

**UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED
DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN
PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO
CARGABILIDAD DE LA RED**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED
DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN
PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO
CARGABILIDAD DE LA RED**

**AUTOR:
GONZALO FABRICIO GUZMÁN RODRÍGUEZ**

**DIRECTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, febrero 2020

Gonzalo Fabricio Guzmán Rodríguez

UBICACIÓN DE SISTEMAS DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Gonzalo Fabricio Guzmán Rodríguez (Y'1991 – M'08). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “San Gabriel” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la ubicación de un sistema de compensación reactiva en la red de transmisión de energía eléctrica basado en programación lineal entera mixta considerando cargabilidad de la red.

gguzmanr@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

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO CARGABILIDAD DE LA RED*” realizado por Gonzalo Fabricio Guzmán Rodríguez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2020



Jorge Paúl Muñoz Pilco

C.C.: 1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Gonzalo Fabricio Guzmán Rodríguez, con documento de identificación N° 1715845820, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO CARGABILIDAD DE LA RED”*, 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.



Gonzalo Fabricio Guzmán Rodríguez

C.C.: 1715845820

Quito, D.M., febrero de 2020

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Dispositivos FACTS	4
2.1	Compensador estático de VAR (SVC).....	5
2.2	Compensador serie de estado sólido (SSSC).....	5
2.3	Compensador serie de tiristores controlados (TCSC).....	5
2.4	Reactor controlado por tiristor (TCR).....	6
2.5	Convertor de fuente de tensión (VSC).....	6
2.6	Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC).....	6
2.7	El compensador estático (STATCOM).....	6
3	Modelado del STATCOM	7
4	Implementación del modelo matemático	8
4.1	Función objetivo	8
4.2	Restricciones del problema	8
4.2.1	Restricciones de balance de potencia.....	8
4.2.2	Restricción máxima cantidad de STATCOM	9
4.2.3	Restricciones para límites de voltajes y potencias	9
4.3	Pseudocódigo	9
5	Análisis de resultados.....	10
5.1	Sistema 9 barras, reducción pérdidas activas.....	10
5.2	Sistema 39 barras, reducción de pérdidas reactivas.....	11
5.3	Sistema 9 barras, reducción de pérdidas reactivas	12
5.4	Sistema 9 barras, comparativa de ubicación.	15
6	Conclusiones	16
6.1	Trabajos futuros	17
7	Referencias.....	17
7.1	Matriz de Estado del Arte	20
7.2	Resumen de Indicadores	22
8	Anexos	24
8.1	Anexo 1	24
8.2	Anexo 2	26
8.3	Anexo 3	31
8.4	Anexo 4	32

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación óptima STATCOM.....	5
Figura 2. Circuito equivalente STATCOM.....	7
Figura 3. Perfil de tensión sistema 9 barras	10
Figura 4. Potencia reactiva generada por cada unidad.....	10
Figura 5. Potencia activa generada por cada unidad.....	11
Figura 6. Potencia reactiva de los STATCOM	11
Figura 7. Perfil de tensión sistema de 39 barras	11
Figura 8. Generación reactiva de las unidades de generación.	12
Figura 9. Potencias activas de las unidades de generación.	12
Figura 10. Perfil de tensión sistema de 9 barras	12
Figura 11. Potencia activa despachada por las unidades.....	13
Figura 12. Potencia reactiva despachada por las unidades	13
Figura 13. Flujos de potencia desde la Barra 1	13
Figura 14. Flujos de potencia desde la Barra 2	13
Figura 15. Flujos de potencia desde la Barra 3	14
Figura 16. Flujos de potencia desde la Barra 4	14
Figura 17. Flujos de potencia desde la Barra 5	14
Figura 18. Flujos de potencia desde la Barra 6	14
Figura 19. Flujos de potencia desde la Barra 7	14
Figura 20. Flujos de potencia desde la Barra 8	14
Figura 21. Flujos de potencia desde la Barra 9	14
Figura 22. Perfil de voltaje con diferentes ubicaciones del dispositivo.....	15
Figura 23. Despacho activo para cada ubicación del dispositivo.....	15
Figura 24. Despacho reactivo para cada ubicación del dispositivo.	15
Figura 25. Potencia reactiva total por cada ubicación del dispositivo.	15
Figura 26. Potencia del dispositivo STATCOM para cada barra seleccionada.	16
Figura 27. Pérdidas de potencia reactiva.....	16
Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	22
Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	23

Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte	23
--	----

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencia reactiva de los STATCOM, sistema 9 barras.....	11
Tabla 2. Potencia reactiva de los STATCOM, sistema 39 barras.....	12
Tabla 3. Potencia reactiva STATCOM.....	13
Tabla 4. Matriz de estado del arte	20
Tabla 5. Información de barras sistema 9 barras.....	24
Tabla 6. Información líneas sistema 9 barras.....	25
Tabla 7. Información barras sistema 39 barras	26
Tabla 8. Información líneas sistema 39 barras.....	28

UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO CARGABILIDAD DE LA RED

Resumen

La presente investigación desarrolla un modelo de optimización para la óptima ubicación del dispositivo de compensación reactiva denominado STATCOM en sistemas de potencia, el modelo optimizador desarrollado se basa en programación no lineal entera mixta o MINLP y tiene como objetivo la reducción de pérdidas de potencia reactiva con lo que consecuentemente se reduce la cargabilidad de las líneas al generar un mejor balance de potencia reactiva en cada barra del sistema eliminando en parte la necesidad de que esta potencia sea cubierta por las unidades de generación disponibles en el sistema. Como efecto positivo también se mejora los perfiles de tensión en el sistema mejorando por tanto también un parámetro de calidad de servicio. El modelo ha sido ensayado en sistemas tipo IEEE de 9 y 39 barras y como límite se han ajustado 1, 2 y 3 dispositivos para el sistema de 9 barras mientras que para el sistema de 39 barras se ha permitido la máxima inserción de 1, 2 y 5 dispositivos en el sistema.

Palabras Clave: *cargabilidad, perfil de voltaje, MINLP, STATCOM, ubicación óptima.*

Abstract

The present investigation develops an optimization model for the optimal location of the reactive compensation device called STATCOM in power systems, the optimizer model developed is based on mixed integer nonlinear programming or MINLP and aims to reduce reactive power losses with which consequently reduces the chargeability of the lines by generating a better balance of reactive power in each bar of the system, partly eliminating the need for this power to be covered by the generation units available in the system. As a positive effect, the voltage profiles in the system are also improved, thus also improving a service quality parameter. The model has been tested in IEEE 9 and 39 bar type systems and as a limit 1, 2 and 3 devices have been set for the 9 bar system while for the 39 bar system the maximum insertion of 1, 2 has been allowed and 5 devices in the system.

Keywords: *cargability, MINLP, STATCOM, optimal location, voltage profile.*

1 Introducción

En los sistemas de potencia modernos, debido a las incertidumbres propias del sistema como la curva de demanda o los problemas que puede sufrir el sistema, incluyendo desconexiones repentinas, se vuelve crucial la implementación de dispositivos de transmisión flexible de corriente alterna (FACTS); con el fin de mejorar la seguridad del sistema eléctrico. Los dispositivos FACTS también han sido introducidos en los sistemas eléctricos de potencia como una tecnología emergente con el fin de mejorar la capacidad del sistema de transmisión [1] [2].

El uso de tecnologías que permiten mejorar la estabilidad de la tensión en el sistema de potencia es un tema de alta relevancia, en especial ante la ocurrencia de contingencias en los sistemas de control y operación. La importancia de tales dispositivos tiene su origen en la compleja estructura que supone un sistema de potencia y su estudio, lo que deriva en la existencia de nuevos retos para el análisis de la estabilidad, particularmente el manejo de la estabilidad de tensión, la inserción de dispositivos de tipo reactivo en el sistema pueden ser la mejor opción para solucionar problemas de este tipo [3][4].

El control y operación del sistema eléctrico de potencia aumenta su complejidad debido a que los grandes complejos de generación se ubican en zonas remotas, lejos de las cargas mientras que los derechos para la colocación de sistema de transmisión de alto voltaje son cada vez más difíciles de conseguir suponiendo grandes barreras de índole socio-económico que evitan una expansión más fluida de las líneas de transmisión. Tales problemas suponen la existencia de líneas sobrecargadas en el tiempo en función del aumento de la

demanda, por lo cual una línea opera por encima de lo originalmente planificado. La estabilidad de la tensión luego de la ocurrencia de una falla será también un factor que haga de considerar las limitaciones de flujo de las líneas o la posibilidad de la expansión de su capacidad por medio de dispositivos electrónicos que ya fueron descritos, con el fin de obtener niveles tolerables de tensión que permitan mantener niveles adecuados de satisfacción del usuario final [5][6].

Debido a los altos costos de inversión que tienen los dispositivos FACTS, resulta indispensable una colocación óptima de tales equipos. La función de este tipo de equipamiento es la regulación de la entrega de potencia reactiva, mientras controla la tensión del sistema en forma adaptativa, esto debido a su gran flexibilidad y característica de control rápidas [7] [8].

Un sistema flexible de transmisión de AC es un dispositivo electrónico de potencia que consta de una serie de controladores; que suponen varias ventajas que incluyen la mejora de la estabilidad dinámica y transitoria del sistema, estabilidad de tensión. También es posible un mejor factor de potencia de la red, compensación de línea, la obtención de perfiles de tensión y potencia mejorados y una adecuada regulación de la tensión. La colocación de dispositivos podría implicar mejorar la capacidad de transferencia de potencia, incluso reduciendo las pérdidas permitiendo una operación del sistema en zonas seguras y estables. Recientes estudios también demuestran que los FACTS pueden ser una solución para los problemas de estabilidad del sistema [1] [7].

Dentro de los dispositivos FACTS más relevantes, se encuentran el compensador estático de VAR (SVC), el

compensador de tiristores controlado en serie (TCSC) y controlador unificado de flujo de potencia (UPFC). Así mismo encontramos al compensador estático sincrónico (STATCOM), este al igual que el SVC se conecta al sistema en conexión shunt para mejorar el perfil de tensión de la red mediante la inyección o la absorción de potencia reactiva según la necesidad en función del tiempo de tal forma de obtener una tensión estable para la zona donde son colocados [2][9].

Los STATCOM pertenecen a la segunda generación de equipamiento FACTS, una de sus características más importantes es que es capaz de entregar la misma cantidad de potencia reactiva sin importar si el nivel de tensión es muy bajo, lo que lo hace vital para soportar la reaceleración de cargas motorizadas. El STATCOM permite una regulación fluida y continua de la potencia de salida si se instalan en la ubicación más óptima para el sistema, tomando en cuenta una serie de factores que influyen en su comportamiento, presentando ciertos beneficios, incluyendo: prevenir colapsos de tensión, mejorando así la estabilidad del sistema, incrementando la capacidad de transmisión. También realiza un control directo del flujo de potencia activa y reactiva, compensando la potencia reactiva lo que implica reducción de pérdidas y amortiguar las oscilaciones de sistema de potencia [3][10].

Otro aspecto que será necesario considerar para la colocación de un dispositivo FACTS es que las crecientes exigencias del mercado de la electricidad, hacen que los sistemas operen en sus límites debido a restricciones económicas, medioambientales y hasta de derechos de uso de la red de transmisión. Lo ideal sería la colocación de STATCOM en todas las barras del sistema, pero como se indicó previamente, sus altos costos hacen que se

deba realizar una racionalización de la cantidad y ubicación del equipamiento a instalar. Debido a que los flujos de potencia son regidos por ecuaciones no lineales, la solución de la colocación óptima se vuelve compleja, teniendo en la literatura diversas aproximaciones para su solución [11] [12].

Los autores de [9] emplean cálculos del flujo de potencia a través de la herramienta PSAT de MatLAB con el objetivo de mejorar la estabilidad de tensión del sistema mediante la óptima colocación y un adecuado tamaño de STATCOM, en este caso primero ubican los puntos más débiles de sistemas de hasta 14 barras, determinando luego el lugar donde existieron las mayores mejoras. en este caso se puede notar que la colocación del dispositivo FACTS presenta mejoras en los perfiles de tensión más significativas que en otros.

El trabajo de [3] hace uso del algoritmo de búsqueda global armónica (GHS), para determinar tanto la ubicación óptima como la potencia que debe suministrar el equipamiento de compensación, aquí también buscan las barras más débiles del sistema mediante cálculos en estado estacionario del sistema, para luego realizar la ubicación óptima, contando con una función multiobjetivo. Otro punto a considerar es que el algoritmo de optimización GHS se alimenta de los datos obtenidos de corridas sucesivas de flujos de potencia.

Los investigadores de [12] proponen la alternativa del uso del análisis de sensibilidad del software PowerFactory DIgSILENT para la colocación de STATCOM en redes de distribución, en conjunto con el algoritmo genético, de esta forma el espacio de búsqueda para la colocación de compensadores se ve reducido, así como un correcto modelado del dispositivo FACTS, los índices de sensibilidad,

consideran incluyen de tensión, de pérdidas y otro índice que considera tanto la potencia activa como la reactiva de las cargas de la red, de esta forma con procesos iterativos se obtiene la ubicación óptima y el algoritmo genético es capaz de obtener el dimensionamiento correcto del equipamiento.

El objetivo de los autores de [7] es la mejora de los perfiles de tensión de un sistema de potencia, para ello emplean el algoritmo de colonia de abejas artificial (ABC), el cual realiza cálculos de flujos óptimos de potencia sin la presencia de STATCOM y con tales dispositivos conectados, en este caso lo ponen a prueba en una red de 30 barras, modelando al equipamiento compensador, las pérdidas, las desviaciones de tensión, los límites del flujo de potencia e incluso el costo del combustible, formando una función multiobjetivo. Luego, el algoritmo ABC que simula el comportamiento de una colonia de abejas, asignando 3 tipos de tareas, permite encontrar la optimización en diversos escenarios hasta llegar al óptimo. Una interesante aproximación es la del documento [13] donde el STATCOM está siendo combinado con una fuente de energía distribuida para mejorar las características de tensión y cargabilidad de las líneas. El método empleado es el algoritmo genético, que encuentra la ubicación óptima y los parámetros más adecuados para el equipamiento tipo STATCOM en función de las condiciones de la red.

La investigación reflejada en [11] emplea un método de análisis denominado flujo de potencia continuo (CPF) para determinar las condiciones críticas de la red con la máxima carga, obteniendo además las condiciones de transferencia máxima del sistema de potencia, también emplea el método de cambio relativo de tensión para encontrar

la barra más vulnerable por tensión, para instalar en tal posición el STATCOM y realizar una nueva simulación del flujo de potencia y realizar el análisis correspondiente.

En lo sucesivo este documento se divide de la siguiente forma: en la sección 2 se trata lo correspondiente a los diferentes dispositivos FACTS, principios de funcionamiento, operación y otros que son necesarios conocer para obtener una ubicación óptima de tales compensadores. La sección 3 aborda el modelamiento de un STATCOM y su directa influencia en el sistema de potencia, incluyendo los cambios que se debe realizar en las ecuaciones que rigen el flujo de potencia de CA tradicional. La sección 4 propone el método a emplearse para la óptima ubicación de STATCOMs en sistemas de potencia mediante programación lineal entera mixta, considerando restricciones de tensión y otros aspectos críticos para un sistema de AC. En la sección 5 se hace el análisis de los resultados de la metodología propuesta para la óptima ubicación de dispositivos tipo STATCOM, considerando las variaciones de las magnitudes del circuito que son relevantes y se ven directamente influenciadas cuando se pone en funcionamiento este tipo de compensador. La sección 6 presenta las conclusiones obtenidas por el autor de esta publicación y sus aportes frente a esta temática.

2 Dispositivos FACTS

Como se mencionó en la primera sección, hay varios tipos de tecnologías que permiten que un sistema de transmisión flexibilice flujos en las líneas de transmisión, clasificados de acuerdo al tipo de conexión hacia el sistema de potencia o al tipo de tecnología que

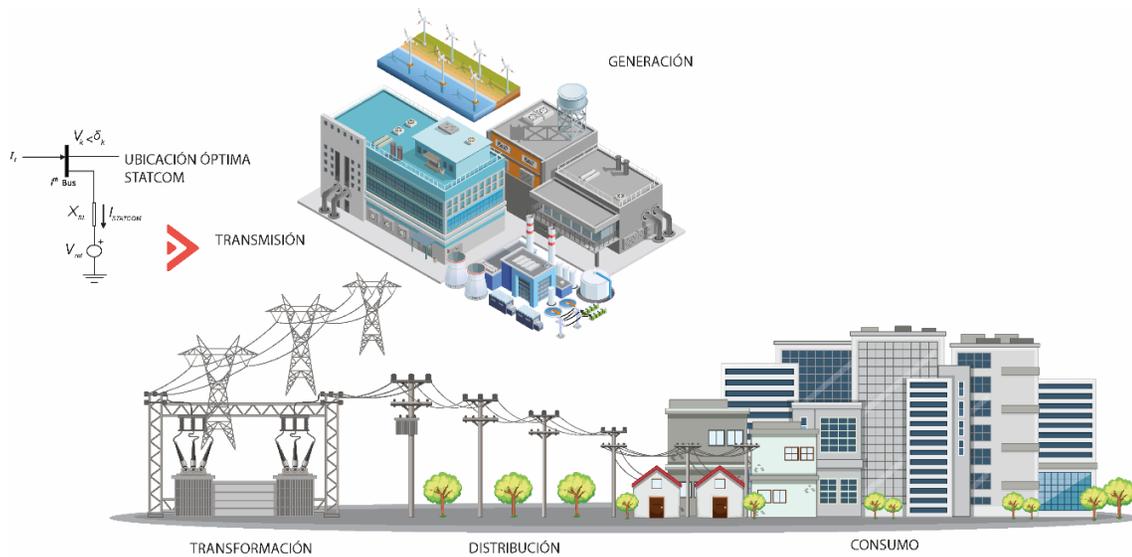


Figura 1. Ubicación óptima STATCOM.

prestaciones en función de la aplicación o la mejora que es necesaria para el caso específico de un sistema de potencia, considerando todas las restricciones y contingencias que tenga el sistema eléctrico como se muestra en la figura 1, la introducción de un dispositivo de compensación reactiva se planea en el sistema de transmisión [14][15].

2.1 Compensador estático de VAR (SVC)

El compensador estático de reactivos es un tipo de controlador FACTS de conexión shunt, consiste de un reactor controlado por tiristor (TCR) o un reactor conmutado por tiristor (TSR) para absorber la potencia reactiva y un capacitor conmutado por tiristor (TSC), para inyectar reactivos al sistema en el momento que sea requerido. El dispositivo también consiste de varios filtros que sirven para controlar ciertas componentes armónicas del sistema; un SVC juega un papel muy importante en la corrección del factor de potencia [1][16].

2.2 Compensador serie de estado sólido (SSSC)

El compensador serie de estado sólido (SSSC) hace una función similar a la de

un equipo de desplazamiento de fase estático, inyectando voltaje en cuadratura en uno de los finales de la línea, de tal forma de regular el flujo de potencia activa. El SSSC es un controlador muy versátil debido a que no absorbe potencia reactiva del sistema de AC, sino que tiene su propia provisión de potencia reactiva en forma de un capacitor DC. Las mencionadas características permiten que este equipamiento no sólo regule la potencia activa sino la reactiva e incluso la tensión de nodo [17][18].

2.3 Compensador serie de tiristores controlados (TCSC)

El compensador serie de tiristores controlados (TCSC) varía la longitud de la línea de transmisión compensadora con un pequeño retraso, esto permite proveer una rápida regulación del flujo de potencia activa. Esto incrementa el margen de estabilidad del sistema y ha mostrado ser efectiva para reducir las oscilaciones de potencia. Este tipo de módulo consiste de un TCR en paralelo a un capacitor fijo, en la práctica se conectan varios módulos para formar un único TCSC [17] [18][19].

2.4 Reactor controlado por tiristor (TCR)

El reactor controlado por tiristor (TCR) consiste de un par de tiristores en conexión antiparalela que son controlables y que conducen en forma alternada medios ciclos de la frecuencia suministrada, el otro componente de este compensador es una inductancia L con lo cual se puede obtener una susceptancia controlada dependiente del ángulo de disparo. La desventaja del principio de funcionamiento es que genera una distorsión armónica que puede llegar a ser destructiva [17][18][20].

2.5 Conversor de fuente de tensión (VSC)

El conversor de fuente de tensión (VSC) tiene diversas tipologías que se usan en un sistema de potencia en operación y otras que podrán tener un gran potencial incluyendo una forma en puente H, un arreglo trifásico como un conversor de dos niveles, por nombrar otras. Dentro de tales topologías podemos encontrar elementos de control de potencia nombrados IGBT, tales elementos electrónicos deben de tener una frecuencia de operación minimizada, con el objetivo de producir una forma de onda sinusoidal de alta calidad que prácticamente no requiera filtrado. Cada IGBT cuenta con diodos de protección frente a condiciones externas al circuito. El completo de este dispositivo son dos capacitores de la misma capacidad que están colocados en el lado de corriente continua proveyendo una fuente de potencia reactiva; el control de los tiristores normalmente llevado a cabo con microcontroladores y modulación de ancho de pulso (PWM) [17][18].

La tensión del capacitor de DC se controla ajustando el flujo de potencia activa que ingresa al VSC usando una pequeña cantidad de tal potencia para

compensar las pérdidas propias del compensador [21].

2.6 Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

El controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) consiste de dos VSCs que comparten un capacitor común en su lado de DC y un sistema de control unificado. El UPFC permite un control simultáneo del flujo de potencia activa, del flujo de potencia reactiva y la magnitud de la tensión en los terminales del compensador. Otra alternativa sería programar el controlador para que se encargue de modificar uno o más de tales parámetros en cualquier combinación o incluso no controlar ninguna de estas magnitudes.

La potencia activa demandada por el conversor serial es arrastrada por el convertidor paralelo desde la red de corriente alterna y suministrada a una barra m a través de la unión de DC. El voltaje de salida del convertidor serial es añadido a la tensión nodal para mejorar el voltaje de nodo en el bus m . La magnitud de la tensión y el ángulo de fase determinan el modo de control del flujo de potencia [17][18].

2.7 El compensador estático (STATCOM)

Un convertidor tipo STATCOM consiste de un VSC, el mismo está asociado a un transformador en derivación. Este es el reemplazo estático de un condensador sincrónico rotativo que genera o absorbe potencia reactiva, la diferencia radica en que las acciones de generación o absorción de la potencia se realiza con una mejor tasa de respuesta debido a que no existen parte móviles involucradas. En este caso, el dispositivo normalmente consiste de un par de elementos electrónicos tipo GTO que permiten el flujo bidireccional de la potencia de tal

forma de entregar o absorber la potencia en función de la necesidad, aunque en la actualidad se utilizan transistores bipolares de puerta aislada (conocido por su acrónimo en inglés IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor).

En esencia un STATCOM cumple con la misma función de regulación de la tensión que un SVC de una manera más robusta debido a que su operación no es directamente dependiente de la presencia de bajas tensiones en el sistema de potencia [17][18][22].

3 Modelado del STATCOM

Un STATCOM se puede modelar como una fuente sincrónica de tensión que tenga un límite mínimo y otro máximo. Tal fuente representa la serie fundamental de Fourier de la forma de la onda de tensión conmutada del terminal conversor de corriente alterna del STATCOM [18] [22].

La barra donde se conecta el STATCOM puede ser representada como una barra de tipo PV, pero podría cambiar a tipo PQ cuando los límites del equipamiento son violados. En un evento de violación la potencia reactiva generada o absorbida corresponde al límite superado. A diferencia de un SVC un dispositivo STATCOM se representa como fuente de tensión para el rango completo de operación permitiendo un mecanismo más robusto de soporte de la tensión [18] [22].

El circuito equivalente de un STATCOM corresponde a su equivalente Thévenin visto desde la barra i , con una fuente de tensión V_{ref} correspondiente a la componente fundamental del voltaje de salida del VSC como se observa en la figura 2. La fuente de tensión se conecta a la barra mediante la impedancia de acoplamiento del transformador representado por X_{SL} .

De esta forma la corriente que fluye hacia el convertidor STATCOM se representa como $I_{STATCOM}$. La ecuación que representa la tensión que se obtiene en la barra en donde está conectado el STATCOM es (1) [23][24].

$$V_i = V_{ref} + j * X_{SL} * I_{STATCOM} \quad (1)$$

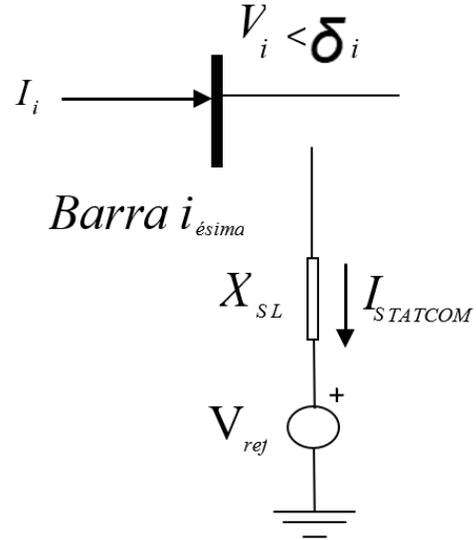


Figura 2. Circuito equivalente STATCOM

Las ecuaciones (2) y (3) modelan el flujo de potencia entre los nodos m y k , sin el STATCOM. En cambio, las ecuaciones (4) y (5) muestran el flujo de potencia considerando el STATCOM [25].

$$P_m = \sum_{k=1}^n V_m * V_k * (G_{mk} * \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} * \sin(\theta_m - \theta_k)) \quad (2)$$

$$Q_m = \sum_{k=1}^n V_m * V_k * (G_{mk} * \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} * \cos(\theta_m - \theta_k)) \quad (3)$$

$$P_m = \sum_{k=1}^n V_m * V_k * (G_{mk} * \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} * \sin(\theta_m - \theta_k)) - V_m * V_{ref} * (G_{SL} * \cos(\theta_m - \theta_{SL}) + B_{SL} * \sin(\theta_m - \theta_{SL})) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
Q_m = & \sum_{k=1}^n V_m * V_k * (G_{mk} * \cos(\theta_m - \theta_k) \\
& - B_{mk} * \sin(\theta_m - \theta_k)) - \\
& V_m * V_{ref} * (G_{SL} * \cos(\theta_m - \theta_{SL}) \\
& - B_{SL} * \sin(\theta_m - \theta_{SL}))
\end{aligned} \quad (5)$$

De la ecuación (4) y (5) de flujo de potencia se puede notar que cuando la barra contiene un STATCOM existe un término adicional debido a la contribución de la fuente de voltaje que representa al STATCOM presente en la ecuación que representa la inyección de potencia activa a la barra. Esto también ocurre en la ecuación de la inyección de potencia reactiva (5).

Con base en estas ecuaciones, es posible realizar un flujo de potencia con las variaciones que ocurren cuando se coloca el dispositivo compensador que está en estudio, sabiendo siempre las restricciones y limitaciones que tiene el STATCOM.

4 Implementación del modelo matemático

El modelo matemático ha sido implementado en 2 sistemas tipo de la IEEE para validar el funcionamiento del mismo, para ello se ha hecho uso de un sistema de 9 barras además de un sistema de 39 barras, los datos de operación, así como las características del sistema, sus unidades de generación y parámetros importantes se encuentran adjuntas en los anexos 1 y 2 mientras que la gráfica de los sistemas se encuentran en los anexos 3 y 4 respectivamente. En primer momento el modelo responde como optimizador de pérdidas activas mientras que en un segundo momento se resaltarán la importancia del modelo a implementar en donde se buscará minimizar la cantidad de pérdidas reactivas en el sistema y el estudio del flujo en las líneas de transmisión.

4.1 Función objetivo

La función objetivo se plantea desde dos perspectivas, la primera de ellas consiste en la reducción de pérdidas de potencia activa y la segunda en la reducción de pérdidas de potencia reactiva. La reducción de pérdidas en el sistema implica por tanto una reducción del flujo de potencia por las líneas de transmisión del sistema. La ecuación (6) describe la reducción de pérdidas de potencia activa y la ecuación (7) muestra la reducción de pérdidas de potencia reactiva[26], [27].

$$\min \sum P g_i - \sum P c_i \quad (6)$$

$$\min \sum Q g_i + Q s t_i - \sum Q c_i \quad (7)$$

Donde:

$P g_i$: es la potencia activa de cada unidad de generación en la barra i.

$Q g_i$: es la potencia reactiva de cada unidad de generación en la barra i.

$P c_i$: es la potencia activa de cada carga del sistema en la barra i.

$Q c_i$: es la potencia reactiva de cada carga del sistema en la barra i.

4.2 Restricciones del problema

La introducción de los STATCOM en el sistema tiene una directa relación con los flujos de potencia por lo que es posible determinar restricciones sobre los diferentes parámetros de red.

4.2.1 Restricciones de balance de potencia

El balance de potencia tanto activa como reactiva en un sistema de potencia involucra una relación entre la generación y carga de cada barra y para este caso también incluye la influencia del STATCOM. Por tanto, las ecuaciones 8 y 9 muestran las restricciones de balance [28].

$$P g_i - P c_i = \sum_{k=1}^n V_i * V_k * (G_{ik} * \cos(\theta_i - \theta_k)) + B_{ik} * \sin(\theta_i - \theta_k) \quad (8)$$

$$Q g_i + Q s t_i - Q c_i = \sum_{k=1}^n V_i * V_k * (G_{ik} * \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} * \cos(\theta_i - \theta_k)) \quad (9)$$

Donde:

Pg_i : es la potencia activa de cada unidad de generación en la barra i.

Qg_i : es la potencia reactiva de cada unidad de generación en la barra i.

Pc_i : es la potencia activa de cada carga del sistema en la barra i.

Qc_i : es la potencia reactiva de cada carga del sistema en la barra i.

V_i : voltaje en la barra i.

V_k : voltaje en la barra k.

θ_i : ángulo en la barra i.

θ_k : ángulo en la barra k.

G_{ik} y B_{ik} : componentes reales e imaginarios de la matriz de admitancias del sistema.

Qst_i : potencia reactiva del STATCOM en la barra i.

4.2.2 Restricción máxima cantidad de STATCOM

El sistema al contener i cantidad de barras puede aceptar STATCOM en cualquiera de sus barras excepto en la barra de tipo Slack por lo que es importante restringir la cantidad de dispositivos que se permiten con el fin de no saturar el sistema con compensadores, aunque al analizar los costos de implementación lo ideal sería limitar la instalación de 1 sólo dispositivo compensador.

$$\sum Ust \leq Maxst \quad (10)$$

Donde:

Ust : es una variable binaria que determina la existencia de un STATCOM en caso de ser 1 o su inexistencia en caso de ser 0.

$Maxst$: es la cantidad máxima de STATCOM que pueden ser instalados en el sistema.

4.2.3 Restricciones para límites de voltajes y potencias

Tanto los voltajes de las barras como las potencias de las unidades de generación tanto activas como reactivas requieren limitaciones para mantenerse dentro de sus límites operativos razonables[29][30][31].

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (11)$$

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (12)$$

$$Q_{i,min} \leq Q_i \leq Q_{i,max} \quad (13)$$

$V_{i,min}, P_{i,min}, Q_{i,min}$: son los límites inferiores de voltaje, potencia activa y reactiva.

$V_{i,max}, P_{i,max}, Q_{i,max}$: son los límites superiores de voltaje, potencia activa y reactiva.

$$Vst_{i,min} \leq Vst_i \leq Vst_{i,max} \quad (11)$$

Donde:

$Vst_{i,min}, Vst_{i,max}$: son el límite superior e inferior de voltaje para los STATCOM.

4.3 Pseudocódigo

Algoritmo para la ubicación óptima de STATCOMs en sistemas eléctricos de transmisión

Paso 1	Importación de datos con información del sistema.
Paso 2	Creación de la Y de barra del sistema
Paso 3	Creación de variables para el modelo.
Paso 4	Creación de restricciones para límites de voltajes y potencias.
Paso 5	Creación de la función objetivo.

Paso 6	Creación de las ecuaciones de flujo.
Paso 7	Cálculo del flujo de potencia por las líneas.
Paso 8	Cálculo de potencia entregado por el STATCOM.
Paso 9	Revisión de cantidad máxima de STATCOM a instalar y ubicación.
Paso 10	Fin

5 Análisis de resultados

5.1 Sistema 9 barras, reducción pérdidas activas

En función de las pruebas realizadas con el modelo de optimización implementado en GAMS se obtienen los siguientes resultados para un sistema tipo IEEE de 9 barras. Para la prueba se han desarrollado para el mismo sistema varias simulaciones en las que se han ido incrementando la cantidad de compensadores para analizar qué sucede con el sistema bajo prueba.

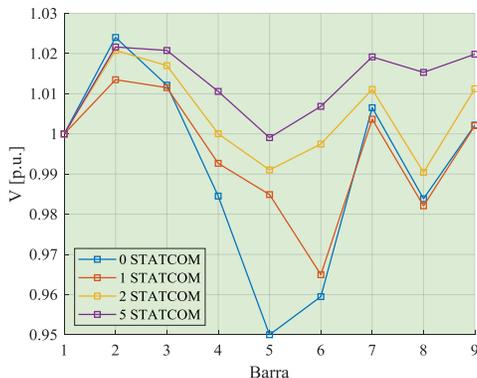


Figura 3. Perfil de tensión sistema 9 barras

La figura 3 muestra cómo el perfil de tensión se ve claramente mejorado con la introducción de cada vez más compensadores en la red, por otro lado, la figura 4 ilustra la cantidad de potencia reactiva entregada por las unidades de generación en cada uno de los casos estudiados notando que el caso con la mayor cantidad de dispositivos compensadores es en donde menor cantidad de potencia reactiva es requerida por el sistema desde las unidades generadoras obteniendo el esperado

efecto, en este caso extremo en donde la función objetivo se basa en reducir las pérdidas de potencia activa en realidad el caso con mayor cantidad de dispositivos es en donde más potencia reactiva se requiere desde la unidad de generación 1.

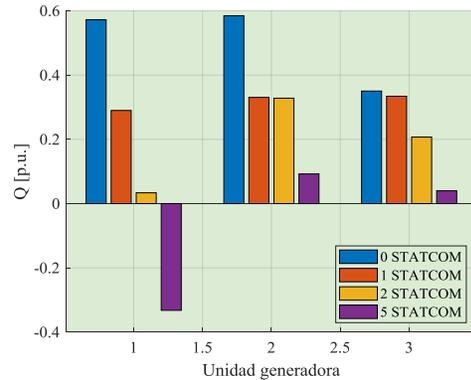


Figura 4. Potencia reactiva generada por cada unidad

La figura 5 por otro lado muestra cómo reaccionan las unidades de generación en el despacho de potencia activa frente a las diferentes condiciones y cantidades de dispositivos compensadores. Notando que incluso al trabajar con dispositivos de compensación reactiva si se consigue una disminución en la potencia activa entregada por las unidades consiguiendo el primer objetivo de reducción de pérdidas activas al tener una menor cantidad de generación se entiende que la potencia que debe circular por las líneas de transmisión que es precisamente el lugar en donde se dan la mayor parte de pérdidas de potencia activa o reactiva, por ello se analiza que al reducir la generación en ciertas unidades, el flujo disminuye y por tanto las pérdidas también.

Por otro lado, la figura 6 ilustra la variación de la potencia reactiva en el compensador ubicado en función de cuántos dispositivos son instalados en el sistema de potencia. Mostrando que para 1 dispositivo la inyección es alta mientras que al aumentar la cantidad de dispositivos la potencia reactiva inyectada tiende a ser inferior en cada dispositivo

instalado, destacando que a pesar de que el modelo tiene como límite la introducción de 3 STATCOM el optimizador ha insertado los 3 posibles.

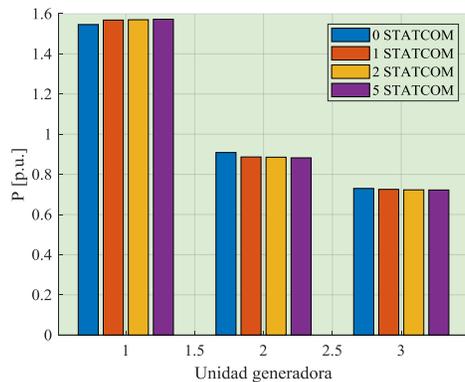


Figura 5. Potencia activa generada por cada unidad

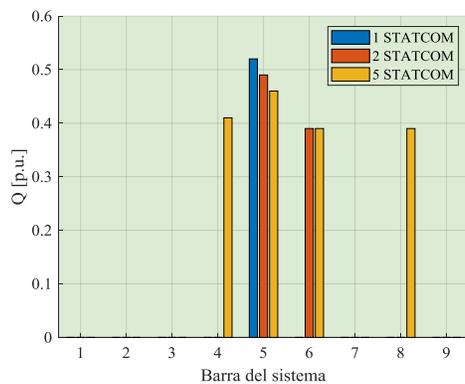


Figura 6. Potencia reactiva de los STATCOM

Tabla 1. Potencia reactiva de los STATCOM, sistema 9 barras.

	1 STATCOM	2 STATCOM	5 STATCOM
	Qst [p.u]	Qst [p.u]	Qst [p.u]
Barra 1	0.00	0.00	0.00
Barra 2	0.00	0.00	0.00
Barra 3	0.00	0.00	0.00
Barra 4	0.00	0.00	0.41
Barra 5	0.52	0.49	0.46
Barra 6	0.00	0.39	0.39
Barra 7	0.00	0.00	0.00
Barra 8	0.00	0.00	0.39
Barra 9	0.00	0.00	0.00

De igual manera la tabla 1 muestra las barras en donde el algoritmo ha colocado un STATCOM y la potencia que

inyecta al sistema. En dicha tabla se puede observar que para todos los casos la barra 5 es seleccionada como ubicación óptima, sin embargo, conforme la cantidad de dispositivos aumenta, la cantidad de potencia a ser inyectada en dicha barra baja ya que son otras las barras encargadas de tomar parte de la potencia reactiva que el sistema requiere.

5.2 Sistema 39 barras, reducción de pérdidas reactivas

El modelo matemático también fue ensayado en un sistema IEEE de 39 barras en donde se realiza un análisis muy parecido obteniendo los siguientes resultados luego de haber probado directamente el modelo de optimización de pérdidas reactiva sin pasar por el caso de reducción de pérdidas activas. La figura 7 ilustra el modo en que la tensión responde en diversos puntos del sistema, para este modelo es necesario aclarar que las tensiones en diversas barras del sistema se mantienen fijos debido a que son barras PV en las que el voltaje se mantiene fijo por control y efecto del generador en dicha barra por lo cual no es posible notar una mejora, sin embargo, las demás barras en donde el voltaje tiene limitaciones la tensión si mejora es notable que en este caso la introducción de compensadores reactivos alcanzan el primer efecto de mejora de perfil de voltaje.

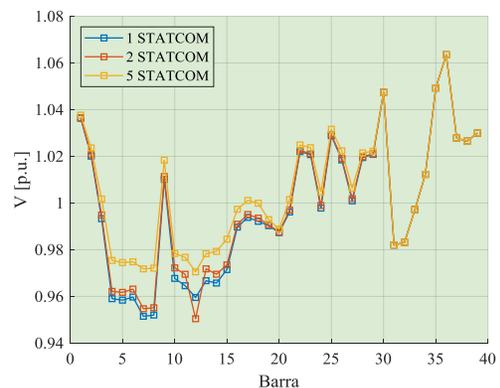


Figura 7. Perfil de tensión sistema de 39 barras

La figura 8 ilustra el modo en que los compensadores tienen un efecto aún más positivo en este sistema respecto del anterior dado que la generación reactiva de las unidades decrece.

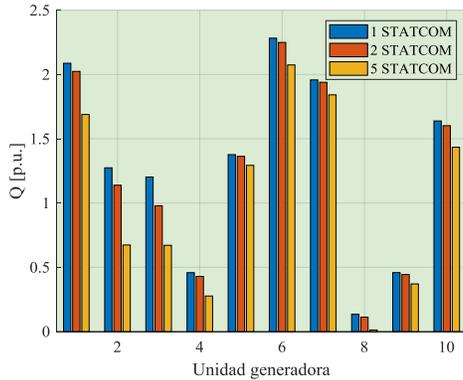


Figura 8. Generación reactiva de las unidades de generación.

La figura 9 muestra el despacho de potencia activa de las unidades de generación en los diversos escenarios pudiendo notar que en este caso no existe una mejora notable en el despacho de potencia activa. La tabla 2 muestra la cantidad de potencia reactiva inyectada por cada unidad de generación, mostrando que para este caso no se tiene una misma ubicación para los tres escenarios y que por el contrario las ubicaciones ahora son dispersas obteniendo sin duda una mejora en el perfil de tensión y la disminución de la potencia reactiva despachada por las unidades ante lo cual se valida que el modelo es funcional.

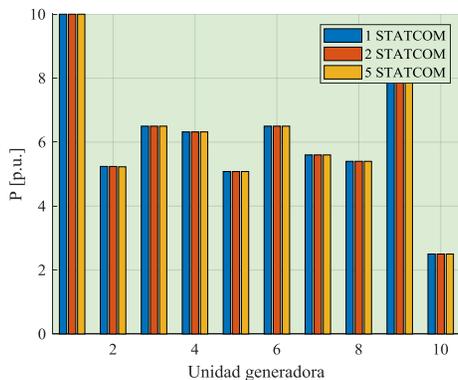


Figura 9. Potencias activas de las unidades de generación.

Tabla 2. Potencia reactiva de los STATCOM, sistema 39 barras.

	1 STATCOM	2 STATCOM	5 STATCOM
	Qst [p.u]	Qst [p.u]	Qst [p.u]
Barra 4	0.00	0.00	0.55
Barra 7	0.00	0.00	0.57
Barra 8	0.00	0.00	0.57
Barra 11	0.00	0.58	0.00
Barra 12	0.61	0.00	0.57
Barra 13	0.00	0.57	0.00
Barra 15	0.00	0.00	0.52

5.3 Sistema 9 barras, reducción de pérdidas reactivas

En la búsqueda de mejores resultados se ensaya el sistema de 9 barras, pero esta vez las pérdidas a analizar son de potencia reactiva ante lo cual se ensaya escenarios para 1, 2 y 3 STATCOM como máxima cantidad posible obteniendo los resultados que se muestran a continuación. La figura 10 muestra el comportamiento de la tensión en cada una de las barras ante la introducción de los dispositivos de compensación estática se sigue la tendencia en la que se mejora el desvío de voltaje en cada barra.

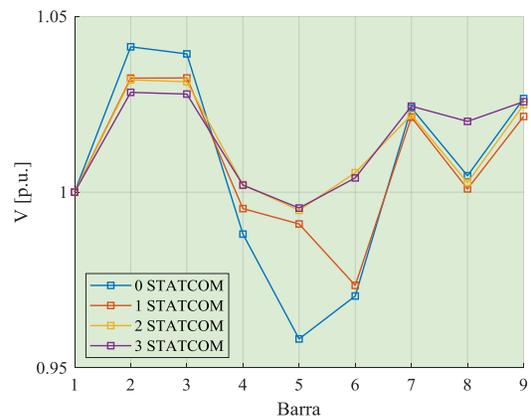


Figura 10. Perfil de tensión sistema de 9 barras

La figura 11 y 12 muestran el modo en que se comportan las unidades de generación en su despacho de potencia activa y reactiva.

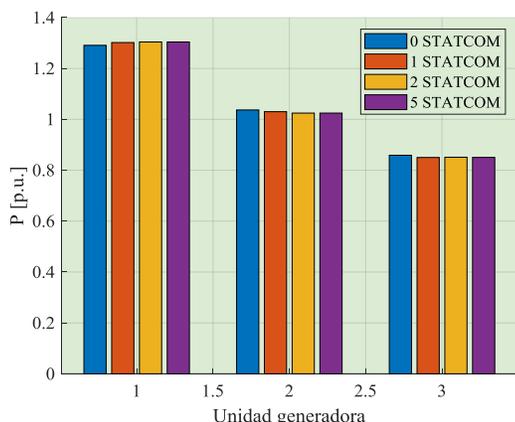


Figura 11. Potencia activa despachada por las unidades

Se puede apreciar que la potencia activa tiende a variar sin ser demasiado importante en el caso que se estudia dado que las pérdidas de potencia reactiva son ahora el objeto del estudio al igual que los flujos que se dan en las líneas de transmisión del sistema bajo estudio.

En la figura 12 es más notoria la variación de potencia reactiva despachada por cada unidad, considerando que el algoritmo ha colocado dispositivos alejados de la unidad 1 y es la unidad 1 que toma esa potencia que se requiere.

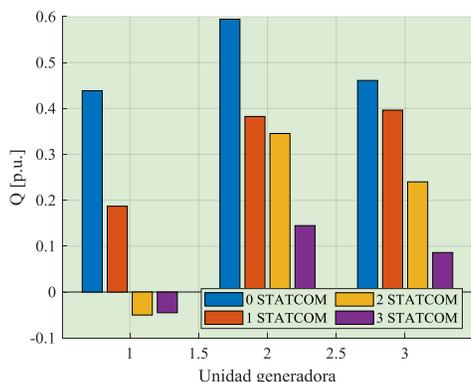


Figura 12. Potencia reactiva despachada por las unidades

Tabla 3. Potencia reactiva STATCOM

	1 STATCOM	2 STATCOM	3 STATCOM
	Qst [p.u.]	Qst [p.u.]	Qst [p.u.]
Barra 5	0.49	0.48	0.47
Barra 6	0.00	0.43	0.40
Barra 8	0.00	0.00	0.37

La tabla 3 muestra los valores de potencia reactiva que son aportadas por los diferentes dispositivos de compensación reactiva que son insertados en las diferentes barras del sistema.

Ahora bien, las figuras que continúan desde la figura 13 hasta la figura 21 ilustra el modo en el que el flujo de potencia reactiva en las líneas es mínimo cuando la cantidad más alta de STATCOM son permitidos, 3 para este caso. Aún así se puede llegar a considerar que económicamente el sistema no es factible de implementar con una cantidad tan elevada de dispositivos debido al alto costo de inversión que implica la instalación de los mismos.

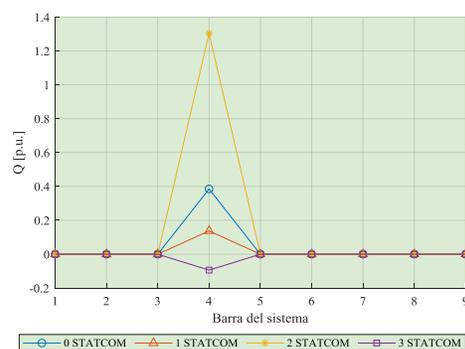


Figura 13. Flujos de potencia desde la Barra 1

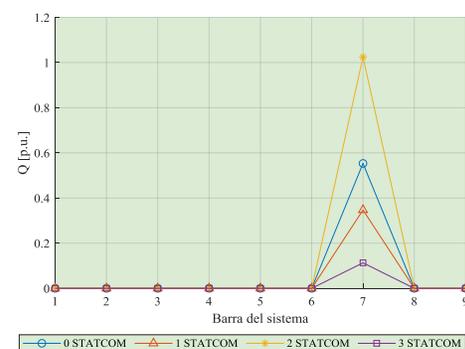


Figura 14. Flujos de potencia desde la Barra 2

Se puede apreciar que los mejores casos son los dados con 1 dispositivo y con 3 dispositivos estáticos, de las gráficas se puede extraer que en el caso en

el cual se permite la inserción de 3 dispositivos de compensación estática es el caso en donde se permite operar a las líneas con una menor cantidad de flujo de potencia reactiva liberando por tanto capacidad de transporte de enlace entre las barras del sistema.

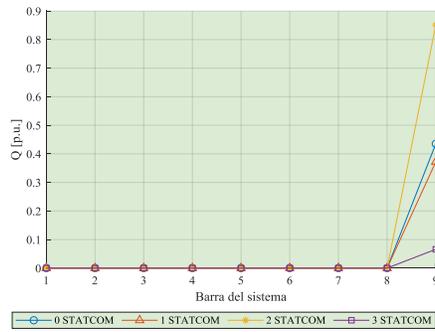


Figura 15. Flujos de potencia desde la Barra 3

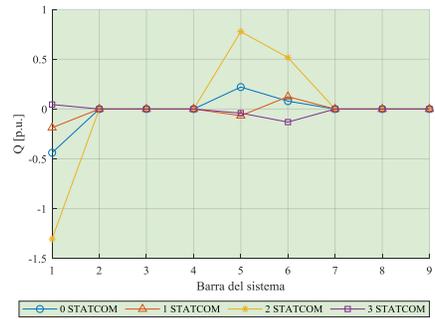


Figura 16. Flujos de potencia desde la Barra 4

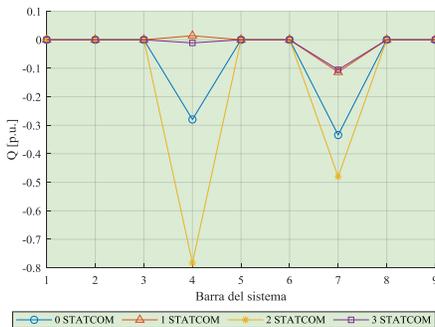


Figura 17. Flujos de potencia desde la Barra 5

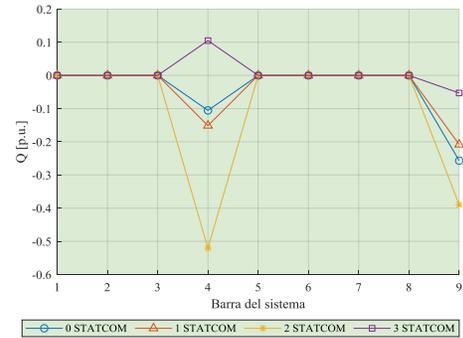


Figura 18. Flujos de potencia desde la Barra 6

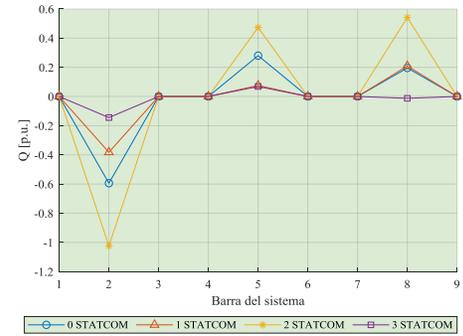


Figura 19. Flujos de potencia desde la Barra 7

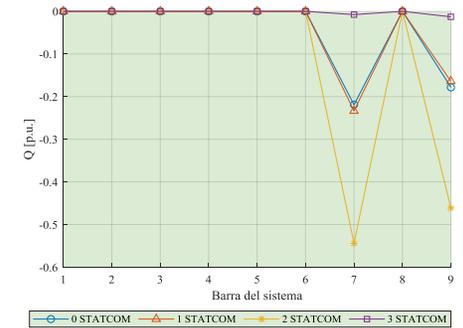


Figura 20. Flujos de potencia desde la Barra 8

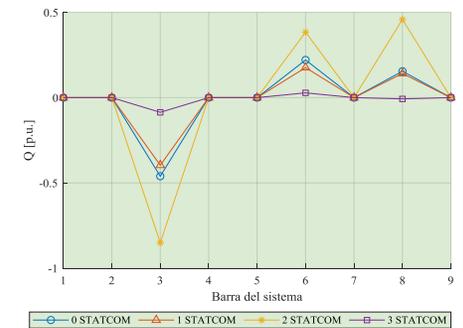


Figura 21. Flujos de potencia desde la Barra 9

5.4 Sistema 9 barras, comparativa de ubicación.

Como se explicó con anterioridad la instalación de un dispositivo de tipo STATCOM en un sistema de potencia implica un alto costo para el ente encargado de la red por ello se ha probado la colocación óptima de un dispositivo limitando la barra en la que puede ser instalado. La figura 22 muestra cómo los perfiles de tensión se ven modificados al cambiar la ubicación del dispositivo entre las 8 barras disponibles en el sistema dado que la barra slack es excluida como opción.

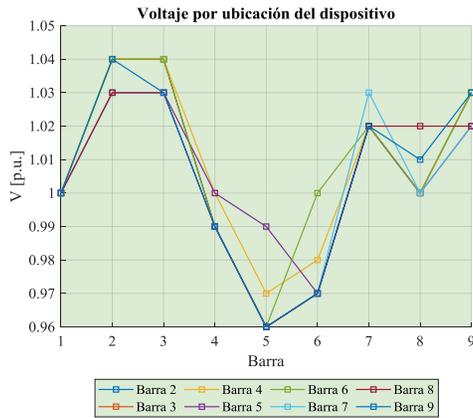


Figura 22. Perfil de voltaje con diferentes ubicaciones del dispositivo.

La figura 23 ilustra el despacho que cada unidad debe entregar en cuanto a potencia activa se refiere frente a cada escenario o ubicación del dispositivo.

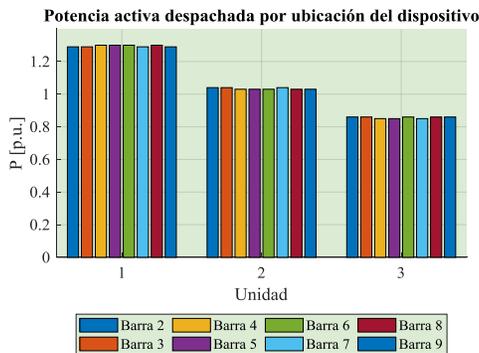


Figura 23. Despacho activo para cada ubicación del dispositivo.

En la figura 24 se ilustra el despacho de potencia reactiva necesario para cubrir las restricciones del modelo frente a cada ubicación del dispositivo.

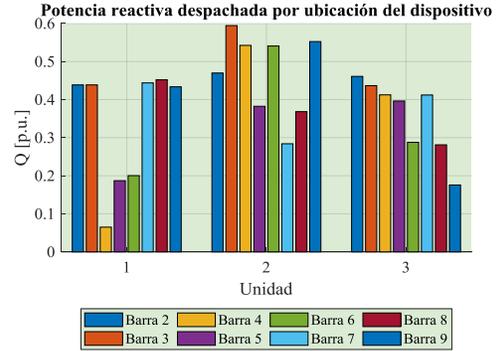


Figura 24. Despacho reactivo para cada ubicación del dispositivo.

Finalmente, a pesar de que la figura 24 muestra cómo se produce el despacho reactivo es necesario considerar cuánta potencia reactiva es necesaria en total, esto se ilustra en la figura 25.

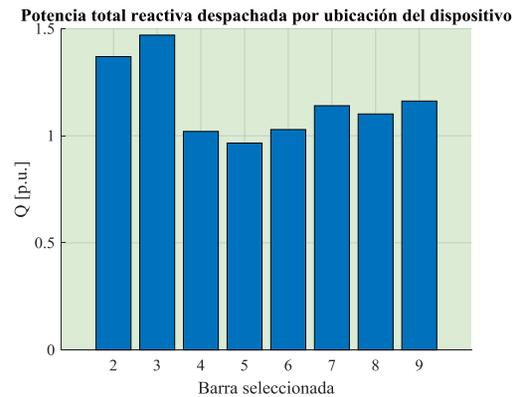


Figura 25. Potencia reactiva total por cada ubicación del dispositivo.

La potencia reactiva que debe ser inyectada o absorbida por el sistema desde el dispositivo también es estudiado dado que el tamaño del dispositivo determina el costo de implementación. La figura 26 muestra la potencia requerida en cada caso.

Se puede apreciar que comparativamente al instalar el dispositivo en la barra 3 se produce el

menor flujo de potencia reactiva desde el dispositivo STATCOM mientras que al seleccionar la barra 5 se tiene el mayor flujo requerido y por tanto el dispositivo de mayor tamaño, sin embargo al observar las métricas referentes a la potencia reactiva requerida desde las unidades de generación también se puede ver que en el caso de seleccionar la barra 3 también se tendría el mayor flujo desde las unidades de generador y en el caso de seleccionar la barra 5 la potencia requerida desde las unidades es la menor que existe. Por tanto, es necesario observar las pérdidas del sistema en ambos puntos de interés. La figura 27 muestra la diferencia de pérdidas que existe en el sistema en el caso de seleccionar la barra 3 o la barra 5 como ubicación óptima. Viendo claramente que la función objetivo cumple a cabalidad la necesidad de reducir la cantidad de pérdidas de potencia reactiva y por tanto liberar consecuentemente el flujo de potencia que debe fluir a través del sistema de transmisión.

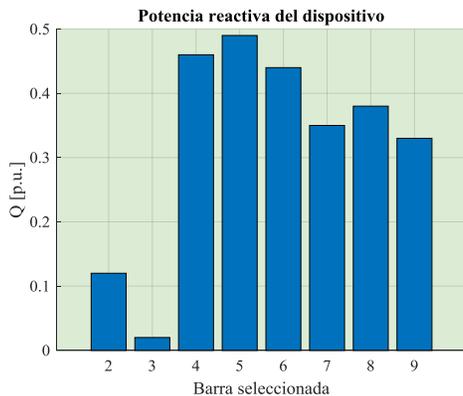


Figura 26. Potencia del dispositivo STATCOM para cada barra seleccionada.

La diferencia entre ambos casos repercute en una diferencia de alrededor de 3.7 MVA de pérdidas en el sistema, la selección de la barra 3 como punto óptimo de ubicación es válida al estudiar la dimensión del dispositivo y por tanto su costo mientras que la ubicación del

dispositivo sigue siendo la barra 5 al considerar únicamente factores técnicos como son el perfil de voltaje, los límites operativos de las unidades, el flujo que circula a través de las líneas y las pérdidas del sistema en general.

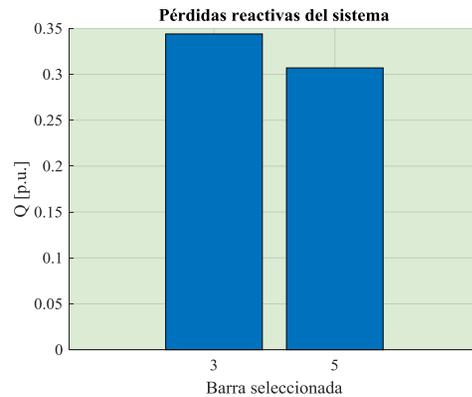


Figura 27. Pérdidas de potencia reactiva.

Al estudiar qué sucede con el flujo de potencia reactiva en ambos casos se puede determinar que el máximo flujo que debe soportar una línea de transmisión en el caso de seleccionar la barra 3 es de 0.59 p.u. mientras que cuando se usa la barra 5 como ubicación óptima el flujo máximo que debe ser soportado es de 0.4 p.u. teniendo una diferencia en valores reales de cerca de 20 MVA, manteniendo el objetivo de la presente investigación al considerar la cargabilidad de las líneas de transmisión.

6 Conclusiones

El modelo presentado muestra que la inclusión de uno o varios compensadores estáticos contribuyen a la mejora de los perfiles de tensión en las barras del sistema a la vez que permiten disminuir la cantidad de pérdidas activas y reactivas del sistema.

La inclusión de compensación reactiva permite reducir el intercambio de potencia reactiva entre barras por medio de las líneas de transmisión aliviando también la cantidad de potencia reactiva

que debe ser despachada por las diferentes unidades de generación en cada barra de conexión.

Los límites asignados con normalidad a un sistema de potencia se ven cubiertos luego de la introducción de los sistemas de compensación que son objeto de este estudio, el comportamiento mostrado por los modelos estudiados valida el efecto esperado al utilizar sistema de compensación reactiva.

6.1 Trabajos futuros

Los logros obtenidos en este documento pueden ser tomados como punto de partida para investigaciones como:

- Dimensionamiento óptimo de sistemas de compensación reactiva.
- Mejora de la calidad del servicio por medio de la introducción de sistemas de compensación tipo FACT.
- Minimizar los costos de instalación de FACTS utilizando dispositivos STATCOMS en las líneas de transmisión,

7 Referencias

- [1] S. Chirantan, S. C. Swain, P. Panda, and R. Jena, "Enhancement of power profiles by various FACTS devices in power system," *Proc. 2nd Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2017*, vol. 2018-Janua, no. Icces, pp. 896–901, 2018.
- [2] M. S. Rawat and R. Tamta, "Optimal Placement of TCSC and STATCOM for Voltage Stability Enhancement in Transmission Network," *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Sect. Int. Conf. Electr. Electron. Comput. Eng. UPCON 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [3] M. Koltun and K. Raahemifar, "Optimal placement and sizing of STATCOMs in power systems using GHS Algorithm," *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2017.
- [4] M. A. Jirjees, D. A. Al-Nimma, and M. S. M. Al-Hafidh, "Voltage Stability Enhancement based on Voltage Stability Indices Using FACTS Controllers," *Int. Iraqi Conf. Eng. Technol. its Appl. IICETA 2018*, pp. 141–145, 2018.
- [5] R. M. M. Pereira, A. J. C. Pereira, C. M. M. Ferreira, and F. P. M. Barbosa, "FACTS performance in the dynamic voltage stability of an electric power system," in *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–5.
- [6] F. C. Gaino and A. Padilha-Feltrin, "Influence of the supply of reactive power in the calculation of the transfer capability," *2004 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*, pp. 190–195, 2004.
- [7] M. R. Shaik and A. S. Reddy, "Optimal placement of STATCOM with ABC algorithm to improve voltage stability in power systems," *Int. Conf. Signal Process. Commun. Power Embed. Syst. SCOPES 2016 - Proc.*, pp. 648–652, 2017.
- [8] Y. Sang and M. Sahraei-Ardakani, "Economic Benefit Comparison of D-FACTS and FACTS in Transmission Networks with Uncertainties," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Augus, pp. 1–5, 2018.
- [9] A. S. Telang and P. P. Bedekar, "Systematic approach for optimal placement and sizing of STATCOM to assess the voltage stability," *Proc. IEEE Int. Conf.*

- Circuit, Power Comput. Technol. ICCPCT 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [10] K. Murugesan and R. Muthu, “Modeling and simulation of D-STATCOM for voltage regulations,” *2011 1st Int. Conf. Electr. Energy Syst.*, pp. 1–5, 2011.
- [11] T. Aristo, S. P. Hadi, and Y. S. Wijoyo, “Static analysis of STATCOM placement effect on the voltage quality and available transfer capability,” *2016 2nd Int. Conf. Ind. Mech. Electr. Chem. Eng. ICIMECE 2016*, pp. 264–269, 2017.
- [12] A. Samimi and M. A. Golkar, “A novel method for optimal placement of STATCOM in distribution networks using sensitivity analysis by DIgSILENT software,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1–5, 2011.
- [13] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Optimal allocation of STATCOM with energy storage to improve power system performance,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 1–5, 2014.
- [14] S. Subramanian, A. Perks, S. B. Tennakoon, and N. Shammam, “Protection Issues Associated with the Proliferation of Static Synchronous Compensator (STATCOM) Type Facts Devices in Power Systems,” in *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, 2006, no. 1, pp. 846–850.
- [15] J. G. Agrawal and K. D. Joshi, “Experimental study of some variable impedance type FACTS devices,” *Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol. ICETET*, no. 3, pp. 164–167, 2011.
- [16] S. Khan, R. Meena, and S. Bhowmick, “Small signal stability improvement of a single machine infinite bus system using SVC,” *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015*, pp. 1–5, 2016.
- [17] S. Bhowmick, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS): Newton power-flow modeling of voltage-sourced converter based controllers*. 2016.
- [18] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, and C. Angeles-Camacho, *Modelling and Simulation in Power Networks FACTS*, vol. 6, no. 2. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [19] Y. Wu and L. Li, “Transfer capability study of tie-line installed TCSC considering transient stability constraints,” *PEAM 2011 - Proc. 2011 IEEE Power Eng. Autom. Conf.*, vol. 2, pp. 260–263, 2011.
- [20] M. Imran and S. Azeez, “Analysis of TCR as a reactive power compensator,” *Asia Pacific Conf. Postgrad. Res. Microelectron. Electron.*, vol. 2016-April, pp. 114–120, 2016.
- [21] D. Wu, J. Zhu, Z. Yu, J. Luo, Y. Chen, and L. Chen, “Research on zero-sequence current calculation method for VSC and circulation current of parallel VSC,” *2017 2nd Int. Conf. Power Renew. Energy, ICPRE 2017*, no. 524606176033, pp. 592–596, 2018.
- [22] M. Eremia, R. Mihalic, and B. Blazic, *Advanced Solutions in Power Systems*. IEEE Press; J. Wiley, 2016.
- [23] S. Dutta and P. K. Roy, “Optimal location of STATCOM using chemical reaction optimization for

- reactive power dispatch problem,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 233–247, 2016.
- [24] S. Bahonar, “Optimal Location of STATCOM for Voltage Security Enhancement via Artificial Intelligent,” no. 2, pp. 2704–2708, 2006.
- [25] L. A. F. M. Ferreira and C. M. S. C. De Jesus, “Local Network Power Flow Analysis: An Accuracy Level Comparison for Two Sets of Equations,” vol. 21, no. 4, pp. 1624–1629, 2006.
- [26] R. Mahanty and P. Gupta, “Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow,” *IEE Proceedings-Generation, Transm. ...*, vol. 151, no. 3, pp. 201–212, 2004.
- [27] K. Tuttelberg and J. Kilter, “Real-time estimation of transmission losses from PMU measurements,” *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, no. 3, pp. 1–5, 2015.
- [28] W. Lin, K. Lu, C. Huang, T. Ou, and Y. Li, “Optimal location and capacity of STATCOM for voltage stability enhancement using ACO plus GA,” *2009 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, pp. 1915–1920, 2009.
- [29] J. Rahul, Y. Sharma, and D. Birla, “A New Attempt to Optimize Optimal Power Flow based Transmission Losses using Genetic Algorithm,” *2012 Fourth Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Networks*, pp. 566–570, 2012.
- [30] M. Dowlatshahi, M. Moallem, and H. Khani, “A new approach for voltage profile enhancement in distribution power systems using fixed and Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC),” *Proc. - 2010 18th Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2010*, pp. 880–884, 2010.
- [31] S. I. Al-Majed, “Secondary voltage control: enhancing power system voltage profile,” *PECon 2008 - 2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, no. PECon 08, pp. 1218–1221, 2008.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 4. Matriz de estado del arte

UBICACIÓN DE SISTEMAS DE COMPENSACIÓN REACTIVA EN LA RED DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD																				
ITEM	DATOS	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Dispositivos FACTS	Estabilidad de tensión sistemas de potencias	Control y operación de sistemas de potencia	Métodos para óptima ubicación de FACTS	Corrección del perfil de tensión	Tipos de dispositivos FACTS	Compensadores estáticos	Modelado STATCOM	Pérdidas del sistema	Ecuaciones de balance de potencia	Restricciones operativas de las barras	Reducir las pérdidas de potencias en la líneas de transmisión	Óptima ubicación de STATCOM	Flujo de potencia convencional	Reducción de flujo reactivo por líneas de transmisión	Límite de cantidad de dispositivos	Cálculo del balance de potencia en cada barra, flujo de potencia
1	2018	Enhancement of power profiles by various FACTS devices in power system	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2018	Optimal Placement of TCSC and STATCOM for Voltage Stability Enhancement in Transmission Network	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>
3	2017	Optimal placement and sizing of STATCOMs in power systems using GHS Algorithm	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	2018	Voltage Stability Enhancement based on Voltage Stability Indices Using FACTS Controllers	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input 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"/>
5	2017	FACTS performance in the dynamic voltage stability of an electric power system	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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"/>
6	2004	Influence of the supply of reactive power in the calculation of the transfer capability	6	<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"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2017	Optimal placement of STATCOM with ABC algorithm to improve voltage stability in power systems	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2018	Economic Benefit Comparison of D-FACTS and FACTS in Transmission Networks with Uncertainties	0	<input checked="" 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"/>

9	2016	Systematic approach for optimal placement and sizing of STATCOM to assess the voltage stability	5	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐		
10	2011	Modeling and simulation of D-STATCOM for voltage regulations	8	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
11	2017	Static analysis of STATCOM placement effect on the voltage quality and available transfer capability	1	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
12	2011	A novel method for optimal placement of STATCOM in distribution networks using sensitivity analysis by DIGSILENT software	11	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	
13	2014	Optimal allocation of STATCOM with energy storage to improve power system performance	7	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	
14	2006	Protection Issues Associated with the Proliferation of Static Synchronous Compensator (STATCOM) Type Facts Devices in Power Systems		☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	
15	2011	Experimental study of some variable impedance type FACTS devices		☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	
16	2015	Small signal stability improvement of a single machine infinite bus system using SVC	3	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
17	2016	Flexible AC Transmission Systems (FACTS) : Newton power-flow modeling of voltage-sourced converter based controllers	5	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
18	2004	Modelling and Simulation in Power Networks FACTS, vol. 6, no. 2. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd	987	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
19	2011	Transfer capability study of tie-line installed TCSC considering transient stability constraints	3	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
20	2016	Analysis of TCR as a reactive power compensator	2	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
21	2018	Research on zero-sequence current calculation method for VSC and circulation current of parallel VSC	0	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
22	2016	Advanced Solutions in Power Systems.	87	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
23	2016	Optimal location of STATCOM using chemical reaction optimization for reactive power dispatch problem	19	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐
24	2006	Optimal Location of STATCOM for Voltage Security Enhancement via Artificial Intelligent	22	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐
25	2006	Local Network Power Flow Analysis : An Accuracy Level Comparison for Two Sets of Equations	10	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
26	2004	Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow		☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

27	2015	Real-time estimation of transmission losses from PMU measurements		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
28	2009	Optimal location and capacity of STATCOM for voltage stability enhancement using ACO plus GA	21	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
29	2012	A New Attempt to Optimize Optimal Power Flow based Transmission Losses using Genetic Algorithm	16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
30	2010	"A new approach for voltage profile enhancement in distribution power systems using fixed and Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)		<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"/>	
31	2008	Secondary voltage control: enhancing power system voltage profile		<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 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 type="checkbox"/>	
			CANTIDAD	18	9	12	11	5	6	4	12	5	5	7	5	10	10	5	5	8	6

7.2 Resumen de Indicadores

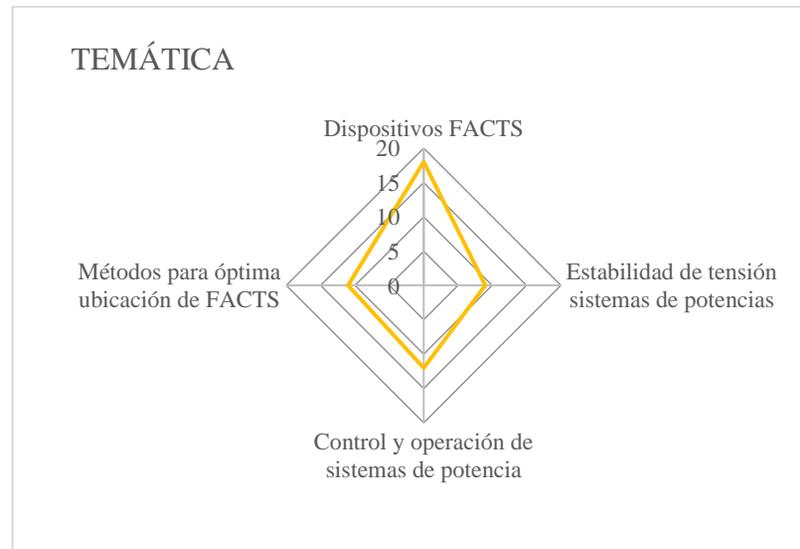


Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

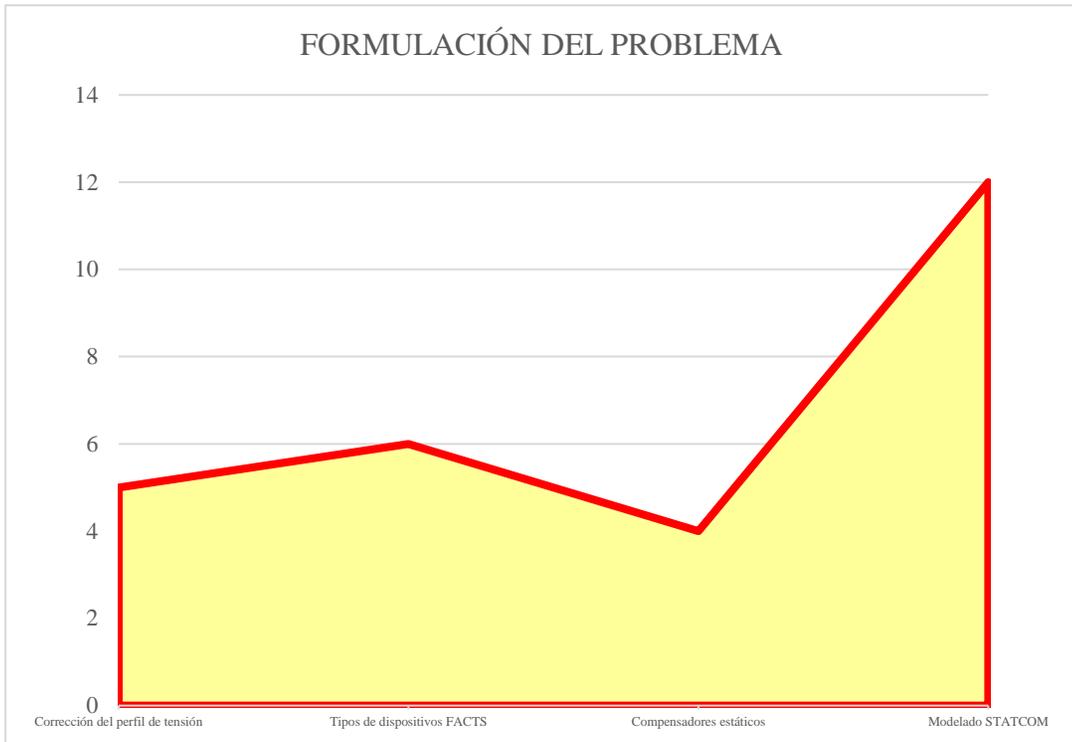


Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

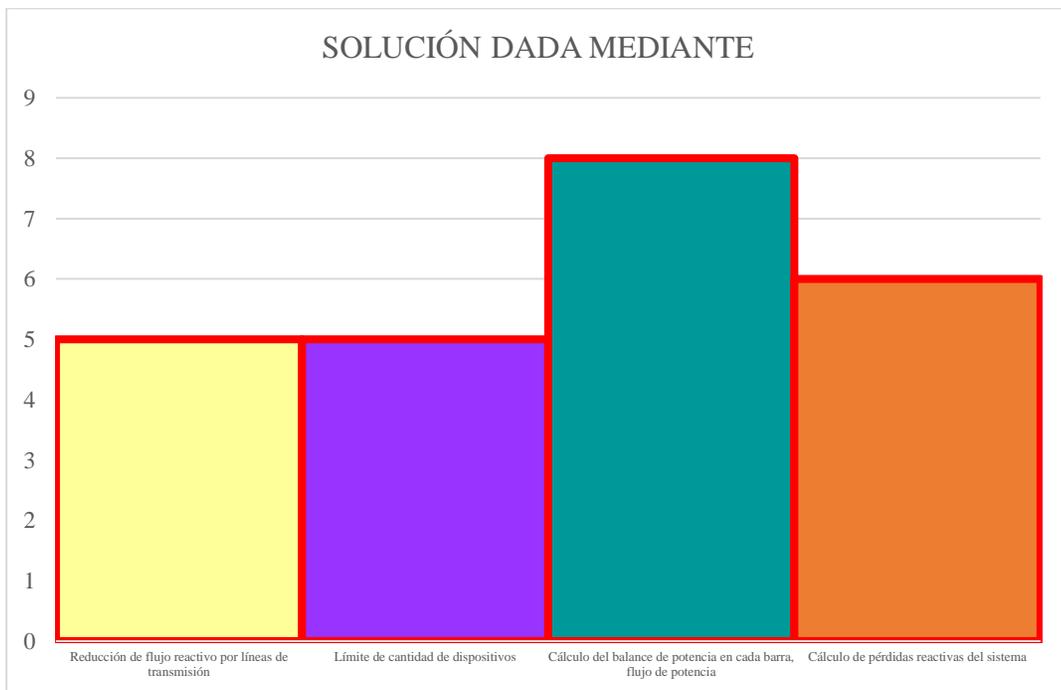


Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte

8 Anexos

8.1 Anexo 1

Tabla 5. Información de barras sistema 9 barras

		Vb:	230									kV
		Vmax	1.05									pu
		Vmin	0.95									pu
*	Nodo	Pload(p,u)	Pload(MW)	Qload(p,u)	Qload(MVAr)	Vmax(kV)	Vmin(kV)	Vini(kV)	dini(rad)	Qreact(pu)	Qreact(MVAr)	
	Num	Pload	Ploadr	Qload	Qloadr	Vmax	Vmin	Vini	dini	Qcap	Qcapr	
N1	1	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	
N2	2	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	
N3	3	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	
N4	4	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	
N5	5	1.25	125	0.5	50	241.5	218.5	230	0	0	0	
N6	6	0.9	90	0.3	30	241.5	218.5	230	0	0	0	
N7	7	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	
N8	8	1	100	0.35	35	241.5	218.5	230	0	0	0	
N9	9	0	0	0	0	241.5	218.5	230	0	0	0	

Tabla 6. Información líneas sistema 9 barras

Vb:			230.000			kV			
Sb:			100			MVA			
Zb:			529.00			ohm			
*	Nin	Nfin	R (p,u)	R(ohm)	X(p,u)	X(ohm)	B(p,u)	B(ohm)	
	Nin	Nfin	Rpu	R	Xpu	X	Bpu	B	
X1	4	5	0.01	5.29	0.09	45.09	0.00	0.00	
X2	4	6	0.02	8.99	0.09	48.80	0.00	0.00	
X3	5	7	0.03	16.93	0.16	85.41	0.00	0.00	
X4	6	9	0.04	20.68	0.17	90.18	0.00	0.00	
X5	7	8	0.01	4.49	0.07	38.19	0.00	0.00	
X6	8	9	0.01	6.29	0.10	53.47	0.00	0.00	
X7	1	4	0.00	0.00	0.03	15.24	0.00	0.00	
X8	2	7	0.00	0.00	0.03	16.56	0.00	0.00	
X9	3	9	0.00	0.00	0.03	15.50	0.00	0.00	

8.2 Anexo 2

Tabla 7. Información barras sistema 39 barras

	Vb:	230.000								kV	
	vmax	1.050								Pu	
	Vmin	0.950								Pu	
*	Nodo	Pload(p,u)	Pload(MW)	Qload(p,u)	Qload(MVAr)	Vmax(kV)	Vmin(kV)	Vini(kV)	dini(rad)	Qreact(pu)	Qreact(MVAr)
	Num	Pload	Ploadr	Qload	Qloadr	Vmax	Vmin	Vini	dini	Qcap	Qcapr
N1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N2	2	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N3	3	3.22	322.00	0.02	2.40	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N4	4	5.00	500.00	1.84	184.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N5	5	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N6	6	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N7	7	2.34	233.80	0.84	84.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N8	8	5.22	522.00	1.76	176.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N9	9	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N10	10	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N11	11	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N12	12	0.08	7.50	0.88	88.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N13	13	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N14	14	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N15	15	3.20	320.00	1.53	153.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N16	16	3.29	329.00	0.32	32.30	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N17	17	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00

N18	18	1.58	158.00	0.30	30.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N19	19	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N20	20	6.28	628.00	1.03	103.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N21	21	2.74	274.00	1.15	115.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N22	22	0.00	0.00	0.00	0.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N23	23	2.48	247.50	0.85	84.60	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N24	24	3.09	308.60	-0.92	-92.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N25	25	2.24	224.00	0.47	47.20	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N26	26	1.39	139.00	0.17	17.00	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N27	27	2.81	281.00	0.76	75.50	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N28	28	2.06	206.00	0.28	27.60	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N29	29	2.84	283.50	0.27	26.90	241.50	218.50	230.00	0.00	0.00	0.00
N30	30	0.00	0.00	0.00	0.00	240.93	240.93	240.93	0.00	0.00	0.00
N31	31	0.09	9.20	0.05	4.60	225.86	225.86	225.86	0.00	0.00	0.00
N32	32	0.00	0.00	0.00	0.00	226.11	226.11	226.11	0.00	0.00	0.00
N33	33	0.00	0.00	0.00	0.00	229.36	229.36	229.36	0.00	0.00	0.00
N34	34	0.00	0.00	0.00	0.00	232.83	232.83	232.83	0.00	0.00	0.00
N35	35	0.00	0.00	0.00	0.00	241.34	241.34	241.34	0.00	0.00	0.00
N36	36	0.00	0.00	0.00	0.00	244.61	244.61	244.61	0.00	0.00	0.00
N37	37	0.00	0.00	0.00	0.00	236.39	236.39	236.39	0.00	0.00	0.00
N38	38	0.00	0.00	0.00	0.00	236.10	236.10	236.10	0.00	0.00	0.00
N39	39	11.04	1.10	2.50	250.00	236.90	236.90	236.90	0.00	0.00	0.00

Tabla 8. Información líneas sistema 39 barras

Vb:	230	kV
Sb:	100	MVA
Zb:	529	ohm

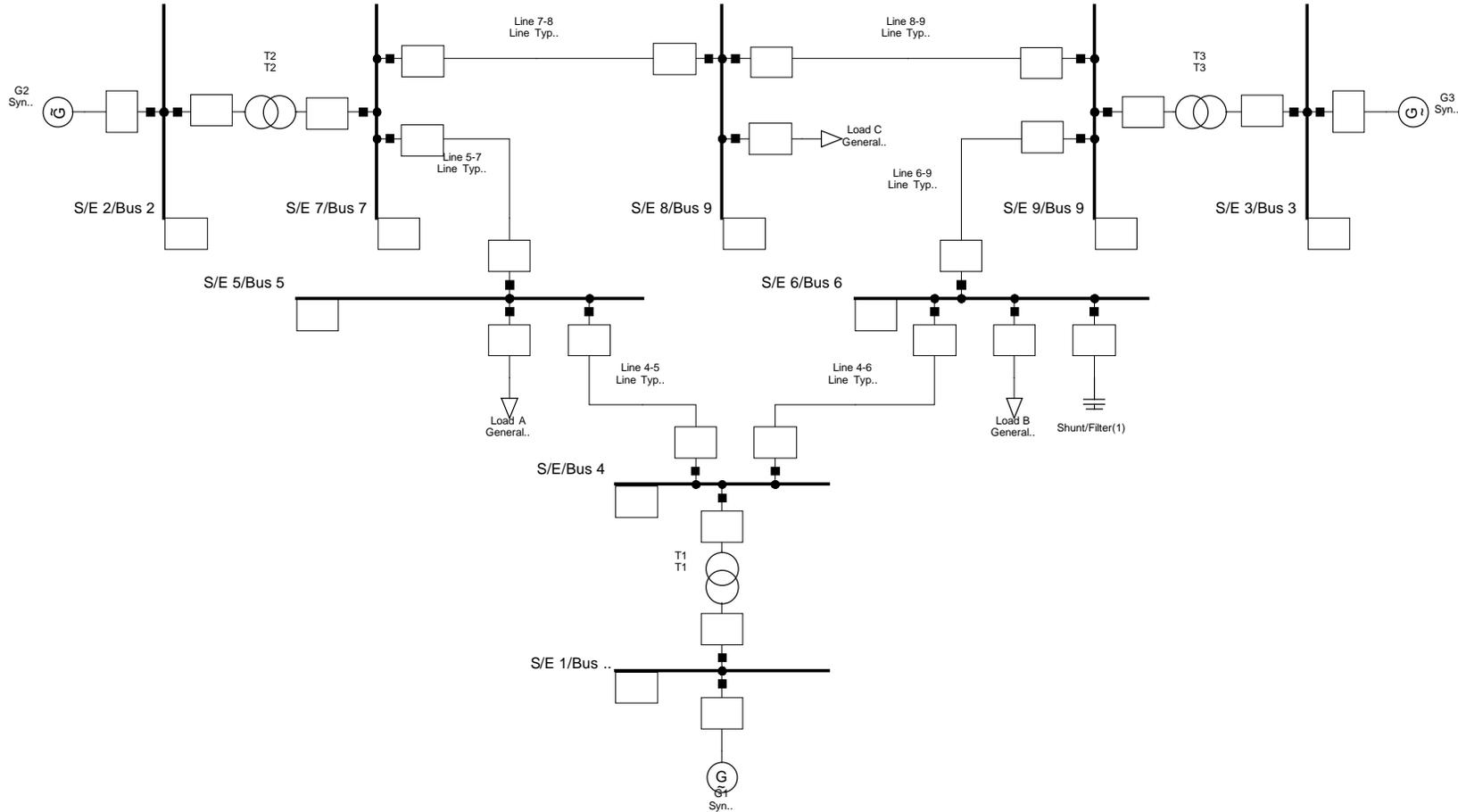
*	Nin	Nfin	R (p,u)	R(ohm)	X(p,u)	X(ohm)	B(p,u)	B(ohm)
	Nin	Nfin	Rpu	R	Xpu	X	Bpu	B
X1	1	2	0.00	1.85	0.04	21.74	0.70	369.61
X2	1	39	0.00	0.53	0.03	13.23	0.75	396.75
X3	2	3	0.00	0.69	0.02	7.99	0.26	136.06
X4	2	25	0.01	3.70	0.01	4.55	0.15	77.23
X5	3	4	0.00	0.69	0.02	11.27	0.22	117.12
X6	3	18	0.00	0.58	0.01	7.04	0.21	113.10
X7	4	5	0.00	0.42	0.01	6.77	0.13	70.99
X8	4	14	0.00	0.42	0.01	6.82	0.14	73.11
X9	5	6	0.00	0.11	0.00	1.38	0.04	22.96
X10	5	8	0.00	0.42	0.01	5.92	0.15	78.08
X11	6	7	0.00	0.32	0.01	4.87	0.11	59.78
X12	6	11	0.00	0.37	0.01	4.34	0.14	73.48
X13	7	8	0.00	0.21	0.00	2.43	0.08	41.26
X14	8	9	0.00	1.22	0.04	19.20	0.38	201.23
X15	9	39	0.00	0.53	0.03	13.23	1.20	634.80
X16	10	11	0.00	0.21	0.00	2.27	0.07	38.56
X17	10	13	0.00	0.21	0.00	2.27	0.07	38.56
X18	13	14	0.00	0.48	0.01	5.34	0.17	91.15

X19	14	15	0.00	0.95	0.02	11.48	0.37	193.61
X20	15	16	0.00	0.48	0.01	4.97	0.17	90.46
X21	16	17	0.00	0.37	0.01	4.71	0.13	70.99
X22	16	19	0.00	0.85	0.02	10.32	0.30	160.82
X23	16	21	0.00	0.42	0.01	7.14	0.25	134.79
X24	16	24	0.00	0.16	0.01	3.12	0.07	35.97
X25	17	18	0.00	0.37	0.01	4.34	0.13	69.78
X26	17	27	0.00	0.69	0.02	9.15	0.32	170.13
X27	21	22	0.00	0.42	0.01	7.41	0.26	135.69
X28	22	23	0.00	0.32	0.01	5.08	0.18	97.65
X29	23	24	0.00	1.16	0.04	18.52	0.36	190.97
X30	25	26	0.00	1.69	0.03	17.09	0.51	271.38
X31	26	27	0.00	0.74	0.01	7.78	0.24	126.75
X32	26	28	0.00	2.27	0.05	25.07	0.78	412.73
X33	26	29	0.01	3.02	0.06	33.06	1.03	544.34
X34	28	29	0.00	0.74	0.02	7.99	0.25	131.72
X35	12	11	0.00	0.85	0.04	23.01	0.00	0.00
X36	12	13	0.00	0.85	0.04	23.01	0.00	0.00
X37	6	31	0.00	0.00	0.03	13.23	0.00	0.00
X38	10	32	0.00	0.00	0.02	10.58	0.00	0.00
X39	19	33	0.00	0.37	0.01	7.51	0.00	0.00
X40	20	34	0.00	0.48	0.02	9.52	0.00	0.00
X41	22	35	0.00	0.00	0.01	7.56	0.00	0.00
X42	23	36	0.00	0.26	0.03	14.39	0.00	0.00
X43	25	37	0.00	0.32	0.02	12.27	0.00	0.00

X44	2	30	0.00	0.00	0.02	9.57	0.00	0.00
X45	29	38	0.00	0.42	0.02	8.25	0.00	0.00
X46	19	20	0.00	0.37	0.01	7.30	0.00	0.00

8.3 Anexo 3

Gráfica sistema 9 barras



8.4 Anexo 4

