, las siguientes características pueden realizarse para los sistemas D-SSSC [24] [29] [30]:

- a) Capacidad para monitorear la temperatura real del conductor y limitar manualmente o automáticamente las corrientes en función de la temperatura del conductor.
- b) La falla de una sola unidad tiene un impacto insignificante en el rendimiento del sistema.
- c) Robusto en condiciones de falla típicas.
- d) Se puede utilizar con conductores convencionales o avanzados.
- e) Instalación fácil y rápida.

El D-SSSC tiene muchas aplicaciones, que se citan en la literatura [25] [26] [27] [28]. En [25] un D-SSSC se emplea en serie a un límite de cortocircuito.

3. Modelos matemáticos del D-SSSC.

En la Figura 13 y en la Figura 14 se presentan sendos diagramas unifilares de dos sistemas de distribución desbalanceados, con los modelos para un D-SSSC presentados en este trabajo. En el primer modelo, el D-SSSC actúa como una

fuerza de tensión a 60 ciclos, en el primario de un transformador cuyo secundario está en serie a la línea de distribución. Este es el modelo 1. También se modela el D-SSSC como una fuente de tensión en serie conectada a una impedancia, que representa la impedancia de cortocircuito de este transformador. Este es el modelo 2. Se propone, para ambos modelos dos magnitudes de tensión, correspondientes al 10% y al 5% de la magnitud del voltaje nominal de la red principal al cual se conecta el sistema eléctrico en distribución.

En lo que respecta al ángulo asociado a esta fuente, se considera que éste es arbitrario. En las simulaciones se ha variado este ángulo para mostrar todos los puntos de operación del equipo. Para ambos modelos, la fuente de tensión o voltaje posee solo la frecuencia de la armónica principal, es decir, 60 [Hz]. La estrategia de modulación por ancho de pulso que puede funcionar para el D-SSSC entrega esta armónica y además un conjunto de armónicas de alta frecuencia que son atenuadas en el SEP. En esta simulación no se han considerado estas armónicas de alta frecuencia.

A continuación, se presentan los cálculos de los parámetros del transformador R_{cc} , X_{cc} y L_{cc} . Para garantizar la equivalencia de ambos modelos, los parámetros del transformador son los mismos que los de la impedancia conectada en serie a la fuente del otro modelo. Para las simulaciones, el equipo fue insertado entre las barras 13 y 14.

3.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].

A continuación, se presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de distribución, que muestra un D-SSSC modelado como una fuente de tensión en

serie a un transformador por fase. El D-SSSC se incluye en la barra 14.

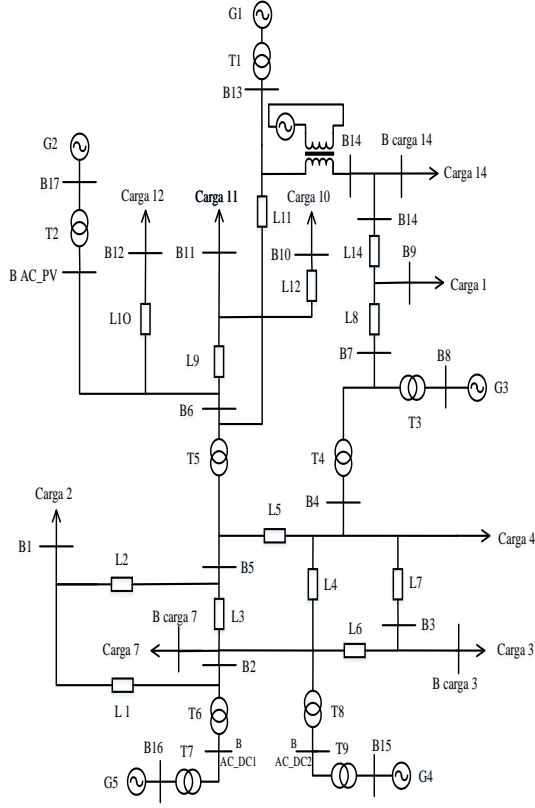


Figura 13. Modelo 1.

$$V_b = \frac{0.69}{\sqrt{3}} \text{ [KV]} \quad (22)$$

$$S_b = 1 \text{ [MVA]}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (23)$$

$$W1 \quad Z_{cc} = 2.5\% = 0.025 \text{ [pu]}$$

$$W2 \quad Z_{cc} = 2.5\% = 0.025 \text{ [pu]}$$

$$\frac{X}{R} = 1 \quad X=R$$

$$0.025 \text{ [\Omega]} = \sqrt{R_{cc}^2 + R_{cc}^2} \quad (24)$$

$$R_{cc} = 0.01767 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{cc} = 0.01767 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{377} = 0.047 \text{ [mH]} \quad (25)$$

$$V_b = \frac{0.345}{\sqrt{3}} \text{ [KV]} \quad (26)$$

$$S_b = 1 \text{ [MVA]}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (27)$$

$$W1 \quad Z_{cc} = 2.5\% = 0.025 \text{ [pu]}$$

$$W2 \quad Z_{cc} = 2.5\% = 0.025 \text{ [pu]}$$

$$\frac{X}{R} = 1 \quad X=R$$

$$0.025 \text{ [\Omega]} = \sqrt{R_{cc}^2 + R_{cc}^2} \quad (28)$$

$$R_{cc} = 0.01767 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{cc} = 0.01767 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{377} = 0.047 \text{ [mH]} \quad (29)$$

3.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345 [V].

A continuación, se presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de distribución, que muestra un D-SSSC modelado como una fuente de tensión en serie conectado a una impedancia, por fase. El D-SSSC se incluye en la barra 14.

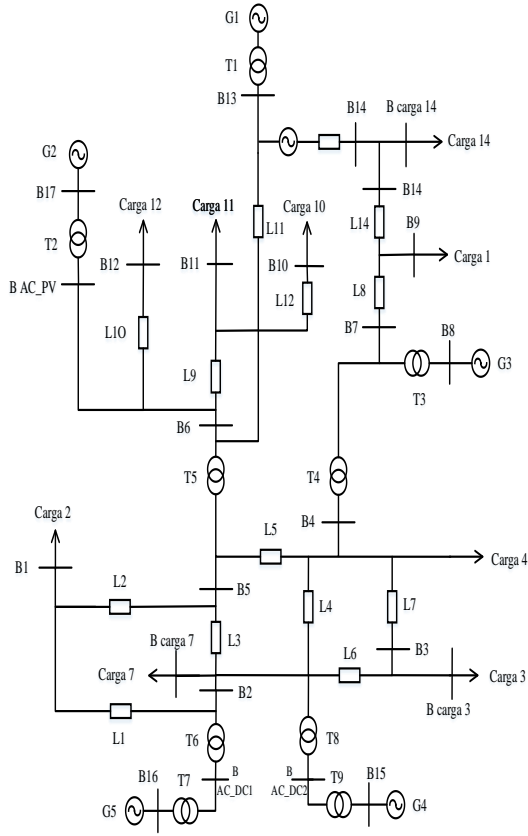


Figura 14. Modelo 2.

$$V_b = \frac{0.69}{\sqrt{3}} \text{ [kV]} \quad (30)$$

$$S_b = 1 \text{ [MVA]}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (31)$$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{0.69}{\sqrt{3}}\right)^2}{1} = 0.1587 \text{ [\Omega]} \quad (32)$$

$$\frac{X}{R} = 1 \quad X = R$$

$$Z_{cc} = 0.05\%(0.1587) = 0.007935 \text{ [\Omega]}$$

$$0.007935 \text{ [\Omega]} = \sqrt{R_{cc}^2 + R_{cc}^2} \quad (33)$$

$$R_{cc} = 0.005611 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{cc} = 0.005611 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{377} = 0.015 \text{ [mH]} \quad (34)$$

$$V_b = \frac{0.345}{\sqrt{3}} \text{ [KV]} \quad (35)$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{0.345}{\sqrt{3}}\right)^2}{1} = 0.039675 \text{ [\Omega]} \quad (36)$$

$$0.001984 \text{ [\Omega]} = \sqrt{R_{cc}^2 + R_{cc}^2} \quad (37)$$

$$R_{cc} = 0.001403 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{cc} = 0.001403 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{377} = 0.004 \text{ [mH]} \quad (38)$$

Para el cálculo respectivo de las cargas del sistema de distribución de la Figura 13 y Figura 14, se ha usado las ecuaciones (39) y (40) para calcular la potencia activa P y potencia reactiva Q de las cargas del sistema.

$$P = S * \cos(\cos^{-1}(fp)) \quad (39)$$

$$Q = S * \text{seno}(\cos^{-1}(fp)) \quad (40)$$

Donde fp es el factor de potencia. Todas las cargas simuladas son cargas tipo RL, lo cual significa que los factores de potencia son en atraso.

A continuación, se presentan los datos del sistema, en la Tabla 1 las potencias consumidas por las cargas, Tabla 2 las tensiones del primario y secundario de los transformadores del sistema, Tabla 3 tensiones de los cinco generadores y Tabla 4 datos de las líneas del sistema de distribución.

Tabla 1: Datos de las potencias consumidas por las cargas del sistema.

Carga	fp	S [kVA]	P	Q [kVAr]
Carga 1	1	640	640	0
Carga 2	0.9	20	18	8.717
Carga 3	0.85	10	8.5	5.267
Carga 4	0.9	20	18	8.717
Carga 7	0.9	20	18	8.717
Carga 10	0.8	400	320	239.99
Carga 11	0.8	400	320	239.99
Carga 12	0.8	400	320	239.99
Carga 14	0.8	800	640	479.99

Tabla 2: Datos de las tensiones de los transformadores del sistema.

Transformador	Voltaje primario/secundario	S [MVA]
T1	69 [kV] / 13.8 [kV]	4
T2	2400 [V] / 13.8 [kV]	3.5
T3	13.8 [kV] / 2400 [V]	3.5
T4	13.8 [kV] / 220 [V]	1.5
T5	13.8 [kV] / 220 [V]	1.5
T6	220 [V] / 150 [V]	0.015
T7	150 [V] / 2400 [V]	3.5
T8	220 [V] / 150 [V]	0.015
T9	150 [V] / 2400 [V]	3.5

Tabla 3: Datos de las tensiones de los generadores del sistema.

Transformador	Voltaje	S [MVA]
G1	69 [kV]	3
G2	2400 [V]	3
G3	2400 [V]	3
G4	2400 [V]	3
G5	2400 [V]	3

Tabla 4: Datos de las líneas del sistema.

Línea	Distancia [Km]	R [Ω]	L [mH]
L10	6	0.394	0.3098
L9	6	0.394	0.3098
L11	3	0.394	0.3098
L12	6	0.394	0.3098
L14	2	0.394	0.3098
L5	0.4	0.198	0.2888
L2	0.2	0.198	0.2888
L3	0.15	0.198	0.2888
L4	0.4	0.198	0.2888
L6	0.4	0.198	0.2888
L7	0.1	0.198	0.2888

4. Resultados

Ambos modelos del D-SSSC se han simulado empleando MATLAB-Simulink, en una red eléctrica de baja tensión. Para todas las siguientes gráficas, el voltaje 1= 690 [V] y el voltaje 2= 345 [V] en las respectivas leyendas de las gráficas.

4.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].

A continuación, se presenta los resultados de la simulación para el modelo 1.

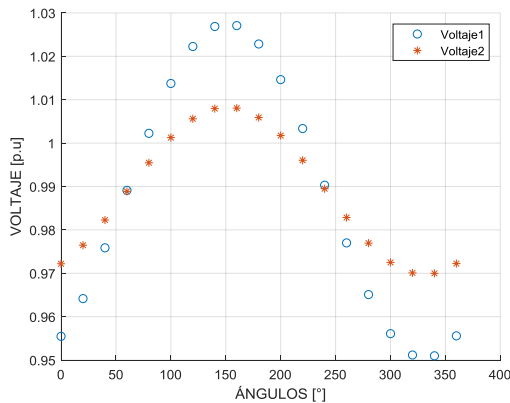


Figura 15. Magnitud de voltaje en la barra 14 en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 1.

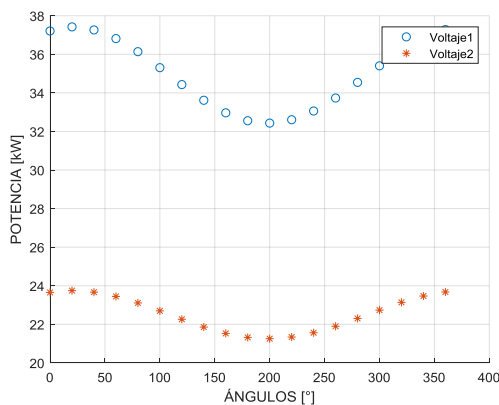


Figura 16. Pérdidas totales del sistema en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 1.

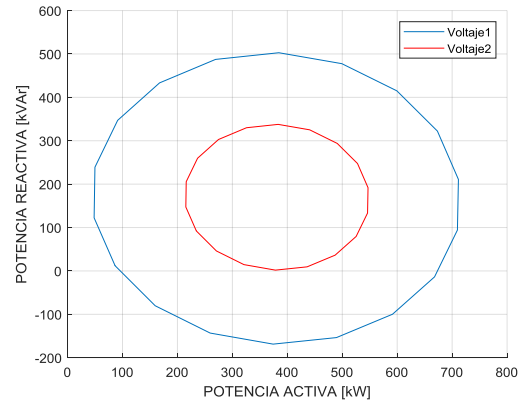


Figura 17. Lugar geométrico de la potencia para la barra 13 modelo 1.

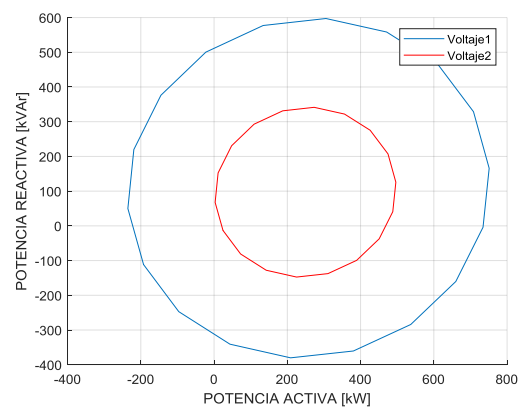


Figura 18. Lugar geométrico de la potencia para la barra 14 modelo 1.

4.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345[V].

A continuación, se presenta los resultados de la simulación para el modelo 2.

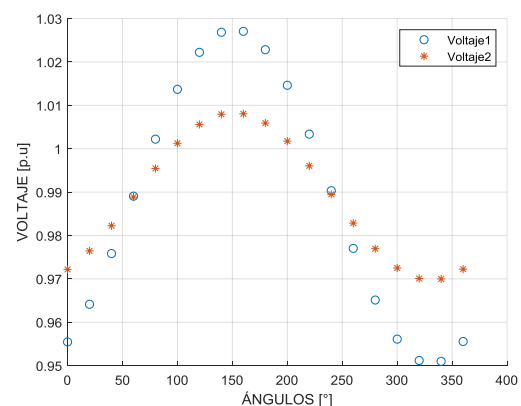


Figura 19. Magnitud de voltaje en la barra 14 en función del ángulo de la fuente de voltaje modelo 2.

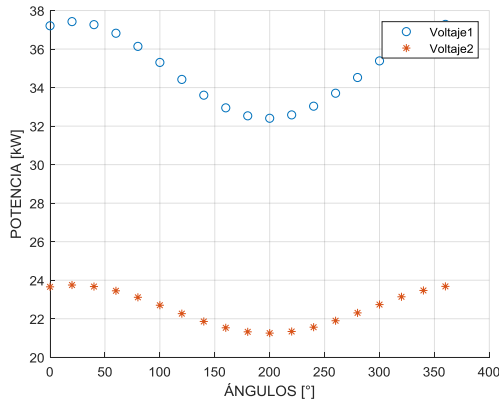


Figura 10. Pérdidas totales del sistema en función del ángulo modelo 2.

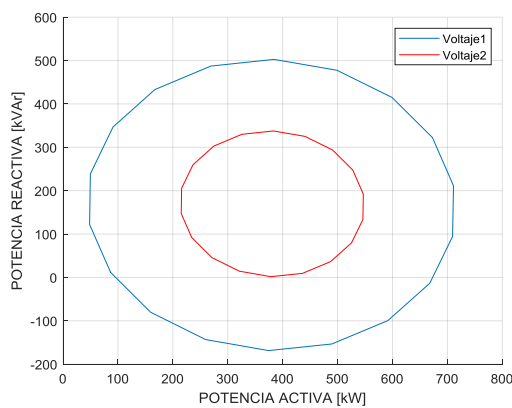


Figura 21. Lugar geométrico de la potencia para la barra 13 modelo 2.

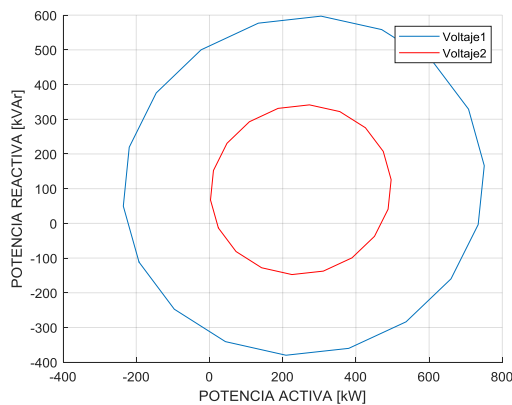


Figura 22. Lugar geométrico de la potencia para la barra 14 modelo 2.

5. Análisis de resultados

Al simular un equipo D-SSSC al sistema de distribución, la magnitud de voltaje para ambos modelos en la barra 14 en función del

ángulo de la fuente de voltaje se encuentra en un rango adecuado, entre 0.95 [pu] y 1.05 [pu]. Las pérdidas totales del sistema en función del ángulo de la fuente de voltaje son simétricas. Para ambos modelos se encuentran dentro de los órdenes de magnitud aceptables para un sistema de estas características.

Se puede observar de las gráficas de la potencia que fluye por las líneas que unen las barras 13 y 14, que el equipo D-SSSC puede modificar el flujo de la potencia activa P y el flujo de potencia reactiva Q simultáneamente, para un valor de ángulo determinado. Para todo en rango de variabilidad de este ángulo, los valores de las potencias P y Q forman una elipse que determina precisamente los valores de potencias que pueden circular por la línea de distribución. Con estos resultados obtenidos, la aplicación de equipos D-SSSC en sistemas de distribución para modificar los flujos de potencia P y Q es posible.

6. Conclusión

Esta investigación ha presentado los resultados de la simulación de un D-SSSC usando dos modelos diferentes, en un programa de simulación como el MATLAB Simulink.

Los modelos propuestos en esta investigación permiten obtener resultados muy similares entre sí. Ambos muestran el funcionamiento de un D-SSSC a una frecuencia industrial de 60 [Hz], en régimen permanente.

Las simulaciones fueron realizadas sobre un sistema radial propio de las redes de distribución, utilizando la librería SimPowerSystems de MATLAB Simulink. La potencia activa intercambiada por el equipo con la línea de distribución procede del enlace capacitivo que posee el equipo. Esta potencia activa puede ser provista por un D-STATCOM que esté conectado en serie al D-SSSC. Este estudio no está presente en este

trabajo. El D-SSSC se puede utilizar para modificar los flujos de potencia P y Q en una línea de distribución. Las diversificaciones de las tensiones en las barras de inserción del equipo se encuentran alrededor de los valores operativos considerados normales en un SEP.

7. Trabajos futuros

Con la finalidad de dejar propuestas para trabajos futuros se propone la modelación y simulación de equipo tipo D-FACTS en serie para sistemas de distribución desde un enfoque para sistemas de control. Es decir, se propone modelar y simular los sistemas de control asociados a este tipo de equipos. También es necesario incluir la modelación de la estrategia correspondiente a la modulación por ancho de pulso del inversor conectado al transformador. También puede ser interesante la inclusión de la curva de saturación de cada transformador conectado en serie a la línea de distribución. También puede ser de utilidad el estudio sobre la sensibilidad que puede tener el equipo ante la impedancia de cortocircuito del transformador.

8. Referencias

- [1] J. Lemay, A. S. Mehraban, A. K. J. Reeve, and F. Sener, "Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS)" vol. 12, no. 4, pp. 1848–1853, 1997.
- [2] S. Kamel and M. Abdel-akher, "Implementation of SSSC Model in the Newton- Raphson Power Flow Formulation Using Current Injections," 2010.
- [3] R. Orizondo and R. Alves, "UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs," pp. 1–7, 2006.
- [4] P. Dhoble and A. Bhandakkar, "Active Reactive Power Flow Control Using Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," vol. 7, no. 6, pp. 59–71, 2013.
- [5] A. Pashaie, B. Zahawi, S. Member, and D. Giaouris, "Distributed Static Series Compensation for Distribution Network Line Voltage Profile Improvement," 2011 2nd IEEE PES Int. Conf. Exhib. Innov. Smart Grid Technol., pp. 1–4.
- [6] G. Bone and R. Mihalič, "Modelling the SSSC Device in the Power Flow Problem as Power Injections Regulated According to First Order Sensitivity," vol. D, 2015.
- [7] A. Haleem and P. Manager, "Power Flow Control with Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," no. 1, pp. 978–981, 2011.
- [8] A. Abdo and M. A. Mohammed, "ADVANCED MODELING OF FACTS IN NEWTON POWER FLOW," vol. 35, no. 6, pp. 1467–1479, 2007.
- [9] N. Voraphonpiput and T. Bunyagul, "Power Flow Control with Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," vol. 9, pp. 117–128, 2008.
- [10] A. A. Nimje, C. K. Panigrahi, and A. K. Mohanty, "Enhanced power transfer capability by using SSSC," vol. 3, no. February, pp. 48–56, 2011.
- [11] G. Yue, C. Zhiqiang, S. Jia, W. Xudong, L. Yun, and M. Shiqian, "Power Flow Adjustment Capability Research of SSSC Accessed to Power Grid," 2018 2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr., vol. 1, pp. 1–9.
- [12] S. A. Kumar, C. Easwarlal, and M. S. Kumar, "Multi machine power system stability enhancement using Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," 2012 Int. Conf. Comput. Electron. Electr. Technol., pp. 212–217, 2012.

- [13] S. Nidadavolu, "ENHANCEMENT OF POWER FLOW IN TRANSMISSION SYSTEM USING STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR," pp. 1–6, 2017.
- [14] C. U. Shankar, R. Thottungal, and S. Mythili, "VOLTAGE STABILITY IMPROVEMENT AND POWER OSCILLATION DAMPING USING STATIC SYNCHRONOUS SERIES LoooooJ," *2015 IEEE 9th Int. Conf. Intell. Syst. Control*, pp. 1–6, 2015.
- [15] X. Zhang, "Advanced Modeling of the Multicontrol Functional Static Synchronous Series Compensator (SSSC) in Newton Power Flow," vol. 18, no. 4, pp. 1410–1416, 2003.
- [16] S. Khan and S. Bhowmick, "A Novel Power Flow Model of a Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," pp. 1–6, 2014.
- [17] K. R. Padiyar, "Analysis of SubSynchronous Resonance with Three Level Twelve-Pulse VSC based SSSC."
- [18] L. Gyugyi, K. Sen, "Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State approach to the Series Compensation of Transmission Lines ," vol. 12, no. 1, pp. 406–417, 1997.
- [19] K. K. Sen and E. Corporation, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications," vol. 13, no. 1, pp. 241–246, 1998.
- [20] H. Taheri, S. Shahabi, S. Taheri, and A. Gholami, "Application of Synchronous Static Series Compensator (SSSC) on Enhancement of Voltage Stability and Power Oscillation Damping," *IEEE EUROCON 2009*, no. 1, pp. 533–539, 2009.
- [21] S. Kamel, F. Jurado, and Z. Chen, "Electrical Power and Energy Systems Power flow control for transmission networks with implicit modeling of static synchronous series compensator," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 911–920, 2015.
- [22] R. Jalayer and S. Member, "A Simple Three-phase Model for Distributed Static Series Compensator (DSSC) in Newton Power Flow," *2009 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–5, 2009.
- [23] H. Johal, "Distributed FACTS – A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control," *2005 IEEE 36th Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 8–14, 2005.
- [24] D. M. Divan et al., "A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines," vol. 22, no. 1, pp. 642–649, 2007.
- [25] M. S. S. Farhangi and J. L. S. P. Jeannin, "Combination of power flow controller and short-circuit limiter in distribution electrical network using a cascaded H-bridge distribution-static synchronous series compensator," no. January, pp. 1121–1131, 2012.
- [26] K. G. Raythaththa, "System Parameters Improvement of Transmission Line using Distributed Static Series Compensator (DSSC)," *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain.*, pp. 459–463, 2016.
- [27] D. Simfukwe and B. C. P. S. Member, "Control of power system static stability using distributed static series compensators," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, no. 1, pp. 1–6, 2009.
- [28] P. Fajri, M. Farsadi, D. Nazarpour, and A. Tavighi, "A Novel Strategy for Controlling a Group of

- Distributed Static Series Compensators,” 2009 Int. Conf. Electr. Electron. Eng. - ELECO 2009, p. I-119-I-123.
- [29] D. J. Gotham, “Power flow control and power flow studies for systems with facts devices,” vol. 13, no. 1, pp. 60–65, 1998.
- [30] M. Saradarzadeh and S. Farhangi, “Reversing the Power Flow in the Looped Electrical Distribution Network by Using a Cascaded H-bridge D-SSSC,” *2011 2nd Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf.*, pp. 193–198, 2011.

8.1. Matriz del estado del arte

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN																										
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Sistemas Eléctricos de Potencia	FACTS	UPFC	STATCOM	SSSC	D-SSSC	Minimización de Costos	Ubicación óptima del D-SSSC	Minimizar las pérdidas de potencia	Mitigación de fallas	Mejorar la estabilidad del SEP	Costo	Balance de Potencia activa	Balance potencia reactiva	Limitación de los voltajes en las barras	Limitación de las líneas de distribución	Fuente de voltaje en serie al transformador.	Fuente de voltaje con impedancia en serie	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP
1	1997	Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (FACTS)	☒	☒	☒	☒	☒				☒	☒													☒	☒
2	2012	Implementation of SSSC Model in the Newton- Raphson Power Flow Formulation Using Current Injections	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒			☒			☒	☒	☒
3	2006	UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒			☒	☒	☒		☒			☒					
4	2013	Active Reactive Power Flow Control Using Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒
5	2011	Distributed Static Series Compensation for Distribution Network Line Voltage Profile Improvement	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒			☒	☒	☒			☒	☒	

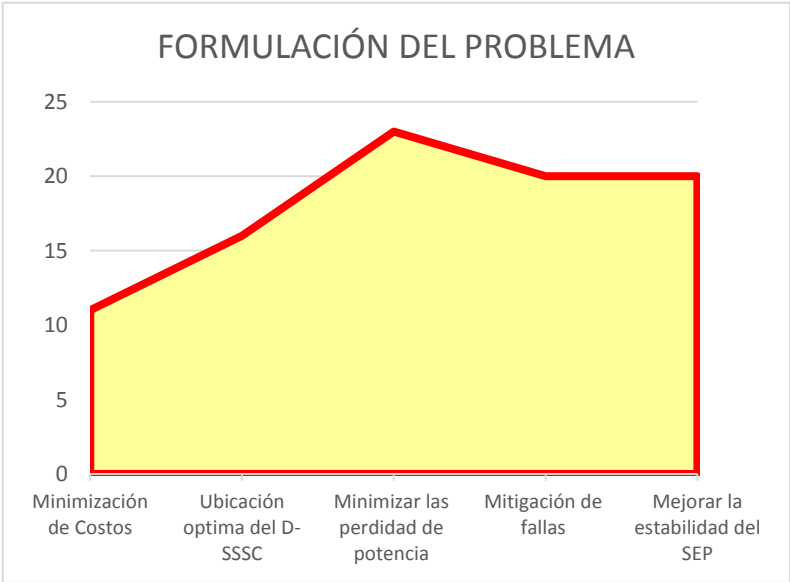
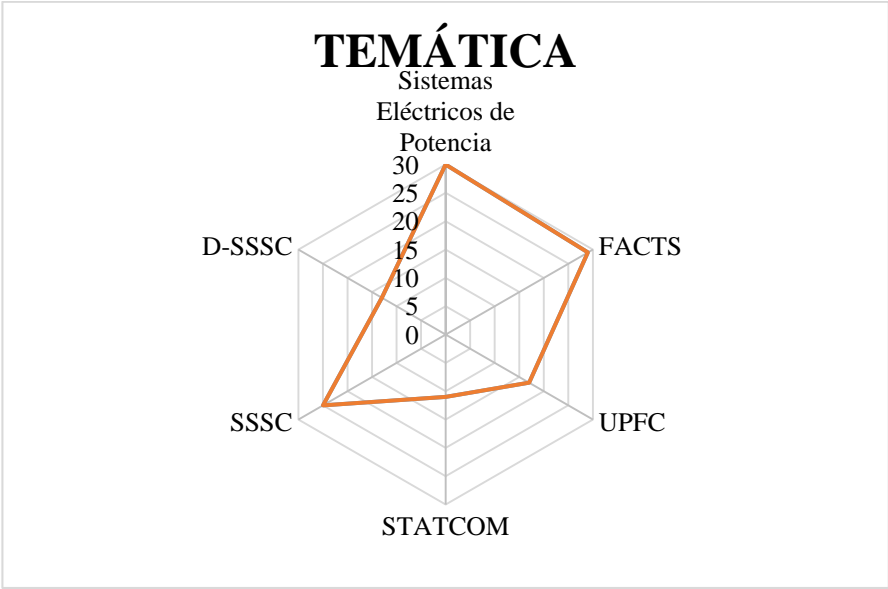
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN																											
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
																Fuente de voltaje en serie al transformador	Fuente de voltaje con impedancia en serie	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Sistemas Eléctricos de Potencia	FACTS	UPFC	STATCOM	SSSC	D-SSSC	Minimización de Costos	Ubicación óptima del D-SSSC	Minimizar las pérdidas de potencia	Mitigación de fallas	Mejorar la estabilidad del SEP	Costo	Balance de Potencia activa	Balance potencia reactiva	Limitación de los voltajes en las barras	Limitación de las líneas de distribución	Fuente de voltaje en serie al transformador	Fuente de voltaje con impedancia en serie	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP	
6	2015	Modelling the SSSC Device in the Power Flow Problem as Power Injections Regulated According to First Order Sensitivity	☒	☒							☒	☒			☒	☒		☒		☒	☒						☒
7	2011	Power Flow Control with Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	☒	☒	☒						☒	☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒			☒
8	2007	ADVANCED MODELING OF FACTS IN NEWTON POWER FLOW	☒	☒							☒	☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒					☒	
9	2008	Power Flow Control with Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒		☒			☒	☒			☒				☒
10	2011	Enhanced power transfer capability by using SSSC	☒	☒				☒		☒	☒		☒		☒				☒	☒	☒						☒
11	2018	Power Flow Adjustment Capability Research of SSSC Accessed to Power Grid	☒	☒	☒						☒		☒		☒	☒			☒	☒	☒					☒	
12	2012	Multi machine power system stability enhancement using Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	☒	☒						☒		☒	☒						☒				☒				
13	2017	ENHANCEMENT OF POWER FLOW IN TRANSMISSION SYSTEM USING STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR	☒	☒					☒		☒				☒	☒	☒		☒								☒

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN																										
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Sistemas Eléctricos de Potencia	FACTS	UPFC	STATCOM	SSSC	D-SSSC	Minimización de Costos	Ubicación optima del D-SSSC	Minimizar las perdidas de potencia	Mitigación de fallas	Mejorar la estabilidad del SEP	Costo	Balance de Potencia activa	Balance potencia reactiva	Limitación de los voltajes en las barras	Limitación de las líneas de distribución	Fuente de voltaje en serie al transformador.	Fuente de voltaje con impedancia en serie.	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP
14	2015	VOLTAGE STABILITY IMPROVEMENT AND POWER OSCILLATION DAMPING USING STATIC SYNCHRONOUS SERIES	☒	☒						☒	☒	☒			☒	☒			☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒
15	2003	Advanced Modeling of the Multicontrol Functional Static Synchronous Series Compensator (SSSC) in Newton Power Flow	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒					
16	2014	A Novel Power Flow Model of a Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	☒	☒	☒	☒	☒				☒	☒				☒			☒	☒	☒				☒	☒
17	2008	Analysis of SubSynchronous Resonance with Three Level Twelve-Pulse VSC based SSSC	☒	☒							☒		☒			☒			☒	☒	☒	☒				☒
18	1997	Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State approach to the Series Compensation of Transmission Lines	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒		
19	1998	SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒				☒				☒	☒				☒		☒
20	2009	Application of Synchronous Static Series Compensator (SSSC) on Enhancement of Voltage Stability and Power Oscillation Damping	☒		☒	☒	☒			☒		☒		☒			☒		☒	☒	☒	☒		☒		☒
21	2015	Electrical Power and Energy Systems Power flow control for transmission networks with implicit modeling of static synchronous series compensator	☒	☒				☒		☒	☒	☒	☒			☒			☒	☒	☒		☒	☒		

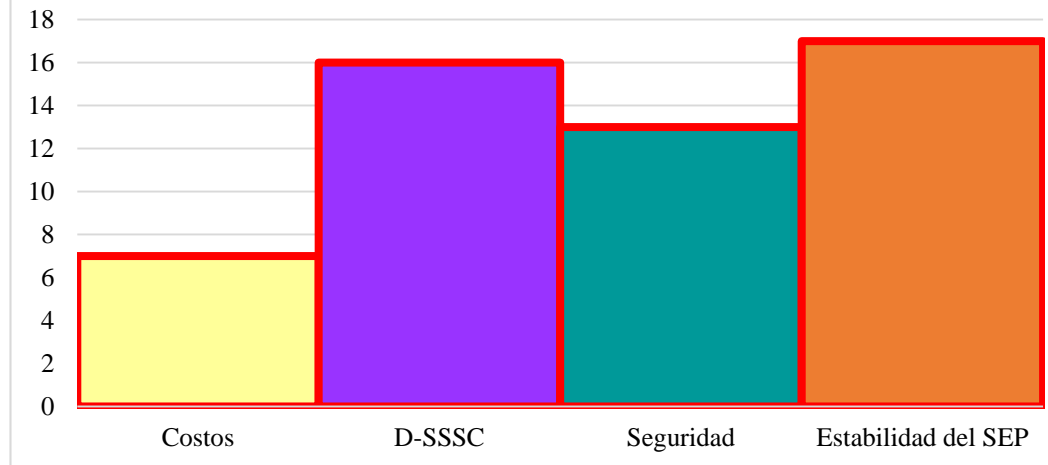
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN																											
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Sistemas Eléctricos de Potencia	FACTS	UPFC	STATCOM	SSSC	D-SSSC	Minimización de Costos	Ubicación optima del D-SSSC	Minimizar las perdidas de potencia	Mitigación de fallas	Mejorar la estabilidad del SEP	Costo	Balance de Potencia activa	Balance potencia reactiva	Limitación de los voltajes en las barras	Limitación de las líneas de distribución	Fuente de voltaje en serie al transformador	Fuente de voltaje con impedancia en serie	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP	
22	2009	A Simple Three-phase Model for Distributed Static Series Compensator (DSSC) in Newton Power Flow	☒	☒					☒				☒		☒	☒		☒	☒		☒			☒	☒		
23	2005	Distributed FACTS – A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control	☒	☒	☒				☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒						☒			☒
24	2007	A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines	☒	☒					☒					☒				☒	☒		☒			☒	☒		
25	2012	Combination of power flow controller and short-circuit limiter in distribution electrical network using a cascaded H-bridge distribution-static synchronous series compensator	☒	☒					☒	☒	☒			☒	☒				☒	☒			☒	☒	☒	☒	
26	2016	System Parameters Improvement of Transmission Line using Distributed Static Series Compensator (DSSC)	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒					☒			☒
27	2009	Control of power system static stability using distributed static series compensators	☒	☒	☒				☒	☒			☒	☒	☒	☒			☒	☒				☒	☒	☒	
28	2009	A Novel Strategy for Controlling a Group of Distributed Static Series Compensators	☒	☒	☒				☒	☒	☒		☒					☒			☒			☒	☒		
29	1998	Power flow control and power flow studies for systems with facts devices	☒	☒	☒				☒		☒			☒	☒			☒	☒					☒			☒

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE EQUIPOS TIPO D-FACTS DE POTENCIA EN SERIE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN																										
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Sistemas Eléctricos de Potencia	FACTS	UPFC	STATCOM	SSSC	D-SSSC	Minimización de Costos	Ubicación óptima del D-SSSC	Minimizar las pérdidas de potencia	Mitigación de fallas	Mejorar la estabilidad del SEP	Costo	Balance de Potencia activa	Balance potencia reactiva	Limitación de los voltajes en las barras	Limitación de las líneas de distribución	Fuente de voltaje en serie al transformador	Fuente de voltaje con impedancia en serie	Modelos Matemáticos	Programa Matlab-Simulink	Costos	D-SSSC	Seguridad	Estabilidad del SEP
30	2011	Reversing the Power Flow in the Looped Electrical Distribution Network by Using a Cascaded H-bridge D-SSSC	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒				☒	☒		☒	
			30	29	17	11	25	13	11	16	23	20	20	10	21	22	3	14	24	17	17	7	7	16	13	17

8.2 Resumen e indicadores del estado del arte



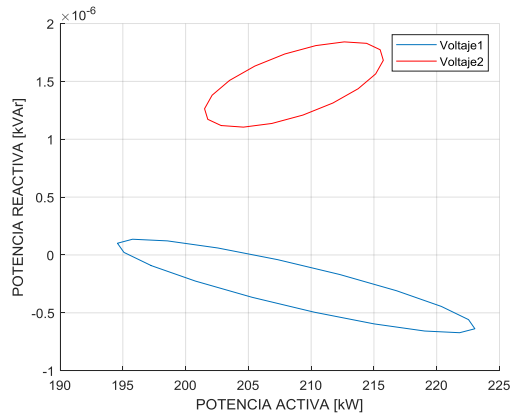
SOLUCIÓN DADA MEDIANTE



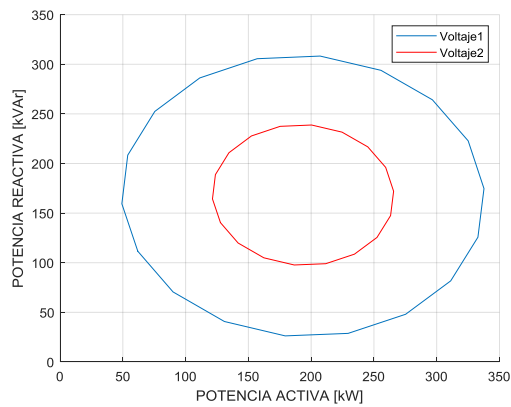
9. Anexos

A continuación, se presenta las demás gráficas del lugar geométrico de la potencia para las barras restantes del sistema en el caso del modelo 1 y del modelo 2.

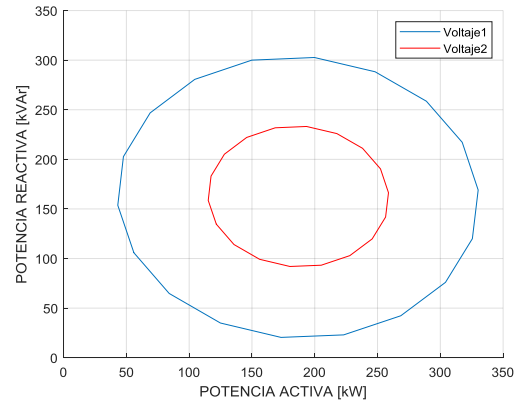
9.1 Modelo 1: fuente en serie al transformador para voltajes de 690 [V] y 345 [V].



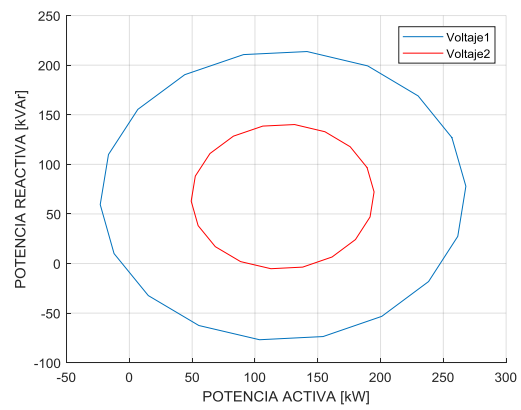
Anexo 1. Lugar geométrico de la potencia para la barra 9 modelo 1.



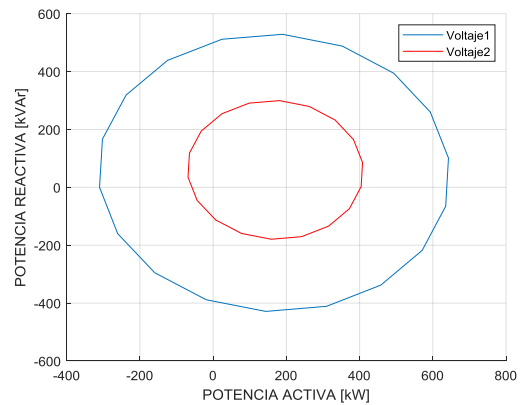
Anexo 2. Lugar geométrico de la potencia para la barra 17 modelo 1.



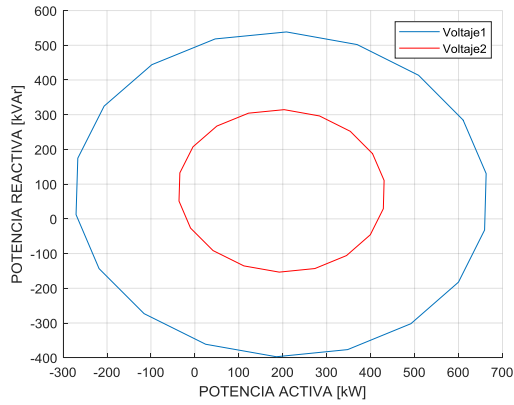
Anexo 3. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_PV modelo 1.



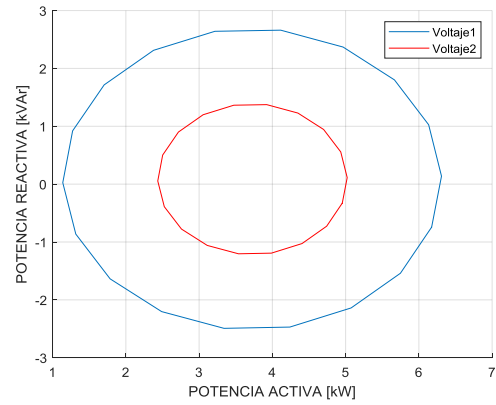
Anexo 4. Lugar geométrico de la potencia para la barra 6 modelo 1.



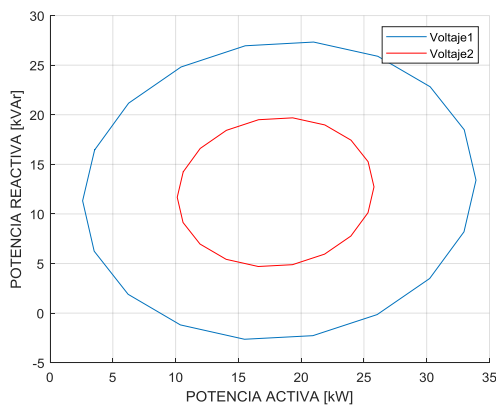
Anexo 5. Lugar geométrico de la potencia para la barra 7 modelo 1.



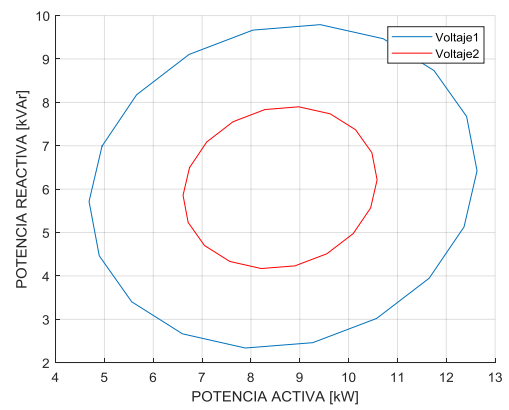
Anexo 6. Lugar geométrico de la potencia para la barra 8 modelo 1.



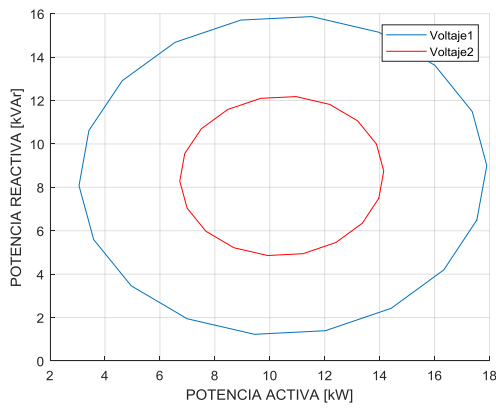
Anexo 9. Lugar geométrico de la potencia para la barra 2 modelo 1.



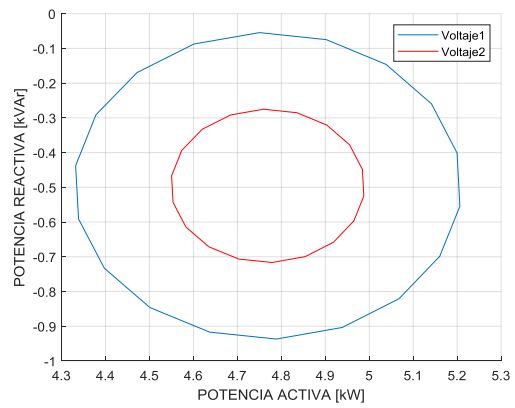
Anexo 7. Lugar geométrico de la potencia para la barra 4 modelo 1.



Anexo 10. Lugar geométrico de la potencia para la barra 3 modelo 1.

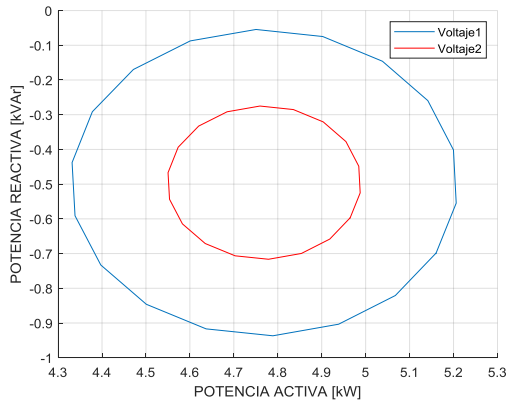


Anexo 8. Lugar geométrico de la potencia para la barra 5 modelo 1.

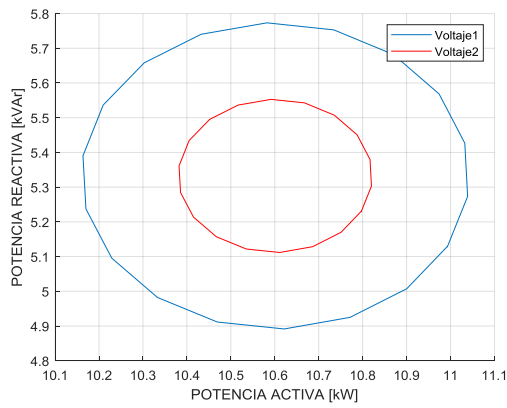


Anexo 11. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC1 modelo 1.

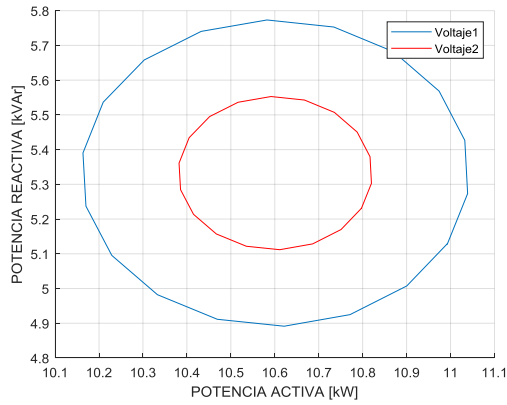
9.2 Modelo 2: fuente con impedancia en serie para voltajes de 690 [V] y 345 [V].



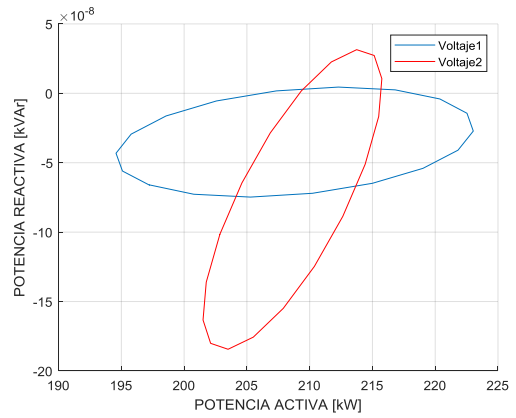
Anexo 12. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC2 modelo 1.



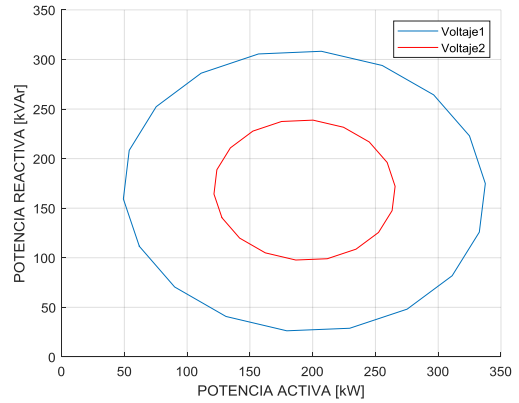
Anexo 13. Lugar geométrico de la potencia para la barra 15 modelo 1.



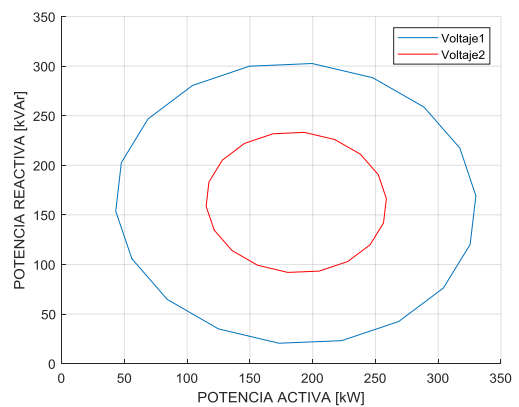
Anexo 14. Lugar geométrico de la potencia para la barra 16 modelo 1.



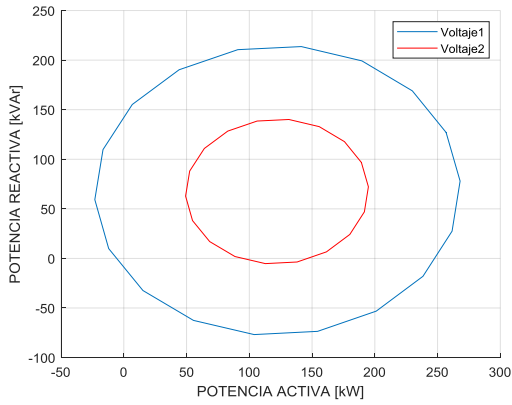
Anexo 15. Lugar geométrico de la potencia para la barra 9 modelo 2.



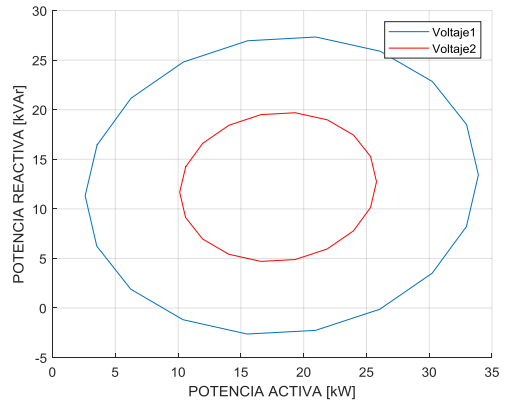
Anexo 16. Lugar geométrico de la potencia para la barra 17 modelo 2.



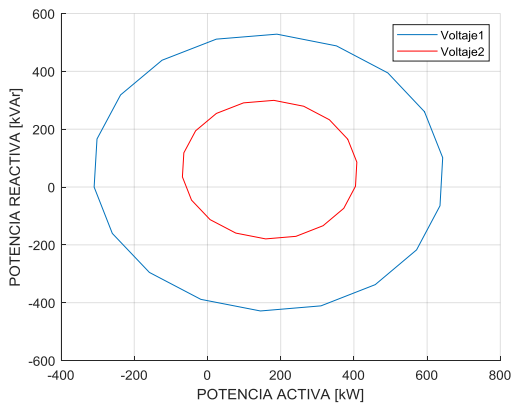
Anexo 17. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_PV modelo 2.



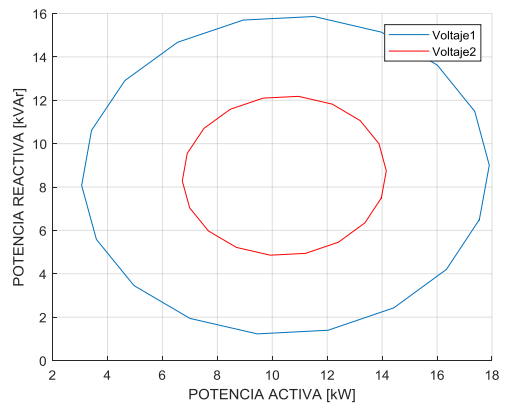
Anexo 18. Lugar geométrico de la potencia para la barra 6 modelo 2.



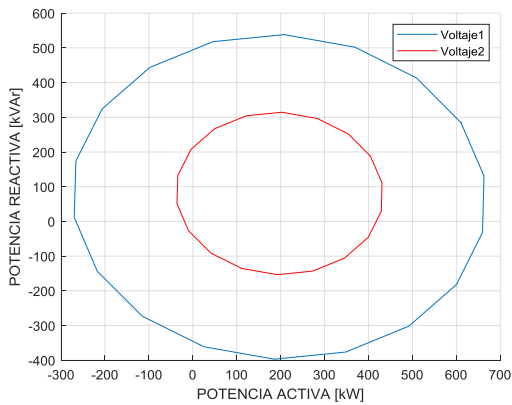
Anexo 21. Lugar geométrico de la potencia para la barra 4 modelo 2.



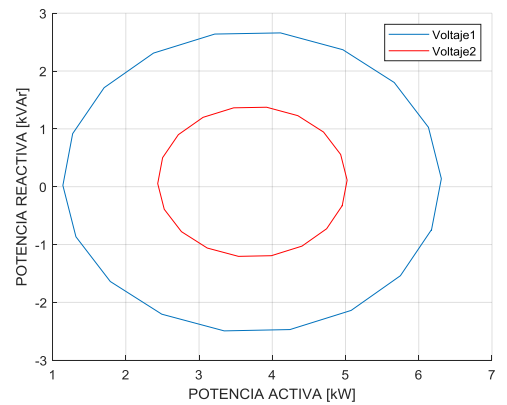
Anexo 19. Lugar geométrico de la potencia para la barra 7 modelo 2.



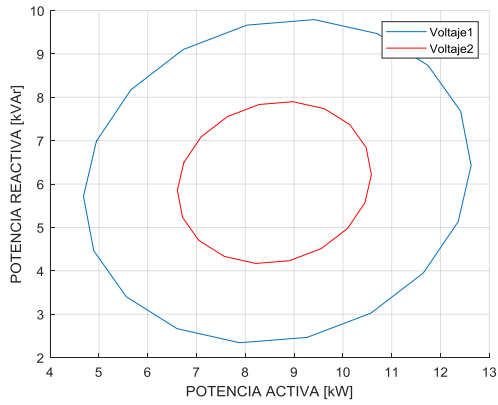
Anexo 22. Lugar geométrico de la potencia para la barra 5 modelo 2.



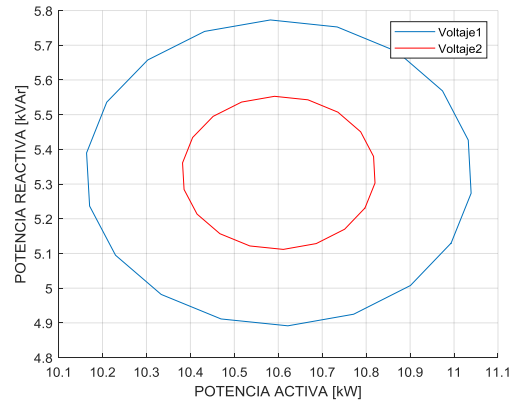
Anexo 20. Lugar geométrico de la potencia para la barra 8 modelo 2.



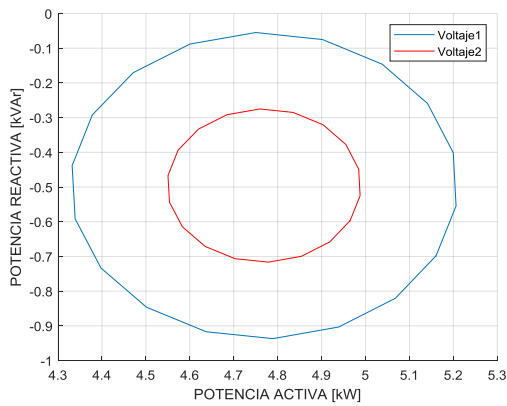
Anexo 23. Lugar geométrico de la potencia para la barra 2 modelo 2.



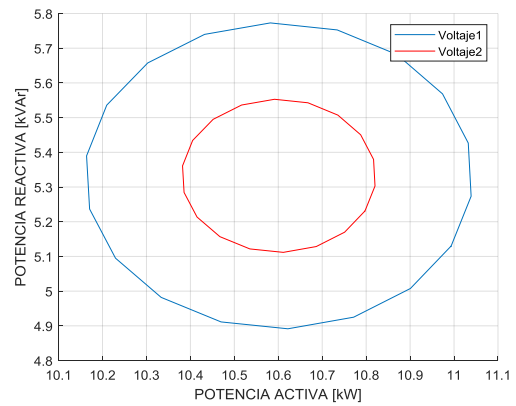
Anexo 24. Lugar geométrico de la potencia para la barra 3 modelo 2.



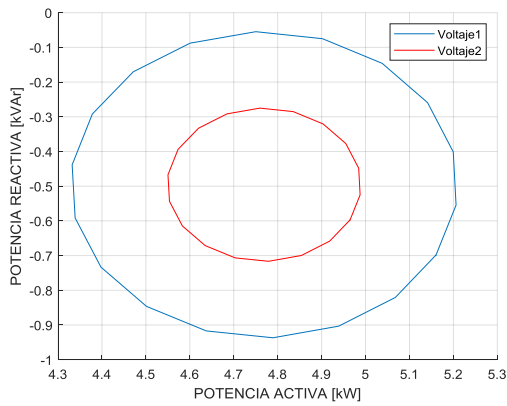
Anexo 27. Lugar geométrico de la potencia para la barra 15 modelo 2.



Anexo 25. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC1 modelo 2.



Anexo 28. Lugar geométrico de la potencia para la barra 16 modelo 2.



Anexo 26. Lugar geométrico de la potencia para la barra AC_DC2 modelo 2.

