



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE TITULACIÓN

TESIS

PREVIO A LA OBTENCIÓN

DEL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO.

Análisis de compensación reactiva aplicado a un SEP estándar IEEE, mediante el

software DigSilent PowerFactory

Autor:

Arteaga Burgos Joury Jimer

García Mora Ronnie Ariel

.

Tutor de Titulación:

Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordoñez MSc, MBA

Manta - Manabí - Ecuador

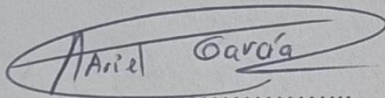
2025

Declaración de autoría

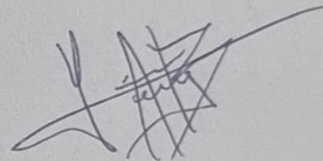
La responsabilidad de este proyecto de titulación **“Análisis de compensación reactiva aplicado a un SEP estándar IEEE, mediante el software DigSilent PowerFactory”**

corresponde exclusivamente a García Mora Ronnie Ariel con C.i: 0250052560 y Arteaga Burgos Joury Jimer con C.i: 1315726115 egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica “ Eloy Alfaro de Manabí. Los derechos patrimoniales de este proyecto de titulación corresponden a la Universidad Laica “ Eloy Alfaro de Manabí”

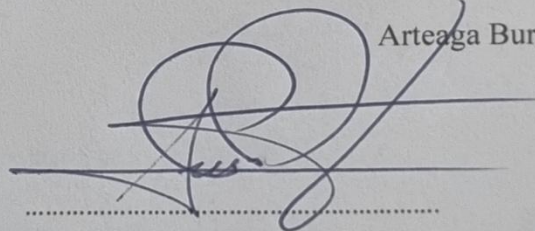
Manta, Septiembre 2025



García Mora Ronnie Ariel



Arteaga Burgos Joury Jimer



Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordoñez MSc, MBA

Dedicatoria

A mis padres, Yimer Arteaga y Magaly Burgos por su apoyo incondicional durante todos mis estudios y por ser una base fundamental en mi vida, motivándome cada día en seguir adelante con los sueños, el respeto y los valores que me han inculcado. A mis hermanas y a mis sobrinos por siempre estar ahí conmigo en todo momento.

Este logro en general es para ustedes, gracias por todo.

Yimer Youry.

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a mis padres, Cecilia Mora y Telmo García que siempre me han ayudado con su enseñanzas y apoyo incondicional durante mi trayectoria universitaria, especialmente en la culminación de mi carrera, cada sacrificio que han hecho y cada consejo que me han ofrecido han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Estoy eternamente agradecido por tenerlos a mi lado y a mis hermanos con los que hemos pasado buenos y malos momentos que, a pesar de todo, siempre hemos estado juntos para poder seguir adelante.

Ronnie García

Agradecimiento.

A mis padres, Yimer Arteaga y Magaly Burgos por hacerme un hombre de bien, por nunca dejar que me falte nada, por tener esa comprensión y apoyo en cada decisión que doy en mi vida, simplemente lo que soy es gracias a ellos.

A mis hermanas que siempre han estado presente en mi vida.

A mi primo Jordan Arteaga, aunque no este conmigo físicamente él sabe cuánto he anhelado este logro y el objetivo de todo.

A mi familia, los Arteaga y los Burgos por a ver estado ahí conmigo directa e indirectamente con su apoyo.

A mis amigos y a todas las personas que fueron parte de este proceso, por acompañarme, día, tarde, noche y madrugada con su presencia.

A nuestro tutor Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordóñez M.Sc por ser guía en este trabajo de titulación.

Yimer Youry.

Agradecimiento.

Primero de nada, agradecer a Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida.

A mis padres y hermanos que siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente tratando de impartir pensamientos positivos.

A nuestro tutor Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordoñez M.Sc. por ser guía en este trabajo de titulación.

Ronnie García

RESUMEN EJECUTIVO

La compensación reactiva es un aspecto fundamental para mantener la estabilidad y eficiencia en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), especialmente bajo condiciones de carga elevadas. La presente investigación se enfoca en analizar el impacto de la compensación reactiva mediante bancos de capacitores, compensadores estáticos de var (SVC) y compensadores estáticos sincrónicos (STATCOM) en un sistema eléctrico estándar IEEE de 9 barras, empleando el software DigSILENT PowerFactory para la simulación y análisis. En términos metodológicos, el documento emplea enfoques descriptivos e inductivos para comprender el rendimiento y límites de modelos de compensación, así como técnicas de simulación y evaluación de resultados, en favor de optimizar la operación, confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico, también se resalta la utilidad del software DigSILENT PowerFactory como herramienta para simular escenarios complejos y evaluar técnicas de compensación en sistemas reales y estándares IEEE, aportando una base sólida para futuras mejoras y aplicaciones en redes eléctricas. El estudio aborda la problemática que representa la correcta ubicación y dimensionamiento de los dispositivos de compensación reactiva, cruciales para mejorar los perfiles de voltaje, corregir el factor de potencia, reducir pérdidas y aumentar la capacidad y estabilidad del sistema eléctrico. Se realizaron análisis bajo diferentes escenarios de carga máxima (90%) y mínima (40%), considerando la aplicación de compensadores en las barras más críticas detectadas mediante curvas PV y QV, identificándose principalmente las barras 5 y 6 como puntos óptimos para la inyección de potencia reactiva.

Palabras clave— Sistema, SVC, STATCOM, Banco de Capacitores, SEP, DigSilent PowerFactory.

ABSTRACT

Reactive compensation is a fundamental aspect of maintaining stability and efficiency in Electric Power Systems (SEP), especially under high load conditions. The present research focuses on analyzing the impact of reactive compensation through capacitor banks, static var compensators (SVC) and synchronous static compensators (STATCOM) in a standard IEEE 9-bar electrical system, using the DigSILENT PowerFactory software for simulation and analysis. In methodological terms, the document uses descriptive and inductive approaches to understand the performance and limits of compensation models, as well as simulation techniques and evaluation of results, in order to optimize the operation, reliability and stability of the electrical system, it also highlights the usefulness of the DigSILENT PowerFactory software as a tool to simulate complex scenarios and evaluate compensation techniques in real systems and IEEE standards. providing a solid foundation for future improvements and applications in power grids. The study addresses the problem of the correct location and sizing of reactive compensation devices, which are crucial for improving voltage profiles, correcting the power factor, reducing losses and increasing the capacity and stability of the electrical system. Analyses were carried out under different scenarios of maximum (90%) and minimum (40%) load, considering the application of compensators in the most critical bars detected by PV and QV curves, mainly identifying bars 5 and 6 as optimal points for reactive power injection.

Keywords— System, SVC, STATCOM, Capacitor Bank, SEP, DigSilent PowerFactory.

Índice

1	Capítulo I. Problema de Investigación.	18
1.1	Planteamiento del problema.	18
1.1.	Antecedentes.	20
1.2.	Justificación.....	21
1.3.	Objetivo General	24
1.3.1.	Objetivos Específicos	24
2	Capítulo II: Marco Teórico.....	25
2.1	Sistema eléctrico de potencia	25
2.2	Normas de calidad del servicio eléctrico en el Ecuador.....	25
2.2.1	Niveles de Tensión	25
2.2.2	Desequilibrio de Tensión.....	26
2.3	Factor de Potencia	27
2.3.1	Potencia Reactiva	28
2.4	Compensación reactiva en los sistemas de potencia	28
2.5	Ventajas de la compensación reactiva en los sistemas eléctricos de potencia. ...	29
2.5.1	Corrección y mejoramiento del factor de potencia.....	29
2.5.2	Mejoramiento de los perfiles de voltajes.....	30
2.5.3	Reducción de las pérdidas por efecto Joule.....	30
2.6	Ubicación óptima de la compensación reactiva	31

	10
2.7 Estabilidad de tensión.....	34
2.7.1 Curvas Q-V.....	35
2.7.2 Curva P-V.....	37
2.8 Sensibilidad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).....	38
2.8.1 Matriz de Sensibilidad.....	38
2.8.2 Inspección de Sensibilidad.....	41
2.9 Tipos de compensación.....	44
2.10 Compensación estática.	44
2.10.1 Conexiones de compensación estática.....	45
2.10.2 Dispositivos estáticos de compensación fija.....	48
2.10.1 Posición de los bancos de capacitores en las líneas (compensación fija)....	52
2.10.2 Dispositivos estáticos de compensación escalonada.	53
2.11 Compensación Dinámica.....	55
2.11.1 Conexiones de compensación dinámica.....	55
2.11.2 FACTS.....	57
2.11.3 Dispositivos SVC.	58
2.11.4 Dispositivos STATCOM.....	62
2.11.5 Compensación por máquinas síncronas.....	65
2.12 Software DigSILENT PowerFactory.....	67
3 Capitulo III: Metodología.....	68

3.1	Metodología de la Investigación	68
3.1.1	Método de investigación.....	68
3.1.2	Procedimiento de análisis	68
3.2	Ingeniería del proyecto.....	70
3.2.1	IEEE	70
3.2.2	Ingreso al Software y selección del modelo	71
3.2.1	Habilitación del apartado de herramientas	74
3.2.2	Resultados.....	74
3.2.3	Habilitación del apartado de las curvas.	76
3.2.4	Modelamiento del banco de capacitores.....	80
3.2.5	Modelamiento del SVC	81
3.2.6	Modelamiento del STATCOM.....	83
3.3	Escenarios considerados para el análisis.....	85
4	Capitulo IV: Diseño de proyecto	88
4.1	Caso 1: Estudio Base en el Sistema de 9 Barras	88
4.1.1	Sistema Base con máxima carga	92
4.1.2	Sistema Base con mínima carga	93
4.2	Caso 2: Carga máxima de 90%	95
4.2.1	Casos en la barra 5.....	95
4.2.1.1	Caso 2.1: Utilización de Banco de Capacitor	95

	12
4.2.1.2 Utilización del SVC.....	96
4.2.1.3 Caso 2.3: Utilización de STATCOM	98
4.2.2 Casos en la barra 6.....	99
4.2.2.1 Caso 2.5: Utilización de Banco de Capacitores.....	99
4.2.2.2 Caso 2.5: Utilización de SVC.....	101
4.2.2.3 Caso 2.6: Utilización de STATCOM	102
4.3 Caso 3: Carga mínima 40%.....	104
4.3.1 Casos en la barra 5.....	104
4.3.1.1 Caso 3.1: Utilización de Banco de Capacitores.....	104
4.3.1.2 Caso 3.2: Utilización de SVC.....	105
4.3.1.3 Caso 3.3: Utilización de STATCOM	107
4.3.2 Casos en la barra 6.....	108
4.3.2.1 Caso 3.4: Utilización de Banco de Capacitores.....	108
4.3.2.2 Caso 3.5: Utilización de SVC.....	110
4.3.2.3 Caso 3.6: Utilización de STATCOM	111
5 Capitulo V: Análisis de los casos	113
5.1 Análisis del perfil de tensión con carga en su máxima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 9 barras	113
5.1.1 Caso 2 en Máxima cargabilidad:	114
5.1.2 Caso 2 en Mínima cargabilidad:.....	119

5.2	Comparativa de resultados	129
6	Conclusiones.....	130
7	Bibliografía.....	132
8	Anexos.....	138

Figuras

Figura 1 Diagrama del triángulo de potencia.....	27
Figura 2 Fenómeno de inestabilidad y colapso de voltaje	35
Figura 3 Curva Q-V	36
Figura 4 Curva P-V	37
Figura 5 Conexión en serie	45
Figura 6 Conexión en paralelo	46
Figura 7 Conexión Fija	47
Figura 8 Conexión Variable	48
Figura 9 Diagrama fasorial de potencias.....	49
Figura 10 Desfase entre la onda de tensión y la de corriente.....	50
Figura 11 Posiciones comunes de los bancos de capacitores en una línea de transmisión: (a) un extremo, (b) en el medio de la línea, (c) ambos extremos y (d) un tercio de la longitud de la línea en ambos extremos	52
Figura 12 Zona de operación del dispositivo de compensación escalonada.....	54
Figura 13 Conexión en shunt	56
Figura 14 Conexión en serie-shunt	57
Figura 15 SVC	59
Figura 16 Comportamiento del SVC	62
Figura 17 Compensación reactiva con STATCOM.....	63
Figura 18 Modelo del Banco de Capacitores	80
Figura 19 Parámetros del sistema de control del Banco de Capacitores	81
Figura 20 Modelo del SVC	82

Figura 21 Parámetros del sistema de control del SVC.....	82
Figura 22 Modelo del STATCOM.....	83
Figura 23 Parámetros del sistema de control del STATCOM	84
Figura 24 Parámetros del flujo de potencia del STATCOM	85
Figura 25: Curva P-V.....	86
Figura 26: Curva Q-V	87
Figura 25 Sistema de 9 barras de la IEEE.....	88
Figura 26 Voltajes pu caso base.....	89
Figura 27 Potencias Reactivas y Activas	90
Figura 28 Curva P-V caso base 9 barras	90
Figura 29 Curva Q-V caso base 9 barras	91
Figura 30: Curva P-V en máxima carga en el sistema.....	92
Figura 31: Curva Q-V en máxima carga en el sistema	92
Figura 32: Curva P-V en mínimo carga en el sistema	93
Figura 33: Curva Q-V en mínimo carga en el sistema	94
Figura 34: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga	95
Figura 35: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga ...	95
Figura 36: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 90% de carga	96
Figura 37: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 90% de carga	97
Figura 38: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga...	98
Figura 39: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga ..	98
Figura 40: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga	99
Figura 41: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga .	100
Figura 42: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 90% de carga	101

Figura 43: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 90% de carga.....	101
Figura 44: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga .	102
Figura 45: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga	103
Figura 46: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 40% de carga ..	104
Figura 47: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 40% de carga .	104
Figura 48: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 40% de carga	105
Figura 49: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 40% de carga	106
Figura 50: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga .	107
Figura 51: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga	107
Figura 52: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con Capacitores al 40% de carga .	108
Figura 53: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con Capacitores al 40% de carga.	109
Figura 54: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 40% de carga	110
Figura 55: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 40% de carga	110
Figura 56: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga .	111
Figura 57: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga	112
Figura 58: Tensiones en pu con banco de capacitores.....	115
Figura 59: Tensiones en pu con SVC	117
Figura 60: Tensiones en pu con STATCOM.....	118
Figura 61: Tensiones en pu con Banco de Capacitores	120
Figura 62: Tensiones en pu con SVC	122
Figura 63: Tensiones en pu con STATCOM.....	123
Figura 64: Grafico de compensación reactiva en máxima cargabilidad.....	138
Figura 65: Grafico de compensación reactiva en mínima cargabilidad.....	138

**PLAN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO
INVESTIGATIVO**

1 Capítulo I. Problema de Investigación.

1.1 Planteamiento del problema.

El análisis de los sistemas de compensación reactiva constituye un tema de interés permanente para los diversos agentes implicados en la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), particularmente en sistemas con condiciones de carga elevadas, se observan una influencia significativa en los niveles de tensión en la red de transmisión. La tensión puede ser controlada mediante la absorción o inyección de potencia reactiva favoreciendo al sistema; en donde la compensación reactiva ayuda a incrementar la confiabilidad y seguridad del SEP, mejorando los perfiles de voltajes, la rectificación del factor de potencia, la disminución del costo de la energía y las pérdidas del sistema.

La potencia reactiva no puede ser transferida a largas distancias, por esto para el control de las tensiones se tiende a utilizar equipos de compensación que son localizadas en sitios donde los perfiles de voltajes no están dentro de los límites admisibles. Existen una variedad de equipos para lograr un balance de reactivos, estos pueden ser clasificados según su modo de funcionamiento siendo dispositivos pasivos que se apoyan en susceptancias fijas y en dinámicos que adapta de forma ininterrumpida la contribución de reactivos, contribuyendo una ayuda a la regulación de voltaje y apoyando al decrecimiento de las pérdidas en las líneas de transmisión.

Los equipos de compensación reactiva pasivas pueden ser: capacitores e inductores en paralelo y serie, y los dinámicos son: compensadores síncronos, compensadores estáticos de Var (SVC), compensadores estáticos sincrónicos (STATCOM), siendo parte de los FACTS; en la actualidad para el mejoramiento de la capacidad del SEP se utilizan los FACTS quienes dan soluciones para aumentar la capacidad del sistema, mejorando la confiabilidad y seguridad del sistema.

La compensación reactiva utilizando bancos de capacitores es una práctica común en los sistemas de potencia, estableciendo su problemática principal en la determinación de un sitio para su localización y posterior montaje; al igual que el valor en términos de la potencia reactiva (Q) con el fin de obtener beneficio técnico-económico en el estado operativo del sistema eléctrico de potencia (SEP). La aplicación de los bancos de capacitores en paralelo asiste a el control del voltaje en periodos de máxima demanda y para la rectificación del factor de potencia, pero se tiene una desventaja donde la potencia reactiva puede disminuir proporcionalmente al voltaje al cuadrado; por lo tanto, resulta ser dispositivos no muy eficientes. Mientras en serie ayudan a controlar el flujo de potencia en régimen permanente ampliando la zona de estabilidad de tensión y reduciendo la reactancia de la línea, contribuyendo a menor caída de voltaje del sistema.

Como nos indica Intriago Luis, 2020; la compensación reactiva por medio de los banco de capacitores pueden ser: en paralelo, serie y combinado; en donde; los bancos en serie; pueden introducir tensión a las líneas de transmisión dado a su comportamiento como una impedancia cambiante, incrementada por la corriente ingresadas en la línea de transmisión, mientras que en paralelo introduce corriente en el sistema permitiendo de esta forma se verifica la tensión en la barras, muy independiente de la red de transmisión a la que esté conectada al nodo, que en el contrario que requiere compensadores unitarios.

A veces, una mala ubicación de los elementos en el sistema es una de las causantes que haya pérdidas y por lo tanto una baja eficiencia en el sistema eléctrico, con la inyección de reactivos a una red es posible que se reduzca un poco la caída de voltaje y así dando un poco de confiabilidad al SEP. Por los problemas operativos y técnicos se producen pérdidas de energía y pérdidas de potencia en el sistema de distribución, con todas estas pérdidas la vida útil de los elementos dentro del sistema va a disminuir, toda esta problemática se traduce principalmente en factores económico de alto costo para las distribuidoras.

En resumen, la problemática presenta un impulso de analizar un sistema eléctrico de potencia estandarizado de la IEEE para la ubicación mediante la colocación de banco de capacitores, SVC y STATCOM a lo largo de las diferentes barras, con el fin de verificar como ayudara la inyección de reactivo en el sistema. Siendo una evaluación importante para futuros estudios y posibles implementaciones que pueden ayudar al sistema eléctrico de potencia.

1.1. Antecedentes.

En la ciudad de Medellín (Alexander Aguilar Téllez, 2021), se realizó un análisis con el objetivo de comprobar la optimización de los flujos de potencia reactiva en el sistema eléctrico de distribución dando una óptima ubicación y dimensionamiento de elementos compensadores de potencia reactiva que contribuya al mejoramiento conjunto de los perfiles de tensión, minimizando las pérdidas de potencia, aumentando la capacidad de la línea, estabilidad de tensión todo ellos a un mínimo costo.

Lo que se realizó dentro de este estudio fue verificar la ubicación y el dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores fijos en una microrred utilizando 14 barras con capacidades reactivas discretizadas se simuló en algunos nodos para analizar el flujo de potencia, obteniendo algunas soluciones y multicriterio utilizando métodos de eliminación por dominancia y de la suma ponderada, siendo una posibles soluciones a las diferente variables que se analizaron ayudando a la ubicación y dimensionamiento de dispositivos de compensación.

Según Gonzalo Manuel y Águila Alexander nos indica “Que disminuyendo pérdidas técnicas que se presentan por ubicación y dimensionarlos en lugares inadecuados, los bancos de condensadores normalmente tienen capacidades nominales que son múltiplos enteros de una unidad estándar (5, 25, 50, 150 KVAR, etc.), en la implementación de los bancos de capacitores debe considerarse algunos aspectos, en donde debe tomarse en cuenta el estudio de redes radiales”

Marcela Lucia Chicaiza (2018), nos explica por medio de un estudio optimizado por medio de colonia de hormigas para solventar el problema de compensación de reactivos en el sistema de distribución; con el que determinan la ubicación y dimensión óptima de un banco de capacitores para reducir las pérdidas de potencia. Su investigación se basa en un sistema de la IEEE de 30 nodos obteniendo un resultado satisfactorio como en la reducción de las pérdidas en el sistema y se alcanzó a mejorar los perfiles de voltaje.

Como conclusión, se puede decir que para que el suministro de energía cumpla con la calidad se realizan estudios de optimización de las redes, con la implementación de banco de capacitores en el sistema de potencia, así favorecer en el flujo de potencia del sistema. Sin embargo, es importante considerar algunas condiciones para la ubicación y realizar un análisis detallado antes de la implementación de dichos equipos en el sistema.

1.2. Justificación.

Como se sabe; la compensación reactiva es una técnica fundamental dentro del SEP para mantener un nivel apropiado de las tensiones mejorando la eficiencia y la estabilidad del sistema, dentro del estándar IEEE la aplicación de un análisis de compensación reactiva cobra una relevancia significativa, ya que, son sistemas críticos que requieren niveles óptimos de tensión y estabilidad para garantizar una ayuda a gran escala en el tema de la eficiencia del SEP cumpliendo con los estándares y normativas para contribuir a un suministro eléctrico seguro y eficaz.

A continuación, se expondrá algunos aspectos que ayudan a justificar el análisis de la compensación reactiva dentro de los sistema de potencia:

- **Corrección del Factor de Potencia:** La compensación reactiva ayuda a corregir el factor de potencia lo que evita penalizaciones a las empresas suministradoras de energía y mejora los perfiles de voltaje durante el arranque de motores o conexión de cargas de gran magnitud.

- **Capacidad de carga:** Con la instalación de banco de capacitores se puede aumentar la capacidad de carga en el sistema eléctrico, al liberar la capacidad de conducción de corriente de los conductores y transformadores. Permite una mayor flexibilidad en la expansión y carga del sistema sin necesitar inversiones en su infraestructura.
- **Mejora en la Eficiencia:** Los equipos que se encuentran conectados al sistema teniendo una compensación reactiva ayuda a tener un menor desgaste y una larga vida útil, contribuyendo a la eficiencia y ahorro en costos de mantenimiento.
- **Mejora en el Factor de Potencia y Tensión:** Con la implementación de la compensación reactiva mejora el factor de potencia de la instalación, el voltaje y el desempeño del sistema eléctrico en general.
- **Cumplimiento de regulaciones y estándares:** Existen regulaciones y estándares en cada país donde a cada empresa de distribución de energía se les requieren que su factor de potencia se mantenga dentro de ciertos límites. Con la instalación de bancos de capacitores, la empresa de distribución de energía puede cumplir con estos requisitos regulatorios y a evitar posibles multas o sanciones.

Como sabemos, en los últimos años se han cambiado los antiguos banco de capacitores por equipos de compensadores de potencia reactiva basados en electrónica de potencia, los cuales tiene un desempeño automatizado siendo más eficiente en la estabilidad de voltaje, sin embargo inyectar demasiados armónicos al sistema eléctrico de potencia puede afectar, por eso es necesario un estudio actual que contribuya a diagnosticar de manera óptima de los dispositivo compensación cuando se utilizan diferentes barras de la IEEE.

El presente estudio justifica la pertinencia del análisis de compensación reactiva aplicado a un SEP estándar IEEE, a través de la constatar que indica la eficiencia y relevancia de dicho enfoque para optimizar la operación de sistemas eléctricos de potencia. A pesar de eventuales

críticas, el análisis detallado respalda la importancia de implementar estrategias de compensación reactiva en entornos controlados por normativas IEEE, ayudando así al mejoramiento continuo del ahorro de energía y el equilibrio del sistema.

Estos beneficios no solo van a mejorar la eficiencia operativa, si no que a largo plazo va a generar ahorros significativos y a garantizar un suministro confiable de energía a los consumidores finales.

1.3. Objetivo General

Analizar el impacto de la compensación reactiva mediante el uso de bancos capacitivos, VSC, STATCOM en un sistema eléctrico de potencia de estándar de la IEEE mediante la utilización del software Digsilent PowerFactory.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Analizar las variables de interés del SEP bajo estudio sin la introducción de compensación reactiva.
- Analizar las variables de interés del SEP bajo estudio con la introducción de compensación reactiva con la cargabilidad máxima y mínima.
- Comparar los resultados obtenidos de las variables de interés del SEP de las barras débiles para identificar cuál de los equipos de compensación reactiva es el que tiene más impacto en el sistema eléctrico de potencia.

2 Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Sistema eléctrico de potencia

En conformidad a lo mencionado por Walter Brokering 2008, el sistema eléctrico de potencia (SEP) es un compuesto de instalaciones que permiten generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica en circunstancias adecuadas de tensión, frecuencia y disponibilidad. Siendo la transmisión y distribución de la energía a los sectores en donde se encuentran los consumidores dando origen a líneas de transmisión que en conjunto se designa como sistema de transmisión (Brokering Christie Walter et al., 2008).

2.2 Normas de calidad del servicio eléctrico en el Ecuador.

La corporación de transmisión dentro del país está en el compromiso de suministrar energía de calidad a los consumidores. Siendo Arconel la encargada de regular el servicio eléctrico y ejecutar las ordenanzas; como son las disposiciones que hablan sobre la calidad de tensión, la cual, se encuentra en la Resolución 003/2023 que habla acerca de “la eficiencia de funcionamiento de la repartición y mercadeo de energía eléctrica”, donde se especifica este tema de calidad de energía. Teniendo 2 aspectos importantes que son (Arconel, 2023).

2.2.1 Niveles de Tensión

Comprender la intensidad de la tensión dentro del sistema de distribución posibilita comprender los parámetros de calidad si son aceptables, y verificar la variación de tensión en el suministro, el cual se puede verificar de la siguiente forma:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100(\%) \quad \dots (1)$$

Donde:

ΔV_k : Diferencial de la tensión de entrega respecto a la tensión nominal en el punto k

V_k : tensión de entrada al punto k, definido como el promedio de las medidas registradas (por lo menos cada tres segundos) en un lapso de diez minutos

V_N : tensión nominal en el punto k

Tabla 1 *Niveles de tensión.*

Nivel de tensión		Rango admisible
Tensión alta-grupo 1	>138 kV	±5,0%
Tensión alta-grupo 2	>40 kV ≤ 138 kV	±5,0%
Tensión media	>0,6 kV ≤ 40 kV	±6,0%
Tensión baja	≥ 0,6 kV	± 8,0%

2.2.2 Desequilibrio de Tensión

Aquí se estudia el punto donde existe el desequilibrio de tensión y se obtiene con la siguiente formula (Arconel, 2023).

$$\text{Desequilibrio de Tensión} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| * 100(\%) \quad \dots (2)$$

Donde:

V^- : Componente de la secuencia negativa de tensión, definida como el producto medio de las medidas analizadas en un intervalo de diez minutos

V^+ : Componente de secuencia positiva de tensión, definida como el producto medio de las medias analizadas en un intervalo de diez minutos.

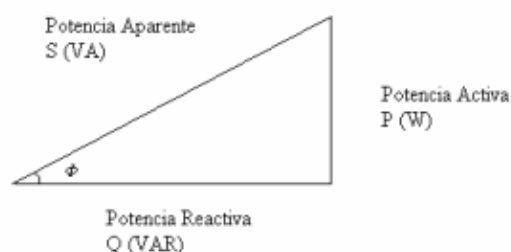
2.3 Factor de Potencia

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (W), y la potencia aparente (VA) describiendo la relación entre la potencia de trabajo o real y la potencia total consumida; siendo favorable en las instalaciones eléctricas el factor de potencia será cercano a uno y algunas empresas distribuidoras de energía exigen valores superiores a 0.92 p.u (Méndez. S.J, 2022).

El factor de potencia (FP) está definido por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} \quad \dots (4)$$

Figura 1 Diagrama del triángulo de potencia



Fuente: Corrección de factor de potencia por (Méndez. S.J, 2022).

De la figura anterior se puede obtener:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \dots (5)$$

Donde:

S= Potencia aparente

P= Potencia activa

Q= Potencia reactiva

El factor de potencia se define como; el desfaseamiento o no de la corriente con relación al voltaje y es utilizado como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el cual

puede estar entre 0.92 y 1 siendo la unidad (1 p.u) el máximo de FP y por tanto mejora el rendimiento de la energía (Landa, 2010).

2.3.1 Potencia Reactiva

La potencia reactiva se define por un desfase entre la corriente y el voltaje, fenómeno que se produce debido a la existencia de inductores o capacitores en el sistema. Según el ingeniero Robert C. Dorf, "la potencia reactiva no puede ser utilizada para realizar trabajo útil, pero es esencial para la operación de muchos dispositivos eléctricos"

$$Q = V * I \sin(\phi) \quad \dots (3)$$

Donde:

Q = Potencia reactiva

V = Voltaje

I = Corriente

ϕ = Ángulo de fase entre el voltaje y la corriente

La potencia reactiva posee una influencia considerable sobre la eficiencia de las redes eléctricas. Si bien no realiza un trabajo útil, su presencia incrementa la cantidad total de energía que debe ser generada y transmitida a través de las redes. Esto puede originar pérdidas adicionales debidas a la resistencia de los cables y equipos, ya que la potencia reactiva provoca un aumento en la corriente circulante en el sistema (Dorf, 2011).

2.4 Compensación reactiva en los sistemas de potencia

La compensación reactiva es uno de los métodos más conocidos por su contribución a la reducción de pérdidas de energía y otros beneficios, tales como la corrección del factor de potencia, aumento de la capacidad de transporte y operación de líneas, estabilidad de tensión todo ello sometidas a restricciones operativas. Con un control integrado del flujo de potencia reactiva y del

perfil de tensión en las redes de distribución se ha generado un problema complicado de solucionar, debido a las características del sistema de potencia.

Por tal motivo la potencia reactiva debe controlarse al nivel deseado mediante equipos como los FACTS ya que tiene una respuesta rápida; en donde; estas unidades compensadoras dan resistencia de voltaje a las barras a través de las perturbaciones, ayudando la estabilidad de voltaje debido a las perturbaciones (Águila T Ellez et al., 2018).

La gestión de la potencia reactiva es la clave para garantizar la estabilidad del voltaje. En otras palabras, los desequilibrios de potencia reactiva en la red eléctrica causan inestabilidad de voltaje y violaciones de carga. El sistema eléctrico puede incluso sufrir catástrofes, como apagones y contingencias, los principales creadores de desajustes son las redes de transmisión y la demanda variable del lado de la carga (Jibran Ali et al., 2019).

2.5 Ventajas de la compensación reactiva en los sistemas eléctricos de potencia.

2.5.1 Corrección y mejoramiento del factor de potencia

La corrección del factor de potencia tiene que ser lo más cercano a 1, ya que en los SEP existen cargas inductivas, lo que desgasta el factor de potencia, por lo que hay que implementar compensación reactiva, para reducir el consumo de reactivos y recortar diferencia entre la activa y la aparente para mejorar el factor de potencia y aumentar la capacidad eléctrica dentro del sistema y mejorar los niveles de voltaje.

(Khusnutdinov et al., 2022a), nos indica en su investigación que algunos valores límites del factor de potencia reactiva son las siguientes:

- Tensión de 110 kV; 0.5
- Tensión de 35 kV; 0.4
- Tensión de 1-20 kV; 0.4

- Tensión de 0.4 kV; 0.35

Con relación a esto la compensación reactiva asiste al sistema y a industrias a acrecentar la calidad de la energía y reducir las pérdidas de la energía en la red (Khusnutdinov et al., 2022b).

2.5.2 Mejoramiento de los perfiles de voltajes

Para el mejoramiento se busca elevar la estabilidad y confiabilidad mediante la implementación de compensadores reactivos, variación de los TAP, reguladores de voltaje, banco de condensadores o compensación estática, etc. (Peña et al., 2021). La utilización de estos compensadores ayuda a tener un voltaje estable, ya que, los equipos mencionados anteriormente trabajan en una zona inductiva y consumen potencia reactiva de la carga, también puede trabajar en zona capacitiva liberando reactiva para mantener estable al sistema de potencia (Alexander Aguilar Téllez, 2021).

2.5.3 Reducción de las pérdidas por efecto Joule

La compensación reactiva ayuda a la reducción de las perdidas Joule en los conductores y transformadores, además estas pérdidas son contabilizadas como energía activa consumida (kWh) por la empresa eléctrica, por lo que se puede decir que es una reducción en los costos. Se sabe que la carga trifásica en condiciones iniciales tiende a consumir potencia activa P con un factor de potencia $\cos \varphi_1$. La tensión U_1 es la tensión de alimentación y U_2 la tensión en la carga (Compensación de Energía Reactiva, 2020).

La corriente consumida por la carga es la siguiente:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U_2 \cos \varphi_1} \quad \dots (6)$$

Si se conoce que se compensa el factor de potencia a $\cos \varphi_2$ la corriente consumida será la siguiente:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}U'_2 \cos \varphi_2} \quad \dots (7)$$

Donde:

I_{1-2} : Corriente consumida 1-2

U_1 : Tensión de alimentación

U_2 : Tensión en la carga

P : Potencia activa

R_L : Resistencia por fase del cable

En donde la corriente $I_1 < I_2$ ya que $\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$ y $U'_2 > U_2$:

La R_L es la resistencia por fase del cable de alimentación, las pérdidas totales en el cable de alimentación es la siguiente formula:

$$p_2 = 3 * R_L * I_2^2 < p_1 = 3 * R_L * I_1^2 \quad \dots (8)$$

También se puede utilizar una fórmula para evaluar la disminución de pérdidas en función del $\cos \varphi$ de la instalación (Compensación de Energía Reactiva, 2020).

$$\frac{Pérdidas_{iniciales}}{Pérdidas_{iniciales}} = \left[\frac{\cos \varphi_{inicial}}{\cos \varphi_{inicial}} \right]^2 \quad \dots (9)$$

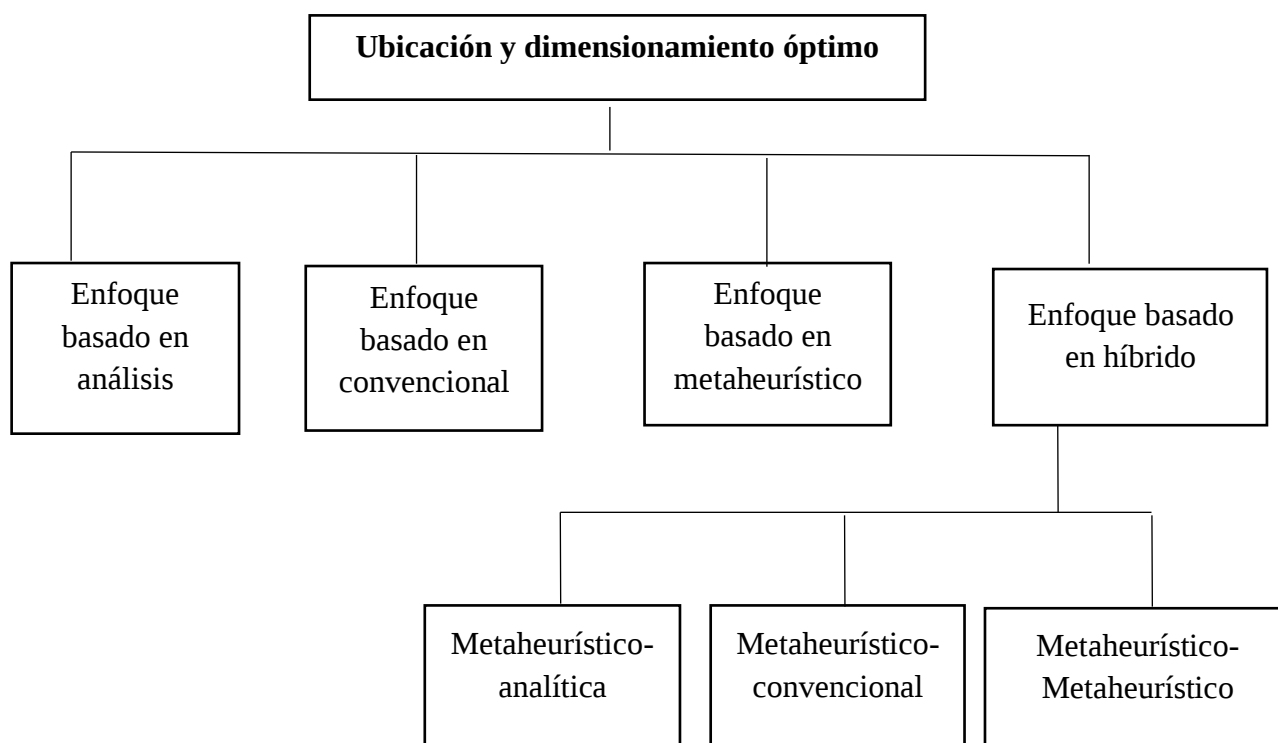
2.6 Ubicación óptima de la compensación reactiva

La ubicación de la compensación reactiva ha sido viable para mitigar problemas en los sistemas de transmisión y distribución, siendo capaces de controlar parámetros importantes de la red eléctrica mejorando algunas características. La combinación de la compensación reactiva con una ubicación y tamaño adecuado puede acrecentar una mejora en el rendimiento general del

sistema, especialmente los perfiles de tensión en las barras minimizando las pérdidas de energía y aumentar la estabilidad del voltaje y el margen de carga.

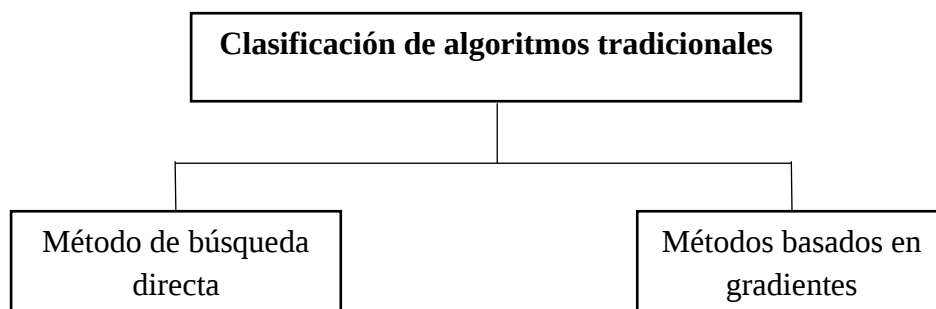
El objetivo de la ubicación que es mencionado anteriormente, considera algunos factores como el balance de potencia real y reactiva, el límite de la barra de ángulo de fase y voltaje, el costo de generación, el límite de flujo de potencia, el límite de estabilidad de voltaje, el límite de demanda, el límite de del factor de carga, el límite de numero de la compensación reactiva, el costo de la compensación reactiva, el límite de la potencia real total y potencia reactiva total como las restricciones del problemas de optimización

Se han propuesto varias técnicas para resolver la ubicación y el tamaño óptimo de la compensación reactiva que se puede clasificar en cuatro grupos: 1. Enfoque analítico, 2. Enfoque convencionales basado en la optimización, 3. Enfoque de optimización metaheurística, 4. Enfoque híbridos; basados en la sensibilidad siendo algoritmos simples, confiables y de eficiencia computacional que se utilizan para soluciones óptimas sin tener en cuenta la no linealidad y la complejidad del sistema, dando soluciones global óptima o casi óptima (Ismail et al., 2020).



Fuente: Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Load ability Enhancement, por (Ismail et al., 2020).

Técnicas de optimización tradicionales o convencionales como la programación lineal/ no lineal, programación dinámica y cuadrática secuencial, Newton-Raphson entre otras, generalmente comienzan con una solución inicial aleatoria y llegan a la solución óptima en cada iteración. Estos algoritmos se clasifican en dos grupos principales: método de búsqueda directa y métodos basados en gradientes. Además, los enfoques tradicionales son algoritmos en funciones objetivo-discontinuas, ya que pueden quedar atrapadas en puntos óptimos locales (Ismail et al., 2020).



Fuente: Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Load ability Enhancement, por (Ismail et al., 2020).

En la literatura se enfoca en la combinación de enfoques analíticos y metaheurístico debido a que son simples y confiables, estos enfoques constan de dos etapas, la ubicación de la compensación reactiva mediante técnicas analíticas y la ubicación y el tamaño se obtiene mediante algoritmo metaheurístico, en algunas ocasiones la ubicación y el tamaño de la compensación

reactiva se determina por separado, y que la mejor ubicación es por medio del enfoque analítico y el mejor tamaño es por lo metaheurístico.

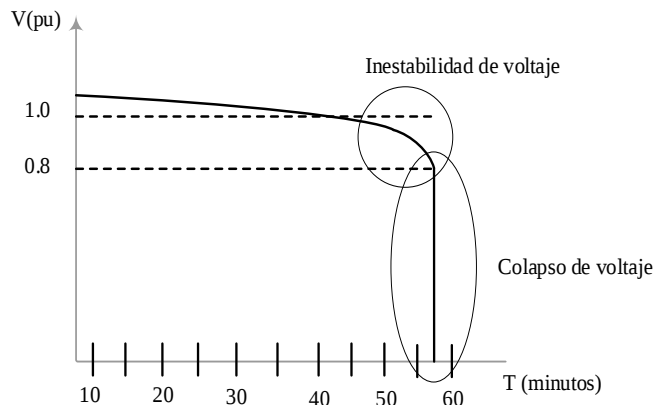
2.7 Estabilidad de tensión.

Se define como la capacidad del sistema de energía para mantener o restaurar la tensión del sistema a un rango permisible después de una perturbación pequeña o grande, sin colapso de la tensión. Según la IEEE/CIGRE, la estabilidad de tensión es la habilidad de un sistema eléctrico de mantener la tensión en todos sus puntos de conexión (barras) a un nivel estable, incluso después de sufrir interrupciones o cambios en las condiciones de operación.. Cabe destacar que la mayoría de las definiciones sobre la estabilidad de tensión indica que, la tensión de todas las barras después de la perturbación debe mantenerse o recuperarse a un rango aceptable (Gómez Antonio et al., 2018).

Se dice que un sistema experimenta inestabilidad de voltaje cuando se presenta una caída continua e incontrolable en la magnitud del voltaje (Mario A. Ríos et al., 2008).

La estabilidad del voltaje se produce cuando la potencia reactiva y la tensión se pueden dirigir todo el tiempo. Cuando hay una incapacidad del SEP para poder suministrar la demanda, es aquí cuando surge o se conduce a una inestabilidad del voltaje. La inestabilidad del voltaje se presenta de una forma rápida ósea (corto plazo produciendo un colapso de voltaje, solo durando segundos) o también puede ser de forma lenta (que tiene un largo plazo produciendo un colapso de voltaje en un intervalo que pueden durar minutos e incluso horas) (Alex Mauricio Guascal Reinoso, 2020).

Figura 2 Fenómeno de inestabilidad y colapso de voltaje



Fuente: Medidas para mitigar problemas de estabilidad de voltaje, por (Mario A. Ríos et al., 2008).

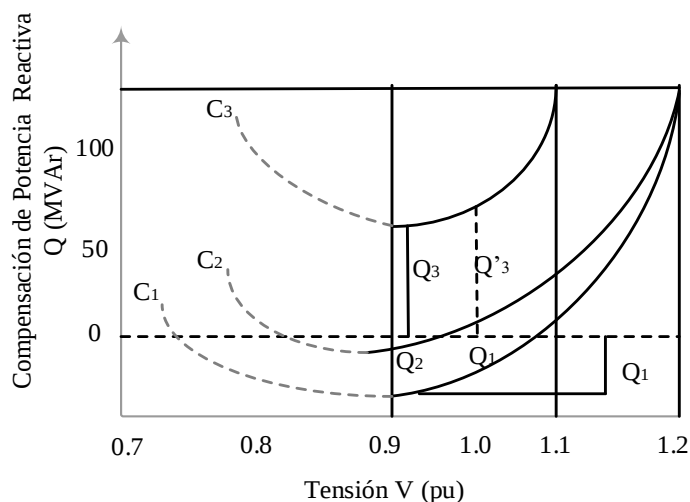
La figura representa a la evolución del voltaje en un sistema eléctrico a lo largo del tiempo, donde el eje vertical representa el voltaje en unidades por unidad (p.u.), significa que el valor 1.0 corresponde al voltaje nominal del sistema y el eje horizontal se representa el tiempo en minutos. Se observa una disminución gradual que puede ser por varias causas como: aumento de carga, fallo en el sistema, etc. Donde vamos a tener dos zonas críticas la primera que es la inestabilidad donde la curva experimenta una variación significativa y la otra zona que es el colapso que es una caída abrupta (Mario A. Ríos et al., 2008).

2.7.1 Curvas Q-V

Esta curva se emplea para identificar la inestabilidad del voltaje. En él se analiza la relación entre la potencia reactiva, la sensibilidad y la variación de los voltajes de los nodos para diferentes valores de las cargas. Esta curva permite examinar la potencia reactiva máxima requerida por los nodos débiles antes de alcanzar el voltaje mínimo.

La curva QV da la tensión crítica de las barras con un margen de carga reactiva, contribuyendo a encontrar la barra más débil en el que se requiere utilizar la compensación reactiva (Manjul & Singh Rawat, 2019).

Figura 3 Curva Q-V



Fuente: QV Analysis for the Identification of Vulnerable Zones to Voltage Collapse: A Study Case, por (Pereira et al., 2023).

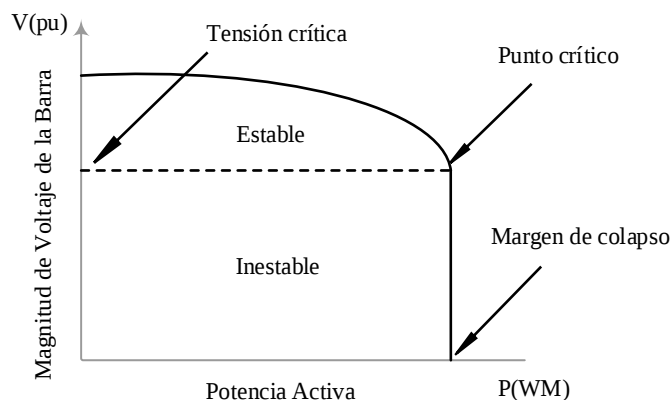
La curva contiene 2 ejes siendo el X para el nivel de tensión y la Y para la compensación reactiva, esta curva se fracciona en dos zonas de funcionamiento dependiendo de la curva: estable (pendiente positiva, línea continua) e inestable (pendiente negativa, línea entrecortada). Siendo la parte inestable los niveles de tensión deficientes que son puntos de funcionamiento indeseables, por lo contrario, la sección estable son los niveles de tensión que están en un rango de valores aceptables (Pereira et al., 2023).

Los investigadores (Zambroni De Souza et al., 2011), una característica importante de esta curva es que en el lado derecho de una barra QV representa un punto de operación estable, ya que un aumento en la generación de potencia reactiva produce un aumento en el nivel de voltaje. Por otro lado, el lado izquierdo muestra que un aumento en la generación de potencia reactiva disminuye el nivel de voltaje, identificando un punto inestable.

2.7.2 Curva P-V

Esta curva es muy utilizada para el análisis de la estabilidad de tensión, en donde, la tensión esta curva demuestra la demanda de tensión critica disponible en las barras en el que se manifiesta la demanda denominada barras críticas. Dicha curva P-V ayuda a deducir desconexiones de carga para mantener el sistema estable incluido cuando existe máximo incremento de potencia reactiva a partir de las conmutaciones de los condensadores (Manjul & Singh Rawat, 2019).

Figura 4 Curva P-V



Fuente: PV/QV Curve based Optimal Placement of Static Var System in Power Network using DigSilent Power Factory, por (Manjul & Singh Rawat, 2019) .

En la figura vemos que en el eje X está constituida por la potencia activa, el eje Y está construida por el voltaje, vemos la zona estable es la parte de la curva que queda antes del punto crítico, esta es una zona estable que antes variaciones en las cargas producen cambios pequeños en el voltaje, el punto crítico es el punto máximo de la carga que el sistema va a poder soportar, si se llega a pasar de este punto provocará una caída brusca del voltaje, la zona inestable viene después del punto crítico, ya que cualquier variación en la carga puede llevar grandes fluctuaciones del voltaje o colapso del sistema y el punto de colapso, es la distancia que existe de forma horizontal desde el punto actual de operación y el punto crítico, es representado o visto como una

capacidad de reserva para soportar cualquier incremento de las cargas (Manjul & Singh Rawat, 2019).

2.8 Sensibilidad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)

La evaluación de la sensibilidad de las variables de estado de voltaje y potencia reactiva consiste en efectuar un análisis lineal del comportamiento del sistema eléctrico de potencia en torno a un punto de operación estable, el cual se obtiene a partir de la convergencia de un flujo de potencia, siendo el método de Newton-Raphson el más utilizado por su rápida convergencia. La información proporcionada por dicha sensibilidad resulta útil para estimar los cambios de voltaje que se derivan de la implementación de elementos de compensación de potencia reactiva (Pereira et al., 2023).

2.8.1 Matriz de Sensibilidad

La matriz de sensibilidad esta defina como la relación entre la variación de tensión debido a una variación de potencia reactiva (Q-V), la sensibilidad se obtiene mediante una aproximación lineal del comportamiento del sistema eléctrico de potencia (SEP) alrededor de un punto de operación en estado estable, punto en el que existe una convergencia del flujo de potencia del sistema que es objeto de análisis.

Esta matriz se centra en la matriz jacobiana reducida y se aplica a la característica tensión-potencia reactiva Q-V de cada una de las barras del sistema, ya que la sensibilidad representa la pendiente de la curva tensión-potencia reactiva en un punto de operación dado, se desarrolla el procedimiento matemático de las variaciones de la tensión debido a la variación de potencia reactiva (Peña et al., 2021).

Para encontrar la matriz de sensibilidad se par por el Jacobiano redefinido

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad \dots (10)$$

Donde:

J = Jacobiano redefinido

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$ = Derivadas parciales de la potencia activa con respecto al ángulo

$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$ = Derivadas parciales de la potencia reactiva con respecto al ángulo

Estas de aquí ∂V son respecto al voltaje

$\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix}$ = Son submatrices que representan las derivadas parciales de la potencia

inyectada en cada barra con respecto al ángulo y al voltaje.

Los valores de la matriz J otorgan la variación entre los flujos de potencia y la alteración en los voltajes de las barras. Las variaciones de P y Q afectan a la estabilidad del voltaje. En cada sitio de acción es posible preservar P invariable y examinar el voltaje apreciando la relación incremental entre Q y V , por lo tanto, considerando $\Delta P = 0$.

Para el análisis y considerando el arreglo matricial del sistema de ecuaciones para los flujos de potencia puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad \dots (11)$$

Donde:

$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ = Incremento de potencia activa y reactiva en los nodos del sistema

$J_{P\theta}$ = Derivadas parciales de P respecto a θ (sensibilidad de potencia activa a los ángulos)

J_{PV} = Derivadas parciales de P respecto a V (sensibilidad de potencia activa a los voltajes)

$J_{Q\theta}$ = Derivadas parciales de Q respecto a θ (sensibilidad de potencia reactiva a los ángulos)

J_{QV} = Derivadas parciales de Q respecto a V (sensibilidad de potencia reactiva a los voltajes)

$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$ = Incremento de los ángulos de fase y magnitudes de voltaje en los nodos del sistema

En cada punto de operación se busca la variación de tensión por cada variación de potencia reactiva, tomando en cuenta esta consideración, se tiene una variación de potencia activa nula.

Consecuencia se tiene el siguiente desarrollo:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad \dots (12)$$

Desglosando la ecuación 12:

$$J_{P\theta} * \Delta\theta + J_{PV} * \Delta V = 0 \quad \dots (13)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} * \Delta\theta + J_{QV} * \Delta V \quad \dots (14)$$

Donde:

$\Delta\theta$ = Incremento de los ángulos de fase

ΔV = Incremento de las magnitudes de voltajes

ΔQ = Incremento de potencia reactiva

Despejando $\Delta\theta$ de la ecuación 13 y reemplazamos en la ecuación 14:

$$\Delta\theta = J_{P\theta}^{-1} * (-J_{PV} * \Delta V) \quad \dots (15)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} * J_{P\theta}^{-1} * (-J_{PV} * \Delta V) + J_{QV} * \Delta V \quad \dots (16)$$

Donde:

ΔQ = Incremento de potencia reactiva

$\Delta\theta$ = Incremento de los ángulos de fase

$J_{P\theta}^{-1}$ = Inversa de la derivada parcial de P respecto a θ

ΔV = Incremento de las magnitudes de voltajes

Factorizando ΔV y reordenando la ecuación 16:

$$\Delta Q = (J_{QV} - J_{Q\theta} * J_{P\theta}^{-1} * J_{PV}) * \Delta V \quad \dots (17)$$

En la ecuación 17 se realiza un cambio de variable, designando a este jacobiano de matriz reducida:

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} * J_{P\theta}^{-1} * J_{PV} \quad \dots (18)$$

Se reemplaza la ecuación 18 en la 17 obteniendo:

$$\Delta V = J_R^{-1} * \Delta Q \quad \dots (19)$$

Donde:

ΔV = Incremento de las magnitudes de voltajes en la barra

J_R^{-1} = Matriz Jacobiana inversa

ΔQ = Incremento de potencia reactiva

Se describe la relación existente la variación de tensión y la variación de potencia reactiva en una barra. Y la matriz jacobiana reducida, establece sensibilidades propias (elementos $\frac{\partial V_i}{\partial Q_i}$ de la diagonal) de las barras y sensibilidad mutuas entre las barras y el sistema (Peña et al., 2021).

2.8.2 Inspección de Sensibilidad

La sensibilidad Q-V ofrece información acerca de los efectos combinados de todas las modalidades de fluctuación de la potencia reactiva en relación con el voltaje. La relación entre las sensibilidades Q-V de los buses y los valores propios que proviene de la ecuación.

$$J_R^{-1} = \left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right] \quad \dots (20)$$

Donde:

J_R^{-1} = Matriz Jacobiana inversa

$\left[\frac{\partial V}{\partial Q}\right]$ = Derivada parcial de V con respecto a Q.

∂V = Derivada parcial de voltaje

∂Q = Derivada parcial de la potencia reactiva

Utilizando variables y arreglos propios de la Jacobiana reducida J_R se obtiene.

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad \dots (21)$$

Donde:

J_R = Matriz Jacobiana reducida

$\xi \Lambda \eta$ = Sumatoria de los componentes de los vectores propios a la izquierda n

Para ello la matriz del vector propio derecho de $J_R = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N]$ es el arreglo del vector propio izquierdo de J_R y Λ es la matriz de valores propios.

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad \dots (22)$$

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta * \Delta Q \quad \dots (23)$$

$$\Delta V = \sum \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} * \Delta Q \quad \dots (24)$$

Donde:

J_R^{-1} = Matriz jacobiana inversa

$\xi \Lambda^{-1} \eta$ = Combinación de vectores y una matriz diagonal inversa Λ^{-1}

∂Q = Derivada parcial de la potencia reactiva

ΔV = Variación del voltaje

λ_i = Valor propio de la matriz J_R donde i indica el índice

$\Sigma \xi_{Ki} \eta_{Ki}$ = Suma de componentes de los vectores propios (derecha k e izquierda n) asociados al valor propio λ_i

Para este fin, λ_i es el valor propio de J_R . ξ_i y η_i son sus correspondientes vectores propios derecho e izquierdo. Las sensibilidades Q-V del bus como se ve en la ecuación. Para lo cual, $\Delta Q = e_k$, donde, e_k tiene todos los elementos cero excepto el factor k, que es igual a 1. Así es como, la sensibilidad Q-V en el bus k.

$$\frac{\partial V_K}{\partial Q_K} = \Sigma \frac{\xi_{Ki} \eta_{Ki}}{\lambda_{Ki}} \quad \dots (25)$$

Donde:

$\frac{\partial V_K}{\partial Q_K}$ = Derivada parcial del ∂V_K respecto ∂Q_K vinculada con la sensibilidad de la tensión respecto a cambios en la potencia reactiva en un nodo k

∂V_K = Derivada parcial del voltaje en un nodo k

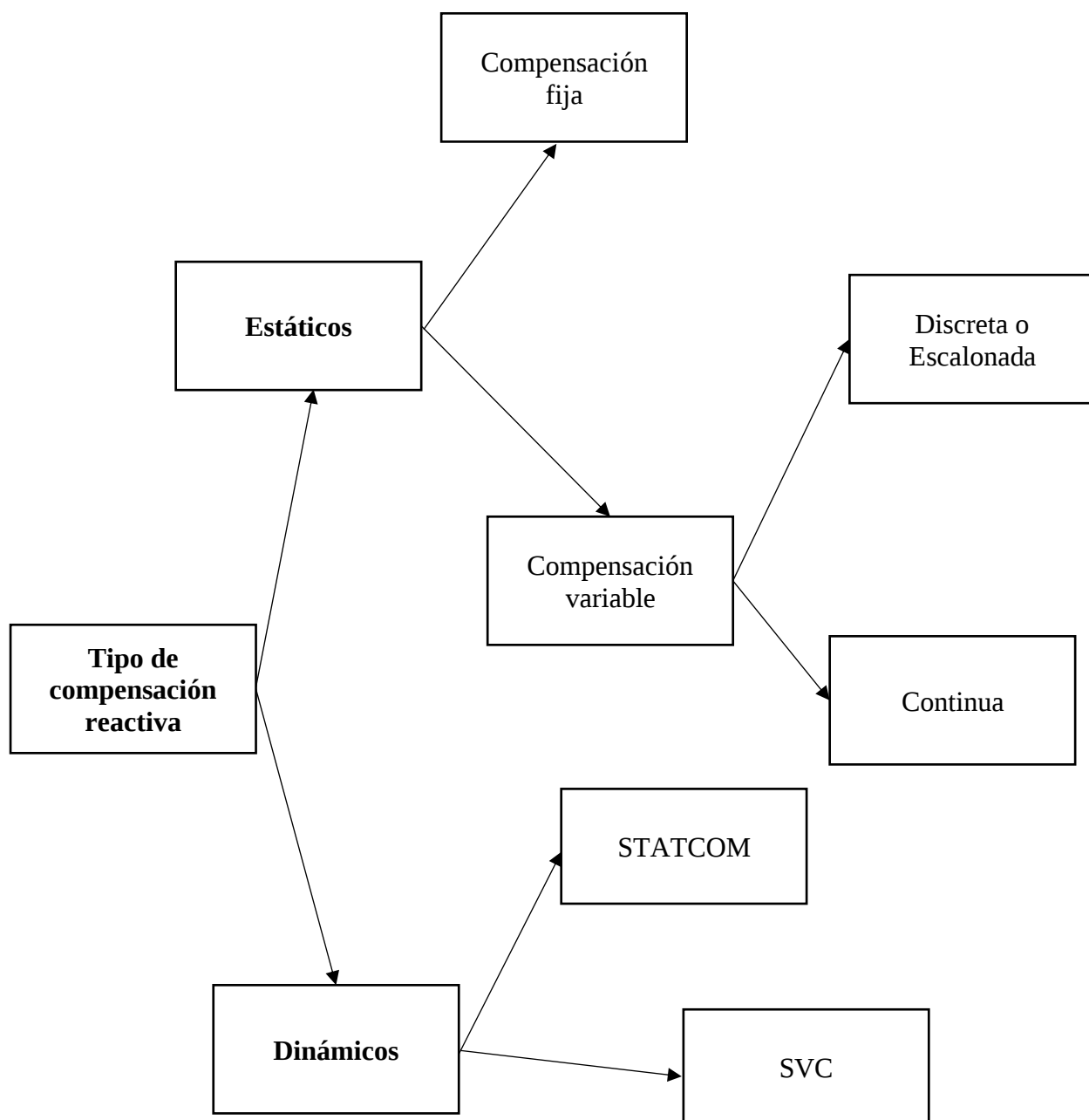
∂Q_K = Derivada parcial de la potencia reactiva en un nodo k

λ_{Ki} = Valor propio asociado al modo i relacionado con la dinámica del sistema

$\Sigma \xi_{Ki} \eta_{Ki}$ = Suma de componentes de los vectores propios (derecha k e izquierda n) asociados al valor propio λ_i asociado al modo i

En este caso, ξ_{Ki} y η_{Ki} son los elementos k de los vectores propios derecho e izquierdo, que corresponden al valor propio λ_i . Cuando el sistema alcanza el punto crítico de estabilización del voltaje, el análisis modal contribuye a determinar la región crítica de estabilización del voltaje y los buses que participan en cada barra. La participación relativa del bus k en el modo i se expresa mediante el factor de participación de la barra (Alzaareer et al., 2020).

2.9 Tipos de compensación



Fuente: Sistemas de distribución de energía eléctrica, (Friedman & Ramos, 2009).

2.10 Compensación estática.

Los dispositivos de compensación estática tradicionales, como los bancos de capacitores conmutados o los bancos de reactores tienen capacidades de salida de potencia reactiva transitoria

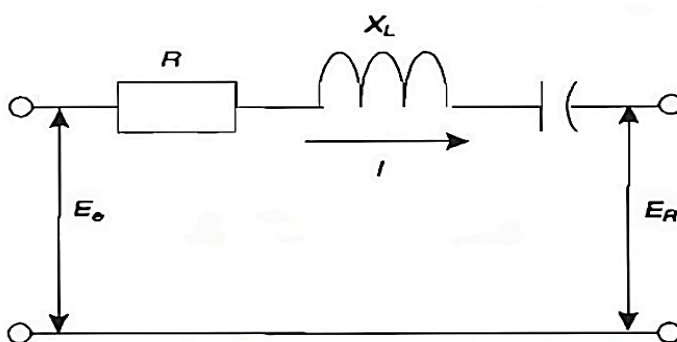
más fuertes, velocidades de respuesta más rápidas y mayor capacidad, pero también costos más altos. La llamada compensación estática significa que el capacitor de compensación no sigue las fluctuaciones de potencia reactiva y el seguimiento y corte en tiempo real, y el retraso general es más de 40 s (Dang et al., 2023).

2.10.1 Conexiones de compensación estática

A causa de los problemas que genera un exceso o falta de reactivos en la red, se tiene varias formas de compensación y diversas formas de clasificarlas, como son las siguiente:

- Clasificación según su conexión. Según la conexión al sistema la compensación puede ser del tipo serie, paralela (shunt) o mixta (Siemens, 2020).
 - **Compensación serie:** Pueden ser del tipo inductivo o capacitivo, la de tipo inductivo disminuye la capacidad de transferencia por la línea debido a que aumenta la reactancia de la línea, mientras que el tipo capacitivo empleando bancos de condensadores serie, ubicados al centro o en los extremos de la línea.

Figura 5 Conexión en serie



Fuente: Tipos de conexión de potencia reactiva, por (Dolores & Cervantes, 1995).

Donde:

R = Resistencia interna

X_L = Reactancia inductiva

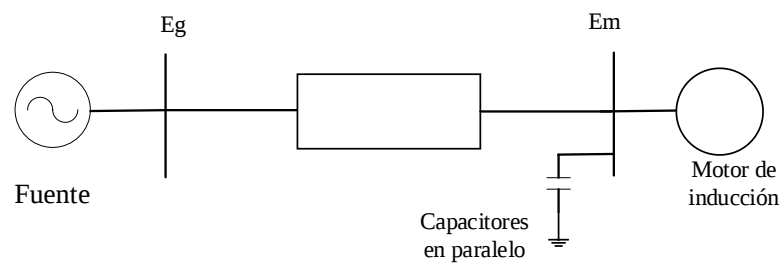
X_C = Reactancia capacitiva

E_G = Tensión del Generador

E_R = Tensión de la carga

- **Compensación paralela:** Se mediante condensadores o reactores, los reactores absorben reactivos disminuyendo las sobretensiones en vacío, por otro lado, mediante condensadores se disminuye la caída de tensión en las líneas, se disminuyen las perdidas en los equipos y componentes de la red y se mejora el factor de potencia.

Figura 6 Conexión en paralelo



Fuente: Tipos de conexión de potencia reactiva, por (Dolores & Cervantes, 1995).

Donde:

E_G = Tensión del Generador

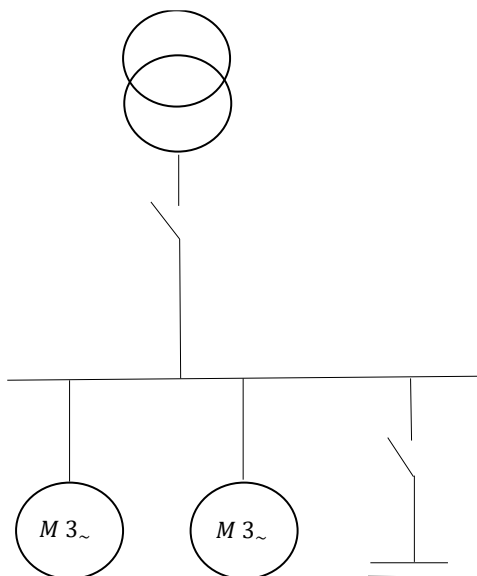
E_M = Tensión de la carga

Z = Impedancia

- **Compensación mixta:** Es la compensación que utiliza las dos anteriores.
- Clasificación según su control: La compensación puede ser fija o variable.

- **Fija:** La potencia reactiva se suministra de manera constante a la red, se utiliza cuando la curva de carga que se desea compensar es de una característica plana.

Figura 7 Conexión Fija



Fuente: Tipos de conexión de potencia reactiva, por (Dolores & Cervantes, 1995).

Donde:

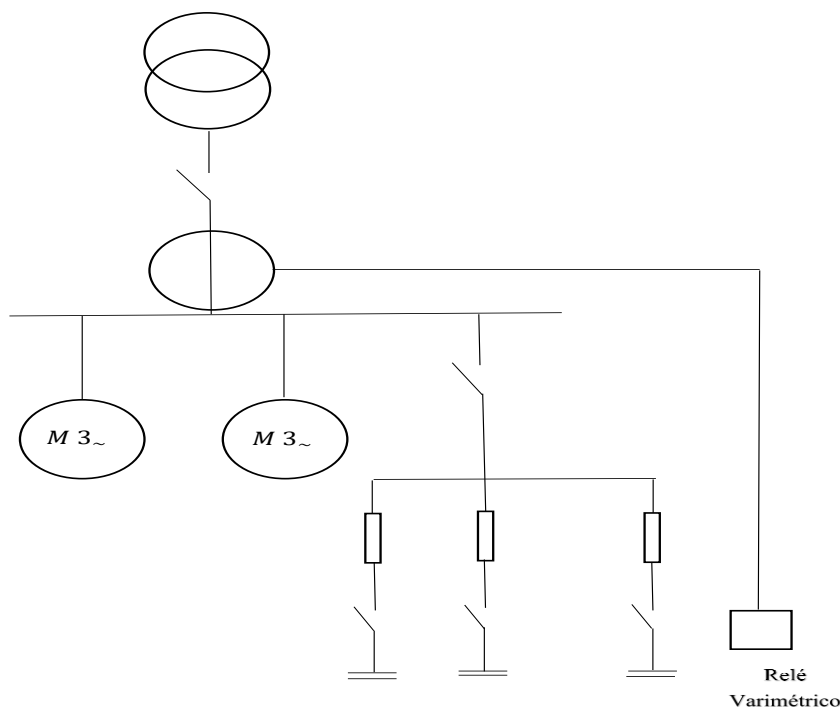
T =Transformador

M = Motores

C = Capacitor

- **Variable:** es el tipo de compensación que suministra la potencia activa según las necesidades de la red, se utiliza cuando la curva de carga que se desea compensar tiene un comportamiento variable durante el día. Esta compensación está diseñada para conectarse y desconectarse varias veces de modo de ajustarse según los requerimientos del sistema (Siemens, 2020).

Figura 8 Conexión Variable



Fuente: Tipos de conexión de potencia reactiva, por (Dolores & Cervantes, 1995).

Donde:

T =Transformador

M = Motores

C = Capacitores

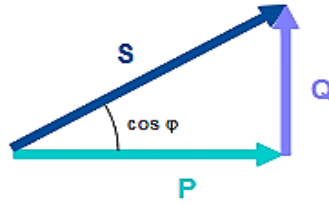
V = Relé Varimétrico

2.10.2 Dispositivos estáticos de compensación fija

Son aquellos que están formado por capacitores o bobinas estacionarias, como en los sistemas eléctricos predomina la carga inductiva por la misma composición de las instalaciones (líneas, maquinas eléctricas, etc.), la composición de reactivos se realiza por la asociación de un banco de capacitores, generalmente en paralelo con el receptor, de la manera que el conjunto se aproxime lo más posible al comportamiento resistivo puro (Friedman & Ramos, 2009).

Fórmula del condensador.

Figura 9 Diagrama fasorial de potencias



Fuente: Diagrama fasorial, por (Friedman & Ramos, 2009).

La figura representa un diagrama fasorial de potencias que ilustra la relación entre la potencia aparente, la potencia activa y la potencia reactiva en un sistema eléctrico de corriente alterna (CA).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \dots (26)$$

Donde:

P = Potencia activa

S = Potencia aparente

Q = Potencia reactiva

$$S = \sqrt{3} * U_F * I_L \quad \dots (27)$$

U_F = Tensión de línea (en voltios).

I_L = Corriente de línea (en amperios).

$$P = \sqrt{3} * U_F * I_L * \cos \varphi \quad \dots (28)$$

$\cos \varphi$ = Factor de potencia.

φ = Ángulo de desfase

$$Q = \sqrt{3} * U_F * I_L * \sin \varphi \quad \dots (29)$$

Conexión en triángulo:

$$C_{\Delta} = \frac{3 * Q}{U_F^2 * \omega} \quad \dots (30)$$

Donde:

C_{Δ} = Capacitancia equivalente por fase conectada en triangulo

Q = Potencia reactiva inductiva

U_F = Tensión de línea

ω = Frecuencia angular

Conexión en estrella:

$$C_Y = \frac{9 * Q}{U_F^2 * \omega} \quad \dots (31)$$

C_Y = Capacitancia equivalente por fase conectada en estrella

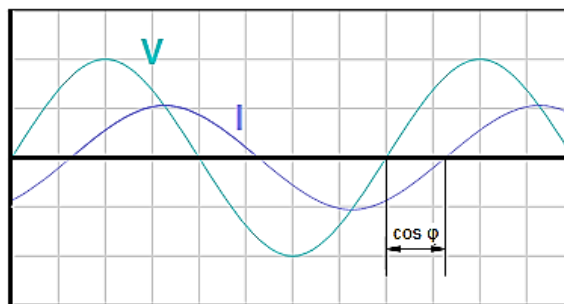
Q = Potencia reactiva inductiva

U_F = Tensión de línea

ω = Frecuencia angular

Los factores 3 y 9 su diferencia proviene de las configuraciones de conexión (triángulo o estrella), ya que en triangulo los capacitores están conectado directamente entre las fases, y en estrella los capacitores están conectados desde cada fase al neutro, modificando la relación de capacitancia.

Figura 10 Desfase entre la onda de tensión y la de corriente



Fuente: Desfase de ondas de corriente y potencia, por (Friedman & Ramos, 2009).

La figura se muestra el desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente en un sistema de corriente alterna, el desfase es clave para entender el comportamiento del sistema y la relación que hay con la potencia activa, reactiva y aparente. En este caso la corriente adelanta la tensión, como se observa la onda de corriente alcanza su valor máximo antes que la onda de tensión tiene predominancia capacitiva (Friedman & Ramos, 2009).

Fórmula de compensación con banco de condensador

Para compensar la alta potencia reactiva en el sistema, se necesita un cálculo simple para determinar el valor del banco de capacitores (en var). Pero, al compensar la potencia reactiva, el banco de condensadores afectará la fluctuación de voltaje del sistema, que se escribe como:

$$|\Delta V| \cong X * \sqrt{\Delta Q^2 + \Delta P^2} = x * \Delta S \quad \dots (32)$$

Donde:

ΔV = Variación máxima permisible en el voltaje del sistema

X = Reactancia del sistema

ΔQ = Variación de la potencia reactiva

ΔP = Variación de la potencia activa

ΔS = Variación de la potencia aparente

Luego, la salida de compensación de potencia reactiva es la siguiente:

$$Q_c = |\Delta Q| - \sqrt{\left|\frac{\Delta V_s}{X}\right|^2 - \left|\frac{\Delta P}{(1 - \Delta V_s)^2}\right|^2} \quad \dots (33)$$

Donde:

Q_c = Potencia reactiva del banco de condensadores

ΔV = Variación máxima permisible en el voltaje

ΔP = Variación de la potencia activa

ΔS = Variación de la potencia aparente

X = Reactancia del sistema

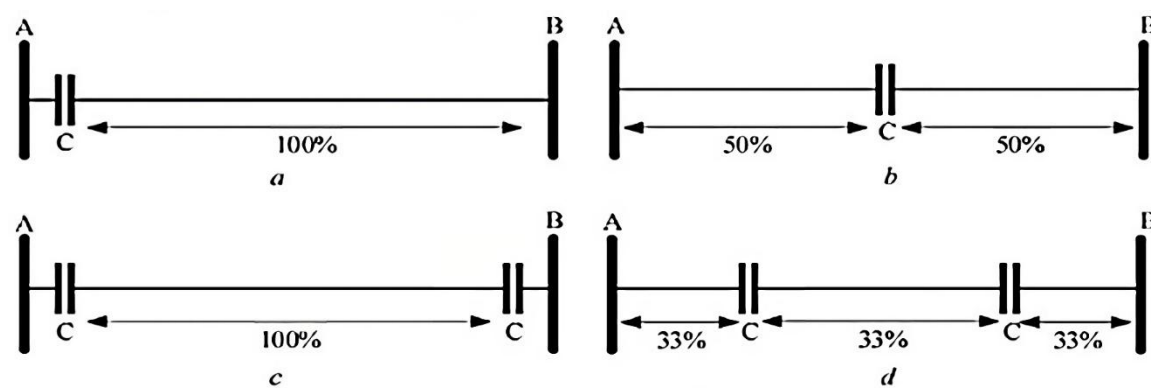
(Muhammad Nizam & Rían Wicaksono, 2019).

2.10.1 Posición de los bancos de capacitores en las líneas (compensación fija)

La ubicación del capacitor afecta el perfil de voltaje de la línea, el voltaje varía suavemente a lo largo de la línea y sufre un cambio repentino en el capacitor. La posición del capacitor también cambia el segmento de línea donde la falla causaría inversión de voltaje o corriente u oscilación subsincrónica.

Las cuatro posiciones generales del banco de capacitores en la línea de transmisión se muestran en la Figura. Los bancos de capacitores se pueden colocar en un extremo o en ambos extremos de la línea como se muestra en la Figura 9, o dentro de la línea, por ejemplo, en la mitad o en un tercio de la longitud de la línea como se muestra en la Figura 9 (Taylor, 2021).

Figura 11 Posiciones comunes de los bancos de capacitores en una línea de transmisión: (a) un extremo, (b) en el medio de la línea, (c) ambos extremos y (d) un tercio de la longitud de la línea en ambos extremos



Fuente: Protección de distancia de líneas compensadas por capacitores en serie, por (Taylor, 2021).

Desde la perspectiva del perfil de voltaje, la colocación de capacitores en el medio de la línea es más efectiva. La ubicación está determinada por consideraciones específicas que se requieran, la compensación de extremo de línea es más común en líneas de transmisión existentes, para líneas nuevas, la compensación de extremo de línea facilita el diseño del esquema de protección. La instalación en mitad de la línea requiere construir una subestación en el medio de la línea y dificulta la protección (Taylor, 2021).

2.10.2 Dispositivos estáticos de compensación escalonada.

Posibilitan el mejoramiento del factor de potencia al valor deseado con poca variación en el comportamiento de este, a pesar de esta variabilidad del comportamiento de la carga. En este caso la compensación del factor de potencia se la va a realizar por medio de baterías individuales de capacitores, no necesariamente todas ellas de la misma potencia, es gobernados por un transductor llamado regulador barométrico, donde este regulador detecta en cada instante el factor de potencia de la red eléctrica y lo compara con el valor que se desea. Este dispositivo lo que hace es mantener el factor de potencia constante en el punto deseado. No obstante, el valor de la potencia de las unidades varía de forma discreta, de allí su nombre, por lo que la selección de los parámetros del dispositivo debe garantizar una eficiente regulación del factor de potencia (Friedman & Ramos, 2009).

Fórmula de la compensación escalonada

$$N_{esc} = \frac{Q_c}{Q_{mesc}} \quad \dots (34)$$

Donde:

Q_{mesc} = Potencia de mínimo escalón

Q_c = Potencia del equipo de compensación

N_{esc} = Número de escalones

La potencia reactiva de compensación para cada instante de tiempo $Q_c(t)$ puede ser determinada a través de:

$$q_c(t) = q(t) - p(t) * \tan \varphi \quad \dots (35)$$

Donde:

$q_c(t)$ = Potencia reactiva de compensación necesaria

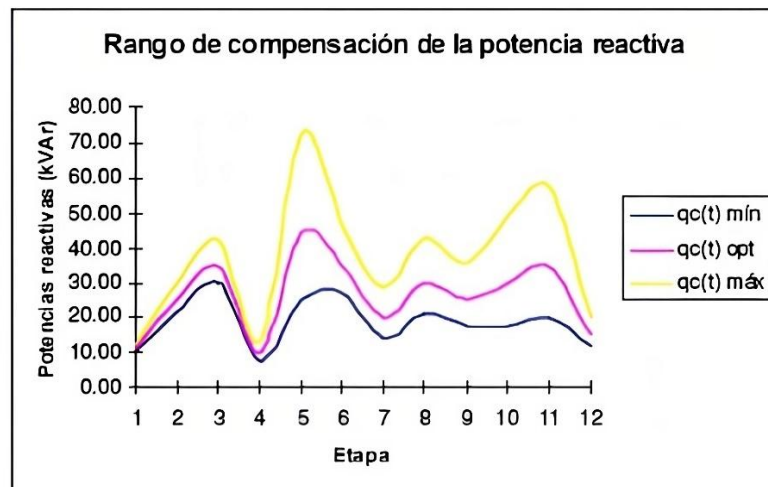
$q(t)$ = Potencia reactiva en función del tiempo (t).

$p(t)$ = Potencia activa en función del tiempo (t)

φ = Ángulo de fase entre la tensión y la corriente

Los dispositivos de compensación escalonados no pueden ofrecer un rango continuo en la variación del factor de potencia.

Figura 12 Zona de operación del dispositivo de compensación escalonada



Fuente: Análisis de los filtros activos para compensación en los sistemas eléctricos de potencia, por (Friedman & Ramos, 2009).

La figura muestra el rango de operación óptimo de un dispositivo de compensación de potencia reactiva escalonada, el eje x representa el tiempo o las diferentes etapas de operación del sistema, el eje y representa la potencia reactiva en kVAr (kilovatio-reactivos), la curva $q_c(t)_{\min}$

es el valor mínimo de potencia reactiva que el dispositivo tiene que compensar en cada instante de tiempo, esto para mantener una operación segura y eficiente en el sistema, $qc(t)_{opt}$ va hacer el valor óptimo de potencia reactiva que el dispositivo tiene que suministrar en cada instante, $qc(t)_{max}$ es el valor máximo que tiene que compensar y la zona del rango de $qc(t)_{min}$ al $qc(t)_{max}$ se le llama zona de operación económica que es la zona segura de operación.

El valor de la potencia reactiva de compensación máxima coincide con el valor de la potencia reactiva antes de la compensación $q(t)$ (Friedman & Ramos, 2009).

2.11 Compensación Dinámica.

Un dispositivo de compensación de potencia reactiva dinámica puede reaccionar rápidamente cuando ocurre una falla en la red, proporcionar una gran cantidad de potencia reactiva e inhibir caídas de voltaje transitorio, evitando así la inestabilidad de voltaje transitorio del sistema. La tecnología de compensación de potencia reactiva dinámica es un medio importante y eficaz para mejorar la confiabilidad de las operaciones del sistema de energía y aumentar el margen de estabilidad (Dang et al., 2023).

2.11.1 Conexiones de compensación dinámica

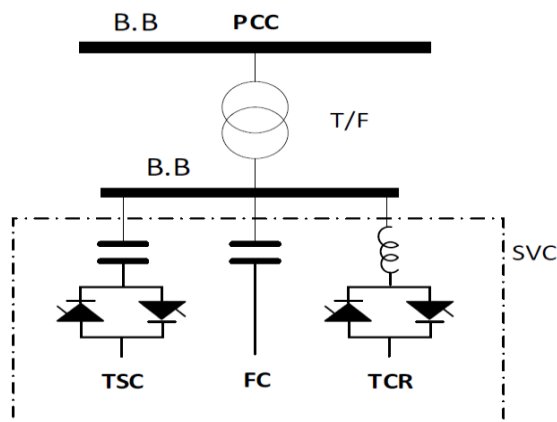
○ Conexión en Serie

Esta conexión permite en suministrar potencia reactiva a la línea, cuya función es maniobrar la magnitud de los voltajes en los extremos emisor y receptor manteniendo los niveles de tensión dentro de los rangos aceptables de seguridad. Esto ayuda inyectando una corriente al sistema en el punto de conexión se puede implementar variando una impedancia, manejando la potencia activa mediante elementos condicionados por los ángulos de desfase, del mismo modo que los controladores series.

Aquí se ofrece una potencia reactiva más constante y mejora el factor de potencia del sistema, lo que incrementa la transferencia de potencia activa y ayuda a la estabilidad general;

además tiende a reducir la caída de tensión y las fluctuaciones, estabilizando la red de forma efectiva utilizando dispositivos como los (SVC) (Pérez, 2013).

Figura 13 Conexión en shunt

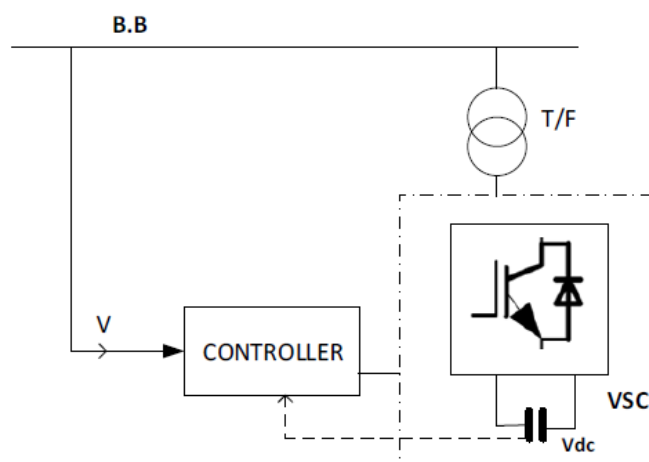


Fuente: Comparative Analysis of Reactive Power Compensation Devices in a Real Electric Substation por, (Tariq et al., 2022).

○ **Conexión en serie-shunt**

Se trata de la combinación entre un controlador serie y paralelo de forma coordinada, esta combinación suministra corriente a la línea o barra por el controlador en paralelo y tensión por el controlador en serie, permitiendo aprovechar ventajas de cada uno mejorando la capacidad y estabilidad de la línea al reducir la reactancia, mientras que también regula la tensión y la potencia reactiva local. Esta conexión es útil para mantener la tensión dentro de un rango y ayudar a la estabilidad transitoria y dinámica del sistema, especialmente en líneas largas o con cargas variables (Capítulo II Introducción al Concepto de FACTS, 2016).

Figura 14 Conexión en serie-shunt



Fuente: Comparative Analysis of Reactive Power Compensation Devices in a Real Electric Substation por, (Tariq et al., 2022).

2.11.2 FACTS

Son equipos basados en electrónica de potencia y otros equipos estáticos que proporcionan control de uno o más parámetros del sistema de transmisión, para mejorar la capacidad de control y aumentar la capacidad de transferencia de potencia. Inicialmente eran utilizados para abordar problemas del sistema debido a las limitaciones en la fabricación de líneas de transmisión y para mejorar la capacidad de transferencia de energía en ambas direcciones y la transacciones entre empresas de servicios públicos en donde se han introducido diferentes tipos de controladores FACTS (Dwivedi & Vadhera, 2019).

Los FACTS en su aplicación se podría resumirse a grandes rasgos en:

- Control continuo de variables eléctricas.
- Control de estabilidad

En esos dos métodos son donde los dispositivos FACTS son más utilizados sacándole el máximo provecho de su aplicación (De La Bodega et al., 2015).

Tabla 2 *Mecanismo de control de los dispositivos*

DISPOSITIVOS	MECANISMO DE CONTROL		
	Dispositivo de control de voltaje	Dispositivo de control de impedancia	Dispositivo de control de ángulo
SVC	SI	-	-
STATCOM	SI	-	-
TCSC	-	SI	-
SSSC	SI	SI	SI
UPFC	SI	SI	SI
IPFC	SI	SI	SI
TCPST	-	-	SI

Fuente: Mecanismo de control de los dispositivos de compensación, por (Dwivedi & Vadhera, 2019).

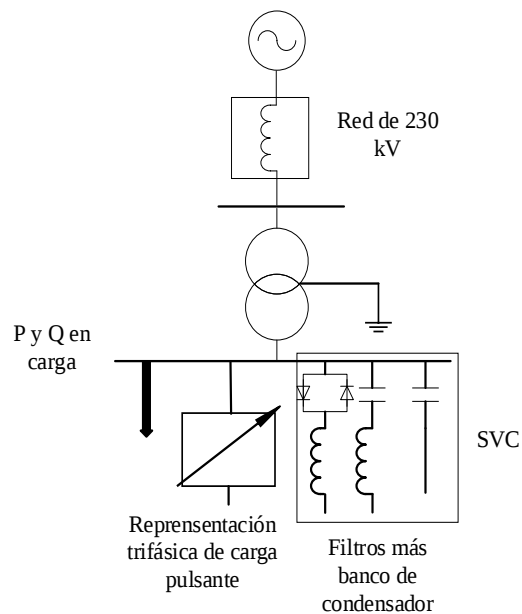
2.11.3 Dispositivos SVC.

El SVC contrala la salida de potencia reactiva de modo que la magnitud de tensión del nodo o barra se mantenga contralado, cuando el SVC alcanzo su salida de potencia reactiva máxima o mínima, la tensión no se puede controlar, y el equipo actúa como reactor o condensador puros, por lo tanto, cuando se tiene tensiones extremas el SVC se comporta como una batería de condensadores.

El SVC está compuesto de dos elementos como un reactor controlado por tiristor (TCR) y un banco de condensadores conmutados por tiristor (TSC), con una combinación de los TCR con un adecuado número de baterías de condensadores se puede conseguir un control continuo de la

potencia reactiva.(Gómez Antonio et al., 2018). Este dispositivo aumenta la capacidad de transmisión del sistema eléctrico, logra proporcionando soporte de voltaje y aumentando los márgenes de estabilidad., lo hace mediante el compensador estático de VAr que opera como un regulador de voltaje, variando la salida de VAr para reducir y amortiguar rápidamente las variaciones de voltaje del bus durante y, después de perturbaciones de energía importantes (Eremia et al., 2016).

Figura 15 SVC



Fuente: Electric Energy Systems Analysis and Operation, por (Gómez Antonio et al., 2018).

Modelo simplificado del SVC.

$$L_{\alpha} = \frac{\pi L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad \dots (36)$$

Donde:

L_{α} = Inductancia variable

L = Inductancia base

$\alpha = 2(\pi - \alpha)$ = Ángulo de conducción

α = Ángulo de disparo

La variación de la intensidad con el ángulo de disparo es similar a una inductancia L_α variable, por la que circula una corriente igual a la componente fundamental de la corriente $i(t)$, que, en el caso monofásico, en estrella o en triángulo con neutro se muestra en la ecuación 28 (Gómez Antonio et al., 2018).

Donde para $\alpha = \pi/2$ la inductancia es mínima e igual a L , mientras que para $\alpha = \pi$ es máxima e igual a infinito. La expresión de la potencia reactiva Q_L consumida por la bobina se puede describir como:

$$Q_{L_\alpha} = E^2 / \omega L_\alpha \text{ ó } Q_{L_\alpha} = B_\alpha E^2 \quad \dots (37)$$

Donde:

Q_{L_α} = Potencia reactiva que consume la bobina

B_α = Susceptancia del TCR

E^2 = Tensión en el punto de conexión

ω = Frecuencia angular

Donde la expresión para la susceptancia B_α del TCR es

$$B_\alpha = \frac{1}{\omega L_\alpha} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \omega L} \quad \dots (38)$$

Donde:

B_α = Susceptancia del TCR

L_α = Inductancia variable

$\alpha = 2(\pi - \alpha)$ = Ángulo de conducción

α = Ángulo de disparo

ω = Frecuencia angular

L = Inductancia

En paralelo el TCR es usual que se necesiten baterías de condensadores o incluso unidades adicionales de reactancias, por lo tanto, la potencia reactiva Q_{SVC} generada por el SVC es el resultado del balance:

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_{l\alpha} \quad \dots (39)$$

Donde:

Q_{SVC} = Potencia reactiva del SVC

Q_C = potencia reactiva generada por los condensadores conectados

$Q_{l\alpha}$ = potencia reactiva consumida por el TCR del ángulo de disparo

El comportamiento del SVC se puede aproximar al de una susceptancia variable con un valor que depende del estado de funcionamiento del SVC, es decir, condensadores conectados y del ángulo del TCR siendo lo siguiente (Eremia et al., 2016).

$$B_{SVC} = \omega C - 1/\omega L_\alpha \quad \dots (40)$$

Donde:

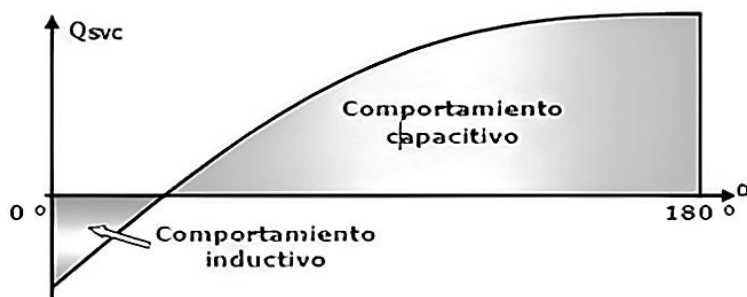
B_{SVC} = Susceptancia variable

C = Capacidad de las baterías en funcionamiento.

ω = Frecuencia angular

L_α = Inductancia variable

Figura 16 Comportamiento del SVC



Fuente: Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC), por (Carrillo González Camilo José & Cidrás Pidre José, 2023).

La figura presenta la relación que hay entre el ángulo de disparo α de un SVC y la potencia reactiva que se le suministra Q_{svc} , en el eje X (α) este ángulo va a determinar el punto en el ciclo del voltaje en la red donde se encienden los tiristores del SVC para controlar el flujo de corriente reactiva, en el eje Y (Q_{svc}) si da un valor positivo indica que el SVC está suministrando potencia capacitiva, y si da un valor negativo está absorbiendo potencia reactiva inductiva (Carrillo González Camilo José & Cidrás Pidre José, 2023).

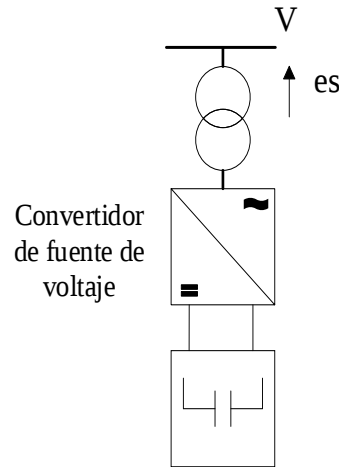
2.11.4 Dispositivos STATCOM

Es un equipo fundamentado en un convertidor de fuente de tensión se conecta en derivación y consta de un condensador cargado con una tensión continua, el cual, proporciona una tensión de entrada para un convertidor de fuente de tensión, dicho convertidor alimenta una corriente reactiva a la red y controla la corriente reactiva ayudando a manejar la tensión.

En el STATCOM la corriente reactiva no está limitada en condiciones de baja o alta tensión, sino que dicha corriente está limitada por los valores nominales del convertidor y no de la tensión del sistema, también la respuesta es más rápida ya que lo limita la frecuencia de conmutación del convertidor de fuente de tensión (1 KHz) (Gómez Antonio et al., 2018). Sirve para mejoras en la calidad de la energía, control de potencia reactiva, regulación de voltaje,

amortiguación de oscilaciones de potencia, amortiguación de oscilaciones torsionales/amortiguación SSR, mejora de la capacidad de la línea de transmisión, mejora de la estabilidad dinámica (Singh et al., 2009).

Figura 17 Compensación reactiva con STATCOM



Fuente: Electric Energy Systems Analysis and Operation, por (Gómez Antonio et al., 2018).

Modelo del STATCOM.

Unas ecuaciones de flujo de potencia para el STATCOM teniendo una fuente de voltaje conectada en paralelo son las siguientes:

$$E_{vR} = V_{vR}(\cos \delta vR + j \sin \delta vR) \quad \dots (41)$$

Donde:

E_{vR} = Fuente de voltaje del STATCOM en el marco de referencia del bus R

V_{vR} = Voltaje del bus R

δvR = Ángulo de fase de los voltajes V_{vR}

$$S_{vR} = V_{vR}I_{vR}^* = V_{vR}Y_{vR}^*(V_{vR}^* - V_k^*) \quad \dots (42)$$

S_{vR} = Potencia compleja inyectada por el STATCOM

I_{vR} = Corriente en el nodo vR

Y_{vR}^* = Admitancia resultante de la impedancia

Las ecuaciones que determinan los flujos de potencia activa y reactiva para el compensador:

$$\Delta P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad \dots (43)$$

$$\Delta Q_{vR} = V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad \dots (44)$$

Donde:

G_{vR} = Conductancia en el nodo vR

V_{vR} = Voltaje en el nodo vR

V_k = Voltaje en el nodo k

B_{vR} = Susceptancia resultante de admitancia Y_{vR}^*

δ_{vR} = Ángulo en el nodo vR

θ_k = Ángulo en el nodo k

Cuando se tiene condiciones nominales como factor de potencia en 1 y que el V_t como V_{ssc} estén en fase, dichos análisis para la expresión de la inyección de potencia reactiva del STATCOM solo dependerá de su voltaje de salida con las siguientes formulas:

$$Q_{ssc} = \frac{V_t * V_{ssc}}{X_s} \cos \delta - \frac{V_{ssc}^2}{X_s} \quad \dots (45)$$

Donde:

Q_{ssc} = Potencia reactiva del ssc

V_t = Voltaje que varía en el tiempo

V_{ssc} = Voltaje del ssc

X_s = Reactancia

δ = Ángulo de disparo

Considerando que el desfase en $\delta = 0$ entre el $V_t * V_{ssc}$.

$$Q_{STATCOM} = \frac{V_t * V_{ssc}}{X_s} * V_{ssc} \quad \dots (46)$$

$$P_{ssc} = \frac{V_t * V_{ssc}}{X_s} * \sin \delta \quad \dots (47)$$

Donde:

$Q_{STATCOM}$ = Potencia reactiva del STATCOM

P_{ssc} = Potencia activa del ssc

V_t = Voltaje que varía en el tiempo

V_{ssc} = Voltaje del ssc

X_s = Reactancia

δ = Ángulo de disparo

Sabiendo que la potencia activa suministrada al sistema cuando la salida de voltaje del convertidos se adelanta a la salida del sistema, o caso contrario la salida del convertidos se atrasa provocando absorción de potencia activa (Apolo Diana Jennifer Guamán & Villacís Rodríguez Juan Esteban, 2022).

2.11.5 Compensación por máquinas síncronas.

La compensación está formada por compensadores o motores síncronos. Los compensadores síncronos, se han utilizado fundamentalmente en la compensación del reactivo en líneas de transporte de energía eléctrica. Este tipo de compensación permiten una compensación continua, ajustada a la potencia reactiva necesaria en cada instante. Algo más usual es el empleo de motores síncronos que realizan simultáneamente las funciones de accionamiento a una carga activa continua y la producción de potencia reactiva de compensación para el sistema (Friedman & Ramos, 2009).

Con el uso de máquinas síncronas como alternativa a menudo busca aumentar la capacidad de transmisión de los sistemas de energía, así como mejorar la estabilidad de voltaje y las capacidades de resistencia a cortocircuitos de los sistemas de energía. El uso de máquinas síncronas como compensadores de potencia reactiva en los sistemas de distribución es menor en comparación con los sistemas de transmisión (Hasan DİRİK et al., 2023).

Fórmula compensadores sincrónicos

$$n = \frac{60 * f}{P} = \frac{120 * f}{p} \quad \dots (48)$$

Las dos formas de estas fórmulas son equivalentes y se utilizan indistintamente, llegando al mismo resultado. La elección de una u otra depende de las convenciones y preferencias.

Donde:

f = Frecuencia de la red a la que está conectada la maquina (Hz)

P = Número de pares de polo que tiene la máquina

p = Número de pares de polos que tiene el compensador

n = Velocidad de sincronismo de la máquina (Rpm)

Para la fórmula de rotor cilíndrico se tiene las siguientes ecuaciones (Hasan DİRİK et al., 2023).

$$P = \frac{V_t E_f}{X_d} \sin \delta \quad \dots (49)$$

Donde:

P = Potencia activa

V_t = Tensión de la línea (voltaje aplicado al motor o generador).

E_f = Fuerza electromotriz inducida en el rotor (voltaje generado en el devanado del rotor).

δ = Ángulo de carga, ángulo entre el voltaje de la línea y la fuerza electromotriz inducida

X_d = Reactancia sincrónica en el eje directo.

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_d} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_d} \quad \dots (50)$$

Q = Potencia reactiva

2.12 Software DigSILENT PowerFactory

El software DigSilent es una herramienta especializada en el análisis de sistemas eléctricos de potencia, el cual permite simular de manera digital cálculos de redes eléctricas. Los modelos con los que efectúa los cálculos están basados en las normas ANSI, IEEE e IEC.

El software es muy utilizado para análisis de redes eléctricas (alta y media tensión) por diferentes entidades, al igual que por profesionales del área lo que le convierte en una herramienta computacional muy competitiva. A continuación, se detalla los análisis que puede brindar el DigSILENT 2021 para el trabajo (Gonzalez-Longatt, 2004).

Flujo de potencia

- Flujo de potencia balanceado o desbalanceado
- Curvas de operación de generadores
- Librerías completas de dispositivos
- Controles secundarios de voltaje, potencia y frecuencia
- Perfiles de carga

Análisis de sensibilidad

- Sensibilidad de tensión y de líneas
- Sensibilidad de transformadores y sus respaldos (alterna y continua)
- Análisis nodal

Herramientas de líneas de transmisión

- Curvas P-V y Q-V

- Factores de transferencia de carga
- Planificación de salidas de servicio

3 Capítulo III: Metodología

3.1 Metodología de la Investigación

En esta sección se define el marco metodológico por el cual se guía la investigación, considerando; el método empleado, las técnicas de recolección de datos y los procedimientos de análisis de los datos.

3.1.1 Método de investigación

Conforme a los objetivos, se emplea algunos métodos para la investigación, que serán descritas a posteriori; sin embargo; existe un método descriptivo con el cual describe las características de un hecho, fenómeno, con el fin de establecer la estructura o comportamiento de un equipo. Además, delimita los resultados de la investigación en un nivel intermedio, en cuanto a la hondura de los conocimientos, no estando restringida a la recolección de datos, sino a la búsqueda de relaciones entre los equipos para el análisis.

También se puede emplear un método inductivo, que nos permite obtener resultados a partir de implementa un modelo de compensación reactiva en un sistema de potencia (SEP) de la IEEE en este caso los sistemas de 9, con la finalidad de analizar los procedimientos y resultados en los modelos de pruebas, observando los límites de operación, restricciones normativas, rendimiento del modelo y eficiencia de los recursos.

3.1.2 Procedimiento de análisis

Aquí se abordará las técnicas, características y condiciones de análisis en los sistemas de potencia y sus incidencias, se procederá a una descripción en fases, las cuales son detalladas a continuación:

Tabla 3: *Procedimiento de análisis*

Caso de estudio	Metodología	Evaluación
Fase 1	- Se inicia la simulación del sistema de potencia en este caso en de 9 barras estandarizado de la IEEE, sin la intervención de la compensación reactiva. - Se verifica mediante las curvas P-V y Q-V el comportamiento del sistema.	- Se recopila información de los voltajes en (p.u) de las barras. - Se verifica mediante las curvas P-V y Q-V los cambios en los voltajes de las barras. - Se comprueba los perfiles de voltajes en las barras críticas.
Fase 2	- Revisar en la librería de componentes del software el modelo de banco de capacitores, SVC y STATCOM que permita simular y sus características de funcionamiento. - Simulas las curvas P-V y Q-V, verificando el comportamiento de las tres compensaciones reactivas.	- Verificar la respuesta de las tres compensaciones reactiva, obteniendo las curvas P-V y Q-V. - Obtener los valores de voltaje (p.u) después aplicar la compensación.
Fase 3	- Implementar cada una de las compensaciones reactiva en los puntos	- Verificar la respuesta del banco de capacitores, SVC y STATCOM, obteniendo los

	críticos en los modelos de 9 barras de la IEEE. - Verificarlo el comportamiento de la compensación reactiva mediante las curvas P-V y Q-V.	valores de voltaje (p.u) después aplicar la compensación.
Fase 4	- Se procede a analizará la estabilidad de tensión que se obtiene después de la aplicación de la compensación reactiva, mediante la obtención de los datos de las curvas.	- Se un análisis comparativo de los resultados, para verificar el desempeño del banco de capacitores, SVC y STATCOM.

3.2 Ingeniería del proyecto

3.2.1 IEEE

El esquema de la IEEE es un modelo estandarizado del sistema eléctrico de potencia empleado para realizar estudios de estabilidad, análisis de perfiles de tensión y análisis de flujo de potencia, el cual, nos permite determinar la capacidad del sistema para conservar la sincronización entre los generadores, transformadores o punto de carga; también ayudando a diagnosticar problemas de congestión o sobrecarga en las líneas de transmisión utilizando diferentes escenarios de operación del sistema, como variación en la carga, fallas en la red o la ocupación de dispositivos FACTS para mejorar el control de tensión.

El sistema de la IEEE de 9 barras facilita la comparación de resultados entre diversos escenarios de simulación, resolviendo condiciones de funcionamiento en estado estacionario, del sistema eléctrico de potencia (SEP), siendo una herramienta fundamental adaptada, en análisis, modelamiento, control y planificación de los diferentes sistemas eléctricos, a corto y largo plazo

facilitando valores de tensiones en cada barra y como se encuentra la energía en ese momento en la red (Geovany Andrade et al., 2020).

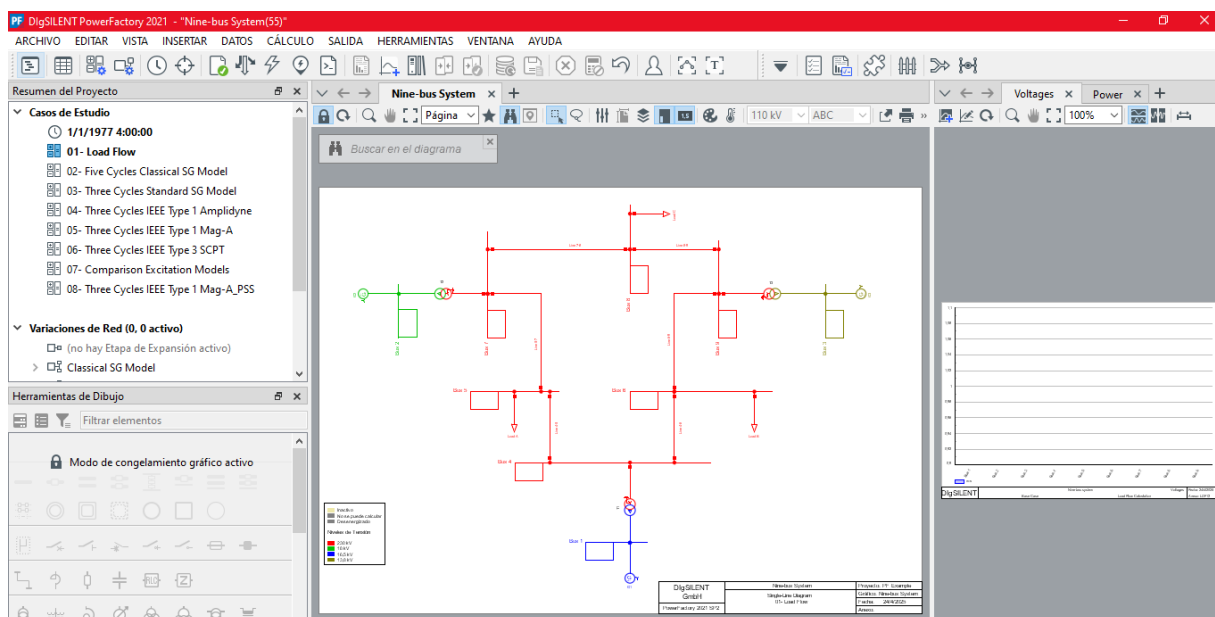
3.2.2 Ingreso al Software y selección del modelo

El primer apartado que vamos a tener cuando se inicie el DigSILENT PowerFactory, es una ventana que se llama ejemplos de PowerFactory, en donde vamos a tener diferentes ejemplos de aplicación, literatura y normas, en base a nuestro estudio nos interesa el apartado de ejemplos de literatura que es donde vamos a tener el sistema de 9 barras. Le damos un clic en donde dice sistema de 9 barras y después le damos en donde está un cuadrado con una flecha para que se cargue el sistema.



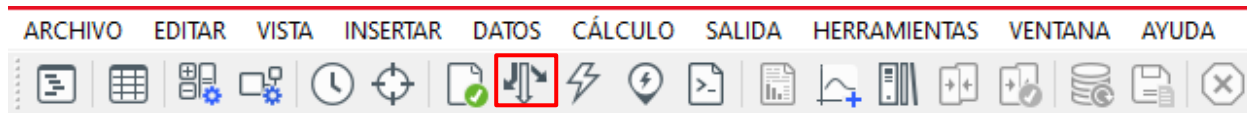
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Una vez hecho todo eso vamos a obtener el sistema de 9 barras cargado, en donde vamos a tener varios apartados para diferentes tipos de estudios, diferentes tipos de herramientas que se pueden aplicar en este software.



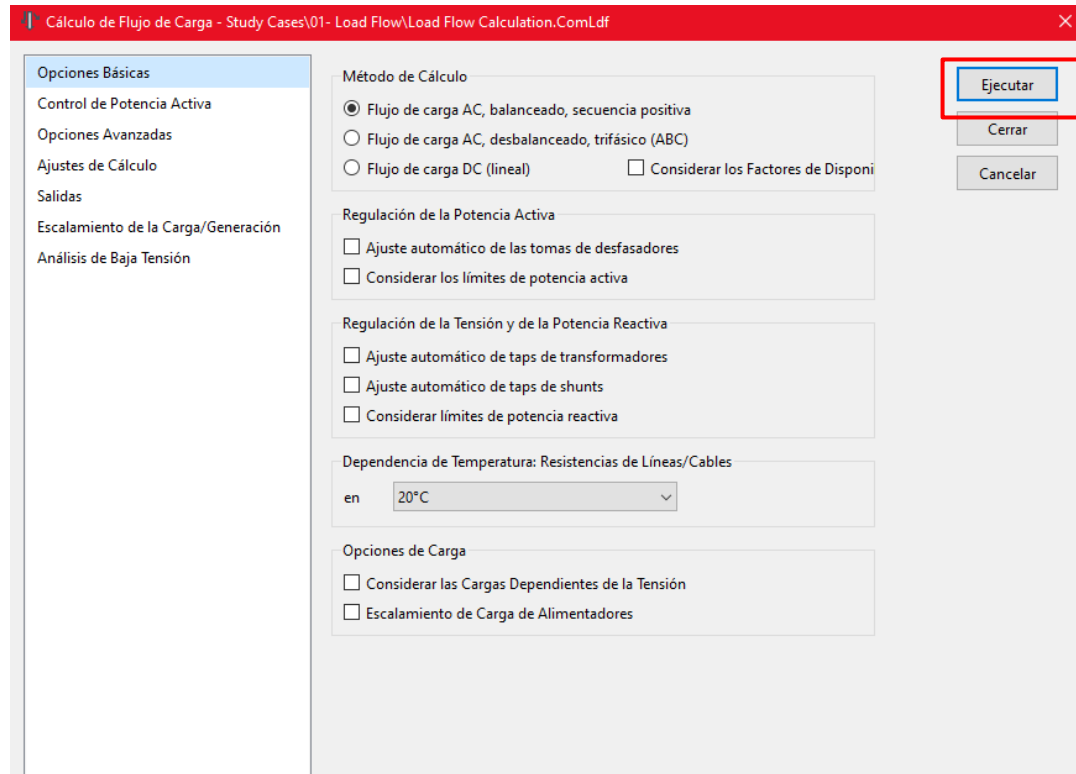
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Para observar los parámetros estándares del sistema de 9 barras de la IEEE, nos vamos a el apartado donde dice flujo de carga que la encontramos representada con tres flechas hacia abajo.



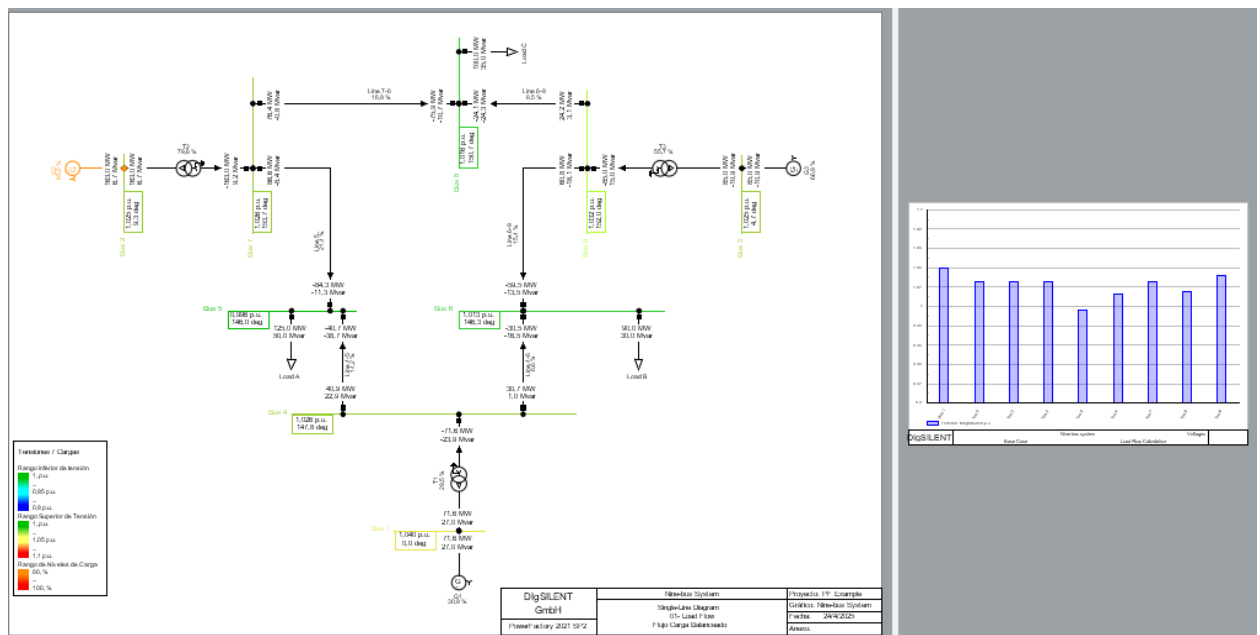
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2025.

Cuando le damos clic a este apartado, se nos abrirá una ventana que se llama cálculo de flujo de carga, no le vamos a mover nada lo dejamos como viene por default, solo le damos en ejecutar.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

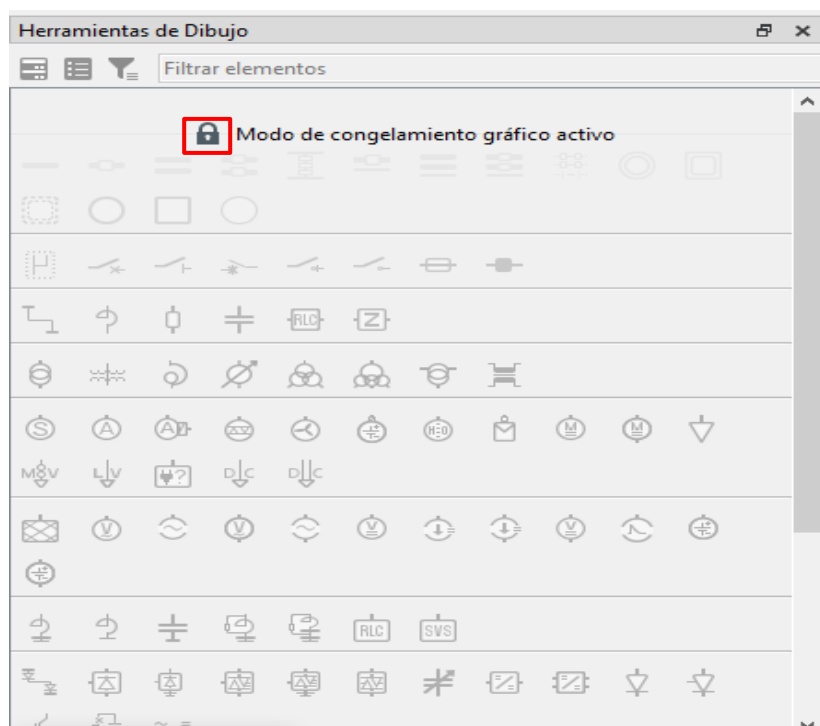
Y obtendremos los valores estándares o valores bases del sistema de 9 barras, además obtendremos un gráfico de barras de todas las tensiones, magnitudes p.u. del sistema.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

3.2.1 Habilitación del apartado de herramientas

Primeramente, en el lado izquierdo del software vamos a encontrar un apartado que dice herramientas de dibujo, para poder escoger los elementos primeramente hay que apretar en el candado que encontramos en ese apartado, caso contrario estarán deshabilitado las herramientas.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Necesitamos hacer esto ya que es donde vamos a encontrar los elementos que necesitamos para el estudio, en el apartado filtros y shunt que son las compensaciones reactivas.

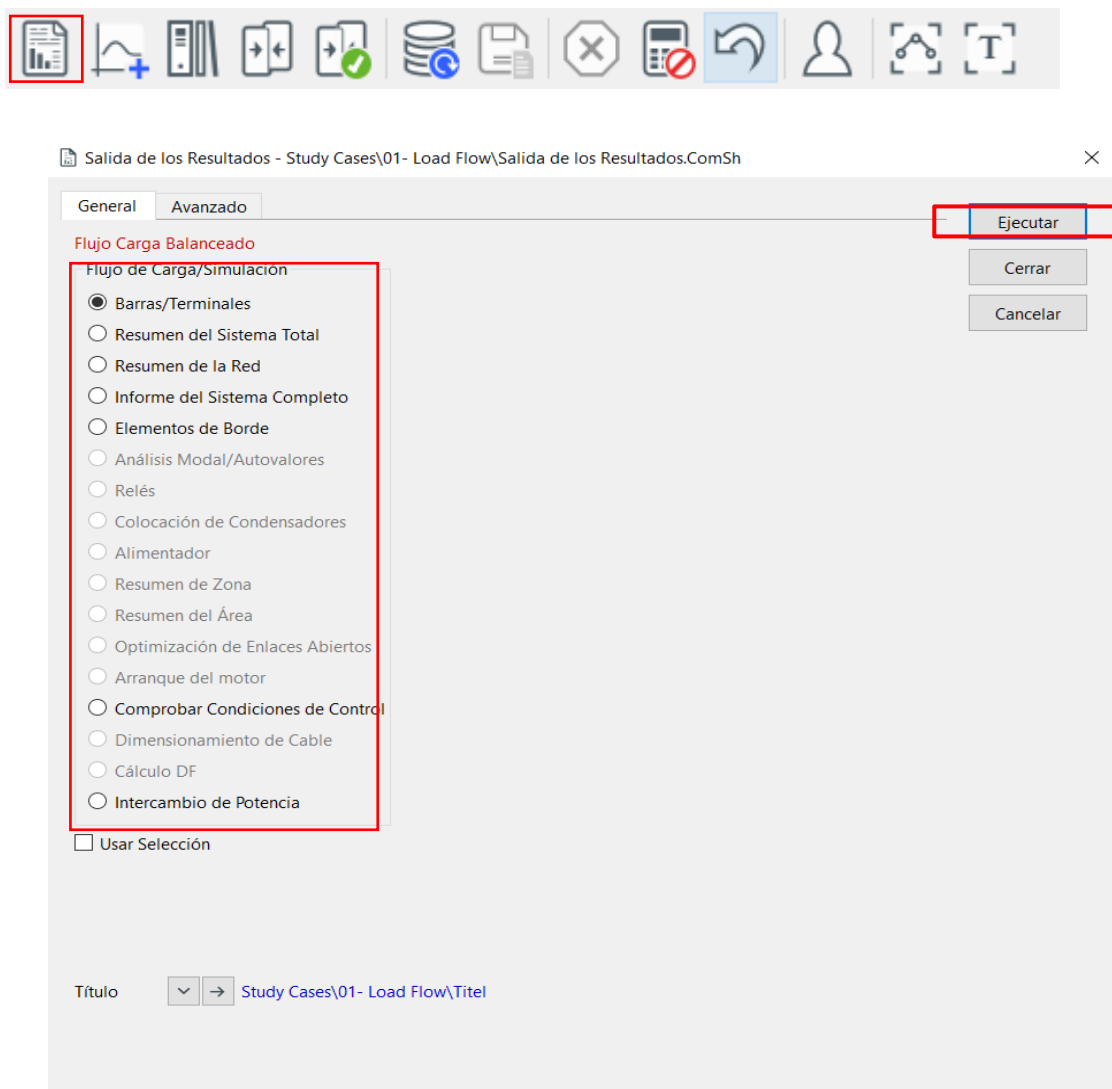


Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

3.2.2 Resultados

Para la obtención de los resultados nos dirigimos a la parte superior central en reporte de Resultados, donde si damos clic en ella se nos habilita una ventana en donde seleccionamos que

tipo de resultado necesitamos obtener, después de modificar dichos apartados procedemos a ejecutar.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Estos resultados nos aparecen en la parte inferior debajo del sistema, si se quiere ver de manera más amplia en la parte superior damos clic en Texto lo que minimiza el esquema del sistema y los resultados se amplía para su visualización.



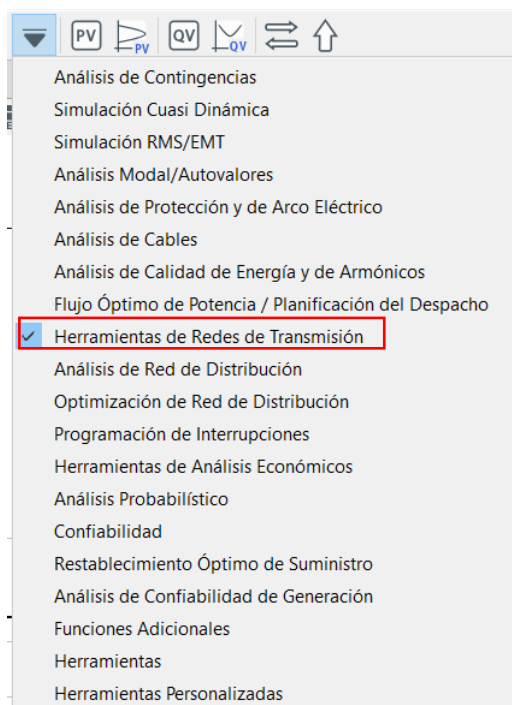
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Errores (0) Advertencias (0) Información (1) Eventos (0) Otros (93) Texto contenido Eliminar todos los filtros														
Bus 4														
	230,00	0,81	187,08	134,29										
Cub_1 /Tr2	T1				-397,66	-265,16	-0,83	1,48	235,05	Tap: 0,00	Min: 0	Máx: 0		
Cub_2 /Lne	Line 4-5				220,84	121,03	0,88	0,78	78,92	Pv: 9804,35 kW	cLod: 9,99 Mvar	L: 1,00 km		
Cub_3 /Lne	Line 4-6				176,82	144,13	0,78	0,70	71,96	Pv: 13766,32 kW	cLod: 8,37 Mvar	L: 1,00 km		
Bus 5														
	230,00	0,69	158,28	116,07										
Cub_1(1/Svs	Sistema Estático d									Qtcr: 237,50 MW	Qtsc: 95,00 Mvar	nKap: 0		
Cub_2 /Lod	Load A				237,50	95,00	0,93	0,93		P10: 237,50 MW	Q10: 95,00 Mvar			
Cub_2(1/Shnt	Shunt/Filtro													
Cub_1 /Lne	Line 4-5				-211,04	-47,68	-0,98	0,79	78,92	Pv: 9804,35 kW	cLod: 9,99 Mvar	L: 1,00 km		
Cub_3 /Lne	Line 5-7				-26,46	-47,32	-0,49	0,20	19,78	Pv: 1558,22 kW	cLod: 16,93 Mvar	L: 1,00 km		
Bus 6														
	230,00	0,63	145,01	118,76										
Cub_1 /Lod	Load B				171,00	57,00	0,95	0,72		P10: 171,00 MW	Q10: 57,00 Mvar			
Cub_1(1/Svs	Sistema Estático d									Qtcr: 171,00 MW	Qtsc: 57,00 Mvar	nKap: 0		
Cub_2(1/Shnt	Shunt/Filtro(1)				-0,00	-50,88	-0,00	0,20						
Cub_2 /Lne	Line 6-9				-7,95	71,88	-0,11	0,29	33,47	Pv: 6184,12 kW	cLod: 10,40 Mvar	L: 1,00 km		
Cub_3 /Lne	Line 4-6				-163,05	-78,00	-0,90	0,72	71,96	Pv: 13766,32 kW	cLod: 8,37 Mvar	L: 1,00 km		
Bus 7														
	230,00	0,80	182,94	119,19										
Cub_1 /Lne	Line 5-7				28,02	38,23	0,59	0,15	19,78	Pv: 1558,22 kW	cLod: 16,93 Mvar	L: 1,00 km		
Cub_2 /Tr2	T2				-163,00	-281,97	-0,50	1,03	204,74	Tap: 0,00	Min: 0	Máx: 0		
Cub_3 /Lne	Line 7-8				134,98	243,74	0,48	0,88	90,06	Pv: 10741,33 kW	cLod: 7,09 Mvar	L: 1,00 km		
Red: Nine-bus SystemEscenario del Sistema: Nine-bus System Caso de Estudio: 01- Load Flow Anexo: / 3														
	Voltaje nominal [kV]	Voltaje de Barra [p.u.]	Pot. Activa [MW]	Pot. Reactiva [Mvar]	Factor Pot. [-]	Corriente Carga [kA]								Datos Adicionales
Bus 8														
	230,00	0,56	129,78	109,43										
Cub_2 /Lod	Load C				190,00	66,50	0,94	0,90		P10: 190,00 MW	Q10: 66,50 Mvar			
Cub_1 /Lne	Line 7-8				-124,24	-159,84	-0,61	0,90	90,06	Pv: 10741,33 kW	cLod: 7,09 Mvar	L: 1,00 km		
Cub_3 /Lne	Line 8-9				-65,76	93,34	-0,58	0,51	52,70	Pv: 5109,23 kW	cLod: 5,24 Mvar	L: 1,00 km		

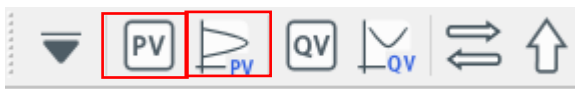
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

3.2.3 Habilitación del apartado de las curvas.

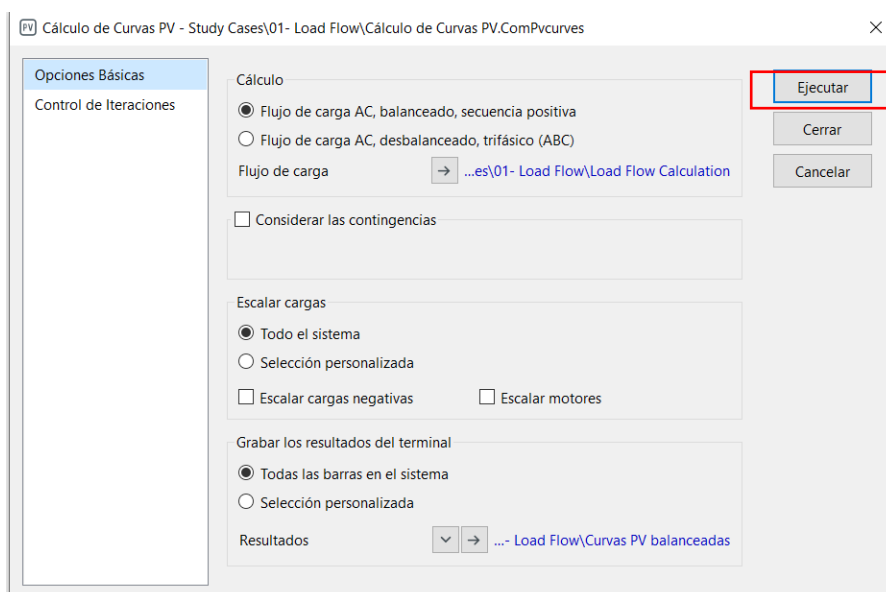
Nos dirigimos a la sección superior derecha y seleccionamos Herramientas de Redes de Transmisión; en donde se nos habilita las dos curvas que se utilizaran, procedemos a dar clic en PV se nos abre una nueva ventana en donde lo dejamos como viene por default y se da ejecutar, en algunos casos no se refleja nos datos en pantalla, pero mediante la gráfica se puede obtener dichos resultados colocando el mouse encima de la curva.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

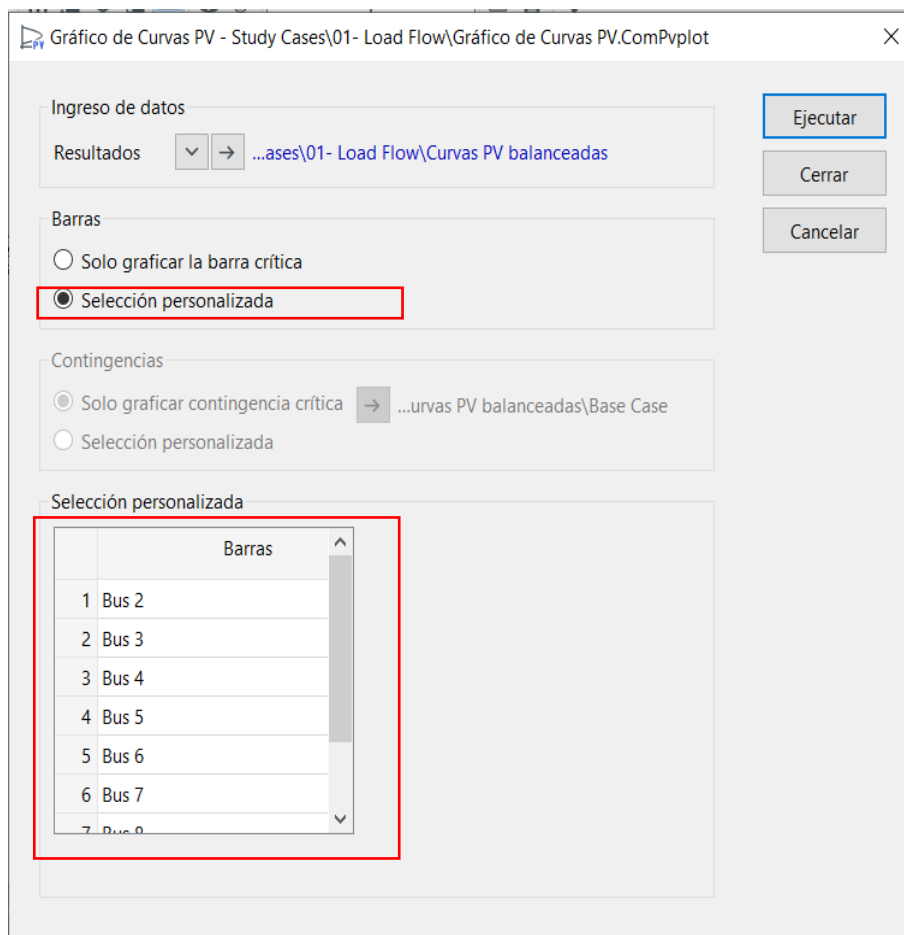


Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.



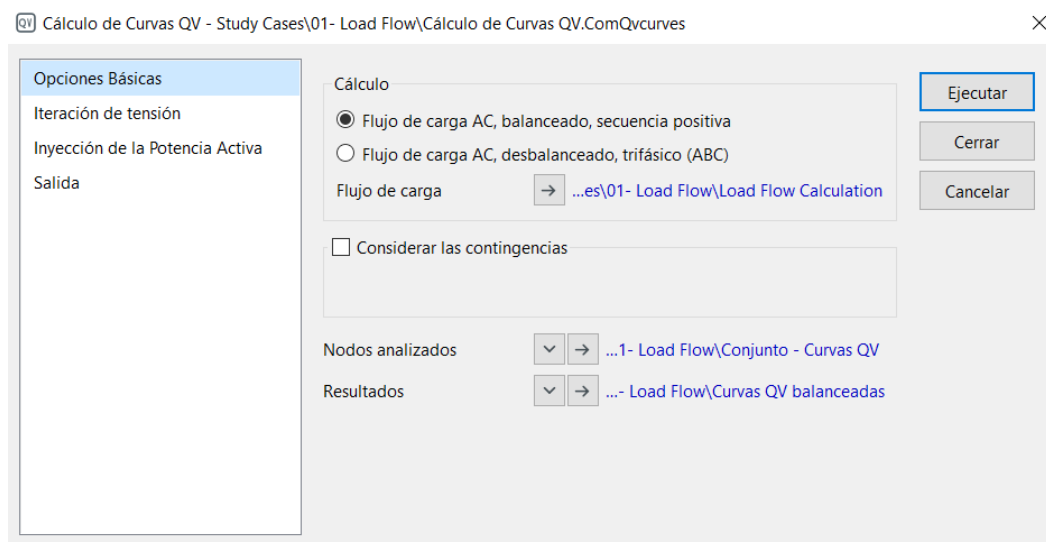
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Ahora si queremos obtener la curva después de la ejecución anterior damos clic en el apartado que se encuentra alado de PV Gráfico de Curva PV, en donde, nos pide habilitar Selección personalizada seleccionando cada una de las barras del sistema para la obtención de la curva.



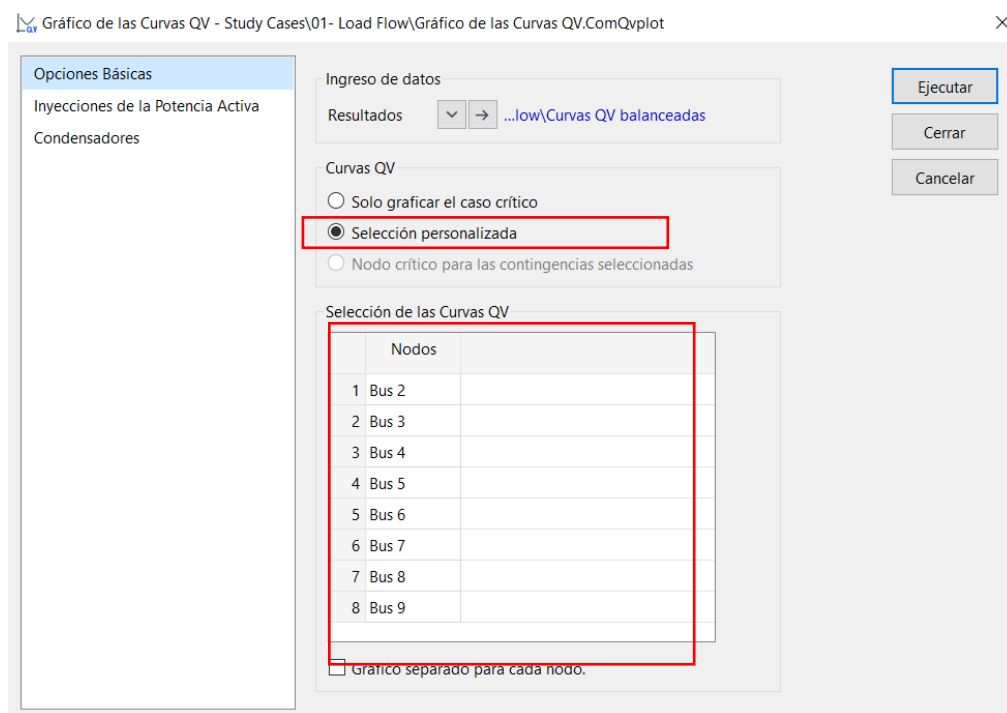
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Así mismo para la otra curva procedemos a dirigirnos a la misma sección antes mencionada y damos clic en QV y lo dejamos como viene por default y ejecutamos.



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Después para obtener la gráfica de la curva realizamos el proceso anterior de dar clic en el icono alado de QV donde de igual manera se nos habilita una ventana y lo dejamos por default y ejecutamos, y obtenemos la gráfica para su respectivo análisis.

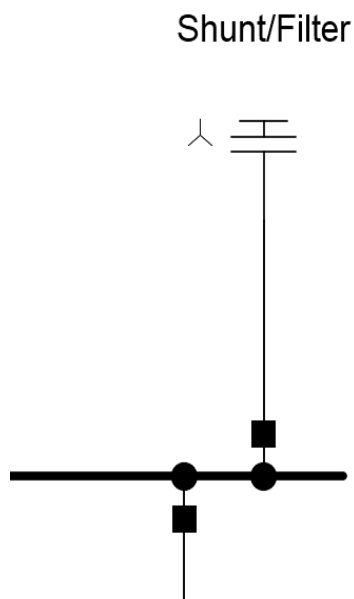


Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

3.2.4 Modelamiento del banco de capacitores

Conforme a los fundamentos teóricos presentados anteriormente, se modela el dispositivo que integra un banco de capacitores. El cual consta de un capacitor y una resistencia interna pequeña que se conecta directamente a la barra que se quiere compensar.

Figura 18 Modelo del Banco de Capacitores



Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

En el apartado de parámetros de diseño permite mejorar la distribución de la potencia reactiva en el sistema, minimizando las pérdidas de energía y manteniendo una operación eficiente; siendo crucial para el control del voltaje en estos sistemas asegurando los niveles de voltaje dentro de los límites operativos deseados.

Figura 19 Parámetros del sistema de control del Banco de Capacitores

The screenshot displays the 'Shunt/Filtro' configuration window for a 'Nine-bus System'. The 'General' tab is active, showing the following parameters:

- Nombre:** Shunt/Filter
- Terminal:** Nine-bus System\Bus 6\Cub_4
- Zona:** (empty)
- Área:** (empty)
- Fuera de servicio:** ☐
- Tipo de Sistema:** AC
- Tecnología:** 3F-Y*
- Tensión Nominal:** 230 kV (highlighted with a red box)
- Tipo de Shunt:** C
- Modo de Entrada:** Por defecto
- Controlador:**
 - Máx. No. de Pasos:** 1
 - No. de Pasos act.:** 1
 - Potencia Reactiva Nominal:** 128 Mvar
 - Potencia activa real:** 128 Mvar
- Según el Informe de Medición:** ☐
 - Parámetros de Diseño (por Paso):**
 - Pot.Reactiva Nominal, C:** 128 Mvar (highlighted with a red box)
 - Factor de Pérdida, tan(delta):** 0
- Parámetros de Distribución (por Paso):**
 - Capacitancia:** 6,418346 uF
 - Conductancia Paralela:** 0 uS

Buttons on the right include OK, Cancelar, Figura, and Ir a ...

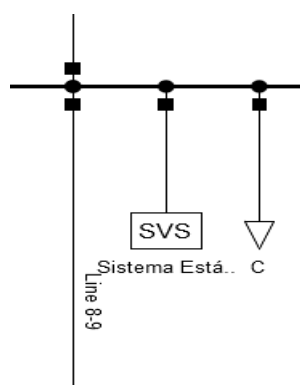
Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

Los valores de tensión nominal son los mismo de la barra a la que se conecta, los valores de potencia reactiva a colocar se encuentran en el apartado de Parámetros de Diseño en donde se coloca el valor de potencia reactiva que se desea proporcionar, además en los demás apartados están definidos por el fabricante en los catálogos correspondientes.

3.2.5 Modelamiento del SVC

Acorde a lo teórico el SVC se modela los dispositivos que integra a un SVC, los cuales son los TCR, TSC y MSC también un control balanceado y desbalanceado, en el apartado de flujo de carga el modo de control que se tiene es un control de tensión, en donde la conexión del SVC es directamente a la barra que se quiere compensar en la red.

Figura 20 Modelo del SVC



Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

En el apartado de flujo de potencia se procede a activar la casilla de Habilitar caída con el cual permite evaluar las variaciones en la carga y la generación afectando a la estabilidad del sistema, siendo un factor crítico en el control de voltaje en las líneas permitiendo realizar ajustes de la potencia reactiva para mejorar el rendimiento general y reducir pérdidas.

Figura 21 Parámetros del sistema de control del SVC

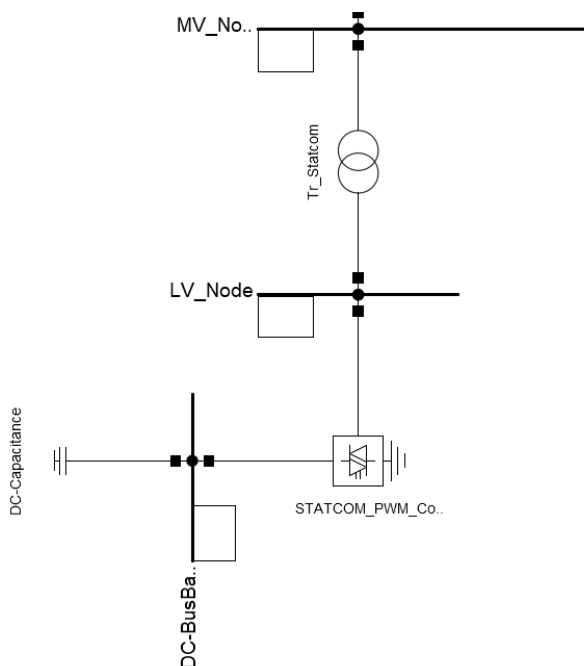
Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

Los valores principales del SVC no se modifican ya que para la presente investigación no son necesarios modificarlos, en el apartado Habilitar caída se coloca los valores de potencia reactiva que se quiere aportar y la caída se colocar por defecto dependiendo del valor colocado de potencia reactiva.

3.2.6 Modelamiento del STATCOM

De acuerdo con lo teórico de la investigación se modela los equipos que integran a un STATCOM, los cuales son el VSC accionado por PWM, una barra de corriente alterna, una barra de corriente continua, un capacitor en DC y el transformador de acoplamiento a la red.

Figura 22 Modelo del STATCOM



Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

Los apartados que se colocaron valores principalmente son los valores nominales, ya que son valores de las tensiones de las barras a la que se conectan los demás valores de la potencia nominal del VSC y del transformador de acoplamiento serán igual, además el valor del capacitor en DC está definido por el fabricante.

Figura 23 Parámetros del sistema de control del STATCOM

Convertidor PWM/1 Conexión DC - Nine-bus System\STATCOM_PWM_Converter(1).ElmVscmono

Datos Básicos

Descripción

Flujo de Carga

Cortocircuito VDE/IEC

Cortocircuito Completo

Cortocircuito ANSI

Cortocircuito IEC 61363

Cortocircuito DC

Simulación RMS

Simulación EMT

Calidad de Energía/Armónicos

Confiabilidad

Análisis de la Capacidad de Integración

Flujo Óptimo de Potencia

Planificación del Despacho

General

Nombre: STATCOM_PWM_Converter(1)

Terminal AC: Nine-bus System\LV_Node(1)\Cub_1 LV_Node(1)

Terminal DC: ...-bus System\DC-BusBar_Statcom(1)\Cub_1 DC-BusBar_Statcom

Zona: Terminal AC

Área: Terminal AC

☐ Fuera de servicio

Número de convertidores en paralelo: 1

Tipo de convertidor: Convertidor de dos niveles

Valores nominales

Tensión nominal (AC): 0,4 kV

Tensión nominal (DC): 1, kV

Potencia nominal: 20, MVA

Modulación

☒ PWM sinusoidal

☐ PWM rectangular

☐ Sin modulación

Reactancia serie

Impedancia de cortocircuito: 5, %

Pérdidas en el cobre: 0, kW

Relación R0/R1: 1,

Relación X0/X1: 1,

Categoría: Otros

Subcategoría:

Modelo:

OK

Cancelar

Figura

Ir a ...

Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

En el apartado de flujo de potencia se coloca el valor que se quiere trabajar de potencia reactiva en la sección de potencia reactiva de operación, las demás secciones no se modifican. En donde el ajuste de estos apartados permite al STATCOM inyectar o absorber potencia reactiva según sea necesario para mantener los niveles de voltaje dentro de los límites deseados, siendo esencial para evitar caídas de tensión que afecte al funcionamiento del sistema eléctrico.

Figura 24 *Parámetros del flujo de potencia del STATCOM*

Fuente: Elaborado propia – DigSILENT 2021

3.3 Escenarios considerados para el análisis

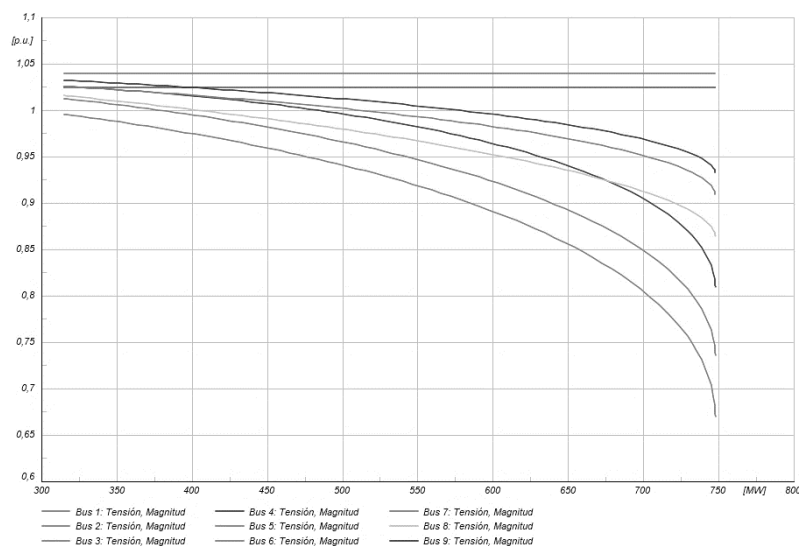
En este capítulo se detalla el sistema del SEP estándar de la IEEE e la implementación de los parámetros técnicos que se van a analizar. Como se mencionó anteriormente se van a realizar casos de estudios en parámetros diferentes, como estudio sin la introducción de compensación reactiva, estudio con la introducción de compensación reactiva mediante métodos heurísticos, estudio con la introducción de compensación reactiva mediante no métodos heurísticos.

Los sistema propuesto estándares de la IEEE se escogieron de 9 de manera que cumpla con los estándares planteados inicialmente, tomando en cuenta que se puedan analizar diferentes parámetros en cada una de las barras dichas y poder sacar una comparación de cada una, para ver cómo puede afectar o mejorar su funcionamiento con el banco de compensación.

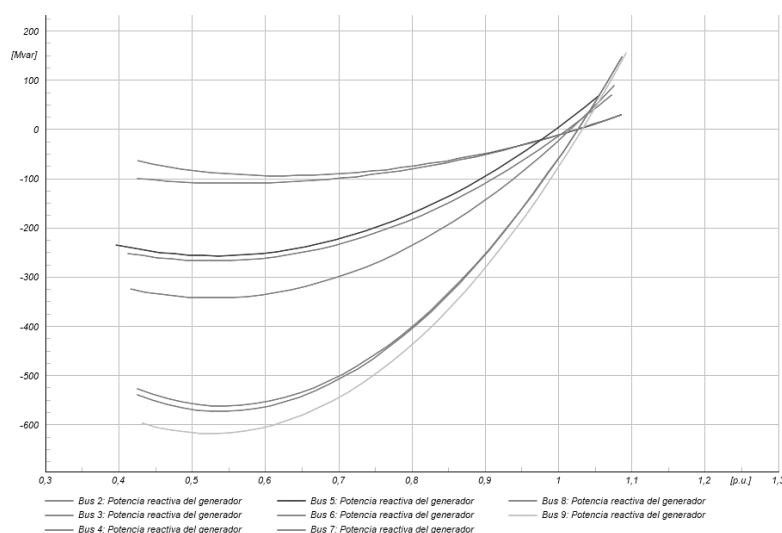
Según el autor Nilson Valentín, 2021 nos dice que “para el estudio de casos se realizó un análisis mediante las curvas Q-V, P-V con la finalidad de determinar qué barras son las más débiles para el estudio, para ello por medio de la curva P-V obtiene valores en la barra 5 de 0,67 p.u. y en barra 6 de 0,74 p.u. y barra 8 de 0,86 p.u. de la misma forma con la curva Q-V obtiene que la barra 5 el valor es de 0,83 p.u. y en la barra 6 de 0.69 p.u. y la barra 9 de 0,43 p.u. siendo la más débil siendo así las más débiles para colocar la compensación reactiva”.

A continuación, procede a colocar un valor de potencia reactiva de 128 MVar para la simulación ya que si sobrepasa dicho valor las barras estarían sobrepasando la tensión crítica para el sistema.

Figura 25: *Curva P-V*



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), por, (Valentín et al., 2021).

Figura 26: Curva Q-V

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), por, (Valentín et al., 2021).

Según CENACE, el porcentaje de carga máxima en Ecuador la capacidad instalada de generación eléctrica es de 10.000 MW a 11.000 MW (megavatios) de carga máxima registrada es del 80-90% de carga máxima, esto influenciado por la estacionalidad y las condiciones de las fuentes de generación y consumo.

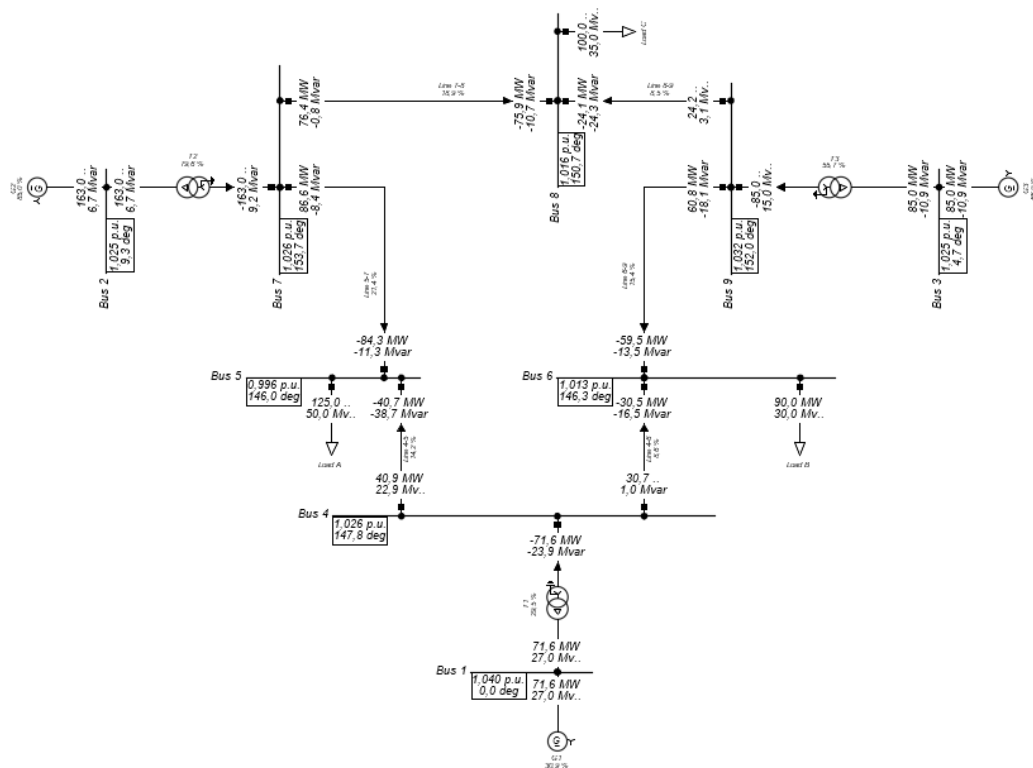
En cambio, la carga mínima en Ecuador puede representar aproximadamente entre el 30-40% de la capacidad instalada total del sistema eléctrico en momento de baja demanda que puede llegar a 3.000 MW, que suelen ser en la noche o en días de menor actividad económica. (CENACE, 2023)

4 Capítulo IV: Diseño de proyecto

4.1 Caso 1: Estudio Base en el Sistema de 9 Barras

Con el sistema de 9 barras procederemos a realizar el análisis del sistema de distribución ya que consta de diferentes elementos que componen la red, para el presente análisis tomaremos datos que nos proporciona el sistema para la investigación, debido a que el sistema de potencia de 9 barras consta de 3 generaciones, 3 transformadores con una relación de transformación de 230/18, 230/16.5, 230/13.8 (kV), además con cargas de 125, 100, 90 (MVA), teniendo una demanda de carga total del sistema de 319.63 MW.

Figura 27 Sistema de 9 barras de la IEEE.



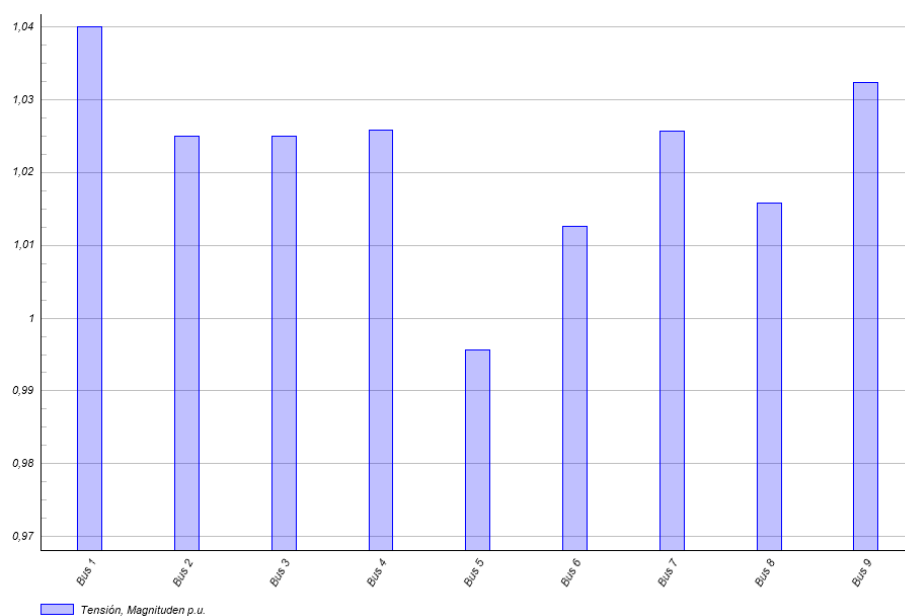
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Tabla 4 Datos de Generación

Cantidad	G1	G2	G3
Potencia aparente nominal (MVA)	247,5	192	128
Tensión nominal (kV)	16,5	18	13,8
Factor de potencia nominal	1	0,85	0,85

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

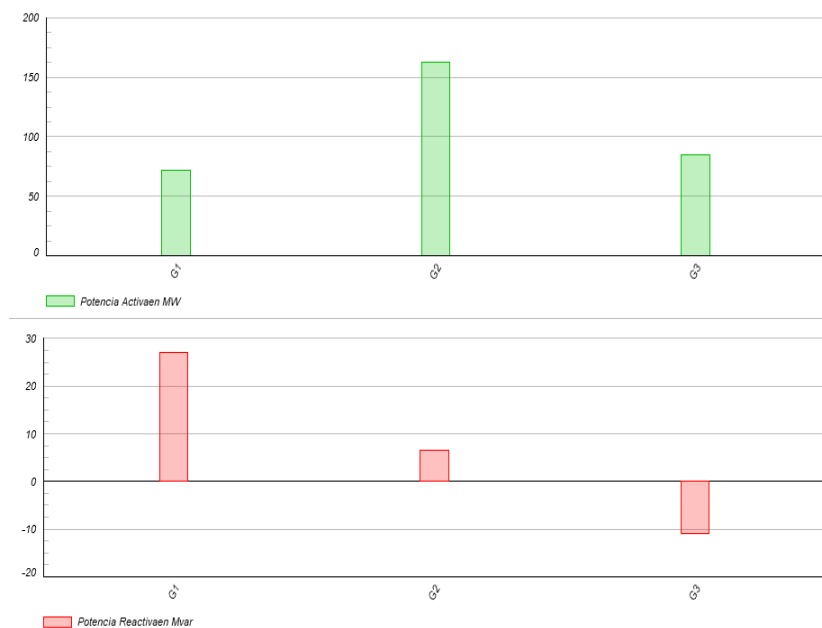
En la tabla 4 se muestra los valores con que se encuentra el sistema de 9 barras de la IEEE de cada generador que se encuentra en el sistema.

Figura 28 Voltajes p.u. caso base

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

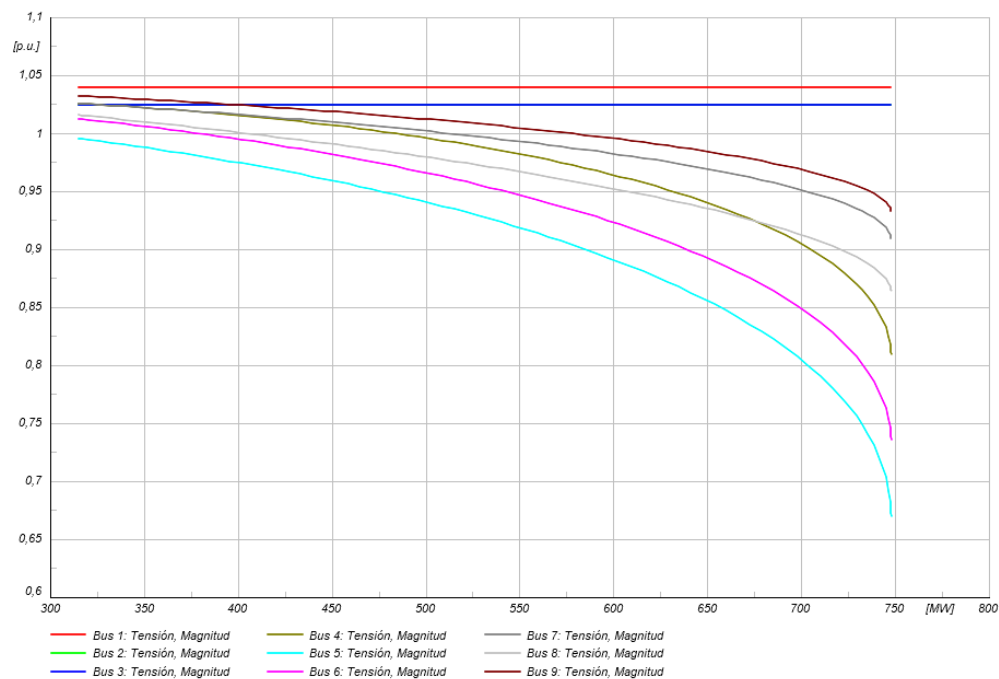
En la figura 26 se puede observar los voltajes en p.u. de las barras se encuentran por encima del 0.99 p.u. Y en condiciones normales, pero en donde se ve una disminución de voltaje en las barras 5, 6 y 8.

Figura 29 Potencias Reactivas y Activas



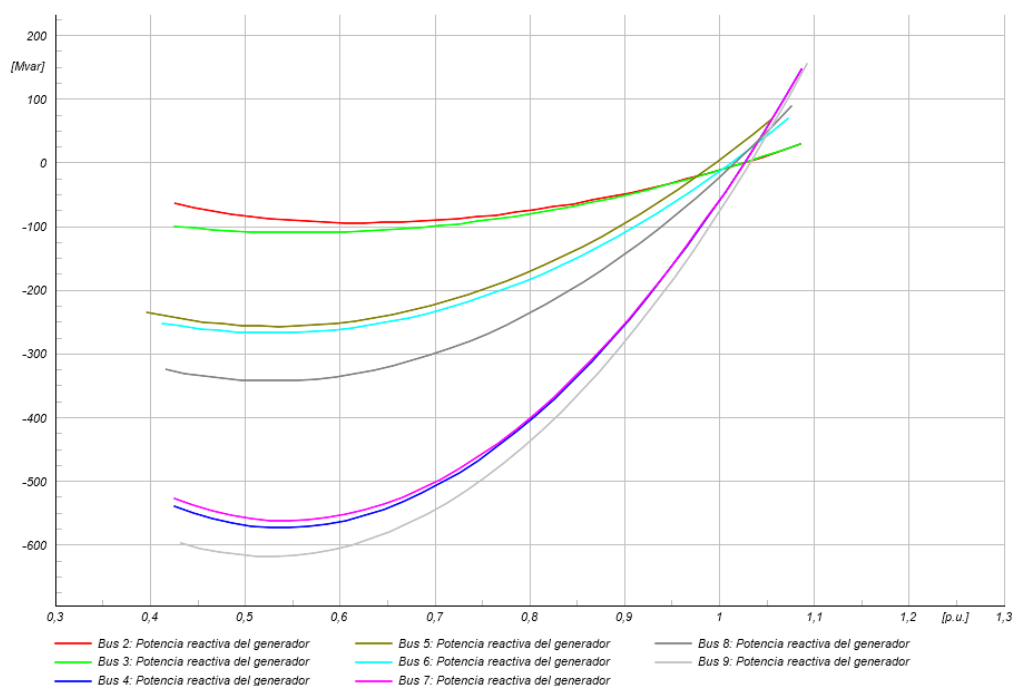
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 30 Curva P-V caso base 9 barras



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 31 Curva Q-V caso base 9 barras



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Tabla 5: Datos de voltaje de las barras

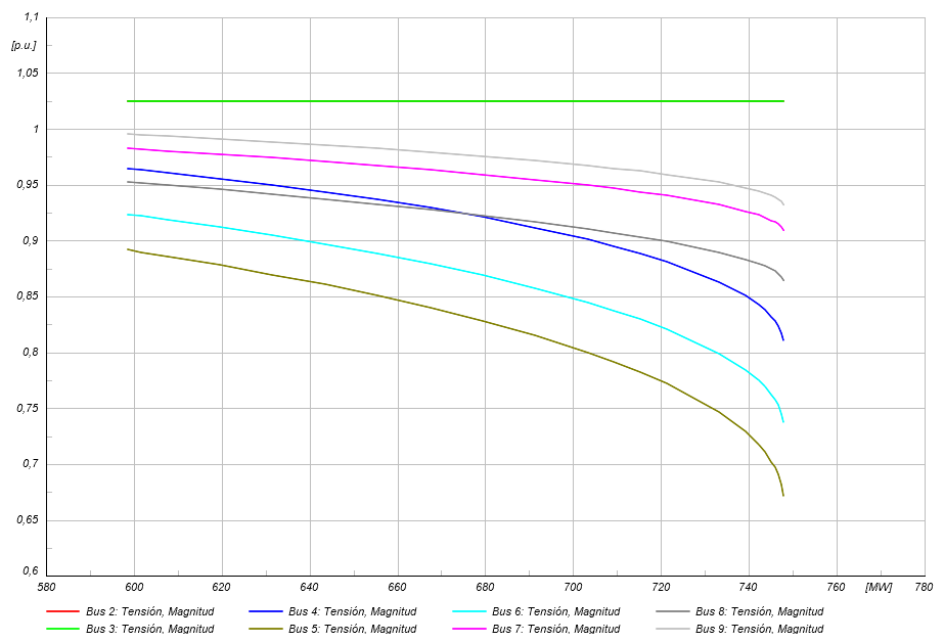
Nº BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
BUS_2	1,02	1.03	1.02
BUS_3	1,02	1.03	1.03
BUS_4	1,03	0.81	0.89
BUS_5	1	0.67	0.84
BUS_6	1,01	0.74	0.69
BUS_7	1,03	0.91	0.86
BUS_8	1,02	0.86	0.65
BUS_9	1,03	0.93	0.43

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

La demanda crítica total de las cargas escaladas es de 747.8 MW en la barra 5, siendo la barra crítica del sistema, en el análisis PV la barra 5, 6 y 8 son más inestables, mientras que en el análisis QV la barra 9, 6 y 5 siendo en este caso las más inestable estando por debajo del voltaje crítico, estas barras serian un buen lugar para la ubicación de la compensación.

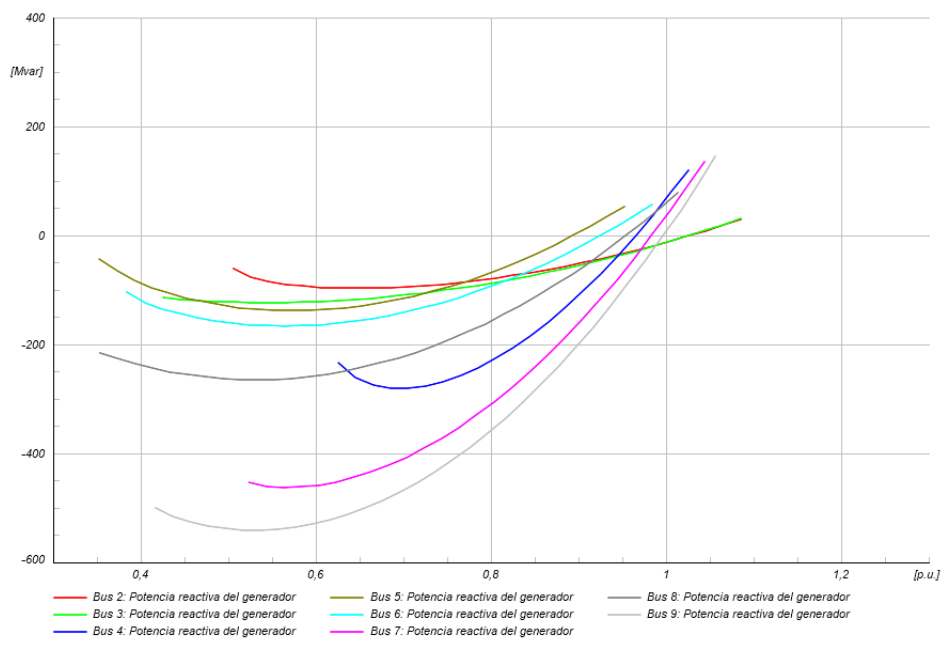
4.1.1 Sistema Base con máxima carga

Figura 320: Curva P-V en máxima carga en el sistema



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 331: Curva Q-V en máxima carga en el sistema

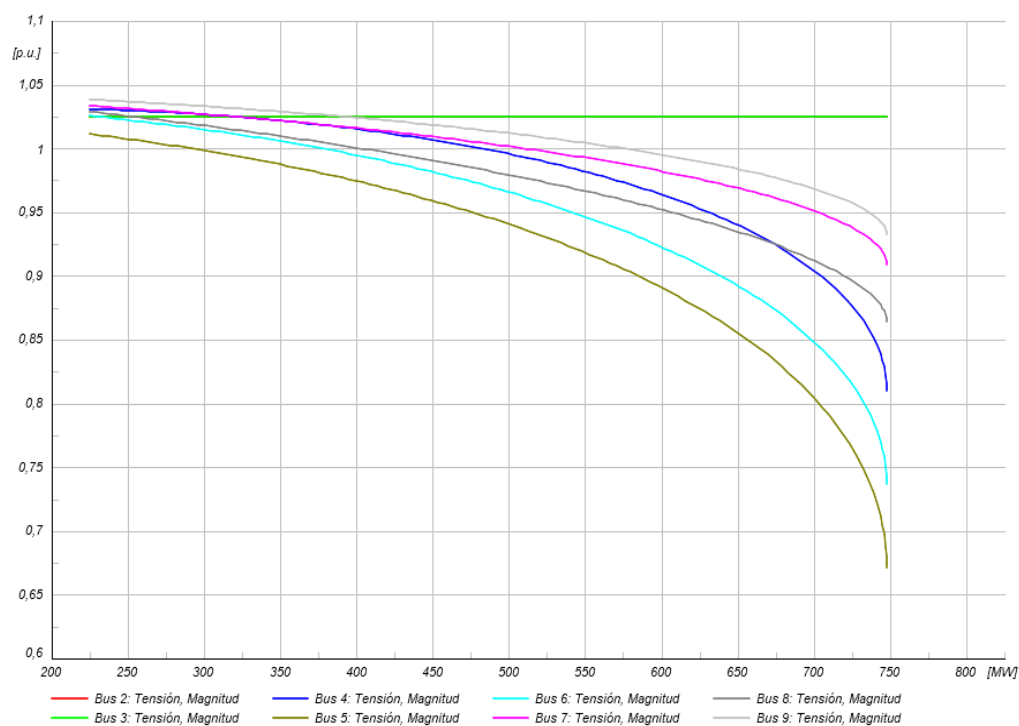


Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Sistema Base		
N° BARRAS	V_{P-V}	V_{Q-v}
BUS_2	1,025	1,025
BUS_3	1,025	1,025
BUS_4	0,81	0,89
BUS_5	0,67	0,83
BUS_6	0,74	0,69
BUS_7	0,91	0,85
BUS_8	0,86	0,65
BUS_9	0,93	0,43

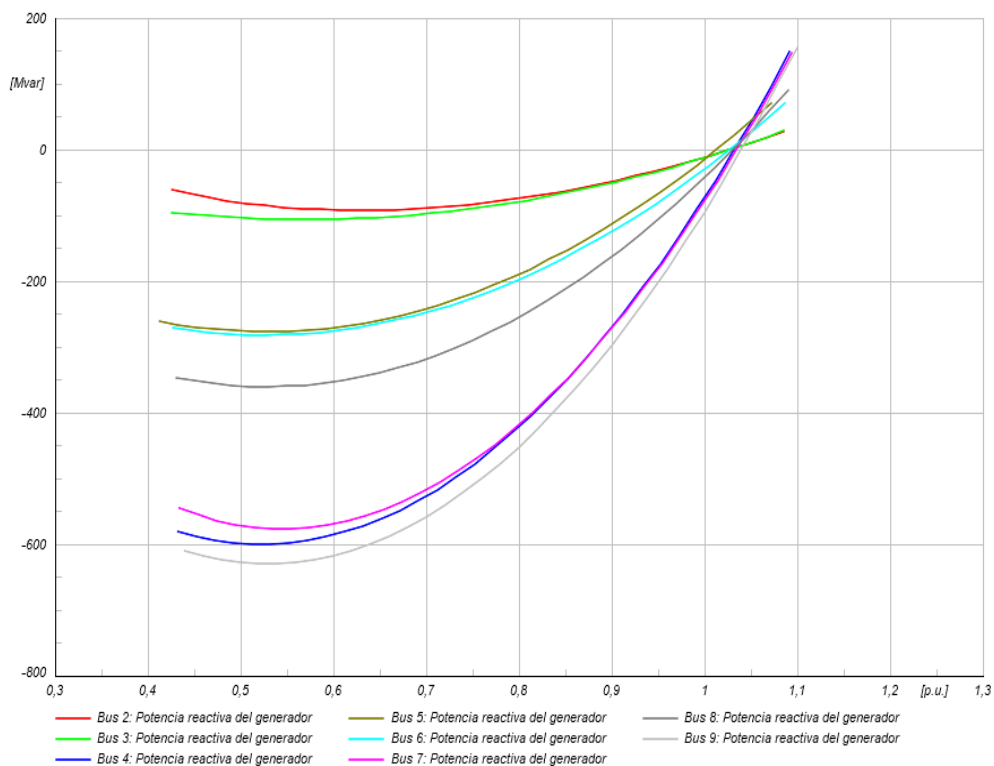
4.1.2 Sistema Base con mínima carga

Figura 342: Curva P-V en mínimo carga en el sistema



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 353: Curva Q-V en mínimo carga en el sistema



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

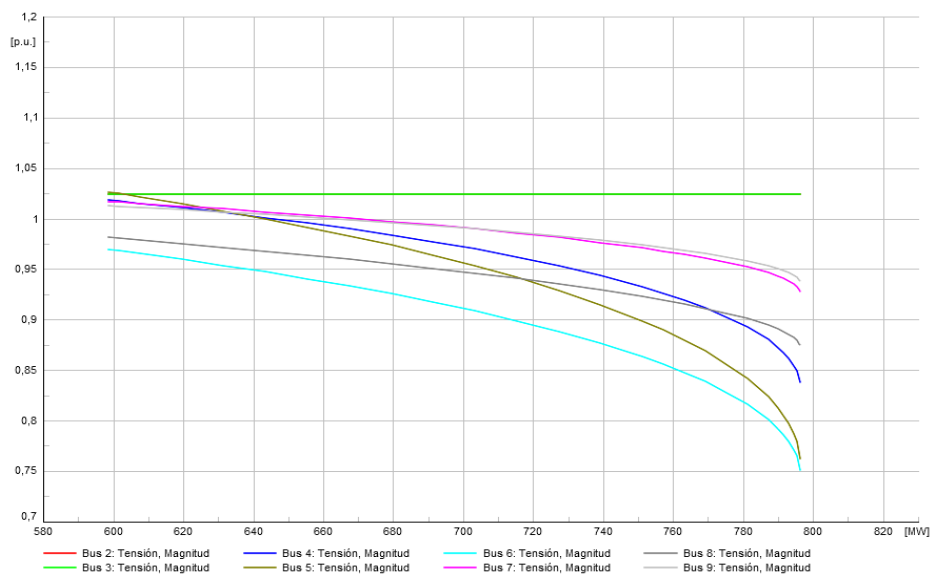
Sistema Base		
Nº BARRAS	V_{P-V}	V_{Q-V}
BUS_2	1,025	1,02
BUS_3	1,025	1,03
BUS_4	0,81	0,90
BUS_5	0,67	0,86
BUS_6	0,74	0,71
BUS_7	0,91	0,87
BUS_8	0,86	0,67
BUS_9	0,93	0,44

4.2 Caso 2: Carga máxima de 90%

4.2.1 Casos en la barra 5

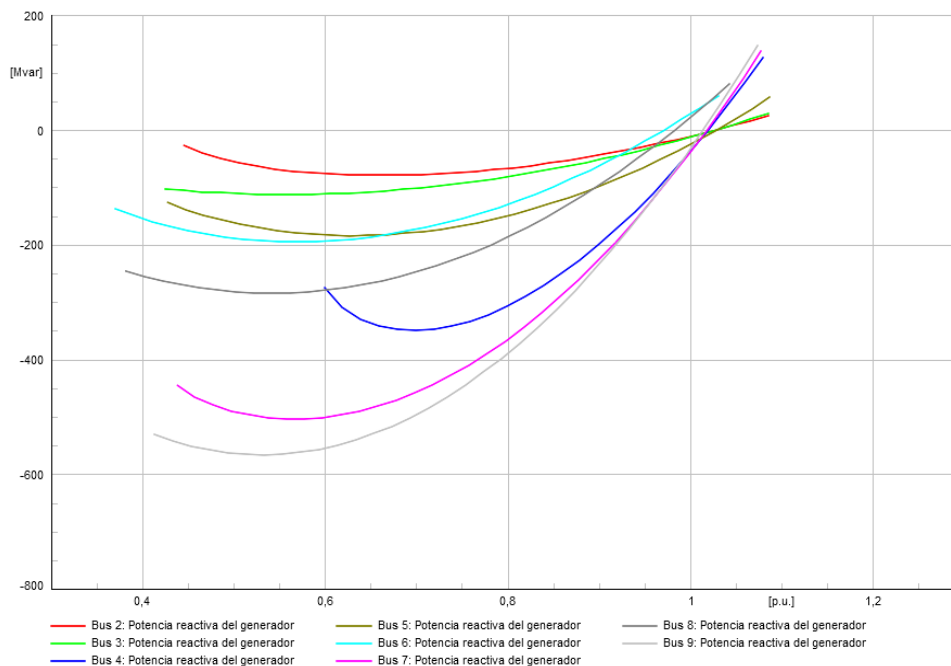
4.2.1.1 Caso 2.1: Utilización de Banco de Capacitor

Figura 364: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 375: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

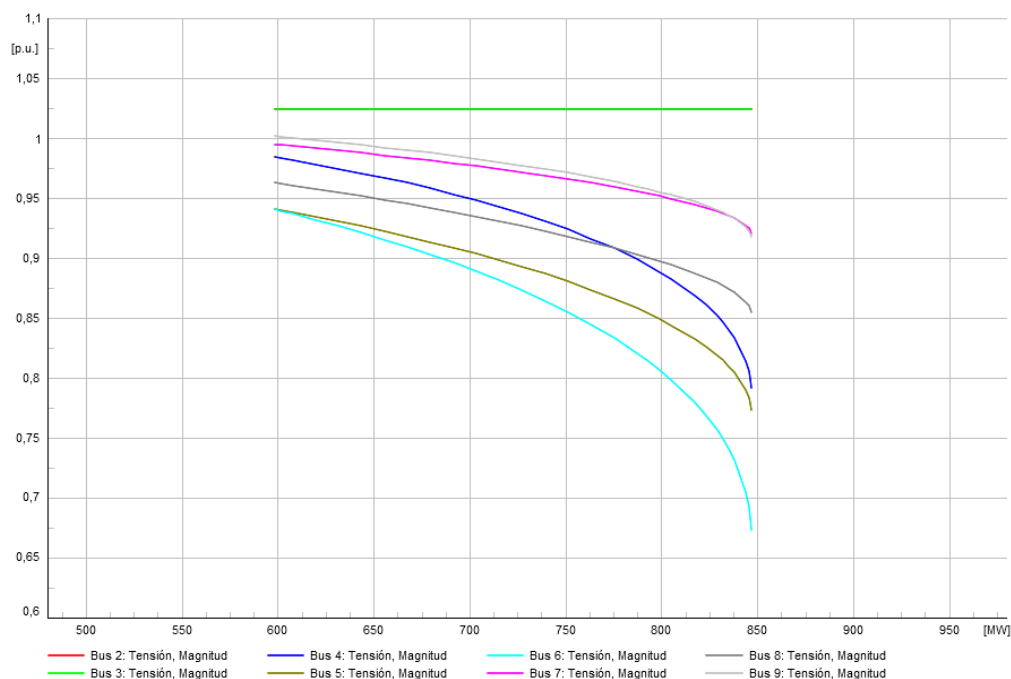
Tabla 6: Voltajes (p.u) de la barra 5 con capacitores

		Sin Compensación de capacitores	Con compensación de Capacitores	
Nº	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,025	1,02
3	BUS_0003	1,03	1,025	1,02
4	BUS_0004	0,96	0,84	0,82
5	BUS_0005	0,89	0,77	0,84
6	BUS_0006	0,92	0,75	0,57
7	BUS_0007	0,98	0,93	0,81
8	BUS_0008	0,95	0,87	0,57
9	BUS_0009	1	0,94	0,41

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

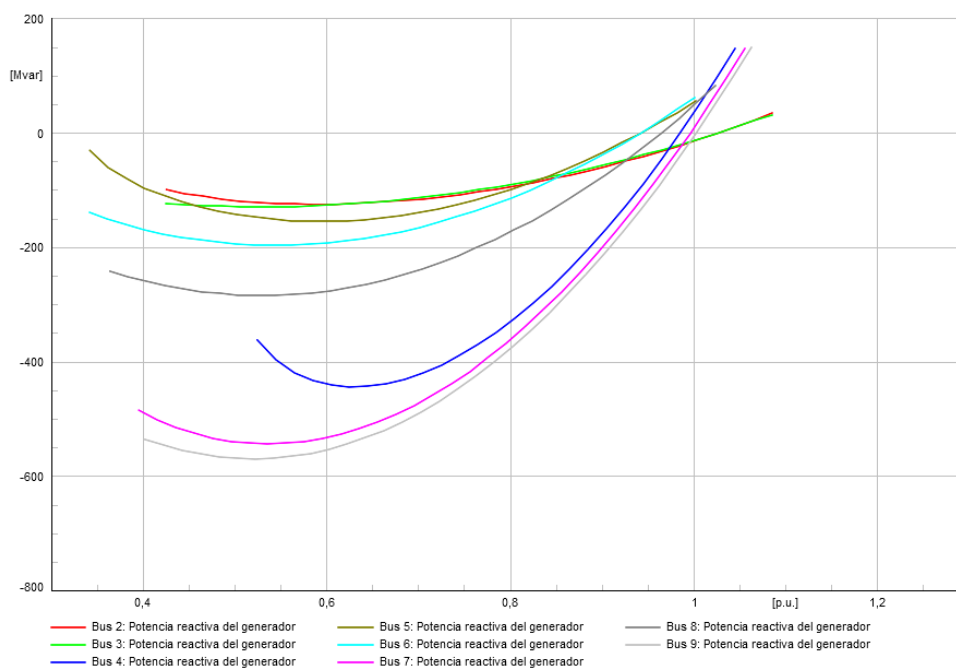
4.2.1.2 Utilización del SVC

Figura 386: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 397: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

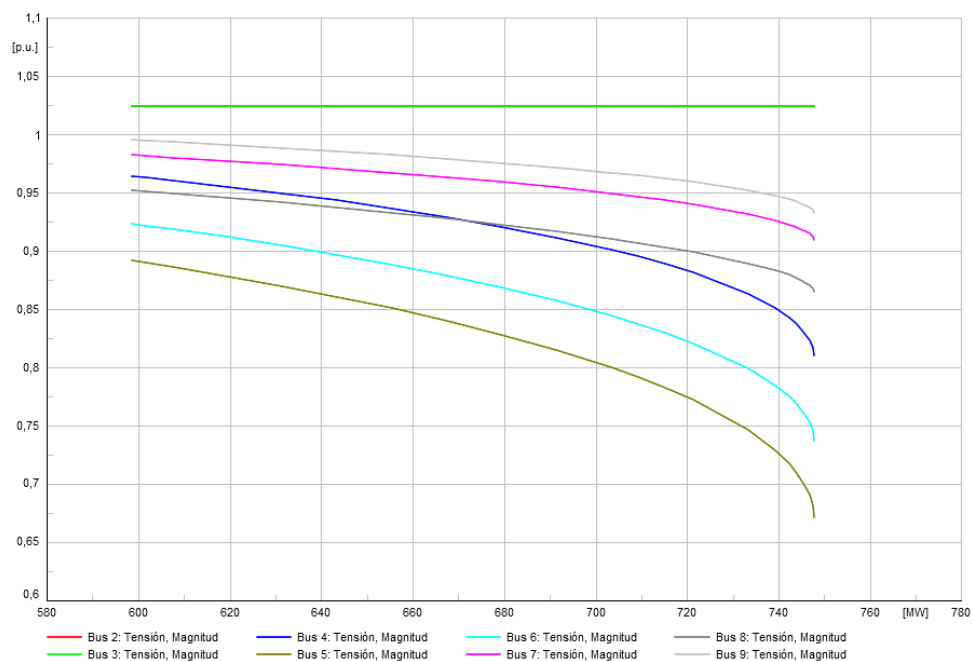
Tabla 7: Voltajes (p.u) de la barra 5 con SVC

		Sin Compensación de SVC	Con compensación de SVS	
N°	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,025	1,03
3	BUS_0003	1,03	1,025	1,03
4	BUS_0004	0,96	0,8	0,85
5	BUS_0005	0,89	0,78	0,85
6	BUS_0006	0,92	0,69	0,59
7	BUS_0007	0,98	0,92	0,82
8	BUS_0008	0,95	0,86	0,57
9	BUS_0009	1	0,92	0,4

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

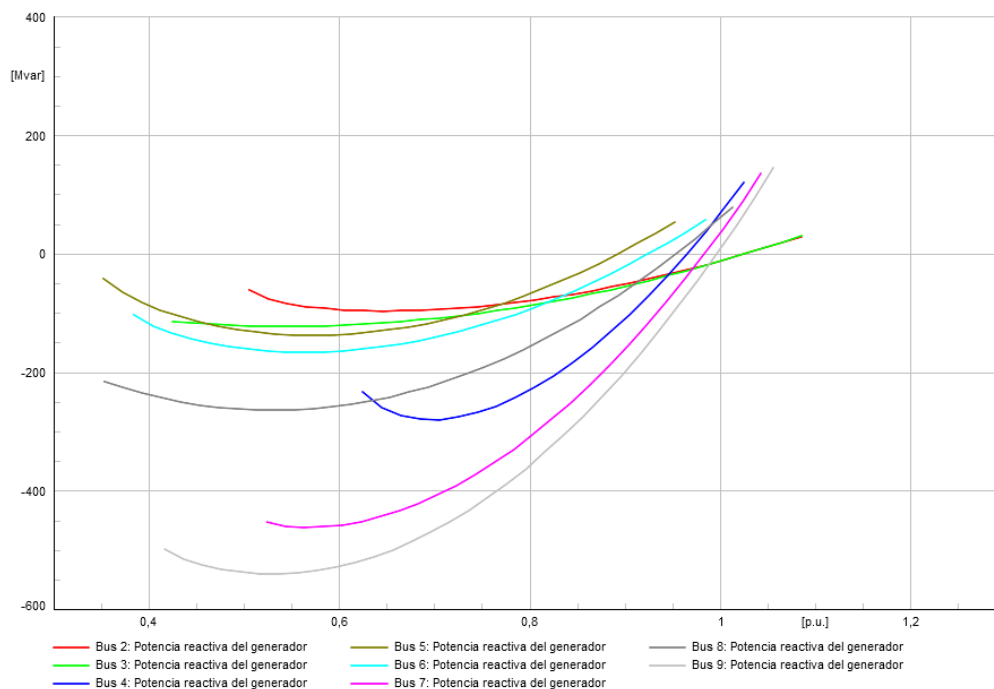
4.2.1.3 Caso 2.3: Utilización de STATCOM

Figura 40: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 41: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

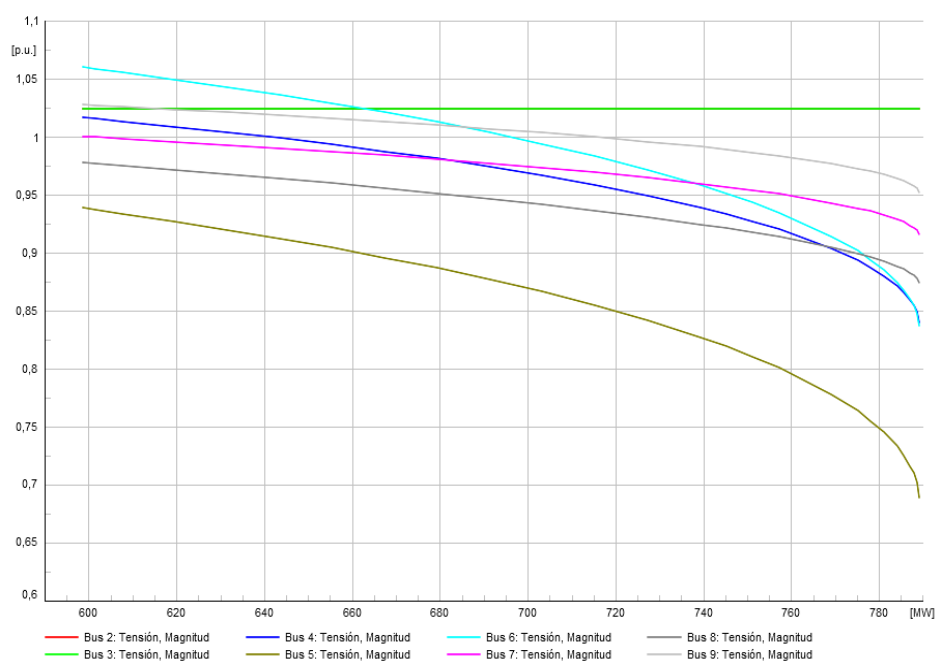
Tabla 8: Voltajes (p.u) de la barra 5 con STATCOM

		Sin compensación de STATCOM	Con compensación de STATCOM	
N°	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,03	1,02
3	BUS_0003	1,03	1,03	1,02
4	BUS_0004	0,96	0,82	0,82
5	BUS_0005	0,89	0,80	0,86
6	BUS_0006	0,92	0,74	0,56
7	BUS_0007	0,98	0,92	0,81
8	BUS_0008	0,95	0,87	0,56
9	BUS_0009	1	0,93	0,42

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

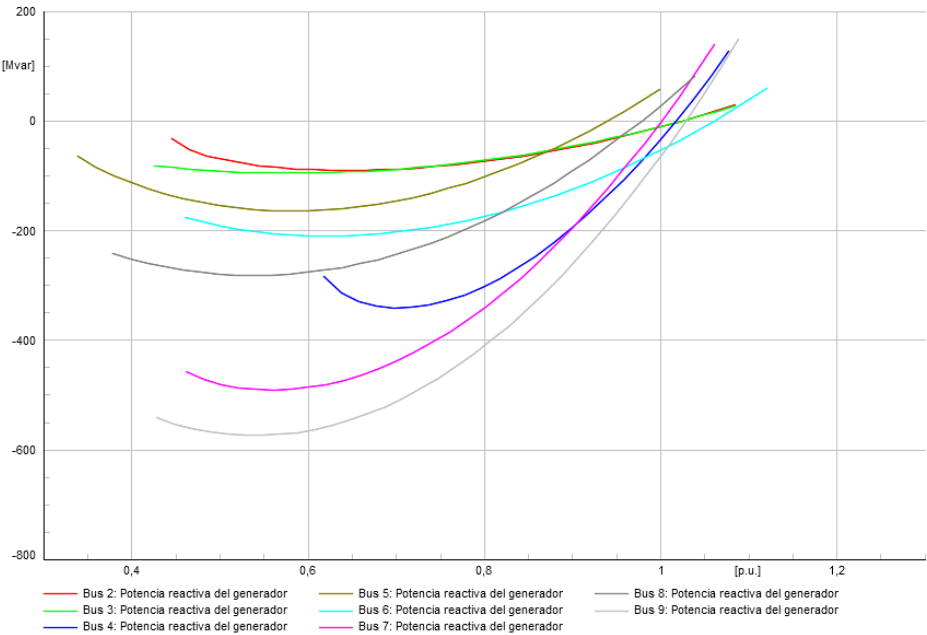
4.2.2 Casos en la barra 6

4.2.2.1 Caso 2.5: Utilización de Banco de Capacitores

Figura 42: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVAR con capacitores al 90% de carga

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 43: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVAR con capacitores al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

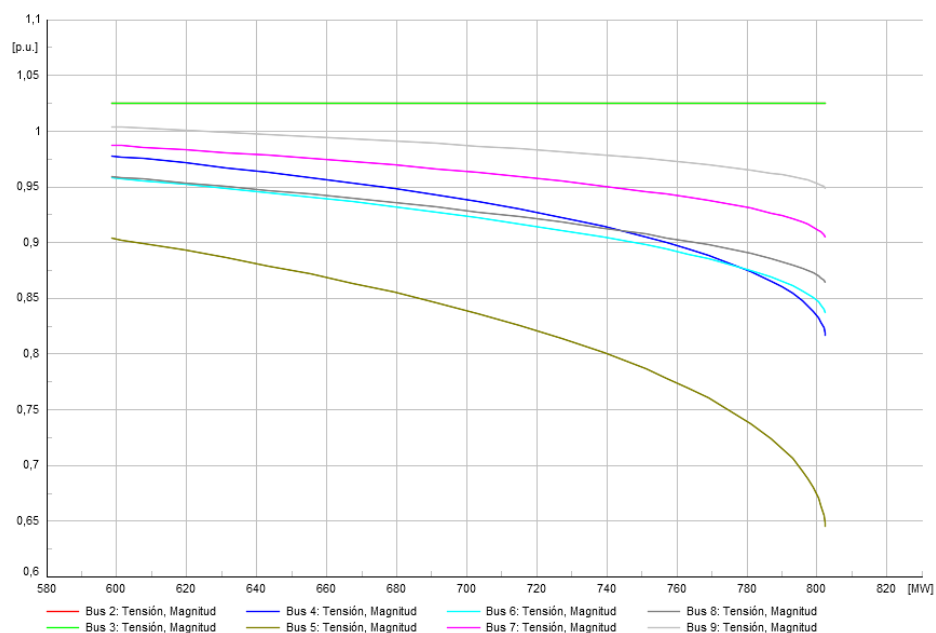
Tabla 9: Voltajes (p.u) de la barra 6 con capacitores

		Sin Compensación de capacitores	Con compensación de Capacitores	
Nº	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,025	1,02
3	BUS_0003	1,03	1,025	1,02
4	BUS_0004	0,96	0,84	0,81
5	BUS_0005	0,89	0,69	0,69
6	BUS_0006	0,92	0,83	0,70
7	BUS_0007	0,98	0,91	0,8
8	BUS_0008	0,95	0,87	0,56
9	BUS_0009	1	0,95	0,43

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

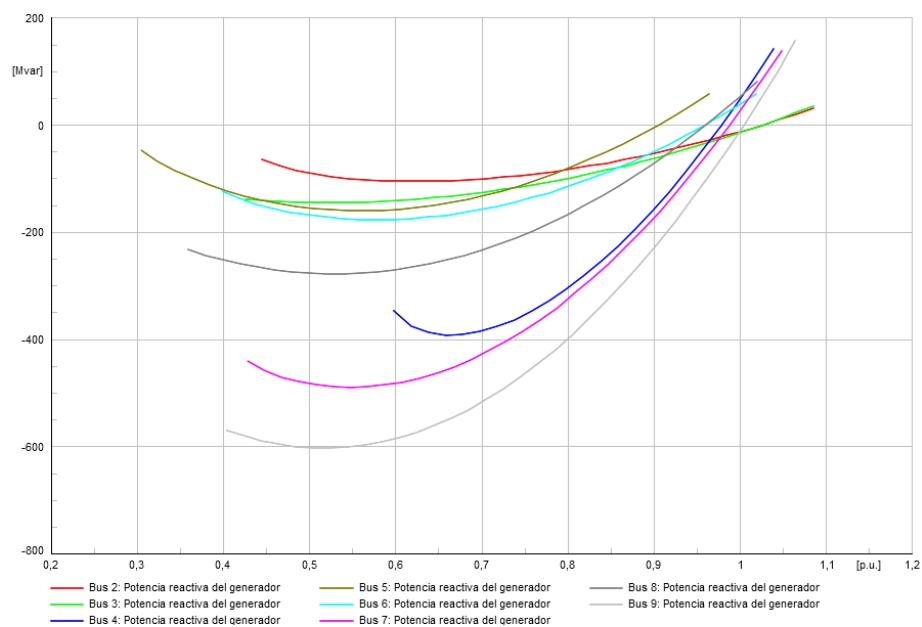
4.2.2.2 Caso 2.5: Utilización de SVC

Figura 44: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 45: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

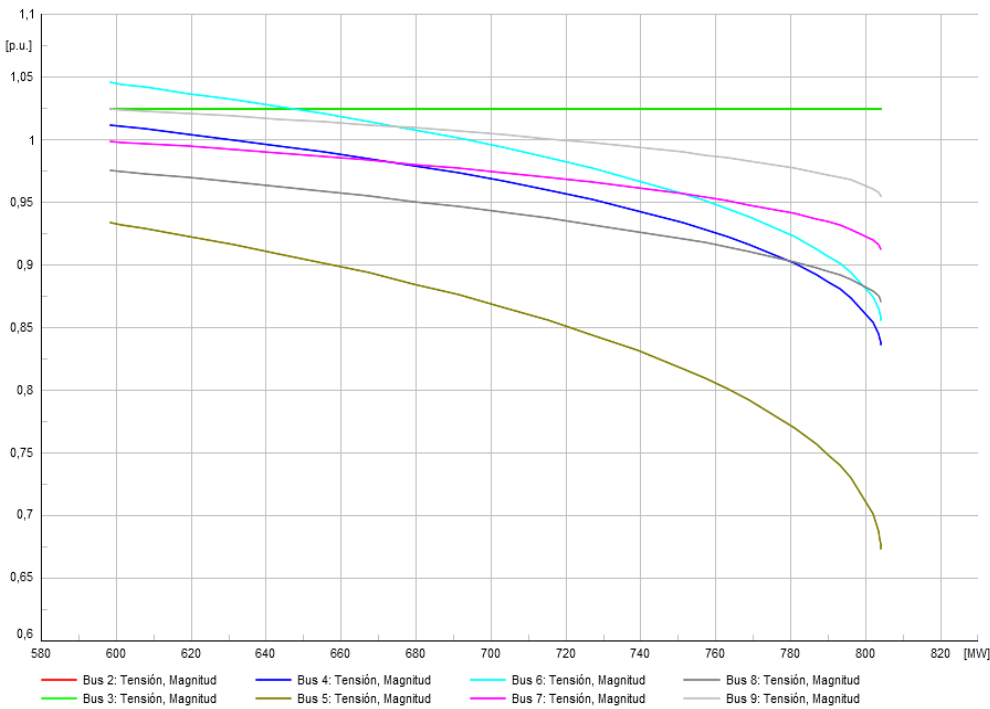
Tabla 10: Voltajes (p.u) de la barra 6 con SVC

		Sin Compensación de SVC	Con compensación de SVS	
N°	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,03	1,03
3	BUS_0003	1,03	1,03	1,03
4	BUS_0004	0,96	0,82	0,87
5	BUS_0005	0,89	0,65	0,74
6	BUS_0006	0,92	0,84	0,77
7	BUS_0007	0,98	0,9	0,8
8	BUS_0008	0,95	0,86	0,55
9	BUS_0009	1	0,95	0,4

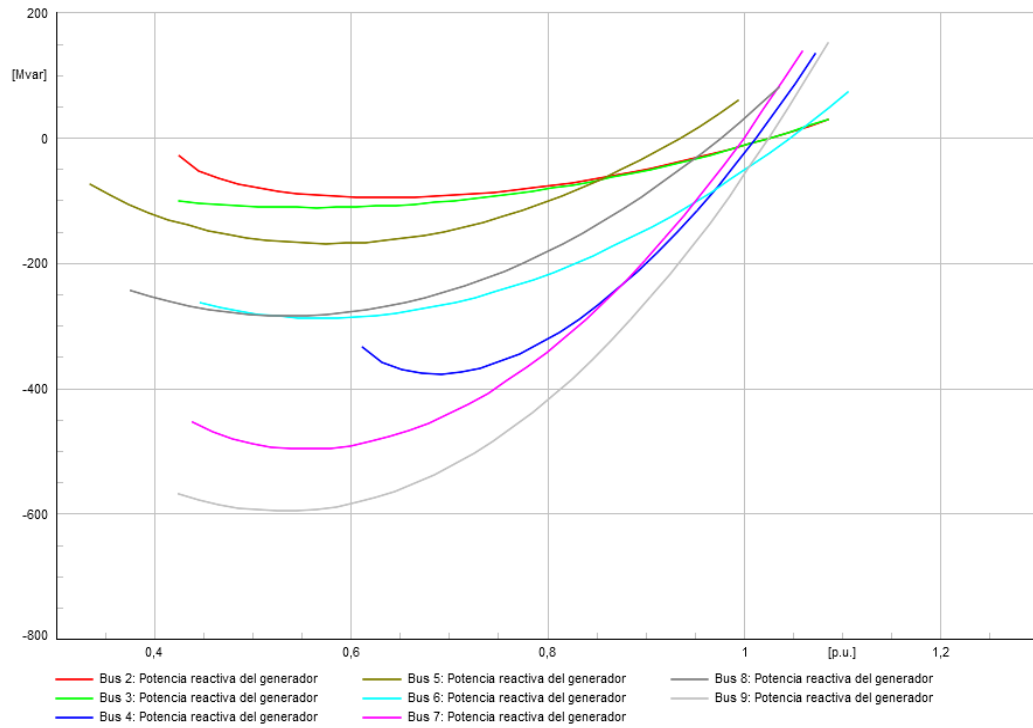
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

4.2.2.3 Caso 2.6: Utilización de STATCOM

Figura 46: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVAR con STATCOM al 90% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 47: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 90% de carga

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Tabla 11: Voltajes (p.u) de la barra 6 con STATCOM

		Sin Compensación de STATCOM	Con compensación de STATCOM	
Nº	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1,03	1,025	1,02
3	BUS_0003	1,03	1,025	1,02
4	BUS_0004	0,96	0,84	0,82
5	BUS_0005	0,89	0,68	0,70
6	BUS_0006	0,92	0,86	0,79
7	BUS_0007	0,98	0,92	0,70
8	BUS_0008	0,95	0,87	0,57
9	BUS_0009	1	0,95	0,42

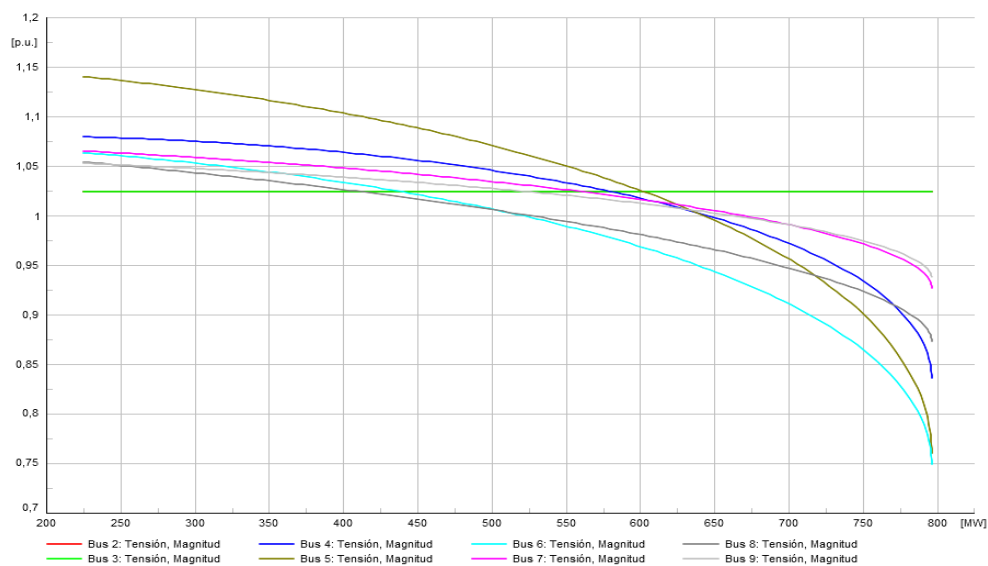
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

4.3 Caso 3: Carga mínima 40%

4.3.1 Casos en la barra 5

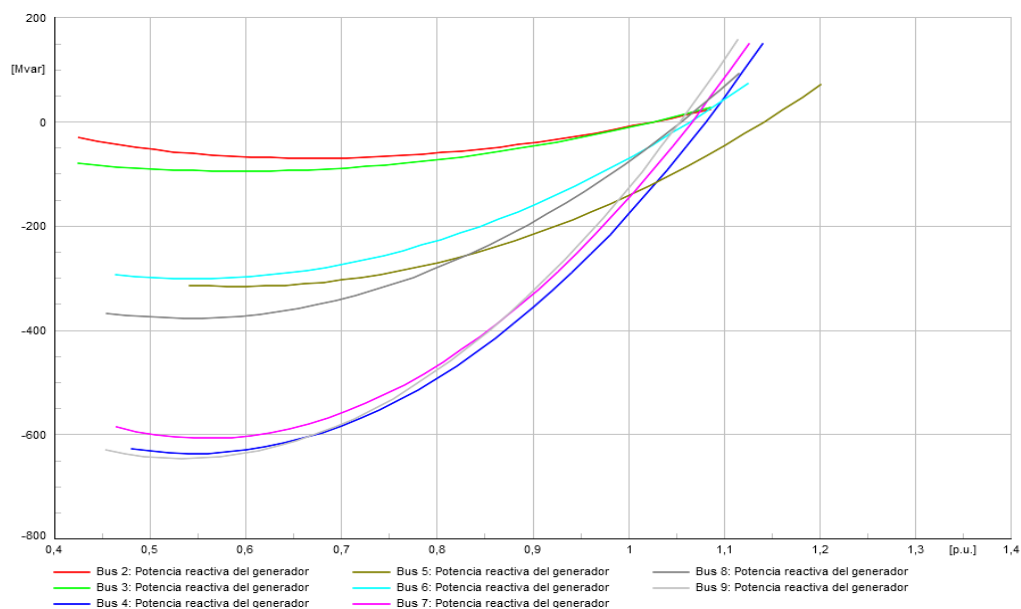
4.3.1.1 Caso 3.1: Utilización de Banco de Capacitores

Figura 48: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 49: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con capacitores al 40% de carga



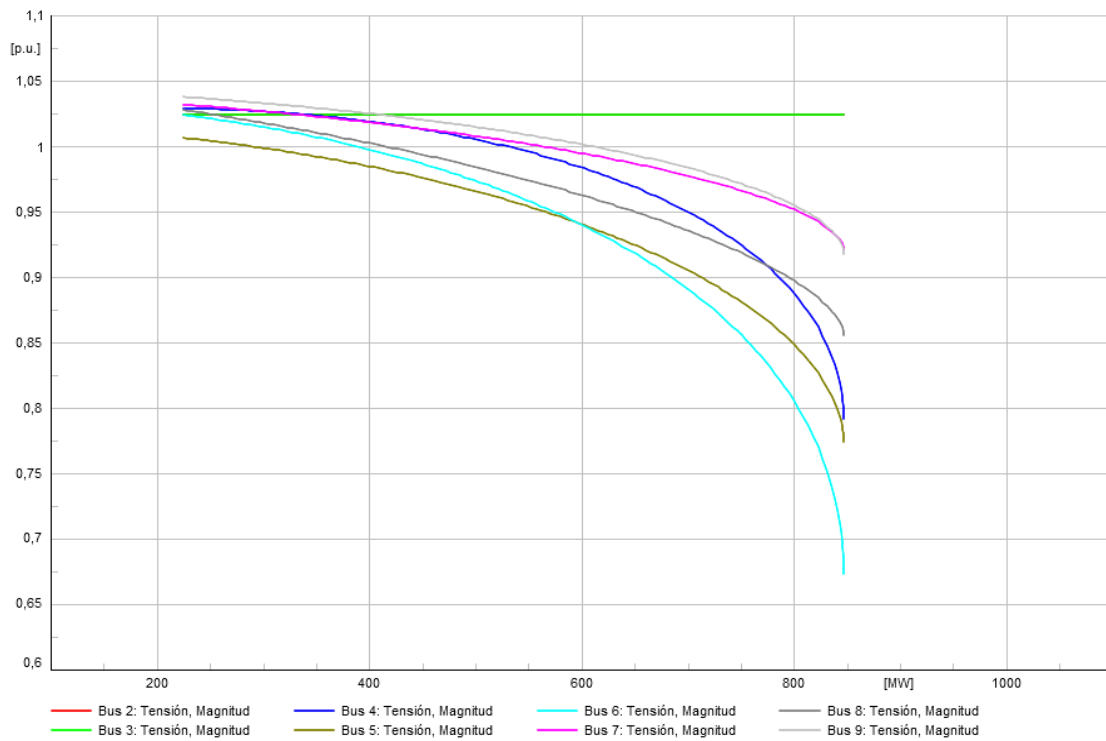
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Tabla 12: Voltajes (p.u) de la barra 5 con Capacitores

		Sin Compensación de capacitores	Con compensación de Capacitores	
N°	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1.03	1,03	1,02
3	BUS_0003	1.02	1,03	1,03
4	BUS_0004	1.03	0,84	0,94
5	BUS_0005	1.01	0,76	0,90
6	BUS_0006	1.03	0,75	0,75
7	BUS_0007	1.03	0,93	0,9
8	BUS_0008	1.03	0,87	0,69
9	BUS_0009	1.04	0,94	0,45

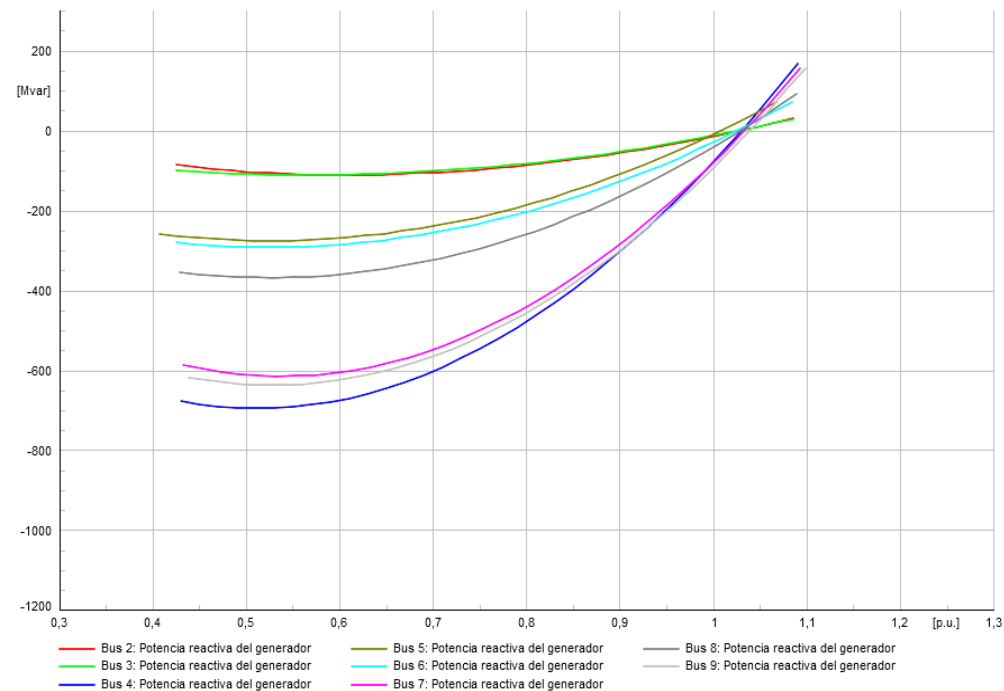
Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

4.3.1.2 Caso 3.2: Utilización de SVC

Figura 50: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 40% de carga

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 51: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con SVC al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

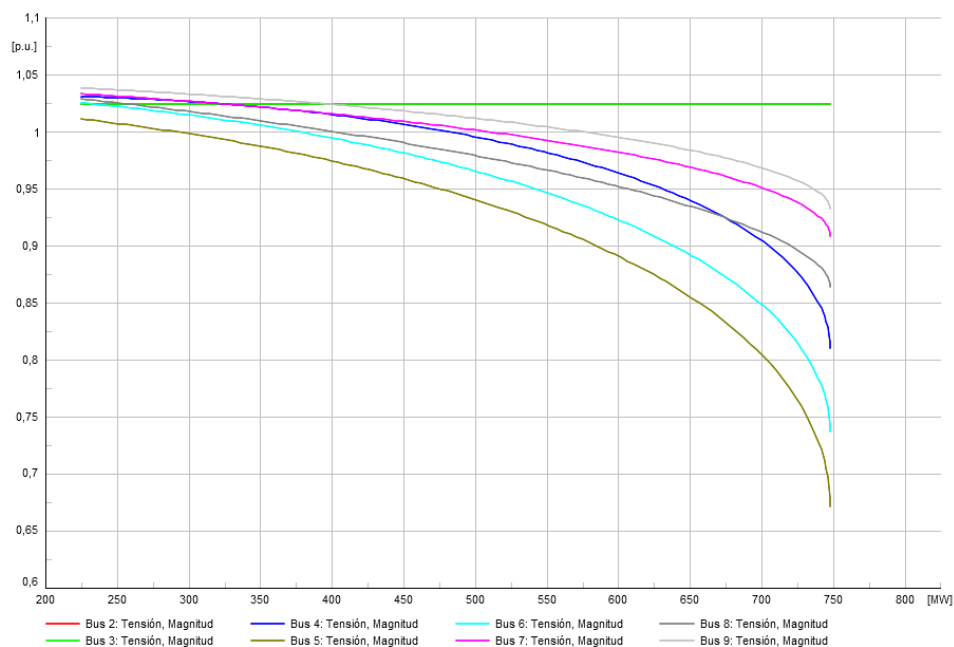
Tabla 13: Voltajes (p.u) de la barra 5 con SVC

Sin Compensación de SVC			Con compensación de SVC	
Nº	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-v}
2	BUS_0002	1.03	1,03	1,02
3	BUS_0003	1.02	1,03	1,03
4	BUS_0004	1.03	0,79	0,92
5	BUS_0005	1.01	0,77	0,92
6	BUS_0006	1.03	0,67	0,72
7	BUS_0007	1.03	0,92	0,88
8	BUS_0008	1.03	0,86	0,68
9	BUS_0009	1.04	0,92	0,44

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

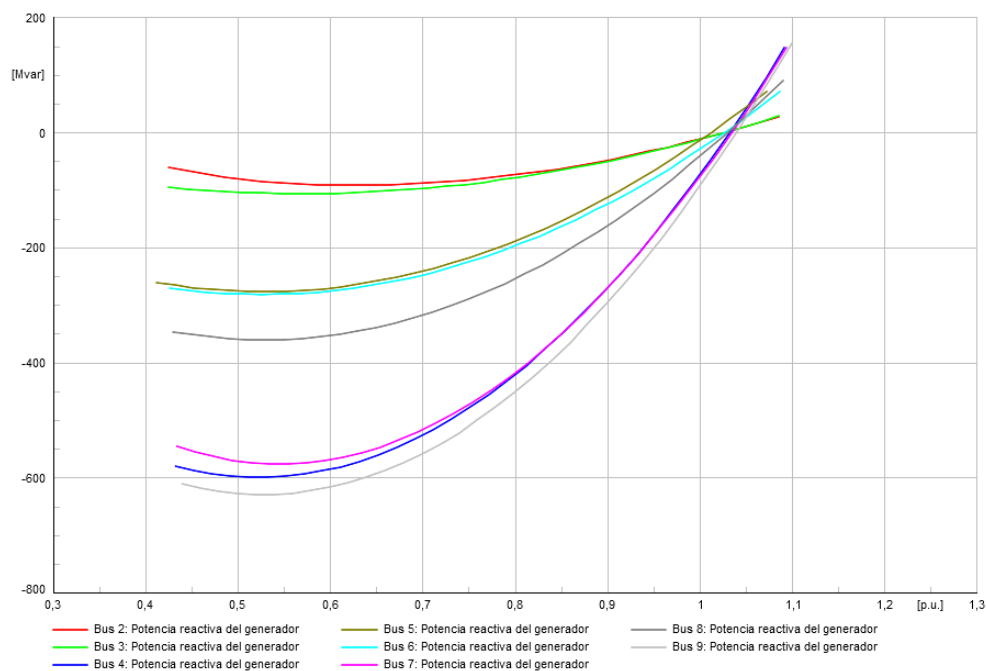
4.3.1.3 Caso 3.3: Utilización de STATCOM

Figura 52: Curva P-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 53: Curva Q-V de la barra 5 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

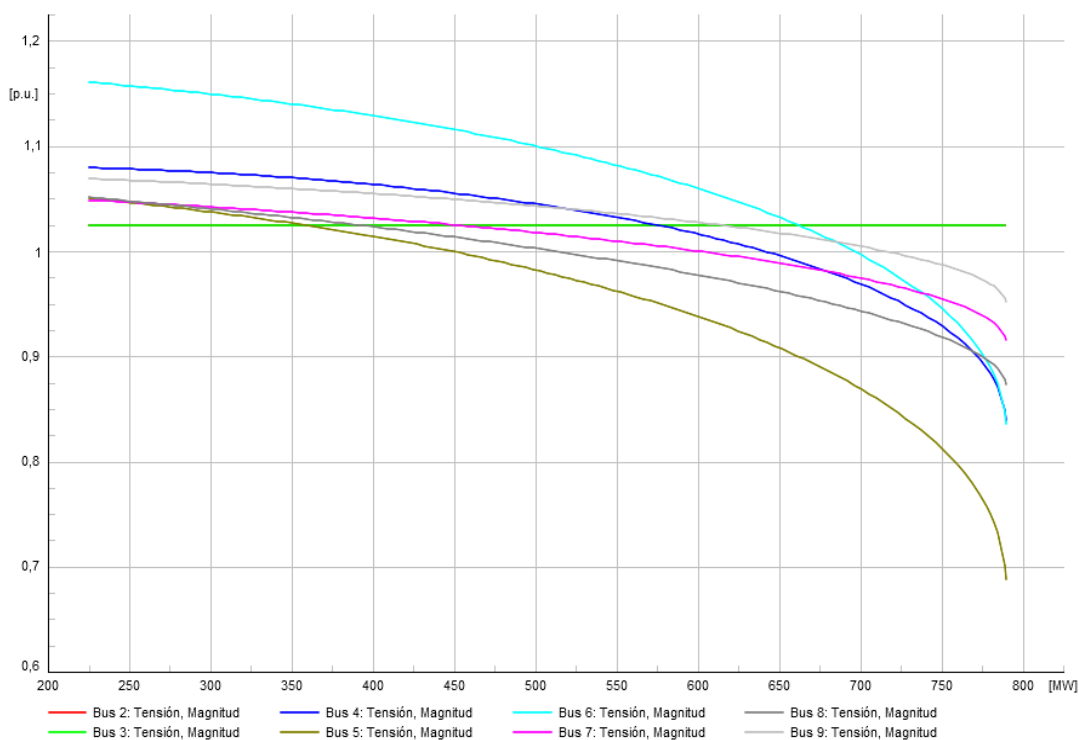
Tabla 14: Voltajes (p.u) de la barra 5 con STATCOM

N°	Sin Compensación de STATCOM		Con compensación de STATCOM	
	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1.03	1.025	1,02
3	BUS_0003	1.02	1.025	1,03
4	BUS_0004	1.03	0.83	0.93
5	BUS_0005	1.01	0.79	0,94
6	BUS_0006	1.03	0.74	0.74
7	BUS_0007	1.03	0.92	0.89
8	BUS_0008	1.03	0.87	0.69
9	BUS_0009	1.04	0.93	0.45

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

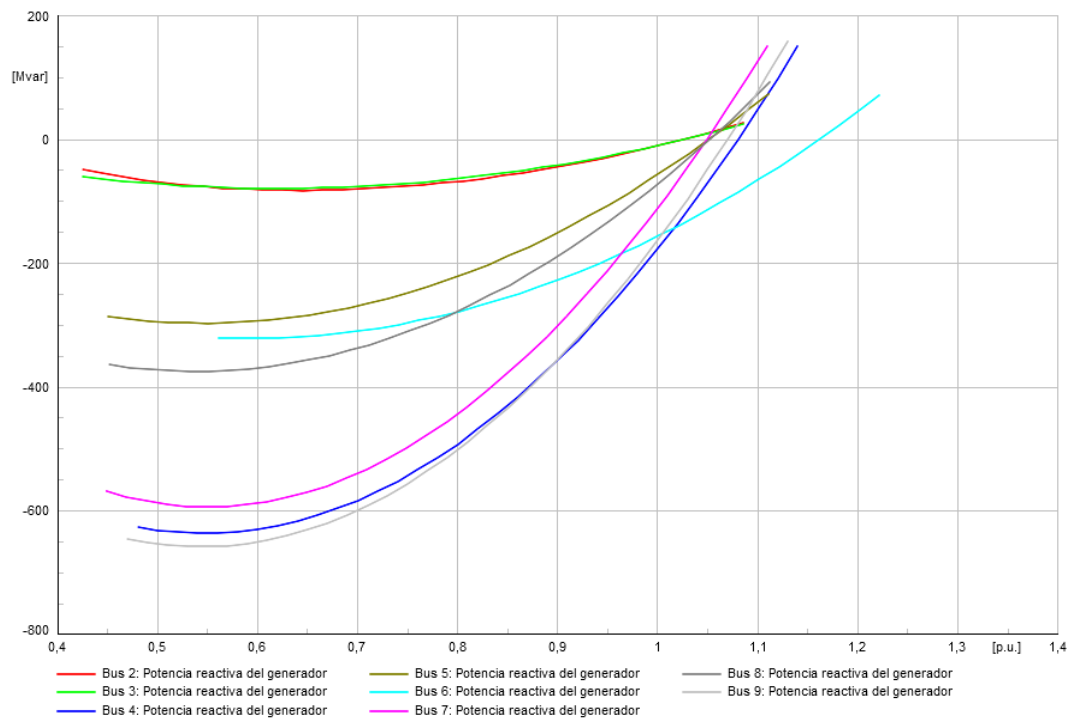
4.3.2 Casos en la barra 6

4.3.2.1 Caso 3.4: Utilización de Banco de Capacitores

Figura 54: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con Capacitores al 40% de carga

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 55: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con Capacitores al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

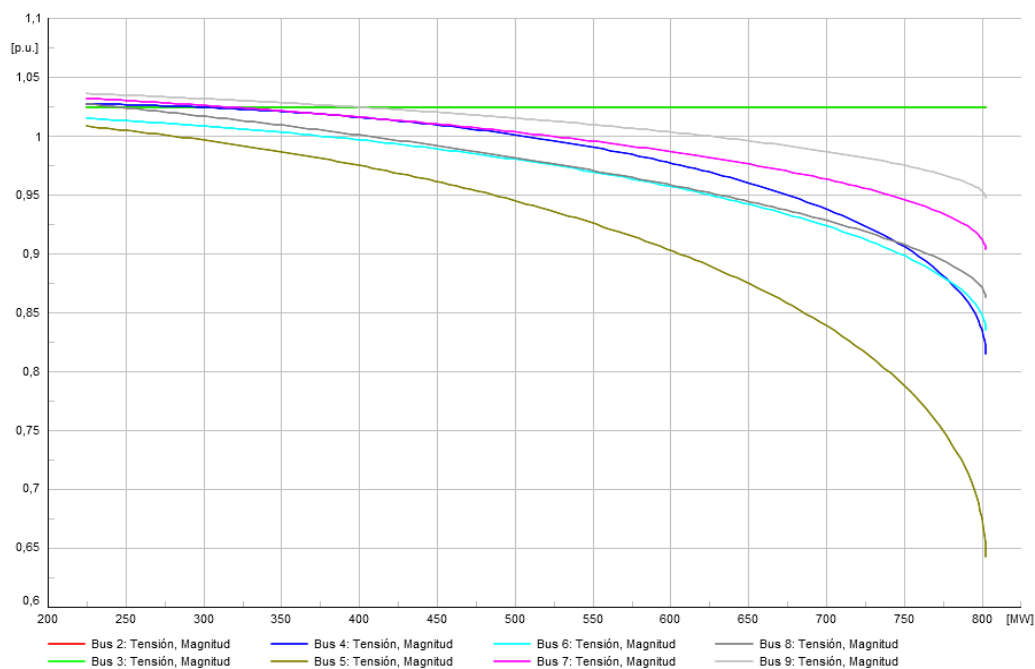
Tabla 15: Voltajes (p.u) de la barra 6 con Capacitores

N°	Sin Compensación de capacitores		Con compensación de capacitores	
	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1.03	1,025	1,02
3	BUS_0003	1.02	1,025	1,03
4	BUS_0004	1.03	0,85	0,94
5	BUS_0005	1.01	0,7	0,89
6	BUS_0006	1.03	0,84	0,81
7	BUS_0007	1.03	0,92	0,88
8	BUS_0008	1.03	0,87	0,69
9	BUS_0009	1.04	0,95	0,47

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

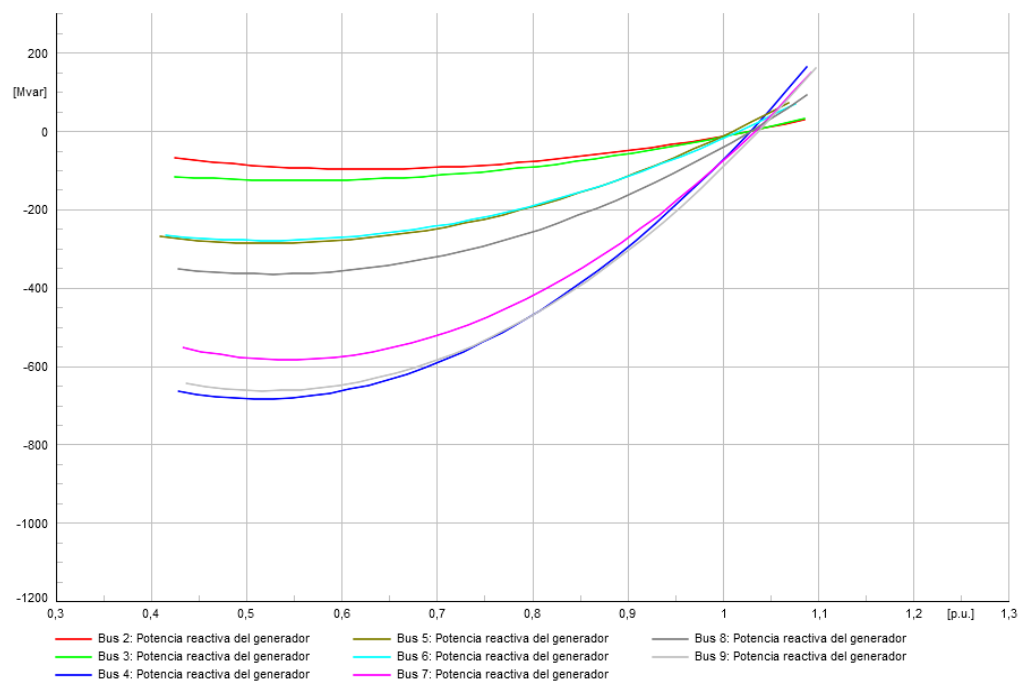
4.3.2.2 Caso 3.5: Utilización de SVC

Figura 56: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Figura 57: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con SVC al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

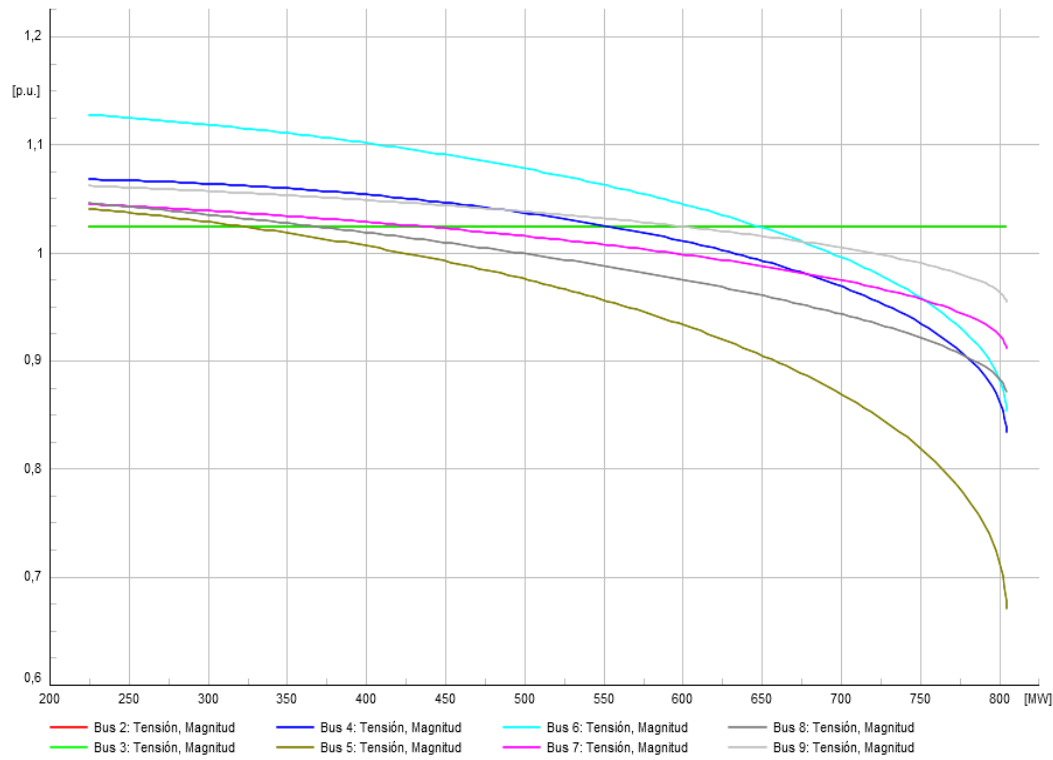
Tabla 16: Voltajes (p.u) de la barra 6 con SVC

Sin Compensación de SVC			Con compensación de SVC	
N	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1.03	1,03	1,02
3	BUS_0003	1.02	1,03	1,03
4	BUS_0004	1.03	0,82	0,95
5	BUS_0005	1.01	0,64	0,89
6	BUS_0006	1.03	0,85	0,83
7	BUS_0007	1.03	0,9	0,87
8	BUS_0008	1.03	0,86	0,67
9	BUS_0009	1.04	0,95	0,44

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

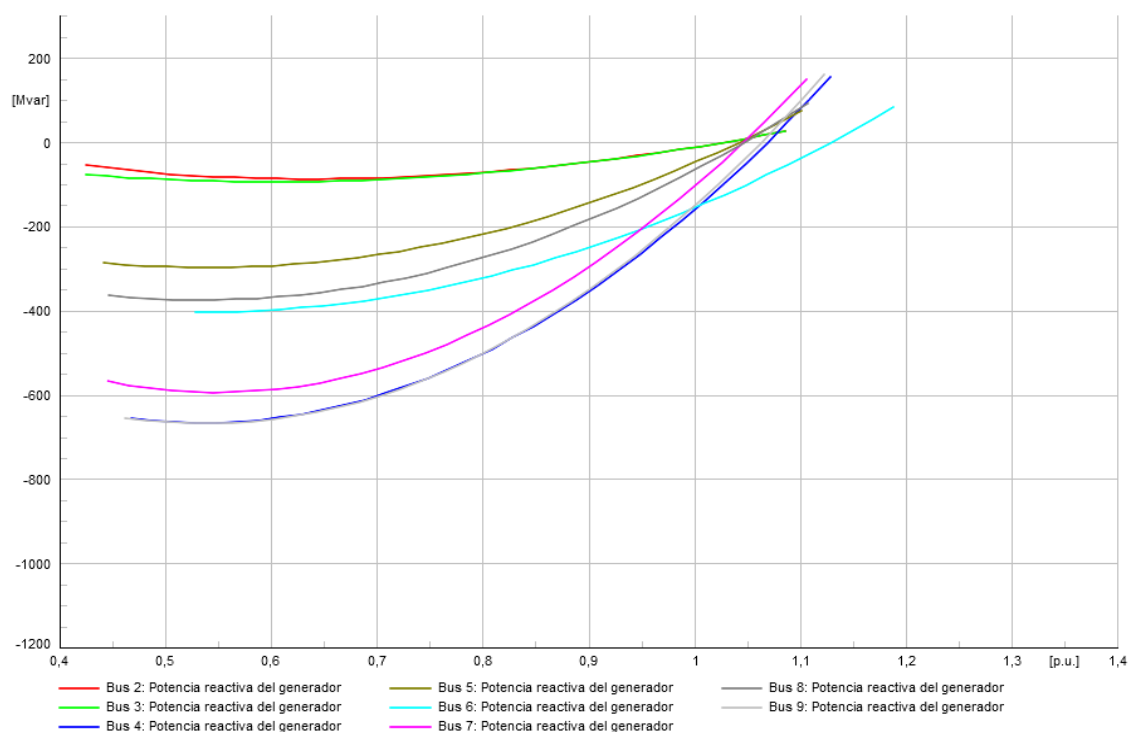
4.3.2.3 Caso 3.6: Utilización de STATCOM

Figura 58: Curva P-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga



Fuente: DigSilent Power Factory (2021), propia, 2024.

Figura 59: Curva Q-V de la barra 6 con 128 MVar con STATCOM al 40% de carga



Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

Tabla 17: Voltajes (p.u) de la barra 6 con STATCOM

N°	Sin Compensación de SATCOM		Con compensación de STATCOM	
	N BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
2	BUS_0002	1.03	1,025	1,02
3	BUS_0003	1.02	1,025	1,03
4	BUS_0004	1.03	0,84	0,94
5	BUS_0005	1.01	0,68	0,9
6	BUS_0006	1.03	0,87	0,85
7	BUS_0007	1.03	0,91	0,88
8	BUS_0008	1.03	0,87	0,68
9	BUS_0009	1.04	0,95	0,46

Fuente: DigSilent PowerFactory (2021), propia, 2024.

5 Capítulo V: Análisis de los casos

Para la comprobación de cada caso de estudio establecido anteriormente en donde los datos de la red de prueba IEEE siendo el modelo de 9 barras, las cuales, cambiarán, en primera instancia se mantendrán los valores base para corroborar como se encuentra el sistema, en el caso 1 se trabaja con (máxima carga), en el caso 2 se modifica valores a (mínima carga). Se efectúa un análisis de los perfiles de tensión al colocar de manera no heurística la compensación reactiva en las barras a estudiar. Se ejecutarán comparaciones en estado inicial sin implementación de la compensación y cuando se implementa la compensación.

5.1 Análisis del perfil de tensión con carga en su máxima capacidad en el sistema de prueba IEEE de 9 barras

Al momento de realizar el análisis con los diferentes métodos de suministración de potencia reactiva proveniente de la solución del flujo de potencia y utilización de las curvas P-V y Q-V. En el estudio de la curva V_{P-V} se observa que las barras 5 (0,67 pu), barra 6 (0,74 pu) y la barra 8 (0,86 pu) son las más inestables; ya que cuenta con cargas considerables siendo posible análisis en estas barras. En la curva V_{Q-V} la barra 9 (0,43 pu) es la más inestable, pero tiene una compensación reactiva considerable al sistema. Con lo que se concluye que la barra 5 (0,84 p.u.) y barra 6 (0,69 p.u.) son las que se tomaran para el análisis y consiguiente colocación de la compensación reactiva con los tres equipos.

Tabla 18: Datos de tensión en p.u.

Nº BARRA	$V_{p.u}$	V_{P-V}	V_{Q-V}
BUS_1	1,04	1,04	1,04
BUS_2	1,02	1,03	1,02
BUS_3	1,02	1,03	1,03
BUS_4	1,03	0,81	0,89
BUS_5	1	0,67	0,84
BUS_6	1,01	0,74	0,69
BUS_7	1,03	0,91	0,86

BUS_8	1,02	0,86	0,65
BUS_9	1,03	0.93	0.43

Para mejorar el sistema, se conectar los diferentes equipos de compensación en las barras más débiles y analizaremos en dos casos basándonos en la tabla 18 como el caso 1:

5.1.1 Caso 2 en Máxima cargabilidad:

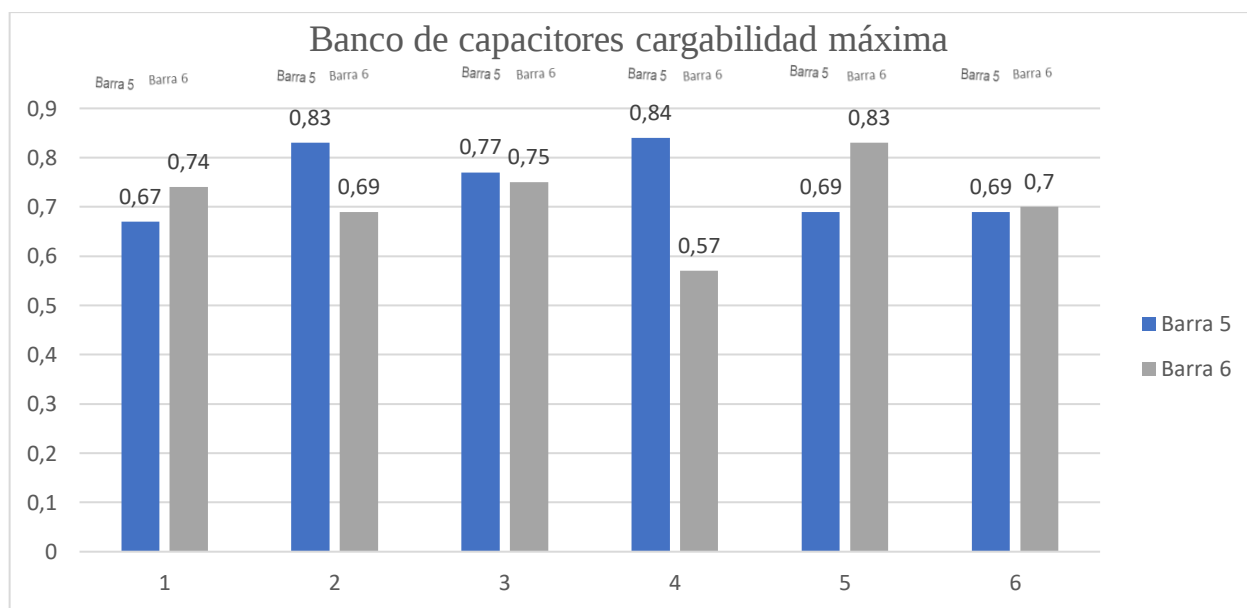
Siendo los siguientes valores con los que se trabajó:

Cargas	Unidades	Valores
Carga 1	Potencia activa	237,5 MW
	Potencia reactiva	95 MVar
Carga 2	Potencia activa	171 MW
	Potencia reactiva	57 MVar
Carga 3	Potencia activa	190 MW
	Potencia reactiva	66,5 MVar

En este caso, se suministra potencia reactiva a través del componente mencionado como es el Banco de Capacitores en las barras 5 y 6 con 128 MVar, esto se da por que estas barras son las más débiles y no alcanzan la tensión critica si se ubica más potencia reactiva. Al examinar los valores de las dos curvas P-V y Q-V como se muestra en la tabla 19 existe una mejora de la tensión en la barra 5 en V_{P-V} de 0,67 p.u. a 0,77 p.u. y en V_{Q-V} de 0,83 p.u. a 0.77 pu, en tanto, la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 p.u. a 0,83 p.u. y en V_{Q-V} de 0,69 p.u. a 0,63 pu también mejorando en otras barras como se observa en la tabla 19.

Tabla 19: Tensiones (p.u.) sin banco de capacitores y con banco de capacitores

N° Barras	Sin compensación de capacitores		Con compensación de Capacitores en la Barra 5		Con compensación de Capacitores en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,025	1,02	1,025	1,02
Barra 3	1,025	1,03	1,025	1,02	1,025	1,02
Barra 4	0,81	0,89	0,84	0,82	0,84	0,81
Barra 5	0,67	0,83	0,77	0,84	0,69	0,69
Barra 6	0,74	0,69	0,75	0,57	0,83	0,70
Barra 7	0,91	0,86	0,93	0,81	0,91	0,8
Barra 8	0,86	0,65	0,87	0,57	0,87	0,56
Barra 9	0,93	0,43	0,94	0,41	0,95	0,43

Figura 60: Tensiones en p.u. con banco de capacitores

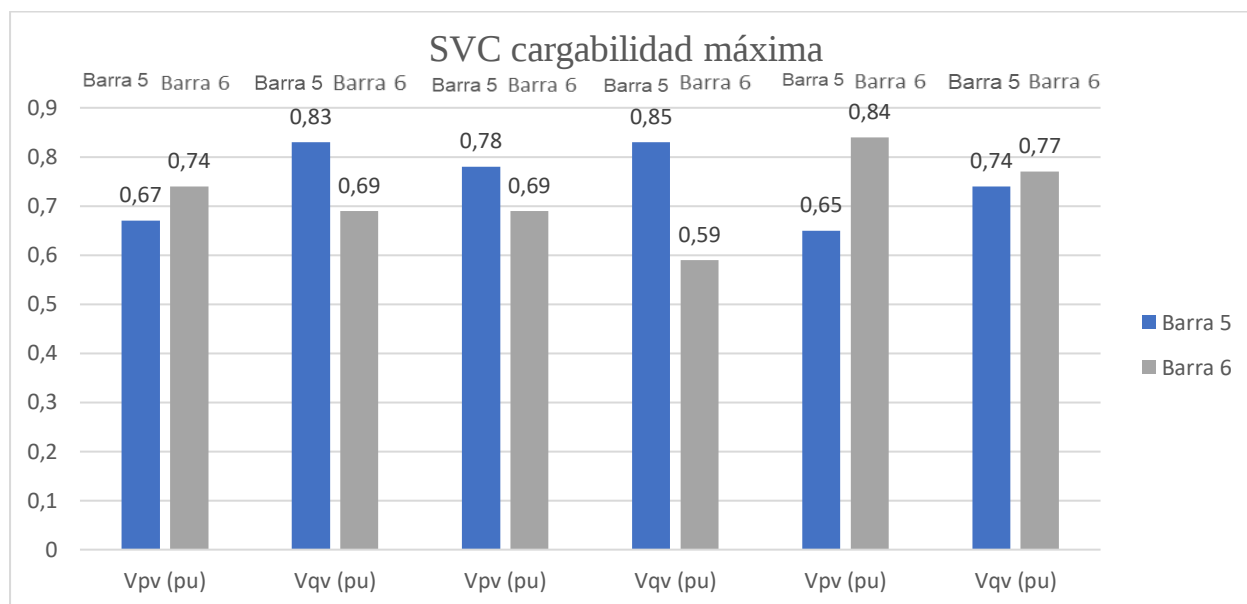
La figura 58 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u) y V_{Q-V} (p.u), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de banco de capacitores en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u) de la barra 5 es 0.67 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u) el valor de la barra 5 es 0.83 y el valor de la barra 6 es

0.69. Ahora aplicando la compensación mediante banco de capacitores en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.77 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.84. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.69 la barra 6 es de 0.83, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.70 siendo el punto crítico de operación.

De igual manera se proporciona potencia reactiva con el SVC en las barras 5 y 6 con 128 MVar, ya que se sabe que son las barras débiles. Al estudiar los valores de las curvas P-V y Q-V como se observa en la tabla 20 se cuenta con una mejora en las tensiones de la barra 5 en V_{P-V} de 0,67 p.u a 0,78 p.u. y en V_{Q-V} de 0,83 pu a 0,83 pu, en cambio, en la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 pu a 0,84 pu y en V_{Q-V} de 0,69 p.u. a 0,77 p.u. también mejorando a otras barras como se muestra en la tabla.

Tabla 20: Tensiones (p.u.) sin SVC y con SVC

N° Barras	Sin compensación de SVC		Con compensación de SVC en la Barra 5		Con compensación de SVC en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,025	1,03	1,03	1,03
Barra 3	1,025	1,03	1,025	1,03	1,03	1,03
Barra 4	0,81	0,89	0,8	0,85	0,82	0,87
Barra 5	0,67	0,83	0,78	0,85	0,65	0,74
Barra 6	0,74	0,69	0,69	0,59	0,84	0,77
Barra 7	0,91	0,86	0,92	0,82	0,9	0,8
Barra 8	0,86	0,65	0,86	0,57	0,86	0,55
Barra 9	0,93	0,43	0,92	0,4	0,95	0,4

Figura 61: Tensiones en p.u. con SVC

La figura 59 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u) y V_{Q-V} (p.u), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de SVC en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u) de la barra 5 es 0.67 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u) el valor de la barra 5 es 0.83 y el valor de la barra 6 es 0.69. Ahora aplicando la compensación mediante el SVC en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.78 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.85. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) en la barra 6 es de 0.84, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.77 siendo el punto crítico de operación.

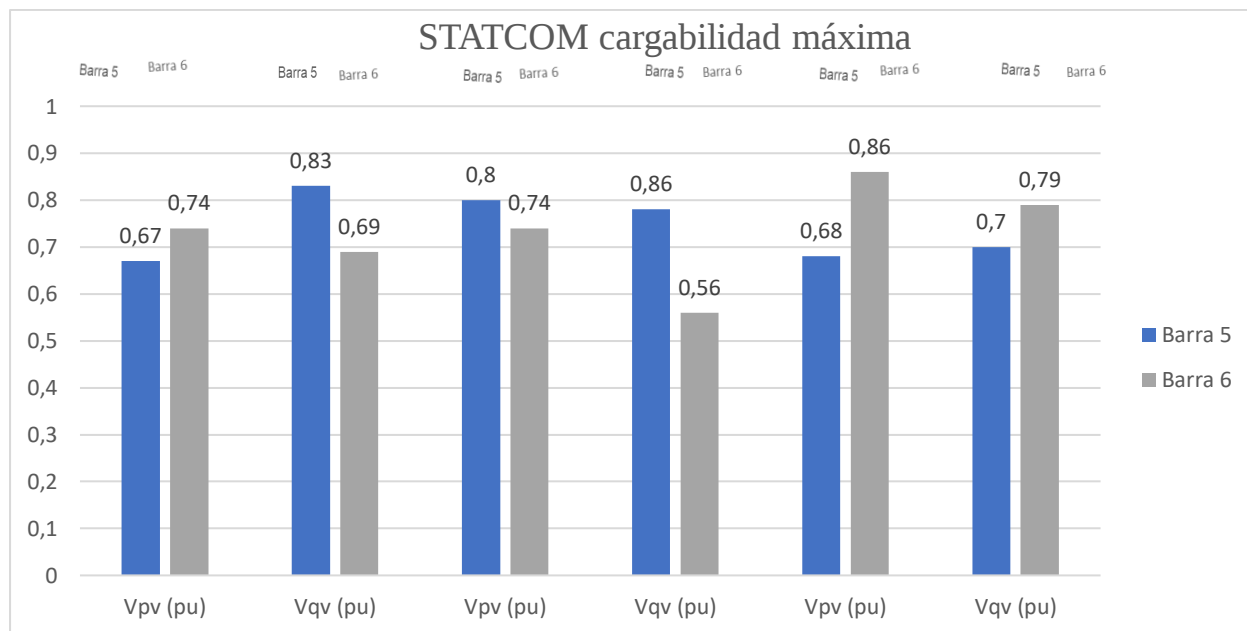
De manera similar, se suministra potencia reactiva con STATCOM en las barras 5 y 6 con 128 MVar, sabiendo que son barras débiles que sirven para el estudio y no alcanzan la tensión crítica al colocar la compensación. Al analizar los valores de las curvas P-V y Q-V como se observa en la tabla 21 se encuentra una mejoría de la tensión en la barra 5 en V_{P-V} de 0,67 p.u. a 0,68 p.u.

y en V_{Q-V} de 0,83 p.u. a 0,73 p.u. en tanto, en la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 p.u. a 0,86 p.u. y en V_{Q-V} de 0,69 p.u. a 0,73 pu asimismo mejorando en otras barras como se muestra en la tabla.

Tabla 21: Tensiones (p.u.) sin STATCOM y con STATCOM

N° de barras	Sin compensación de STATCOM		Con compensación de STATCOM en la Barra 5		Con compensación de STATCOM en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,03	1,02	1,025	1,02
Barra 3	1,025	1,03	1,03	1,02	1,025	1,02
Barra 4	0,81	0,89	0,82	0,82	0,84	0,82
Barra 5	0,67	0,83	0,80	0,86	0,68	0,70
Barra 6	0,74	0,69	0,74	0,56	0,86	0,79
Barra 7	0,91	0,86	0,92	0,81	0,92	0,70
Barra 8	0,86	0,65	0,87	0,56	0,87	0,57
Barra 9	0,93	0,43	0,93	0,42	0,95	0,42

Figura 62: Tensiones en p.u. con STATCOM



La figura 60 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u.) y V_{Q-V} (p.u.), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de STATCOM en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún

tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u) de la barra 5 es 0.67 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u) el valor de la barra 5 es 0.83 y el valor de la barra 6 es 0.69. Ahora aplicando la compensación mediante STATCOM en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.80 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.86. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) en la barra 6 es de 0.86, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.79 siendo el punto crítico de operación.

5.1.2 Caso 2 en Mínima cargabilidad:

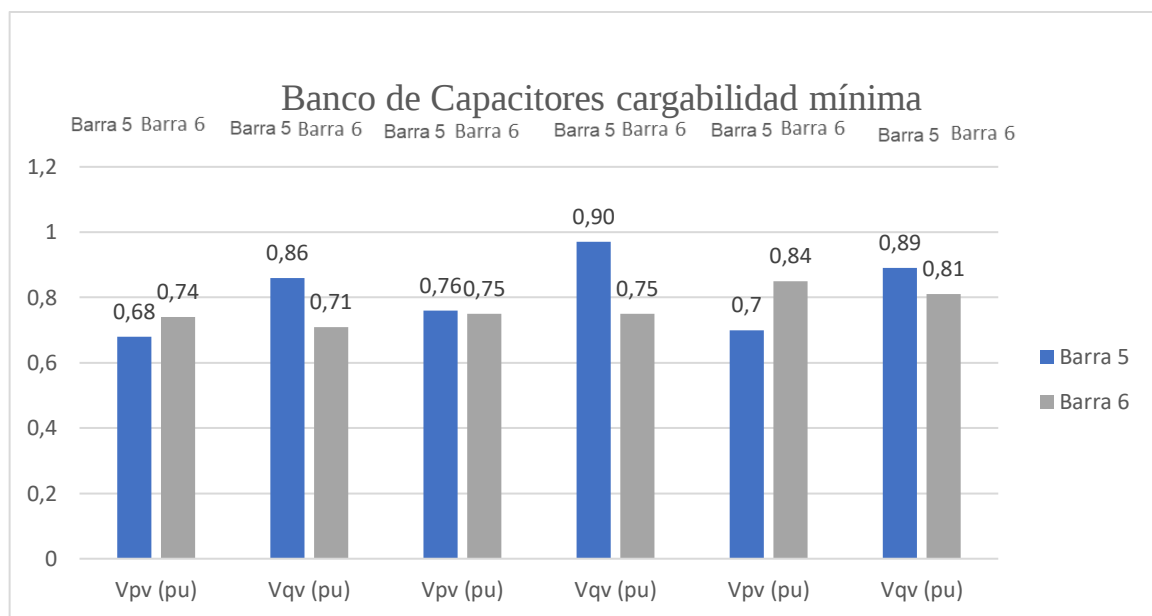
En este caso, los valores de carga con los que se trabajó son los siguientes:

Cargas	Unidades	Valores
Carga 1	Potencia activa	89,28 MW
	Potencia reactiva	35,71 MVar
Carga 2	Potencia activa	64,28 MW
	Potencia reactiva	30 MVar
Carga 3	Potencia activa	71,42 MW
	Potencia reactiva	25 MVar

Se suministra potencia reactiva a través del componente mencionado como es el Banco de Capacitores en las barras 5 y 6 con 128 MVar, comprendiendo que estas barras son las más débiles y no alcanzan la tensión crítica colocándole la compensación. Al examinar los valores de las dos curvas P-V y Q-V como se muestra en la tabla 8 existe una mejora de la tensión en la barra 5 en V_{P-V} de 0,68 p.u. a 0,76 p.u. y en V_{Q-V} de 0,86 p.u. a 0,97 p.u. en tanto, la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 p.u. a 0,85 p.u. y en V_{Q-V} de 0,71 p.u. a 0,81 p.u. también mejorando en otras barras como se observa en la tabla.

Tabla 22: Tensiones (p.u.) sin banco de capacitores y con banco de capacitores

N° de Barras	Sin compensación de capacitores		Con compensación de capacitores en la Barra 5		Con compensación de capacitores en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,03	1,02	1,025	1,02
Barra 3	1,025	1,03	1,03	1,03	1,025	1,03
Barra 4	0,81	0,9	0,84	0,94	0,85	0,94
Barra 5	0,68	0,86	0,76	0,90	0,7	0,89
Barra 6	0,74	0,71	0,75	0,75	0,84	0,81
Barra 7	0,91	0,87	0,93	0,9	0,92	0,88
Barra 8	0,86	0,67	0,87	0,69	0,87	0,69
Barra 9	0,93	0,44	0,94	0,45	0,95	0,47

Figura 63: Tensiones en p.u. con Banco de Capacitores

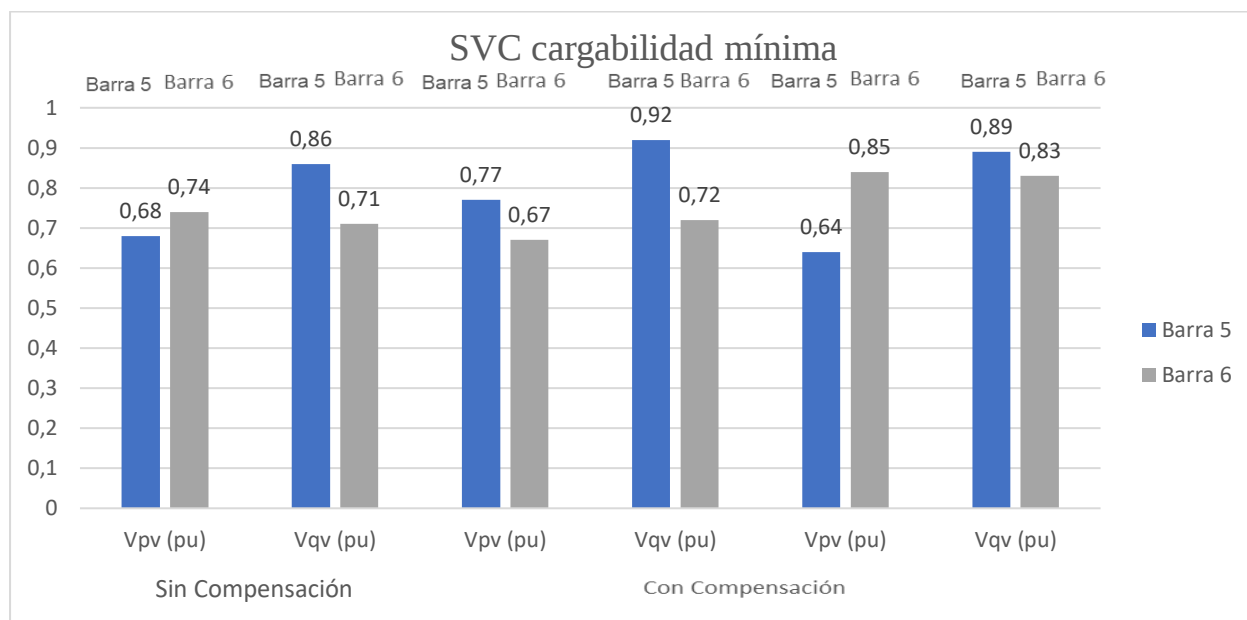
La figura 61 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u.) y V_{Q-V} (p.u.), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de banco de capacitores en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u.) de la barra 5 es 0.68 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u.) el valor de la barra 5 es 0.86 y el valor de la barra 6 es

0.71. Ahora aplicando la compensación mediante banco de capacitores en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.76 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.90. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) en la barra 6 es de 0.84, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.81 siendo el punto crítico de operación.

De igual manera se proporciona potencia reactiva con el SVC en las barras 5 y 6 con 128 MVar, ya que se conoce que son las barras débiles y con la ubicación de la compensación no llega a la tensión crítica en el sistema. Al estudiar los valores de las curvas P-V y Q-V como se observa en la tabla 9 se cuenta con una mejora en las tensiones de la barra 5 en V_{P-V} de 0,68 p.u. a 0,77 p.u. y en V_{Q-V} de 0,86 p.u. a 0,92 p.u. en cambio, en la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 p.u. a 0,84 p.u. y en V_{Q-V} de 0,71 p.u. a 0,83 p.u. también mejorando a otras barras como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23: Tensiones (p.u.) sin SVC y con SVC

N° Barras	Sin compensación de SVC		Con compensación de SVC en la Barra 5		Con compensación de SVC en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,03	1,02	1,03	1,02
Barra 3	1,025	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Barra 4	0,81	0,9	0,79	0,92	0,82	0,95
Barra 5	0,68	0,86	0,77	0,92	0,64	0,89
Barra 6	0,74	0,71	0,67	0,72	0,85	0,83
Barra 7	0,91	0,87	0,92	0,88	0,9	0,87
Barra 8	0,86	0,67	0,86	0,68	0,86	0,67
Barra 9	0,93	0,44	0,92	0,44	0,95	0,44

Figura 64: Tensiones en p.u. con SVC

La figura 62 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u.) y V_{Q-V} (p.u), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de SVC en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u) de la barra 5 es 0.68 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u) el valor de la barra 5 es 0.86 y el valor de la barra 6 es 0.71. Ahora aplicando la compensación mediante el SVC en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.77 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.92. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) en la barra 6 es de 0.85, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.83 siendo el punto crítico de operación.

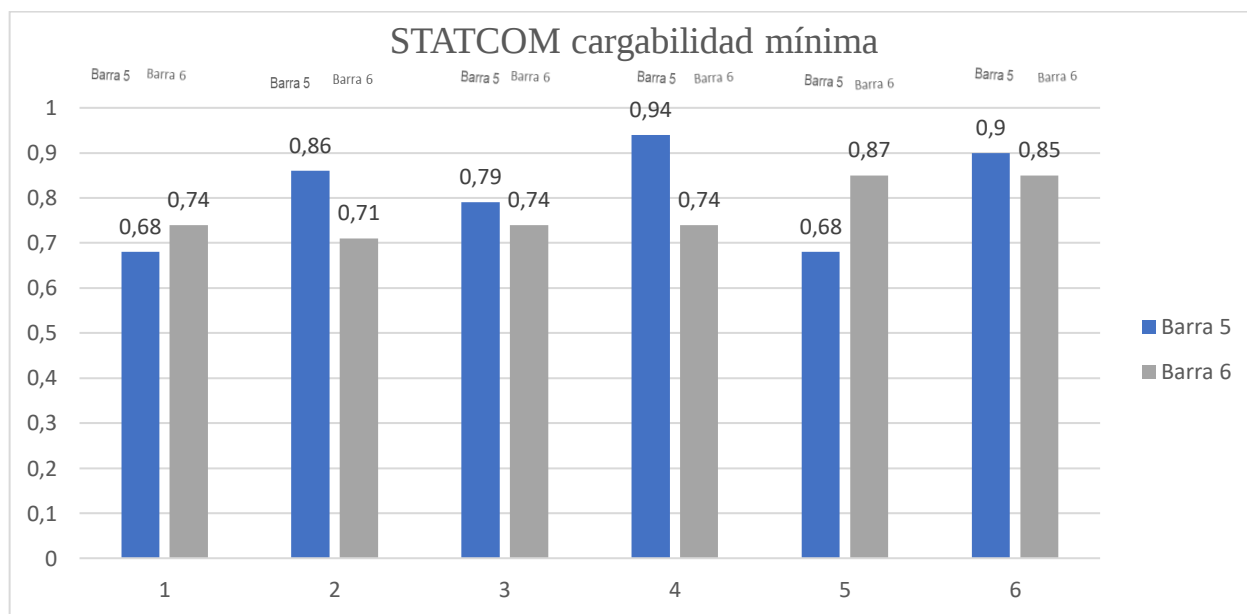
De manera similar, se suministra potencia reactiva con STATCOM en las barras 5 y 6 con 128 MVar, sabiendo que son barras débiles para estudiar y no alcanzan la tensión crítica al colocar la compensación. Al analizar los valores de las curvas P-V y Q-V como se observa en la tabla 10 se encuentra una mejoría de la tensión en la barra 5 en V_{P-V} de 0,68 p.u. a 0,67 p.u. y en V_{Q-V} de

0,86 p.u. a 0,86 p.u., en tanto, en la barra 6 en V_{P-V} de 0,74 p.u. a 0,85 p.u. y en V_{Q-V} de 0,71 p.u. a 0,85 p.u. asimismo mejorando en otras barras como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24: Tensiones (p.u.) sin STATCOM y con STATCOM

N° Barras	Sin compensación de STATCOM		Con compensación de STATCOM en la Barra 5		Con compensación de STATCOM en la Barra 6	
	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}	V_{P-V}	V_{Q-V}
Barra 2	1,025	1,02	1,025	1,02	1,025	1,02
Barra 3	1,025	1,03	1,025	1,03	1,025	1,03
Barra 4	0,81	0,9	0,83	0,93	0,84	0,94
Barra 5	0,68	0,86	0,79	0,94	0,68	0,9
Barra 6	0,74	0,71	0,74	0,74	0,87	0,85
Barra 7	0,91	0,87	0,92	0,89	0,91	0,88
Barra 8	0,86	0,67	0,87	0,69	0,87	0,68
Barra 9	0,93	0,44	0,93	0,45	0,95	0,46

Figura 65: Tensiones en p.u. con STATCOM

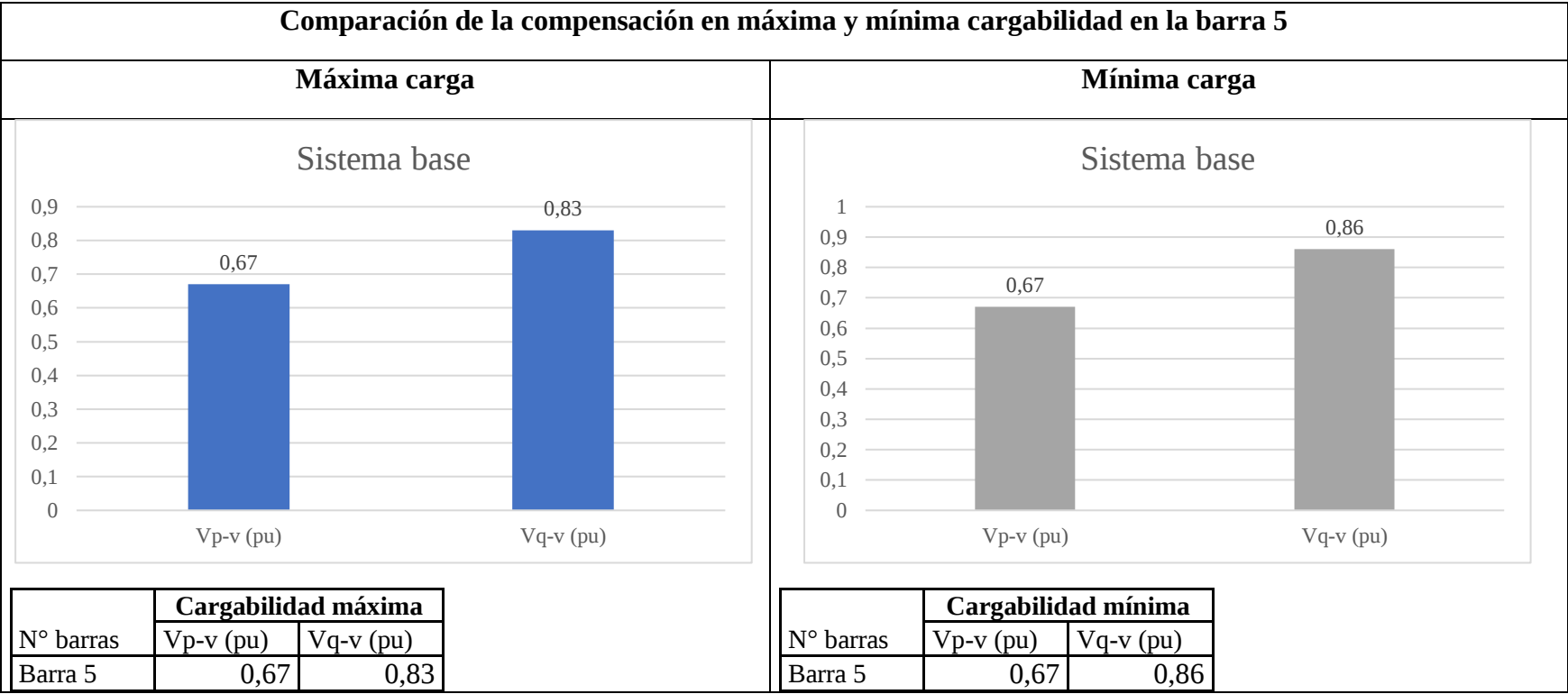


La figura 63 hace referencia a los valores de las barras 5 y 6 en V_{P-V} (p.u.) y V_{Q-V} (p.u.), sin aplicar ningún tipo de compensación como también aplicando la compensación de STATCOM en la barra 5 y luego en la barra 6. En la parte de sin compensación tenemos que, sin colocar ningún

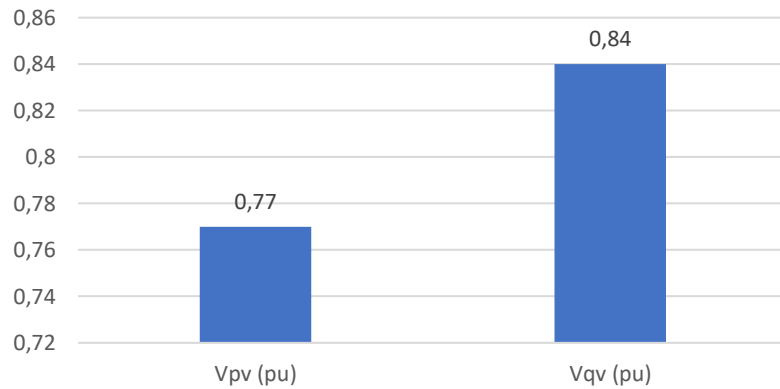
tipo de compensación en la barra, el valor de V_{P-V} (p.u) de la barra 5 es 0.68 y el valor de la barra 6 es 0.74, para V_{Q-V} (p.u) el valor de la barra 5 es 0.86 y el valor de la barra 6 es 0.71. Ahora aplicando la compensación mediante STATCOM en la barra 5 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) es de 0.79 en la barra 5, para V_{Q-V} (p.u) el valor en la barra 5 es 0.94. Ahora colocando la compensación en la barra 6 tenemos que el valor de V_{P-V} (p.u) en la barra 6 es de 0.87, para V_{Q-V} (p.u) en la barra 6 es 0.85 siendo el punto crítico de operación.

5.2 Comparativa de resultados

Tabla 25 Comparativa de máxima y mínima cargabilidad en la barra 5

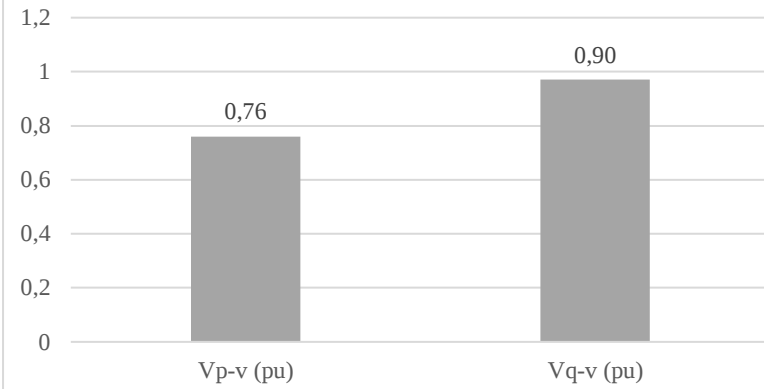


Banco de capacitores



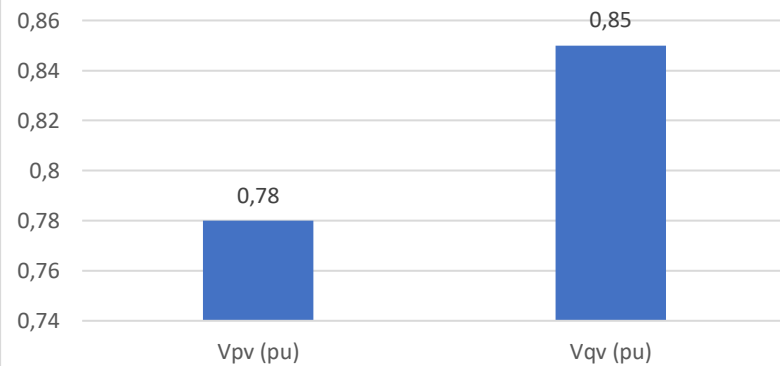
N° barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,77	0,84

Banco de capacitores



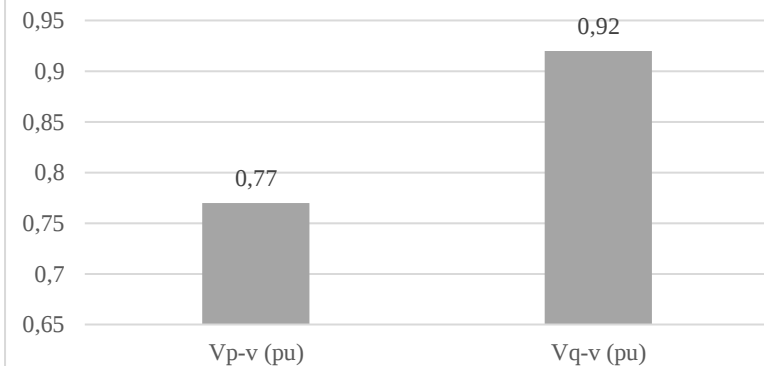
N° barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,76	0,90

SVC



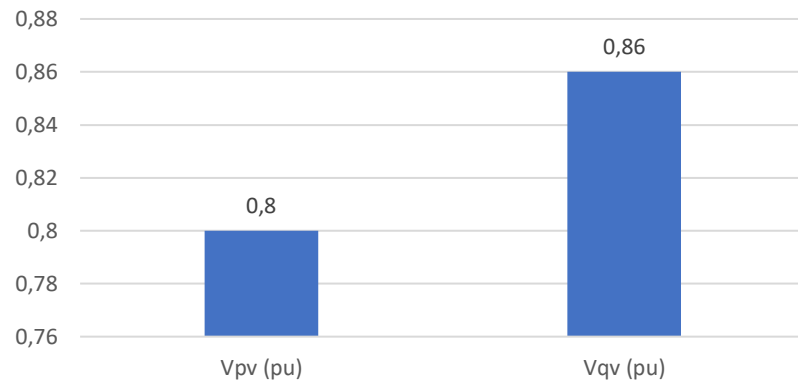
N° barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,78	0,85

SVC



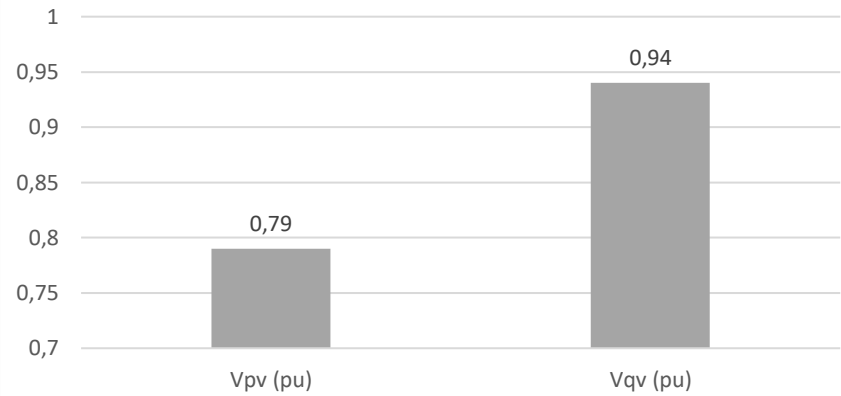
N° barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,77	0,92

STATCOM



N° barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,80	0,88

STATCOM

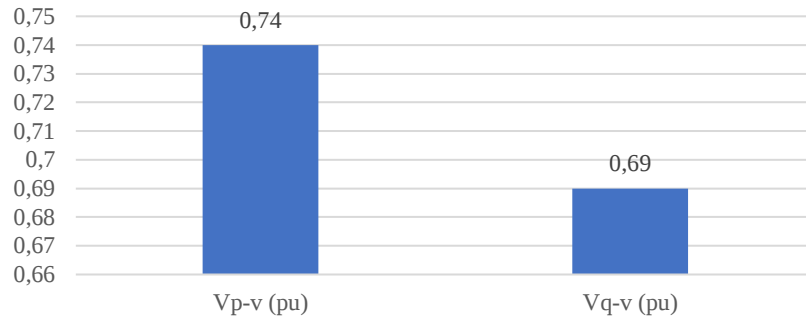


N° barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 5	0,79	0,94

Comparación de la compensación en máxima y mínima cargabilidad en la barra 6

Máxima carga

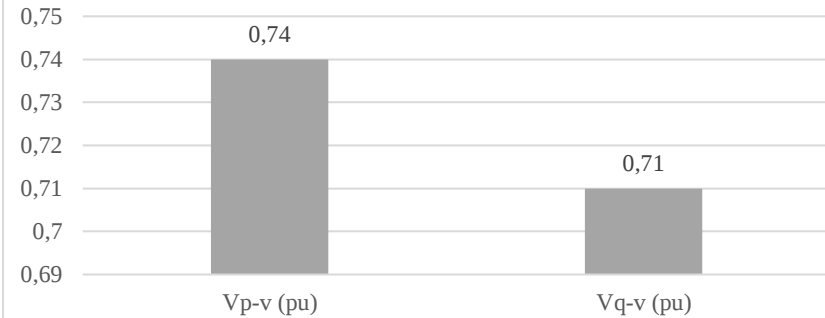
Sistema base



N° barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,74	0,69

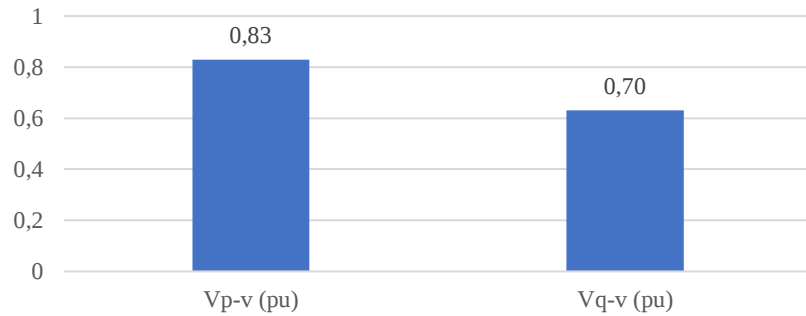
Mínima carga

Sistema base



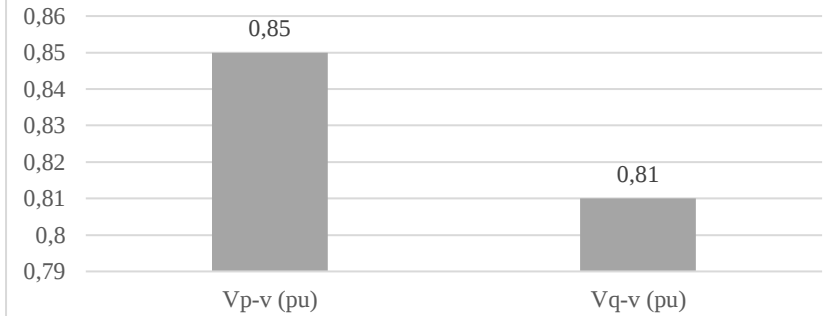
N° barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,74	0,71

Banco de capacitores



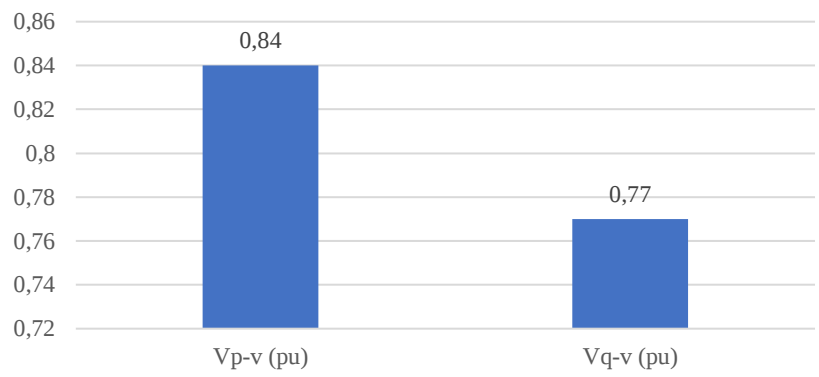
N° barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,83	0,70

Banco de capacitores



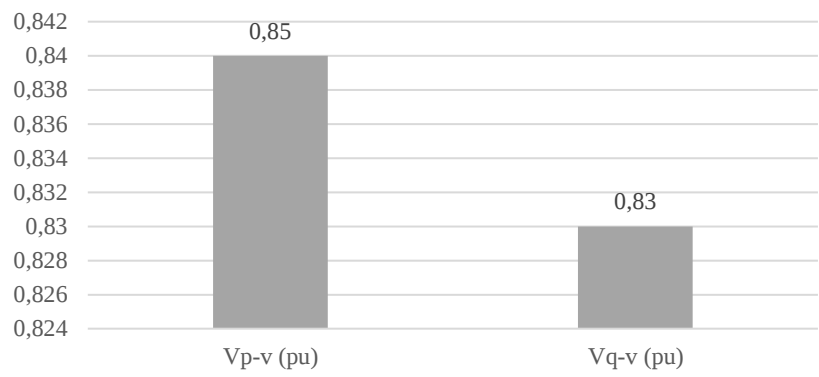
N° barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,84	0,81

SVC



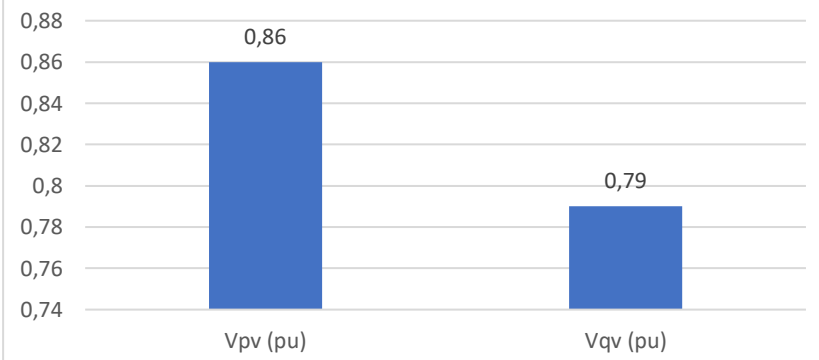
Nº barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,84	0,77

SVC



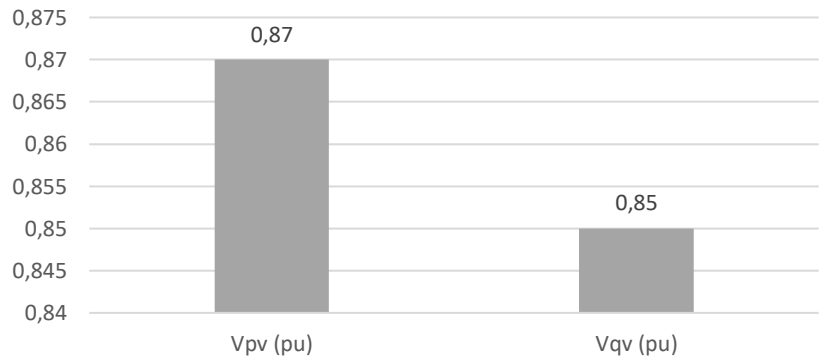
Nº barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,85	0,83

STATCOM



Nº barras	Cargabilidad máxima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,86	0,79

STATCOM



Nº barras	Cargabilidad mínima	
	Vp-v (pu)	Vq-v (pu)
Barra 6	0,87	0,85

6 Conclusiones.

- Como resultado de lo expuesto en el trabajo de investigación, se pudo visualizar que la colocación de la compensación reactiva en punto débiles de la red contribuye al control del perfil de tensión, la cargabilidad en las líneas, entre otros. No obstante, se logra conseguir que los resultados obtenidos de la investigación ofrecen beneficios favorables en la parte técnica como son; incremento de la tensión p.u. reducción de la cargabilidad de las líneas, aumento libre de flujo de potencia activa al instante de ejecutar el proceso mencionado.
- A lo largo del análisis, es posible apreciar que el objetivo de la aplicación de la compensación reactiva tiene como punto importante en obtener mediante los dos métodos convencionales Q-V, P-V para conocer los puntos débiles de la sistema, el cual ayudara para la ubicación de la compensación reactiva; debido a ello, se elabora un proceso en el cual se verifica los valores de tensión más bajos en las barras, además encontrar la capacidad que se debe inyectar en las barras seleccionadas para la colocación de la compensación, evidenciando que no solo la cantidad de potencia reactiva compensada es importante sino la localización estratégica de la misma como se detalló en el capítulo 3.
- Realizando flujos de potencia en cada escenario con cargabilidad alta del 90% y baja del 40% en la sistema, se consiguió que el sistema tiende a poseer valores por debajo de lo nominal en barras alejadas de la generación, dichos datos son obtenidos en cada una de las barras mediante el software de simulación DigSILENT PowerFactory 2021, al mismo tiempo estas barras demostraron ser eficientes para experimentar el refuerzo del sistemas mejorando un balance de potencia reactiva,

dependiendo del equipo utilizada como son Banco de Capacitores, SVC o STATCOM.

- Para plasmar el Banco de Capacitores, SVC y STATCOM, fue factible utilizar los modelos *Example With Interface* de la librería de PowerFactory. Los cuales primeramente constan del capacitor para el banco, el SVC de un controlador proporcional integral (PI), mientras el STATCOM con un transformador, un capacitor en DC y el controlador PWM que permiten tener una respuesta ante diferentes situaciones.
- El análisis realizado con las curvas P-V en las barras mencionadas 5 y 6 cuando no se tiene compensación poseen tensiones de 0,68-0,74 p.u., donde es necesario aumentar dichos valores de tensión, ya con la ubicación de los equipos estos valores tienden a elevarse entre 0,77-0,86 p.u., observando un incremento considerable en dichas barras.
- Es estudio realizado con las curvas Q-V en las barras 5 y 6 no teniendo compensación poseen tensiones de 0,71-0,86 p.u., donde es necesario aumentar estos valores de tensión, ya que con la colocación de los equipos estos valores tienden a elevarse a 0,77-0,91 p.u., obteniendo un incremento considerable en dichas barras y mejoras a las demás barras del sistema.

En resumen, los análisis que se pueden realizar mediante el Software DigSILENT PowerFactory es extenso, por lo tanto se sugiere bien el entendimiento de lo que se quiere realizar o simular, es una herramienta y plataforma completa para realizar simulaciones de varios tipo de aplicaciones y estudios a futuro, ya que cuenta también con elementos de energías renovables que se pueden conectar al sistema y ver cómo se comporta este mismo ante esos cambios mediante la simulación, y así tener una visión clara ante de la instalación en un futuro.

7 Bibliografía.

- Águila T Ellez, A., Opez, G. L., Isaac, I., & González, J. W. (2018). Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. *Heliyon*, 4, 746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018>
- Alex Mauricio Guascal Reinoso. (2020). *Mejora del margen de estabilidad de tensión en sistemas de potencia basado en la ubicación óptima de SVC*.
- Alexander Aguilar Téllez. (2021). *Optimización multicriterio de Flujo de Potencia Reactiva en Sistemas Eléctricos de Distribución*.
- Alzaareer, K., Saad, M., Mehrjerdi, H., Lefebvre, S., & Asber, D. (2020). Top-down/bottom-up method for identifying a set of voltage stability preventive controls. *Proceeding - 2nd International Conference on Technology and Policy in Electric Power and Energy, ICT-PEP 2020*, 339–343. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249938>
- Apolo Diana Jennifer Guamán, & Villacís Rodríguez Juan Esteban. (2022). *Modelado de compensadores automáticos de potencia reactiva en lenguaje de programación dpl y dsl para la interconexión ecuador-Perú 500 kv*.
- Arconel. (2023). *Resolución N° ARCERNNR-003/2023*. www.controlrecursosyenergia.gob.ec
- Brokering Christie Walter, Palma Behnke Rodrigo, & Vargas Díaz Luis. (2008). *Los Sistemas Eléctricos de Potencia*.
- Capítulo II Introducción al concepto de FACTS*. (2016).
- Carrillo González Camilo José, & Cidrás Pidre José. (2023). *Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)*.

CENACE. (2023). *Informe Anual: Operador Nacional de Electricidad- CENACE*.

Compensación de Energía Reactiva. (2020).

Dang, J., Tang, F., Wang, J., Yu, X., & Deng, H. (2023). A Differentiated Dynamic Reactive Power Compensation Scheme for the Suppression of Transient Voltage Dips in Distribution Systems. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813816>

De La Bodega, F., Dolores Gutiérrez, M., Aginako, Z., & Sagastabeitia, K. J. (2015). *FACTS Formas de usar más eficientemente las líneas eléctricas existentes*.

Dolores, J., & Cervantes, J. (1995). *Sistemas de distribución de energía eléctrica*.

Dorf, R. S. James. (2011). *Circuitos eléctricos*. Alfaomega Grupo Editor.

Dwivedi, A., & Vadhera, S. (2019). *Reactive Power Sustainability and Voltage Stability with Different FACTS Devices using PSAT*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2019.8711587>

Eremia, M., Gole, A., & Toma, L. (2016). Static VAr Compensator (SVC). In *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and AI Techniques* (pp. 271–338). Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781119175391.ch5>

Friedman, R., & Ramos, C. (2009). *Análisis de los filtros activos para compensación en los sistemas eléctricos de potencia*.

Geovany Andrade, Marcelo Pozo, & Carlos Gallardo. (2020). *Evaluación de Estabilidad Transitoria en él. Vol. 2 Núm. 1*.

Gómez Antonio, Conejo, A., & Cañizares, C. (2018). *Electric Energy Systems Analysis and Operation*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315192246>

Gonzalez-Longatt, F. M. (2004). *Manual de usuario de DIgSILENT PowerFactory 12.0 en Español*.

https://www.researchgate.net/publication/301231957_Manual_de_usuario_de_DIgSILENT_PowerFactory_120_en_Espanol

Hasan DİRİK, Cenk GEZEGİN, & Hasan Serdar DİRİK. (2023, March). *Compensación de potencia reactiva con compensador híbrido que combina un motor síncrono y condensadores conmutados*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109010>

Ismail, B., Abdul Wahab, N. I., Othman, M. L., Radzi, M. A. M., Naidu Vijyakumar, K., & Mat Naain, M. N. (2020). A Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Load ability Enhancement. *IEEE Access*, 8, 222733–222765.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043297>

Jibran Ali, Stefano Massucco, & Federico Silvestro. (2019). Aggregation strategy for reactive power compensation techniques-validation. *Energies*, 12(11).
<https://doi.org/10.3390/en12112047>

Khusnutdinov, A. N., Cherepen'kin, I. V., Minazov, M., Filina, O. A., Lazarev, P. S., & Khusnutdinova, E. M. (2022a). Investigation of reactive power parameters in the elements of the power supply system. *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022*.
<https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731433>

- Khusnutdinov, A. N., Cherepen'kin, I. V., Minazov, M., Filina, O. A., Lazarev, P. S., & Khusnutdinova, E. M. (2022b). Investigation of reactive power parameters in the elements of the power supply system. *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022*.
<https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731433>
- Landa, J. V. (2010). *Redes Eléctricas*.
https://www.academia.edu/36271558/_2010a_Redes_el%C3%A9ctricas_I_pdf
- Manjul, N., & Singh Rawat, M. (2019). *PV/QV Curve based Optimal Placement of Static Var System in Power Network using DigSilent Power Factory*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/POWERI.2018.8704441>
- Mario A. Ríos, Carlos Zapata, & Oscar Gómez. (2008). Medidas para mitigar problemas de estabilidad de voltaje. *Scientia et Technica*, 2(39). <https://doi.org/10.22517/23447214.3125>
- Méndez. S.J. (2022). *Corrección del Factor de Potencia*.
- Muhammad Nizam, & Rian Wicaksono. (2019). *Real-Time Comparison of Electromechanical and Thyristor-Switched Capacitor Banks for Improving Power Factor in Lead-Acid Battery Manufacturing Industry*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628357>
- Peña, R., Santillán, H., & Morales, J. (2021). Análisis de Estabilidad de Voltaje en un Sistema de Subtransmisión, Mediante Curvas QV – PV y Análisis Modal. *INGENIO*, 4(2), 4–15.
<https://doi.org/10.29166/ingenio.v4i2.3165>

- Pereira, O., Rosés, R., & Giménez, M. D. C. (2023). QV Analysis for the Identification of Vulnerable Zones to Voltage Collapse: A Study Case. *Revista Técnica “Energía,”* 19(2), 32–41. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.545>
- Pérez, F. D. (2013). Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna. In *Prisma Tecnológico* | (Vol. 4, Issue 1).
- Siemens. (2020). *Discover the World of FACTS Technology*. www.siemens.com/energy/facts
- Singh, B., Saha, R., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2009). Static synchronous compensators (STATCOM): A review. *IET Power Electronics*, 2(4), 297–324. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2008.0034>
- Tariq, H., Czapp, S., Tariq, S., Cheema, K. M., Hussain, A., Milyani, A. H., Alghamdi, S., & Salem Elbarbary, Z. M. (2022). Comparative Analysis of Reactive Power Compensation Devices in a Real Electric Substation. *Energies*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/en15124453>
- Taylor, N. (2021). Distance Protection of Series Capacitor Compensated Lines: Practical Considerations, Industrial Status and Development. In *Electricity* (Vol. 2, Issue 2, pp. 168–186). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/electricity2020011>
- Valentin, N., Prieto, E., & Chauca, M. (2021). Voltage Stability Analysis based on Power Voltage (P-V) and Reactive Voltage (Q-V) Curves in Transmission Lines Using Static Var Compensator (SVC) with the Power Factory Program. *Journal of Physics: Conference Series*, 1993(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1993/1/012015>

Zambroni De Souza, A. C., Mohn, F. W., Borges, I. F., & Ocariz, T. R. (2011). Using PV and QV curves with the meaning of static contingency screening and planning. *Electric Power Systems Research*, 81(7), 1491–1498. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.02.012>

8 Anexos

Figura 66: *Grafico de compensación reactiva en máxima cargabilidad*

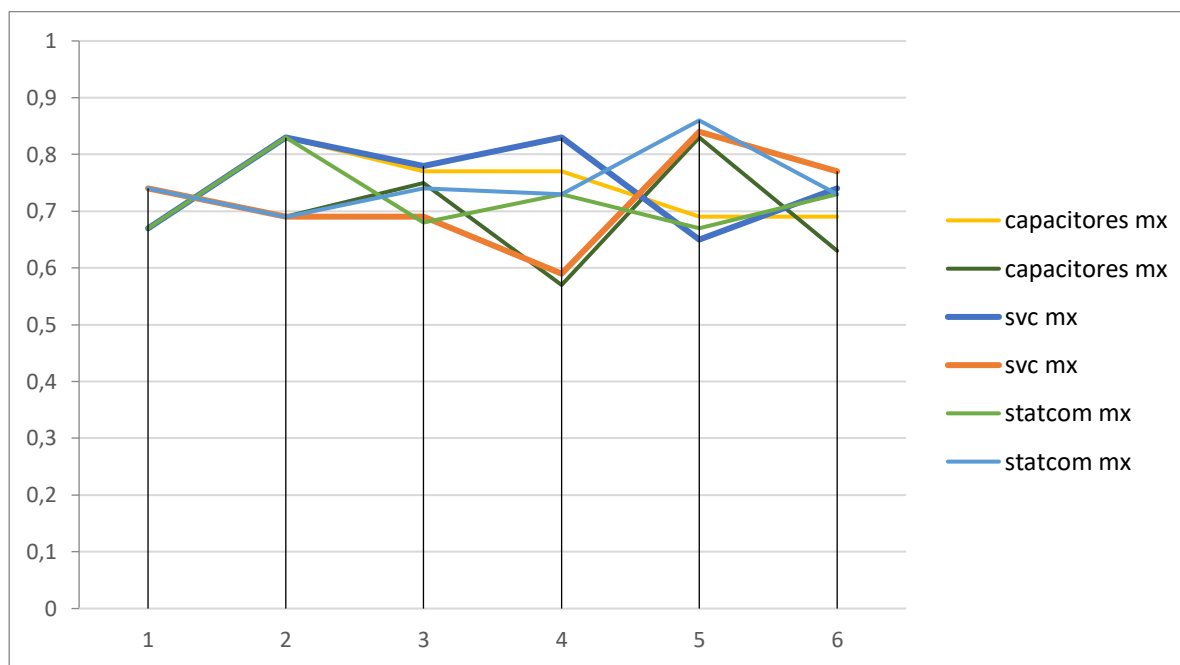


Figura 67: *Grafico de compensación reactiva en mínima cargabilidad*

