



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: KEVIN PATRICIO RAMÍREZ ENCALADA
TUTOR: ALEXANDER AGUILA TÉLLEZ

Quito -Ecuador
2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, KEVIN PATRICIO RAMÍREZ ENCALADA con documento de identificación N° 0503188062 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 06 de mayo del año 2025

Atentamente,



Kevin Patricio Ramírez Encalada

0503188062

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Kevin Patricio Ramírez Encalada con documento de identificación No. 0503188062, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Óptima Compensación De Potencia Reactiva En La Planta Asme (American Society Of Mechanical Engineer) De La Empresa Sertecpet S.A. En La Ciudad De Puerto Francisco De Orellana Usando Búsqueda Exhaustiva”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de mayo del año 2025

Atentamente,



Kevin Patricio Ramírez Encalada

0503188062

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alexander Aguila Téllez con documento de identificación N° 1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: :OPTIMA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA PLANTA ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER) DE LA EMPRESA SERTECPET S.A. EN LA CIUDAD DE PUERTO FRANCISCO DE ORELLANA USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA, realizado por Kevin Patricio Ramírez Encalada con documento de identificación N° 0503188062, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de mayo del año 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long diagonal stroke, positioned above a horizontal dashed line.

Ing. Alexander Aguila Téllez, MSc
1755983184

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	IX
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Alcance.....	6
1.3. Objetivo Principal	7
1.4. Objetivos específicos.....	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Distribución eléctrica	8
2.2. Distribución eléctrica en plantas industriales.....	8
2.3. Distribución de energía primaria.....	9
2.4. Distribución de energía secundaria	10
2.5. Distribución de energía terciaria o de distribución de energía interna.....	10
2.6. Factor de potencia	11
2.7. Potencia Activa	12
2.8. Potencia reactiva	13
2.9. Tipos de compensación de potencia reactiva	14
2.9.1. Banco de capacitores fijos.....	14
2.9.2. Banco de capacitores automáticos.....	15
2.9.3. Compensadores Híbridos	15
2.10. Tipos de cargas.....	15
2.10.1. Cargas inductivas	16
2.10.2. Cargas capacitivas	16
2.10.3. Cargas resistivas	16
2.10.4. Cargas mixtas	16
2.11. Metodologías para el diseño de un banco de capacitores.....	17

2.12.	Normativas para diseño e implementación de un banco de capacitores.	18
2.12.1.	Normativas Internacionales:.....	18
3.	MARCO METODOLÓGICO	19
3.1.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	20
3.2.	Variables y Condiciones para la Ubicación Óptima de Bancos de Condensadores. 20	
3.2.1	Variables Eléctricas Consideradas	20
3.2.2	Condiciones Analizadas	21
3.3.	Procedimiento.....	22
3.4.	Análisis de Potencia Reactiva	23
3.4.1.	Cálculo de la Potencia Reactiva (Q)	23
3.4.2.	Determinación de la Capacidad del Banco de Condensadores	23
3.4.3.	Capacidad del Banco de Condensadores.....	23
3.5.	Procedimiento para la Selección de la Capacidad.....	24
4.	INSPECCIÓN TÉCNICA	26
4.1.	Resultados de la inspección.....	28
5.	CÁLCULO DEL BANCO DE CONDENSADORES	29
5.1.	Calculo y Configuración del Banco de Condensadores	33
5.2.	Configuración del Banco de Capacitores Automático	36
5.3.	Selección de los pasos del Banco de Condensadores:.....	37
6.	UBICACIÓN DEL BANCO DE CONDENSADORES.....	39
6.1.	Método de Búsqueda Exhaustiva	39
6.1.1.	Simulaciones en ETAP.....	40
6.1.2.	Características del Sistema.....	40
6.1.3.	Datos de Voltaje y Carga de Barras	41
6.1.4.	Flujo de Potencia en Líneas y Transformadores	41
6.1.5.	Detalles de las Cargas Conectadas	42
6.1.6.	Generación	43
6.2.	Búsqueda exhaustiva con MATLAB	44
6.2.1.	Análisis de Perfiles de Tensión en los Buses	44
6.2.2.	Análisis de consumo y pérdidas activas y reactivas.....	47
6.2.3.	Análisis del Factor de potencia en la Frontera	48
6.2.4.	Cargabilidad del alimentador principal	49

7.	ANÁLISIS FINAL	52
7.1.	Análisis del Factor de Potencia	52
7.2.	Análisis de la Cargabilidad	52
7.3.	Análisis de Niveles de Tensión en los Buses	53
7.4.	Análisis de las Pérdidas de Potencia	53
7.5.	Determinación del Mejor Bus para Ubicar el Banco de Capacitores.....	54
8.	CONCLUSIONES	57
9.	RECOMENDACIONES	58
9.1.	Mejora Continua del Sistema Eléctrico.....	58
9.2.	Optimización de la Compensación de Potencia Reactiva	58
9.3.	Integración de Energías Renovables	59
9.4.	Capacitación y Desarrollo del Personal	59
9.5.	Investigaciones Futuras	60
9.6.	Mejoras en la Documentación y Reportes.....	60
	ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Tablero principal, Planta ASME, vista frontal	6
Figura 2.	Diagrama unifilar planta	27
Figura 3.	Registro fotográfico de tableros y equipos	27
Figura 4.	Consumo de Energía aparente mes mayo.	30
Figura 5.	Consumo de potencia Activa mes mayo.	31
Figura 6.	Consumo de potencia Reactiva Inductiva mes mayo.	32
Figura 7.	Consumo de energía Reactiva capacitiva mes mayo.	33
Figura 8.	Diagrama de flujo funcionamiento banco de condensadores.	35
Figura 9.	Potencia reactiva- Caso Base y Banco automático incluido.	37
Figura 10.	Comparativa tensión barraje principal vs estimado luego de instalar el banco.	38
Figura 11.	Diagrama unifilar Propuesto	38
Figura 12.	Ubicaciones para evaluar	39
Figura 13.	Niveles de tensión para cada caso en todos los buses.	45
Figura 14.	Comparativo del consumo de potencia activa y reactiva vs ubicación del banco.	47
Figura 15.	Pérdidas Potencia Activa Y Reactiva para cada caso	48
Figura 16.	Factor de potencia en cada ubicación del banco.	49
Figura 17.	Cargabilidad del alimentador principal en cada ubicación del banco.	50
Figura 18.	Nivel de tensión comparativo mejor caso con caso Base	54
Figura 19.	Cargabilidad del alimentador principal en cada ubicación del banco.	55
Figura 20.	Comparación factor de potencia en la Frontera comercial	55
Figura 21.	Cargabilidad del alimentador principal en Baja tensión.	56
Figura 22.	Diagrama unifilar del sistema de potencia en ETAP	62
Figura 23.	Placa característica AM8053	66
Figura 24.	Placa característica Transformador trifásico.	66
Figura 25.	Placa característica Power Wave 1000SD	66
Figura 26.	Potencia reactiva registrada en el analizador de redes.	67
Figura 27.	Potencia y fp. registrad en el analizador de redes.	67
Figura 28.	Tensión y corriente registrados en el analizador de redes.	68
Figura 29.	Información de producto condensadores WEG.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Procedimiento general para elaborar el estudio	22
Tabla 2.	Algoritmo para la optimización del banco de condensadores con análisis de complejidad	34
Tabla 3.	Registro de activaciones de los pasos propuestos	36
Tabla 4.	Características generales del sistema base	40
Tabla 5.	Tensión y carga en las barras	41
Tabla 6.	Flujo de potencia en el caso base	42
Tabla 7.	Detalle de las cargas en el caso base	42
Tabla 8.	Niveles de tensión para cada caso en todos los buses	45
Tabla 9.	Resumen factor de potencia en la frontera con el operador de red	52
Tabla 10.	Resumen cargabilidad en la frontera con el operador de red	52
Tabla 11.	Resumen pérdidas de potencia	53
Tabla 12.	Matriz de consumo energía activa.....	63
Tabla 13.	Matriz de consumo energía reactiva Inductiva	64
Tabla 14.	Matriz de consumo energía reactiva capacitiva	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Diagrama unifilar planta ASME SERTECPET.....	62
Anexo 2.	Tablas.....	63
Anexo 3.	Registro fotográfico y figuras adicionales	66

RESUMEN

Este estudio analiza la compensación óptima de potencia reactiva en la planta ASME de SERTECPET S.A., ubicada en Puerto Francisco de Orellana, Ecuador. Utilizando técnicas de búsqueda exhaustiva y herramientas como ETAP y MATLAB, se identificó la mejor ubicación para un banco de capacitores automáticos. Se evaluaron detalladamente la demanda eléctrica y el desempeño del sistema bajo distintas condiciones operativas.

El proyecto logró optimizar la eficiencia energética, minimizar costos operativos y garantizar un suministro eléctrico más confiable. Además, se establecieron mejoras en los perfiles de tensión, reducciones de pérdidas y cumplimiento de estándares internacionales de calidad. Los resultados destacan la viabilidad de integrar bancos de capacitores automáticos como solución técnica clave para plantas industriales. La implementación de estos dispositivos de compensación pretende ofrecer una mejora significativa en la calidad da energía en la planta SERTECPET S.A, alineándose con los estándares internacionales de ingeniería y las mejores prácticas de la industria garantizando el bienestar de las personas y de los activos de la empresa.

Palabras clave: Norma IEEE 80 2013, Norma IEC 62305, Norma EEQ Parte A-B -C, Energía reactiva, Banco de condensadores automático, indicadores de calidad.

ABSTRACT

This study analyzes the optimal reactive power compensation at the ASME plant of SERTECPET S.A., located in Puerto Francisco de Orellana, Ecuador. Using exhaustive search techniques and tools such as ETAP and MATLAB, the best location for an automatic capacitor bank was identified. The electrical demand and system performance under different operating conditions were evaluated in detail.

The project managed to optimize energy efficiency, minimize operating costs and guarantee a more reliable electrical supply. In addition, improvements in voltage profiles, loss reductions and compliance with international quality standards were established. The results highlight the feasibility of integrating automatic capacitor banks as a key technical solution for industrial plants. The implementation of these compensation devices aims to offer a significant improvement in energy quality at the SERTECPET S.A. plant, aligning with international engineering standards and best industry practices, guaranteeing the well-being of people and company assets.

Keywords: IEEE Standard 80 2013, IEC Standard 62305, EEQ Standard Part A-B -C, Reactive energy, Automatic capacitor bank, quality indicators.

1. INTRODUCCIÓN

La eficacia y la estabilidad energética son elementos fundamentales en el funcionamiento de cualquier instalación industrial. Los inconvenientes pueden ocasionar pérdidas financieras significativas en la planta ASME de la empresa SERTECPET S.A.

La localidad de Porto Francisco de Orellana se encuentra en una situación crucial relacionada con la compensación por el uso de fuentes no funcionales y las pérdidas financieras y multas relacionadas. A pesar de que la potencia reactiva no es útil, es fundamental mantener niveles de voltaje apropiados en los sistemas eléctricos. Investigar el fenómeno de interés requiere equipos de medición de alta precisión que puedan recolectar muestras en poco tiempo y que cumplan con el tiempo de reacción requerido para el fenómeno de interés. Además, encontrar soluciones requiere herramientas avanzadas de análisis estadístico. La investigación comienza con una revisión documental de los procedimientos y criterios para evaluar cuestiones de calidad energética [1]. Es importante realizar mediciones correctas de cantidades eléctricas y evaluar el tipo y ubicación de la carga, el ciclo de operación del equipo y la topología del sistema eléctrico. Se trata de realizar la correcta selección y posterior instalación de los condensadores de corrección del factor de potencia. Porque, como ya se ha comentado, en cualquier sistema eléctrico existen muchos aspectos, parámetros y condiciones que pueden hacer que un diseño sea completamente diferente a otro. Esto hace que instalar un banco de condensadores automático con compensación centralizada en un solo punto no siempre sea la mejor solución [2].

Esta situación es importante para SERTECPET S.A, donde los requisitos energéticos varían significativamente en función de las condiciones de funcionamiento. A pesar de la relevancia del tema, no se ha realizado ningún análisis minucioso con el fin de establecer la estrategia adecuada para una mejora en la potencia reactiva (Q) de la red eléctrica. Dado que en la planta se encuentran disponibles variadores de velocidad para controlar los motores, las soluciones existentes no solucionan de manera efectiva las deficiencias energéticas y las pérdidas ocasionadas por el exceso de potencia reactiva. En consecuencia, se requiere una investigación minuciosa para examinar las condiciones de las instalaciones eléctricas y de tal manera plantear una estrategia de compensación de conformidad con las demandas. Desde un punto de vista técnico, un equipo eléctrico del tamaño adecuado funcionará bien con factores de potencia bajos. Aunque esto es claramente posible, la red eléctrica situada delante del punto de conexión

propiedad del operador de la red está "ocupada" con grandes cantidades de energía inutilizable, lo que provoca importantes pérdidas económicas. Por este motivo, diversas normas y regulaciones son cada vez más exigentes, exigiendo factores de potencia en un rango óptimo[2]

La compensación de potencia reactiva es un método de gran utilidad para optimizar la eficiencia de los sistemas energéticos. Muchos autores han analizado cómo optimizar esta compensación y han señalado la relevancia de un análisis detallado del sistema y sus condiciones de funcionamiento. Las regulaciones y directrices internacionales brindan orientaciones claras para el diseño e implementación de esta práctica y brindar mayor eficacia en los sistemas eléctricos. Al compensar el sistema eléctrico se mantiene la potencia activa de acuerdo con el consumo de cada carga eléctrica y se disminuye significativamente la potencia reactiva de la línea de transmisión, dando como resultado reducción de la factura eléctrica, optimización de parte del sistema, reducción de la sección de conductor de repuesto, atenuar las pérdidas y minimizar de la caída de tensión [3].

En tal sentido, esta investigación se centra en la evaluación de la instalación eléctrica de la fábrica ASME de SERTECPET S.A. en este contexto, el objetivo es identificar problemas de calidad energética y pérdidas debido al exceso de potencia reactiva. Esta investigación propone hacer un análisis detallado utilizando la técnica de búsqueda exhaustiva, una estrategia de búsqueda de soluciones mediante simulaciones y algoritmos que permiten comparar distintos escenarios de estudio.

Posteriormente, el objetivo mejorar la calidad de la energía, reducir los costos operativos propios de la actividad de producción y garantizar la operación óptima y confiabilidad del suministro de energía, al tiempo que se cumplen los estándares técnicos nacionales e internacionales para brindar una sobresaliente seguridad en la industria. Esto contribuye de manera significativa a mejorar el rendimiento de la instalación eléctrica, reducir costos de operación y prolongar la vida útil de los equipos [4].

Para establecer cuáles son las condiciones iniciales para modelar se realizara un levantamiento detallado junto con simulaciones en el software ETAP que reflejan las condiciones de operación de la planta. Estas simulaciones nos permitirán analizar el funcionamiento de su sistema en diversas configuraciones de compensación de potencia reactiva para aplicar el método de la búsqueda exhaustiva y encontrar la mejor ubicación. Los resultados obtenidos se analizarán

mediante algoritmos desarrollados en MATLAB para visualizar y tratar los datos con más facilidad. El escenario de simulación muestra claramente que alimentar el sistema con energía activa y reactiva por separado tiene un efecto positivo en la reducción de pérdidas [5].

Por otro lado, se poseen mejores resultados cuando se suministran potencia activa y reactiva simultáneamente, ya que el flujo de potencia se redistribuye de manera más eficiente. Se puede observar que la inyección de potencia activa y reactiva se correlaciona con la mejora del perfil de tensión de la red. Sin embargo, este inconveniente pertenece al grupo de los problemas no lineales y no convexos, y pueden existir varias combinaciones con comportamiento muy similar en cuanto al perfil de tensión de inyección de potencia reactiva, por lo que no existe una relación lineal ni proporcional [4].

Algunos investigadores han propuesto soluciones como el diseño D-STATCOM basado en la teoría de componentes simétricos instantáneos (ISCT) para reducir los armónicos y el factor de potencia rectificadas en sistemas de distribución en presencia de cargas no lineales, reduciendo así la THD e introduciendo un control de filtro de potencia activo con bypass monofásico en sistemas de distribución con cargas no lineales de alta penetración. Aunque este caso de estudio de caso utiliza un enfoque ligeramente diferente, el método de encontrar componentes simétricos es muy útil para modelar cargas lineales y no lineales. Otros estudios recientes han demostrado la importancia de implementar dispositivos compensadores en la red eléctrica para optimizar la productividad y el mejor desempeño de las redes de transmisión de energía. Ya que en la ubicación óptima se redujo la pérdida del sistema en un 0,015 %, 0,010 % y 0,005 % según diferentes criterios de carga [6].

El reto de esta investigación está en verificar cuál es la ubicación óptima de estas soluciones garantizando mejoras en los indicadores a proponer teniendo en cuenta las normativas nacionales e internacionales.

1.1. Planteamiento del problema

Durante los años de crecimiento de la planta y debido a la inclusión de nuevos equipos y al aumento en la producción, se ha visto un aumento en los valores asociados a la energía reactiva facturada, por tal motivo se desea encontrar una solución técnica que pueda reducir y mitigar los efectos de esta energía reactiva en la planta ASME de la empresa SERTECPET S.A., ubicada en la ciudad de Puerto Francisco de Orellana. En la figura 1 se puede ver una vista frontal del tablero trifásico principal de distribución de la planta con nivel de tensión de 440v de operación.

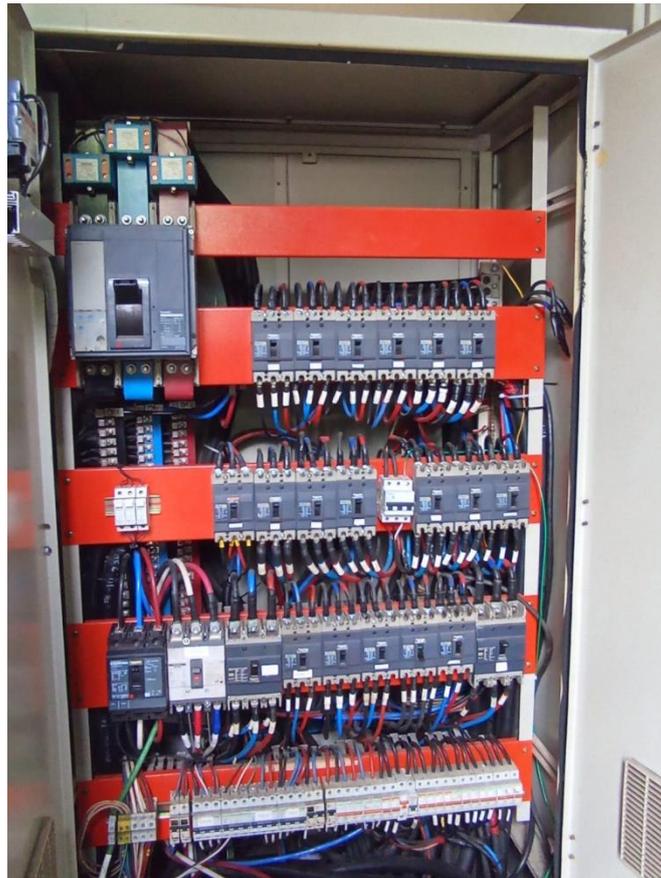


Figura 1. Tablero principal, Planta ASME, vista frontal

1.2. Alcance

Este estudio se centrará en encontrar la mejor ubicación para un banco de capacitores en la instalación eléctrica de la planta ASME de SERTECPET S.A., empleando el método de búsqueda exhaustiva. Para ello, se realizarán simulaciones detalladas en el software ETAP, considerando una variedad de escenarios operativos que reflejarán las condiciones reales de la planta. Estas simulaciones permitirán evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes ubicaciones. Posteriormente, los resultados

obtenidos serán analizados y comparados utilizando algoritmos desarrollados en MATLAB, con el fin de identificar la ubicación óptima del banco.

1.3. Objetivo Principal

- Optimizar la compensación de reactivos en la planta ASME de la empresa SERTECPET S.A. en la ciudad de Puerto Francisco de Orellana, mediante la identificación de la mejor ubicación para bancos de capacitores utilizando el método de búsqueda exhaustiva, apoyado en simulaciones en ETAP y el análisis de resultados con algoritmos de MATLAB, con el propósito de beneficiar a la eficiencia energética, disminuir costos operativos y asegurar la estabilidad del suministro eléctrico.

1.4. Objetivos específicos

- Verificar la operación actual del sistema y analizar las pérdidas de potencia y el factor de potencia como variables a modificar con la compensación reactiva en la planta ASME.
- Ubicar y Dimensionar un banco de condensadores automático y encontrar la ubicación óptima por medio del método de búsqueda exhaustiva.
- Verificar el desempeño de la compensación propuesta como mejor alternativa para la planta ASME.

2. MARCO TEÓRICO

Al realizar investigaciones eléctricas, diseñar o implementar sistemas eléctricos, se deben considerar muchos aspectos, como verificar las medidas de protección eléctrica, sistemas de puesta a tierra y blindaje, señalización y espacio de trabajo. Por lo tanto, se debe dar gran importancia a este aspecto para garantizar la seguridad de los seres vivos y la propiedad privada. En el ámbito eléctrico se sabe que actualmente existen diversas circunstancias de riesgo tanto internos, así como externos. A través de la búsqueda y la práctica se han creado numerosos códigos, manuales, normas y estatutos que ayudan a respaldar este aspecto tan significativo, cuya innovación tiene como objetivo prevenir o mitigar accidentes en los sistemas eléctricos [7].

2.1. Distribución eléctrica

La industria eléctrica depende de la distribución eléctrica como un elemento crucial, encargado del transporte, conversión y distribución de energía eléctrica a los usuarios finales, ya sean residenciales o industriales. El reglamento general de la ley del servicio eléctrico dictamina que este proceso involucra el uso de líneas e instalaciones distintas a las líneas de transmisión. La conexión directa con los consumidores es crucial, ya que enfrenta desafíos continuos debido al aumento de la demanda, las actualizaciones de la infraestructura y la disponibilidad del servicio. La calidad de la distribución eléctrica se ve afectada negativamente por fallas de suministro, fluctuaciones de voltaje y tiempos de respuesta prolongados ante interrupciones, que tienen impactos negativos en los hogares, las instituciones y los sectores industriales. El mantenimiento de las redes se ve dificultado por la escasez de recursos, equipos especializados y materiales. La planificación continua, el mantenimiento preventivo y las actualizaciones tecnológicas son esenciales para garantizar un servicio confiable en los servicios de distribución eléctrica dentro de los parámetros regulatorios. Potenciar este proceso no sólo asegura la satisfacción de los clientes, sino que también mejora la eficiencia operativa y el desarrollo socioeconómico de la región, promoviendo así la rentabilidad del sistema eléctrico [8].

2.2. Distribución eléctrica en plantas industriales

El suministro de energía a diversos equipos y sistemas en entornos industriales es un aspecto crucial de la distribución eléctrica, que es crucial para garantizar un suministro de energía eficiente y confiable. La distribución en entornos industriales requiere una planificación más detallada debido a las altas demandas de energía, la necesidad de continuidad operativa y la presencia de maquinaria especializada, a diferencia de los sistemas residenciales. El proceso de distribución eléctrica en las plantas industriales se inicia en las subestaciones de media tensión, donde la energía se transforma y distribuye a través de redes internas hasta llegar a los tableros de distribución, motores, sistemas de iluminación y equipos automatizados. El proceso debe cumplir con las normas técnicas y de seguridad, incluido el control de los niveles de voltaje y frecuencia, para evitar interrupciones o daños en los equipos [9].

Controlar la calidad de la energía es un aspecto crucial de esta distribución, con un enfoque en minimizar problemas como armónicos, fluctuaciones de voltaje y picos de corriente. El uso de transformadores, sistemas de protección, cableado de alta capacidad y dispositivos de monitoreo adecuados es necesario para garantizar un desempeño eficiente. Además, los sistemas de mantenimiento preventivo y correctivo son esenciales para que las plantas industriales mantengan operaciones ininterrumpidas, minimicen las pérdidas de producción y eviten que la producción se interrumpa inesperadamente. Una distribución eléctrica eficaz no sólo optimiza el consumo de energía, sino que también mejora la productividad, extendiendo la vida útil de los equipos y generando reducciones sustanciales en los costos operativos. Por lo tanto, es necesario un diseño robusto y adaptable para adaptarse a los cambios en la demanda de carga y futuras expansiones dentro de la planta [10].

2.3. Distribución de energía primaria

La distribución de energía primaria se refiere al transporte de electricidad desde las subestaciones de transmisión hasta las subestaciones de distribución cercanas a las áreas de consumo. En esta etapa, la energía se maneja en niveles de media tensión, que en Colombia suelen ser de 7,62 kV, 13,2 kV, 33 kV y 34,5 kV [11].

Estas redes de distribución primaria son importantes para cubrir amplias zonas geográficas y garantizar que la energía llegue de manera eficiente a las subestaciones locales, donde se preparará para su posterior distribución a los usuarios finales.

La topología de las redes de distribución primaria puede variar según las necesidades y la confiabilidad requerida. Los sistemas más comunes incluyen configuraciones radiales, donde una línea principal alimenta directamente a los consumidores; en anillo, que permiten una mayor flexibilidad y redundancia al conectar múltiples subestaciones en un circuito cerrado; y en malla, que ofrecen alta confiabilidad al interconectar diversas fuentes y rutas de suministro.

2.4. Distribución de energía secundaria

La distribución de energía secundaria implica la entrega de electricidad desde las subestaciones de distribución hasta los transformadores de distribución ubicados en proximidad a los consumidores finales. En esta fase, la energía se transforma de media tensión a baja tensión, adaptándose a los niveles requeridos para el consumo doméstico, comercial o industrial. Las tensiones nominales más comunes en Colombia para esta etapa son 120 V, 208 V, 220 V y 240 V [11].

Esta red secundaria es fundamental para garantizar que la energía llegue de manera segura y eficiente a cada usuario, cumpliendo con los estándares de calidad y continuidad del servicio. Las redes de distribución secundaria suelen adoptar una configuración radial, donde cada línea alimenta directamente a un conjunto específico de consumidores. Esta estructura facilita la identificación y solución de problemas en caso de fallas, aunque puede presentar limitaciones en términos de redundancia y capacidad de carga. Por ello, es esencial un diseño cuidadoso y un mantenimiento regular para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico en esta etapa crítica del proceso de distribución.

2.5. Distribución de energía terciaria o de distribución de energía interna.

La distribución de energía terciaria, también conocida como distribución de energía interna, hace referencia al sistema eléctrico que se establece dentro de instalaciones específicas, como plantas industriales, edificios comerciales o complejos residenciales. En esta fase, la energía eléctrica, ya en baja tensión, se reparte desde el punto de entrada principal hacia los diferentes equipos, maquinarias y puntos de consumo internos. Este sistema debe ser diseñado cuidadosamente para satisfacer las necesidades particulares de cada instalación, asegurando al mismo tiempo la eficiencia, la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico [12].

Un diseño eficaz de la distribución de energía interna debe tener en cuenta aspectos como la capacidad de carga, la flexibilidad para futuras expansiones, así como la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, cumpliendo además con las normativas de seguridad eléctrica vigentes. Igualmente, resulta esencial implementar sistemas de mantenimiento preventivo y monitoreo constante, lo que permite detectar y solucionar eventuales fallas antes de que estas afecten el funcionamiento de la instalación. En suma, una distribución interna bien planificada no solo optimiza el rendimiento de los equipos, sino que también favorece la eficiencia energética y contribuye a la reducción de los costos operativos.

2.6. Factor de potencia

El factor de potencia o “fp” es considerada como una medida de la eficiencia con la que un sistema usa la electricidad. Además, se define como la relación entre la potencia activa (potencia eléctrica que hace un trabajo útil) y la potencia aparente (es una composición de potencia activa y reactiva). Un factor de potencia de 1 significa que en su totalidad la electricidad suministrada se emplea de manera eficiente para efectuar un trabajo útil. Sin embargo, si hay potencia reactiva en el sistema, el factor de potencia puede ser inferior a 1, lo que indica una eficiencia reducida en el uso de la electricidad. Matemáticamente, el factor de potencia se calcula como el coseno del ángulo de fase entre la corriente y el voltaje en un circuito [13].

En la Ecuación. 1 se muestra el ‘fp’, el cual cuenta con 3 variables que son: la primera variable es “P” que es la potencia activa de la red, la cual se transforma en trabajo útil, la segunda variable es “S” que es la potencia aparente de la red, la cual es la unión de la potencia activa y reactiva, comprende la totalidad de electricidad la cual es proveniente de la red, y por último la variable “θ” que es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje en un mismo circuito.

$$\text{Factor de potencia (fp)} = \frac{\text{“P”}}{\text{“S”}} = \cos \theta \quad (1)$$

Donde:

- “P”: Potencia activa.
- “S”: Potencia aparente
- θ: Angulo de fase.

El factor de desplazamiento está en base a la fundamental, y queda expresada de la siguiente manera:

$$DF = \frac{V_{1-ef} \cdot I_{1-ef} \cdot \cos(\varphi_1)}{V_{1-ef} \cdot I_{1-ef}} = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi_1) \quad (2)$$

Donde:

V_{1-ef} tensión eficaz de la componente fundamental

I_{1-ef} es la amplitud de la corriente.

$$fp_{total} = \frac{V_{ef} \cdot I_{1-ef} \cdot \cos(\varphi_1)}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \frac{I_{1-ef}}{I_{ef}} \cdot \cos(\varphi_1) = DH \cdot DF \quad (3)$$

$$fp_{total} = fp_{dist} \cdot fp_1 \quad (4)$$

Donde:

DH es la distorsión armónica y

DF es la distorsión de la frecuencia.

Entonces la nueva expresión para la distorsión armónica:

$$DH = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}} \quad (5)$$

Con relación al factor de potencia fundamental (fp_{total}), se tendría:

$$fp_{total} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cdot \cos(\varphi_1) \quad (6)$$

un bajo factor de potencia también puede ser producto a un aumento de la corriente, y esta es producto de las distorsiones armónicas.

2.7. Potencia Activa

La potencia eléctrica que se convierte en trabajo útil, como iluminar, calentar o moverse un motor, se conoce como potencia activa (P). Su unidad de medida es en vatios (W) y es la potencia real que realiza un trabajo. La tensión, la corriente y el factor de potencia son los tres factores que afectan la potencia activa. El factor de potencia es el coseno del ángulo de fase entre la corriente y el voltaje.

Potencia activa en sistemas trifásicos:

$$P_{TRIFASICA} = \sqrt{3} \times IL \times VL \times \cos \theta \quad (7)$$

Dónde:

- P significa la potencia activa en un sistema trifásico (W).
- VL es el voltaje de línea (V).
- IL es la corriente de línea (A).
- θ es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje.

2.8. Potencia reactiva

También es conocida como “Q” es un componente de la electricidad que no realiza ningún trabajo útil en el circuito. Esto ocurre porque el sistema contiene componentes inductivos y capacitivos como bobinas, transformadores y condensadores. Esta energía se caracteriza por la formación de campos magnéticos y eléctricos, que se almacenan temporalmente en estos elementos, pero no se transforman en trabajo mecánico, térmico u óptico.

Potencia reactiva en sistemas trifásicos:

$$Q_{TRIFASICA} = \sqrt{3} \times IL \times VL \times \sin \theta \quad (8)$$

Dónde:

- Q trifásico es la potencia reactiva en un sistema trifásico (VAR).
- VL es el voltaje de línea (V).
- IL es la corriente de línea (A).
- θ es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje.

La potencia reactiva su unidad de medida son los voltamperios reactivos (VAR) y es necesaria para conservar una armonía entre voltaje y corriente en sistemas con componentes inductivos o capacitivos. Sin embargo, demasiada potencia reactiva puede causar varios problemas en la red eléctrica, como caídas de voltaje, pérdidas de energía y sobrecarga de equipos [7].

En una conexión en estrella, las tensiones de línea y de fase están relacionadas a través del factor $\sqrt{3}$.

Tensión de Línea (VL):

$$VL = \sqrt{3} \times V_{fase} \quad (9)$$

Donde:

- VL es la tensión entre dos líneas.
- Vfase es la tensión entre una línea y el neutro.

Tensión de Fase (Vfase):

$$V_{fase} = \frac{V_{Linea}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

En una conexión en triángulo, los voltajes de línea y de fase son iguales:

Tensión de Línea y fase:

$$V_L = V_{fase} \quad (11)$$

Donde:

- VL es la tensión entre dos líneas.
- Vfase es la tensión entre los dos terminales de una fase.

$$V_{fase} = \frac{V_{Linea}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

2.9. Tipos de compensación de potencia reactiva

Los tipos de compensación para la potencia reactiva se las puede clasificar dependiendo de cómo se los vaya a utilizar en cada campo, los tipos de compensadores más comunes son:

2.9.1. Banco de capacitores fijos

Los bancos de capacitores fijos están compuestos por una serie de condensadores instalados de forma permanente en un sistema eléctrico, con el propósito de ofrecer una compensación constante de potencia reactiva. Estos dispositivos están diseñados para funcionar bajo condiciones normales, proporcionando una solución simple y económica para la corrección del factor de potencia y la disminución de pérdidas en la red eléctrica. Generalmente, los bancos fijos se conectan directamente al sistema o a través de disyuntores, facilitando su implementación en subestaciones o líneas de distribución. Su función principal es compensar la potencia reactiva generada por cargas inductivas, como motores o transformadores, además de mejorar el perfil de voltaje, especialmente en entornos industriales y comerciales. Sin

embargo, debido a su naturaleza estática, no pueden adaptarse a los cambios dinámicos en la demanda de potencia reactiva, lo que limita su uso en sistemas con cargas variables.

2.9.2. Banco de capacitores automáticos

Los bancos de capacitores automáticos funcionan de manera similar a los bancos fijos, pero se diferencian en que cuentan con controles automáticos que supervisan de manera continua el factor de potencia del sistema. Estos dispositivos son capaces de conectar o desconectar capacitores en función de la demanda de potencia reactiva, lo que asegura un ajuste dinámico y eficiente. Los controladores automáticos miden parámetros eléctricos como voltaje, corriente y factor de potencia, y utilizan relevadores o dispositivos electrónicos para activar o desactivar las etapas de capacitores, manteniendo así el factor de potencia dentro de un rango óptimo. Esta capacidad de adaptación proporciona una mayor flexibilidad operativa, haciéndolos ideales para sistemas con cargas variables, como en instalaciones industriales y comerciales. Además, contribuyen a evitar penalizaciones económicas por un bajo factor de potencia y optimizan el uso de la capacidad instalada en la red.

2.9.3. Compensadores Híbridos

Los compensadores híbridos combinan la tecnología de bancos de capacitores automáticos con dispositivos de electrónica de potencia, como los FACTS (Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexible), ofreciendo una solución más eficiente y adaptable para la compensación de potencia reactiva. Estos sistemas son capaces de ajustar la potencia reactiva de manera dinámica y precisa, respondiendo de forma instantánea a las variaciones en la carga. Al integrar capacitores convencionales con controles avanzados y dispositivos electrónicos, los compensadores híbridos no solo corrigen problemas de voltaje, sino que también reducen pérdidas y mejoran la estabilidad del sistema eléctrico. Además, tienen la capacidad de mitigar armónicos y fluctuaciones de voltaje, convirtiéndolos en una opción ideal para entornos complejos y exigentes, como las plantas industriales y las redes de transmisión eléctrica.

2.10. Tipos de cargas

Los tipos de cargas en el sistema eléctrico se las pueden clasificar en función de sus propiedades y características eléctricas. Algunas de los tipos de cargas más comunes son:

2.10.1. Cargas inductivas

Las cargas inductivas abarcan elementos como motores eléctricos, transformadores y bobinas. En este tipo de cargas, la corriente se retrasa respecto al voltaje, lo que genera un ángulo de desfase y resulta en la producción de potencia reactiva inductiva, medida en kVAr (kilo voltamperios reactivos). Estas cargas son comunes en el sector industrial, donde motores y transformadores son fundamentales para el funcionamiento de diversos equipos. La potencia reactiva que se genera debe ser compensada mediante dispositivos como bancos de capacitores, con el fin de evitar caídas de voltaje y mejorar la eficiencia del sistema [14].

2.10.2. Cargas capacitivas

Las cargas capacitivas, que incluyen componentes como condensadores y baterías, se caracterizan por tener una corriente que se adelanta al voltaje, creando así un ángulo de fase positivo. Aunque son menos frecuentes que las cargas inductivas, pueden hallarse en sistemas de compensación reactiva y en circuitos electrónicos. Estas cargas producen potencia reactiva capacitiva, la cual necesita ser equilibrada para prevenir sobrevoltajes en la red eléctrica. En entornos industriales, un exceso de cargas capacitivas puede provocar inestabilidad en el perfil de voltaje.[15]

2.10.3. Cargas resistivas

Las cargas resistivas son aquellas que únicamente consumen potencia activa, medida en kW (kilovatios). Este tipo de cargas no generan potencia reactiva, ya que la corriente y el voltaje se encuentran en fase. Ejemplos comunes de cargas resistivas incluyen calentadores eléctricos, estufas, planchas y lámparas incandescentes. En los sistemas eléctricos, estas cargas son sencillas de modelar y no requieren dispositivos de compensación reactiva. Sin embargo, su funcionamiento prolongado puede generar pérdidas térmicas en las líneas de distribución debido al efecto Joule [15].

2.10.4. Cargas mixtas

Las cargas mixtas combinan características resistivas, inductivas y capacitivas, lo que las convierte en un desafío más complejo para su análisis y balance. Ejemplos típicos de estas cargas son los sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), donde se encuentran motores de inducción para ventiladores y compresores, así como elementos resistivos utilizados para calefacción eléctrica. Estas cargas presentan un comportamiento dinámico y requieren sistemas de compensación reactiva adaptativa, como compensadores híbridos, para mantener el factor de potencia en niveles óptimos [16].

2.11. Metodologías para el diseño de un banco de capacitores

Lo más importante en un diseño de los bancos de capacitores lo principal es garantizar su eficiencia y seguridad en la compensación de los reactivos del sistema de potencia. A continuación, se presentan algunas técnicas comunes utilizadas en el diseño de bancos de capacitores:

- **Análisis de carga y potencia reactiva:** Antes de diseñar una batería de condensadores, es importante realizar un análisis detallado de la carga eléctrica y potencia reactiva del sistema. Esto incluye determinar la cantidad de potencia reactiva a compensar y la ubicación óptima del banco de capacitores en el sistema.
- **Cálculo del tamaño del banco de capacitores:** Con base en el análisis de carga y potencia reactiva, se calcula el tamaño apropiado del banco de capacitores requerido para remediar el exceso de reactivos. Esto incluye determinar la clasificación en kilovoltios (kVAr) del banco de capacitores y la cantidad de unidades de capacitores requeridas [17].
- **Selección de elementos capacitores:** se escogen los condensadores adecuados para el conjunto según la potencia requerida y las especificaciones del sistema. Es importante considerar factores como el voltaje nominal, la corriente máxima, la frecuencia de operación y la vida útil del capacitor.
- **Diseño del controlador:** El controlador del banco de capacitores está diseñado para monitorear y controlar el acoplamiento y desconexión de los capacitores según sea lo requerido para mantener el factor de potencia dentro del rango deseado. Esto puede

incorporar la ejecución automática de controladores basados en métricas del factor de potencia.

- Protección y seguridad: se deben usar instrumentos de protección adecuados como fusibles, mecanismos de desconexión rápida y relés de protección para garantizar la seguridad de la batería de condensadores y de todo el sistema eléctrico. Esto ayuda a prevenir sobrecargas, cortocircuitos y otros problemas potenciales [18].

2.12. Normativas para diseño e implementación de un banco de capacitores.

El diseño e implementación de bancos de capacitores en sistemas eléctricos industriales están sujetos a diversas normativas y estándares internacionales que aseguran la seguridad, eficiencia y fiabilidad del sistema. A continuación, se detallan las principales normativas y consideraciones que se deben tener en cuenta:

2.12.1. Normativas Internacionales:

- IEEE Std 18-2012: Esta norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) establece los requisitos para los capacitores de potencia utilizados en sistemas de corriente alterna (CA). Incluye especificaciones sobre su diseño, pruebas, instalación y mantenimiento, garantizando que operen de forma segura y eficiente [19].
- IEC 60831: La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ofrece directrices para los capacitores de potencia en servicios de baja y media tensión. La norma IEC 60831 aborda aspectos como clasificación, requisitos de diseño, ensayos de rutina y tipo, así como procedimientos de instalación y mantenimiento [20].
- ANSI/IEEE Std C37. 99: Esta norma proporciona recomendaciones para la protección y operación de bancos de capacitores en sistemas eléctricos. Incluye directrices sobre la protección contra sobre corriente, sobrevoltaje y otros fenómenos transitorios que podrían afectar tanto el rendimiento como la seguridad del sistema [21].
- NEMA CP 1: La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) en Estados Unidos establece normas para los capacitores de potencia y su uso en sistemas de

distribución eléctrica. NEMA CP 1 especifica los criterios de diseño, construcción y pruebas que deben seguir estos capacitores [22].

Consideraciones de Diseño:

Ubicación y Espacio Físico: Es fundamental que la batería de capacitores se instale en un lugar que ofrezca suficiente espacio tanto para su instalación como para su mantenimiento. Además, se deben respetar distancias mínimas con otros equipos y estructuras eléctricas, para evitar interferencias y facilitar el acceso a los técnicos.

Ventilación y Temperatura: Las baterías de condensadores deben colocarse en un ambiente con ventilación adecuada, de modo que se evite el sobrecalentamiento. Asimismo, las temperaturas extremas pueden comprometer el rendimiento y la vida útil de los condensadores.

Compatibilidad Electromagnética (EMC): Es crucial asegurar que el banco de capacitores no interfiera con otros equipos electrónicos y que cuente con una adecuada protección contra interferencias electromagnéticas externas.

Seguridad Eléctrica: Para salvaguardar tanto al operador como al equipo, es imperativo que la instalación cumpla con los lineamientos de seguridad eléctrica pertinentes.

3. MARCO METODOLÓGICO

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, basado en la realización de simulaciones computacionales y análisis de datos para optimizar la compensación de potencia reactiva en la planta ASME de la empresa SERTECPET S.A. Se utilizará la técnica de búsqueda exhaustiva, apoyada por herramientas de software como ETAP y MATLAB, para identificar la mejor ubicación para bancos de capacitores en el esquema eléctrico de la planta.

Entonces, el tipo de investigación es descriptivo y experimental. Se describirán las características actuales del esquema eléctrico de la planta y se realizarán experimentos de simulación para evaluar el impacto de diferentes configuraciones de bancos de capacitores.

Adicional, la población seleccionada se encuentra conformada por el sistema eléctrico completo de la planta ASME de SERTECPET S.A. La muestra seleccionada incluye los nodos y líneas críticas del sistema donde se podría optimizar la compensación de potencia reactiva.

3.1. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Como instrumentos de recolección de datos se utilizarán las siguientes técnicas e instrumentos:

- Simulaciones en ETAP: Se modelará el esquema eléctrico de la planta en el software ETAP, que permitirá realizar simulaciones bajo diferentes condiciones operativas y escenarios.
- Algoritmos en MATLAB: Se desarrollaron algoritmos en MATLAB para analizar y comparar los resultados de las simulaciones, identificando la configuración óptima para la compensación de potencia reactiva.
- Mediciones de Campo: Se realizaron mediciones in situ de variables eléctricas clave para validar los resultados de las simulaciones.

3.2. Variables y Condiciones para la Ubicación Óptima de Bancos de Condensadores

La ubicación óptima de los bancos de condensadores en el sistema eléctrico de la planta ASME de SERTECPET S.A. se determinó considerando las siguientes variables eléctricas clave y condiciones del sistema:

3.2.1 Variables Eléctricas Consideradas

1. Factor de Potencia (FP):

- **Influencia:** Un bajo factor de potencia genera pérdidas adicionales y penalizaciones económicas. Este parámetro fue medido en cada barra del sistema eléctrico.
- **Objetivo:** Aumentar el FP hasta valores cercanos a cero para optimizar el uso de la energía.

2. Cargas Activas y Reactivas:

- **Influencia:** La distribución de P y Q a lo largo de las barras determina la necesidad y capacidad de compensación.
- **Datos Analizados:** Registros horarios de P, Q y potencia aparente (S) de las cargas conectadas a las barras.

3. Perfil de Tensión:

- **Influencia:** Desviaciones de los valores nominales afectan la estabilidad y eficiencia del sistema. Se analizaron niveles de tensión en barras principales y secundarias.

4. Pérdidas de Energía:

- **Influencia:** Las pérdidas de potencia activa y reactiva fueron evaluadas para minimizar el impacto económico y operativo.

3.2.2 Condiciones Analizadas

1. Simulaciones Operativas:

- Se ejecutaron múltiples escenarios de simulación en ETAP, considerando diferentes configuraciones de bancos de condensadores y ubicaciones.
- Escenarios evaluados: carga máxima, mínima, y promedio; además de casos extremos de fallos o interrupciones.

2. Criterios de Selección de Ubicación:

- **Reducción de Pérdidas:** Se seleccionaron ubicaciones que minimizaron pérdidas de energía activa y reactiva.
- **Mejoras en el Perfil de Tensión:** Se priorizaron barras que mostraron incrementos en niveles de tensión hacia valores nominales.

- **Costos de Implementación:** Consideraciones económicas relacionadas con la distancia a los equipos y facilidad de instalación.

3. Algoritmos de Análisis:

- Los datos obtenidos de las simulaciones fueron procesados en MATLAB para identificar patrones y correlaciones entre las variables eléctricas.
- Se desarrollaron algoritmos específicos para calcular índices de calidad energética, como mejora en el FP y reducción de pérdidas.

3.3. Procedimiento

El procedimiento para llevar a cabo el estudio se describe a en la tabla 1:

Tabla 1. Procedimiento general para elaborar el estudio

Paso	Descripción
1. Recolección de Datos Iniciales	Obtener información detallada del esquema eléctrico actual, incluyendo:
	• Diagramas unifilares
	• Características del instrumental
	• Registros del uso de energía.
2. Modelado del Sistema en ETAP	Crear un modelo preciso en el software ETAP, integrando:
	• Todos los componentes eléctricos relevantes
	• Sus características operativas.
3. Simulaciones Preliminares	Realizar simulaciones iniciales en ETAP para:
	• Identificar puntos críticos del sistema
	• Evaluar el comportamiento bajo límites de carga y demanda.
4. Desarrollo de Algoritmos en MATLAB	Crear y validar algoritmos en MATLAB para analizar los resultados de las simulaciones e identificar configuraciones óptimas para los bancos de capacitores.
5. Simulaciones Exhaustivas	Ejecutar simulaciones más detalladas en ETAP, explorando:

	<ul style="list-style-type: none"> • Diferentes ubicaciones de bancos de capacitores • Capacidades variables de los mismos.
6. Análisis de Resultados	Usar los algoritmos desarrollados en MATLAB para: <ul style="list-style-type: none"> • Analizar los datos de simulaciones • Determinar la ubicación y configuración óptima de los bancos de capacitores.

3.4. Análisis de Potencia Reactiva

El primer paso para seleccionar la capacidad de un banco de capacitores es un análisis detallado de la potencia reactiva del sistema. Este análisis incluye una evaluación de las cargas inductivas y capacitivas actuales y su contribución a la potencia reactiva total.

3.4.1. Cálculo de la Potencia Reactiva (Q)

La potencia reactiva (Q) se puede deducir usando la siguiente ecuación:

$$Q = S \cdot \sin(\theta) \quad (13)$$

Dónde:

- Q es la potencia reactiva en voltamperios reactivos (Var).
- S es la potencia aparente en voltamperios (Va).
- θ es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje.

3.4.2. Determinación de la Capacidad del Banco de Condensadores

Una vez que se ha determinado la potencia reactiva máxima, se puede establecer la amplitud necesaria del banco de condensadores para compensar esta potencia. La capacidad del banco de condensadores se expresa en kilo voltamperios reactivos (kVAr).

3.4.3. Capacidad del Banco de Condensadores

La capacidad del banco de condensadores se puede deducir con la siguiente ecuación:

$$Q_C = Q - Q_{des} \quad (14)$$

Dónde:

- Q_c es la capacidad del banco de condensadores en kVAr.
- Q es la potencia reactiva total del sistema en kVAr.
- Q_{des} es la potencia reactiva deseada después de la compensación.

3.5. Procedimiento para la Selección de la Capacidad

El procedimiento para seleccionar la amplitud del banco de condensadores implica los siguientes pasos:

- **Medición de la Potencia Reactiva Actual:**

Realizar mediciones precisas de potencia reactiva en el sistema utilizando analizadores de redes y otros equipos de medición, además se utilizarán datos suministrados por el operador de red en la frontera comercial.

- **Cálculo de la Potencia Reactiva Necesaria:**

Deducir la potencia reactiva que necesita ser compensada para alcanzar el factor de potencia deseado (generalmente cercano a 1).

- **Cálculo de la Potencia Reactiva Neta:**

$$Q_{neta} = Q_{inductiva} - Q_{capacitiva-auto} \quad (15)$$

Dónde:

- Q_{neta} es la potencia reactiva neta para el banco de capacitores automático.
- $Q_{capacitiva-auto}$ es la potencia reactiva capacitiva ajustada automáticamente

Selección del Banco de Condensadores:

Seleccionar un banco de condensadores comercialmente disponible que se ajuste a la capacidad calculada y que cumpla con las especificaciones técnicas del sistema.

El tablero de capacitores adicionalmente deberá incluir los siguientes componentes:

- **Controlador de Factor de Potencia:**

Un controlador automático que vigila el factor de potencia y conecta o desconecta los pasos de capacitores conforme sea imprescindible para conservar el factor de potencia en el rango requerido, en este caso se requiere un banco de al menos 13 pasos, en el mercado es posible conseguir controladores de 15, 18 o 24 pasos.

- **Condensadores:**

Condensadores trifásicos de potencia nominal adecuada, con una tensión de operatividad que corresponda al sistema eléctrico de la planta y al punto a seleccionar en el proceso de búsqueda exhaustiva (440V o 220V).

- **Pérdidas de potencia aparente:** Se calculará también la potencia aparente (kVA) a partir de los valores de pérdidas activas y reactivas mediante la ecuación:

$$Perdidas\ KVA = \sqrt{Perdidas\ Activa\ Kw^2 + Perdidas\ Reactivas\ en\ Kvar^2} \quad (16)$$

- **Contactores:**

Contactores adecuados para cada paso de capacitores, diseñados para manejar la corriente nominal y las condiciones de operación, en este caso se recomienda usar contactores de alta velocidad para garantizar la conmutación rápida de los pasos reduciendo la influencia de armónicos al momento de la entrada y salida de los pasos.

- **Fusibles y Protecciones:**

Fusibles de protección y dispositivos de desconexión rápida para cada paso de capacitores, asegurando la protección del sistema contra sobrecargas y cortocircuitos.

- **Sistema de Ventilación:**

Se debe instalar un método de ventilación adecuado para eludir el sobrecalentamiento de los condensadores y demás componentes del tablero, garantizando el correcto funcionamiento.

Al seleccionar la capacidad del banco de condensadores, es importante tener en cuenta:

- La ubicación del banco de condensadores para minimizar pérdidas y maximizar la eficiencia.
- Las condiciones ambientales y operativas, como temperatura y humedad, que pueden afectar el rendimiento del banco de condensadores.
- La normativa y estándares aplicables, como IEEE Std 18-2012 e IEC 60831, para asegurar la conformidad y seguridad del sistema.

4. INSPECCIÓN TÉCNICA

La inspección técnica consistió en examinar la condición actual del sistema eléctrico de la para la futura instalación y verificar el espacio necesario para el banco de capacitores propuesto. La finalidad de la inspección consistió en detectar dificultades potenciales y asegurar que la solución posible a ser implementada cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia establecidos.

- **Diagrama Unifilar del Sistema de Potencia:**

Se elaboró un diagrama unifilar detallado del sistema de potencia de la planta, el cual se presenta en la Figura 2. Este diagrama muestra la disposición de los componentes eléctricos y su interconexión.

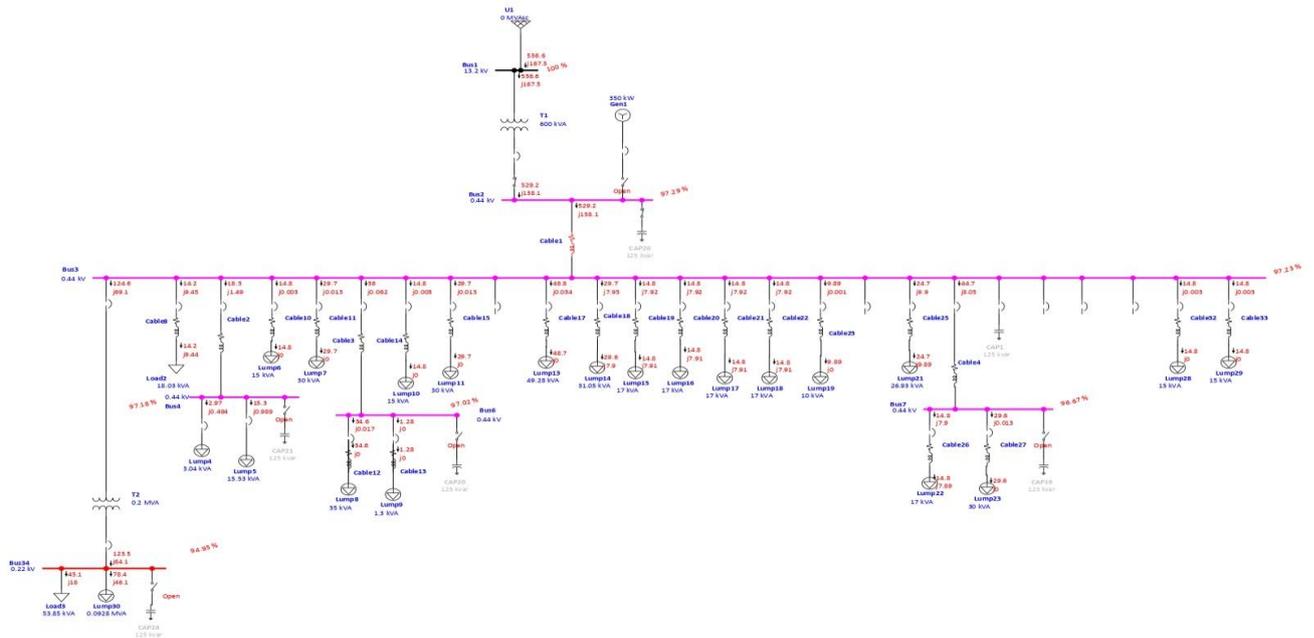


Figura 2. Diagrama unifilar planta

- **Información de Equipos:**

Se recopiló información detallada de los principales equipos eléctricos, incluyendo sus características técnicas y estado operativo para su correcta modelación en las simulaciones.

- **Registro Fotográfico:**

El registro fotográfico proporciona una vista precisa de los dispositivos inspeccionados, destacando su condición actual y cualquier anomalía detectada. En la figura 3 se puede ver parte del registro tomado en los tableros principales de distribución. En las figuras 22 a 27 anexas se pueden ver más fotografías de algunos de los equipos revisados en la inspección.



Figura 3. Registro fotográfico de tableros y equipos

- **Recolección de Información:**

Se realizó una recolección exhaustiva de información adicional necesaria para el análisis y validación de las estrategias de compensación de potencia reactiva. Esto incluyó registros históricos de consumo de energía y mantenimiento de equipos. La información relevante se incluye en los anexos.

4.1. Resultados de la inspección

El análisis de los resultados de la inspección técnica permitió identificar las siguientes observaciones:

- Algunos equipos se encuentran en buen estado operativo, aunque se detectaron algunas conexiones sueltas que requieren ajuste.
- Los niveles de potencia reactiva medidos son consistentes con los resultados de las simulaciones, confirmando la necesidad de optimizar la compensación.
- El registro fotográfico reveló áreas específicas donde se puede optimar la instalación y el mantenimiento de los bancos de capacitores.

5. CÁLCULO DEL BANCO DE CONDENSADORES

Para el cálculo del banco de condensadores que requiere la planta, se llevó a cabo un análisis con los datos del caso base utilizando la matriz de consumo hora a hora de la planta durante el mes de mayo los cuales encontramos en el anexo 2, en este periodo la planta operó a su máxima capacidad. Con este análisis se puede ver las condiciones de operación a plena carga para seleccionar un banco que pueda cubrir todos los escenarios posibles de operación de manera adecuada. Para poder analizar los datos de entrada se gráfica las potencias registradas cada hora durante el mes, incluyendo la potencia activa (kW), la potencia reactiva capacitiva (kVA), y la potencia reactiva inductiva (kVAr y kVA) correspondiente a cada hora. Con estos gráficos se puede ver las variaciones horarias de la carga, facilitando ver puntos específicos de consumo y de compensación.

En la Figura 4 se puede ver la energía aparente consumida hora a hora la cual combina la energía activa y la reactiva (tanto inductiva como capacitiva). Es una proporción de la carga general

que el sistema eléctrico debe soportar. La potencia aparente muestra la carga total hora a hora que del sistema eléctrico. Los picos en la potencia aparente indican días de alta actividad general en la planta. La variación horaria en la potencia aparente resalta los períodos de alta y baja demanda. Estos datos son cruciales para la planificación de configuración del banco. La gráfica mensual de la potencia aparente nos puede ayudar a identificar los instantes de máxima demanda eléctrica. Se puede observar que el consumo máximo horario durante el mes fue de 567.85 kVAh, mientras que el mínimo fue de 0 kVAh.

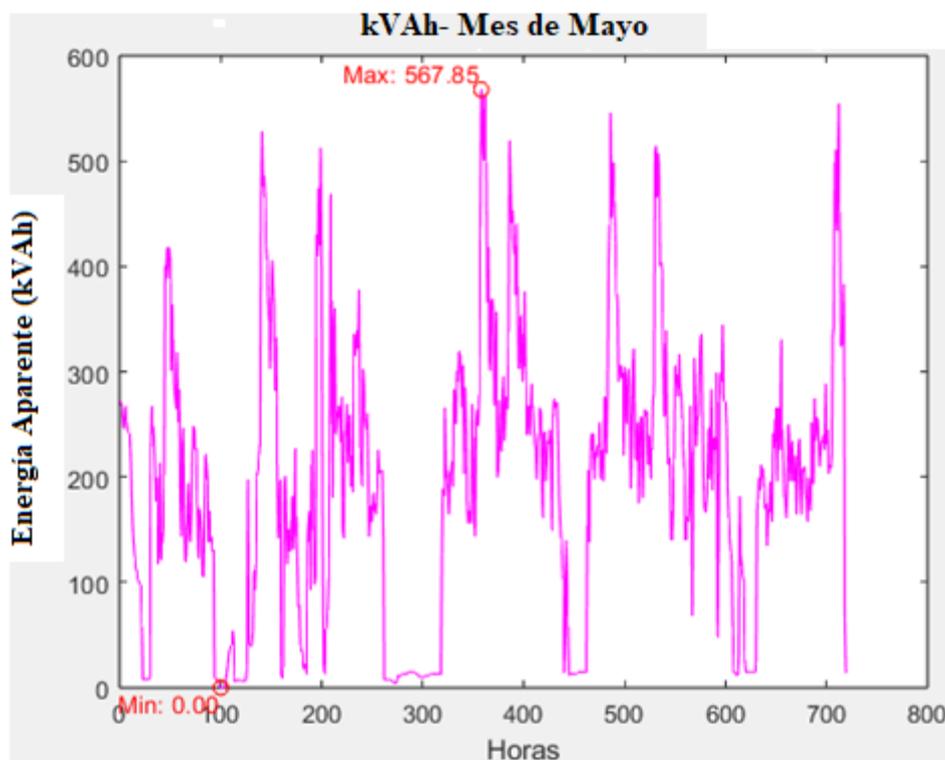


Figura 4. Consumo de Energía aparente mes mayo.

En la Figura 5 se presenta la potencia activa que representa el uso de energía real por parte de la empresa SERTECPET a lo largo del mes de mayo. Se observa un consumo horario variado, con picos significativos en ciertas horas. Esto podría reflejar los diferentes niveles de actividad en la empresa. Dentro de cada día, el consumo horario muestra fluctuaciones. Es posible identificar horas pico de mayor consumo que puede estar relacionado con los períodos de mayor actividad operativa. La gráfica mensual muestra la variación en el consumo de potencia activa, destacando días específicos, como el 3 y 16 de mayo, que muestran picos altos, lo que sugieren puntos de máximo consumo por producción. El consumo máximo horario durante el mes fue de 552.55 kWh, mientras que el mínimo fue de 0 kWh.

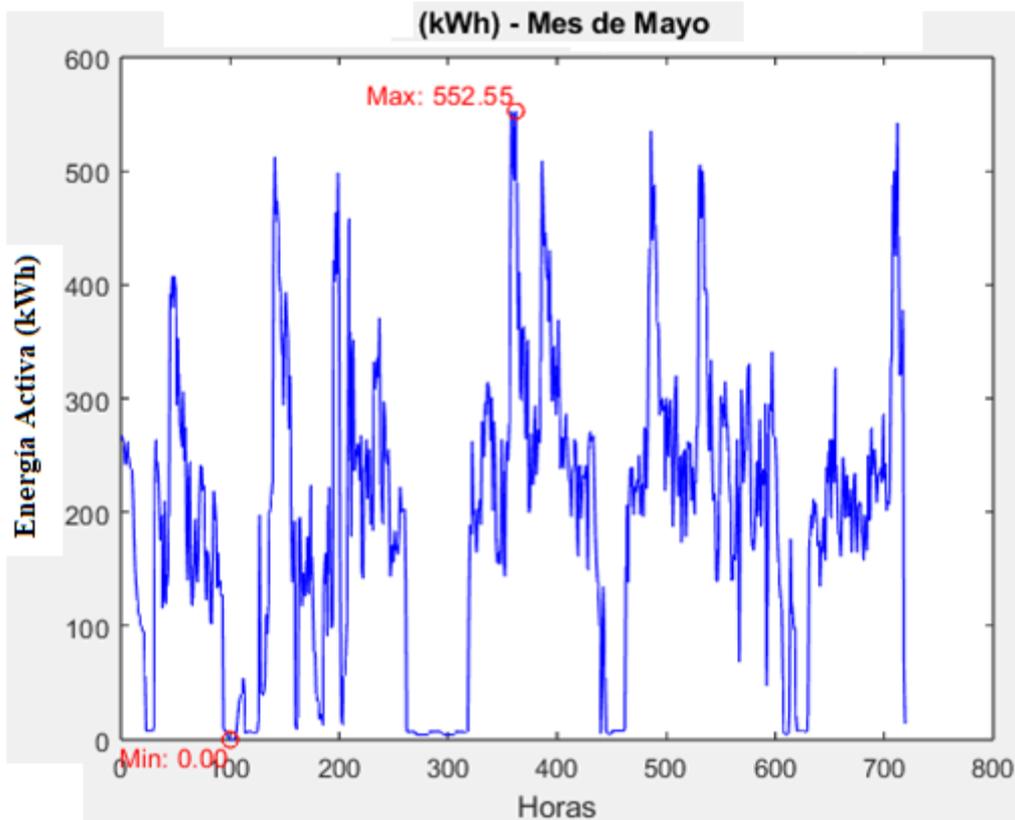


Figura 5. Consumo de potencia Activa mes mayo.

En la Figura 6 se presenta la energía reactiva inductiva es una muestra de la energía almacenada y liberada por elementos inductivos como motores y transformadores en el sistema eléctrico. Similar a la potencia activa, el uso de potencia reactiva inductiva también varía diariamente. Hay días con picos altos de consumo reactivo, lo que podría indicar un uso intensivo de motores u otros equipos inductivos. La energía reactiva inductiva muestra variaciones horarias que pueden correlacionarse con el uso de maquinaria específica que opera en horarios determinados. A lo largo del mes, se pueden identificar patrones de alta inductancia, lo cual es necesario para el dimensionamiento adecuado de los equipos de compensación de energía reactiva en la planta. El consumo máximo horario durante el mes fue de 131.56 kVArh, mientras que el mínimo fue de 0 kVArh. También es posible ver unos valles durante un tiempo prolongado de tiempo en 10kVAr, algunos en 5kVAr lo cual nos indica que se requieren pasos de esta capacidad en el banco para suplir estos momentos de bajo consumo de energía reactiva.

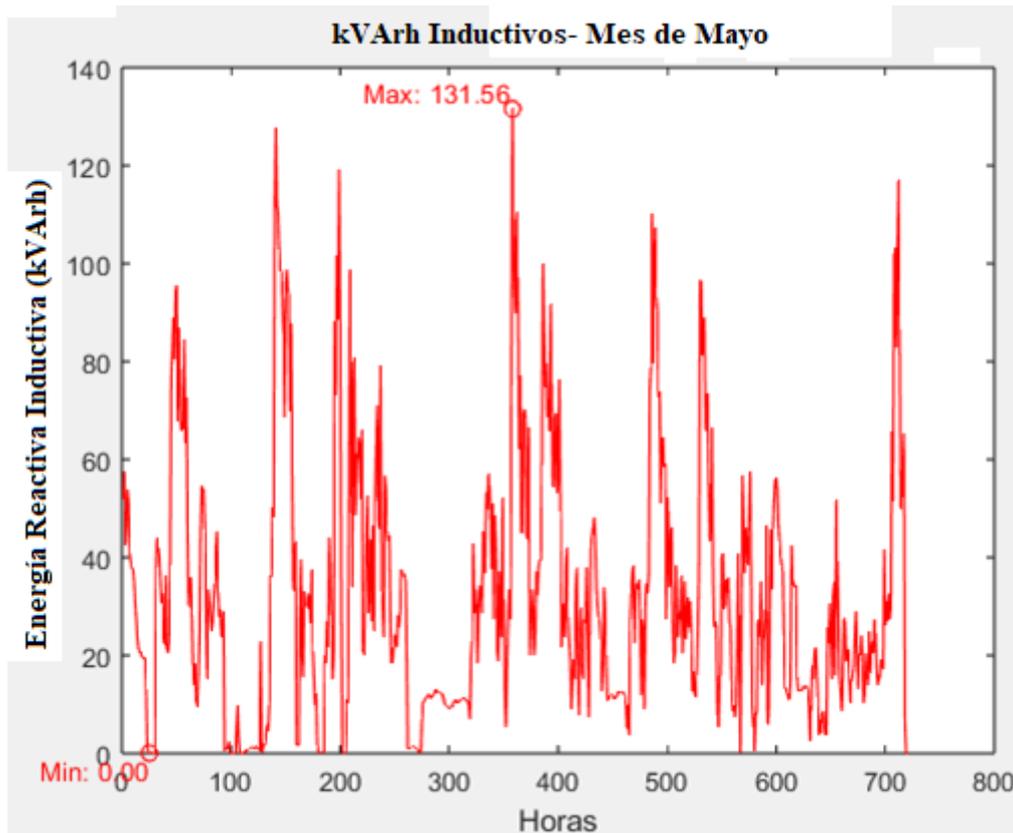


Figura 6. Consumo de potencia Reactiva Inductiva mes mayo.

La Figura 7 se puede ver la energía reactiva capacitiva se refiere a la energía acumulada y liberada por componentes capacitivos en el sistema, como los condensadores. El consumo de energía reactiva capacitiva es generalmente menor en comparación con la inductiva, lo que sugiere que la planta tiene menos elementos capacitivos o que estos están mejor compensados. Las variaciones horarias son menos pronunciadas, pero aun así existen, indicando momentos específicos donde la capacidad reactiva es más significativa. La tendencia mensual muestra una baja constante en la mayoría de los días, lo cual es idóneo para conservar un buen factor de potencia en el sistema. El consumo máximo horario durante el mes fue de 0.25 kVArh, mientras que el mínimo fue de 0 kVArh. De acuerdo con estos datos se identifica que no se requiere compensación de energía reactiva capacitiva.

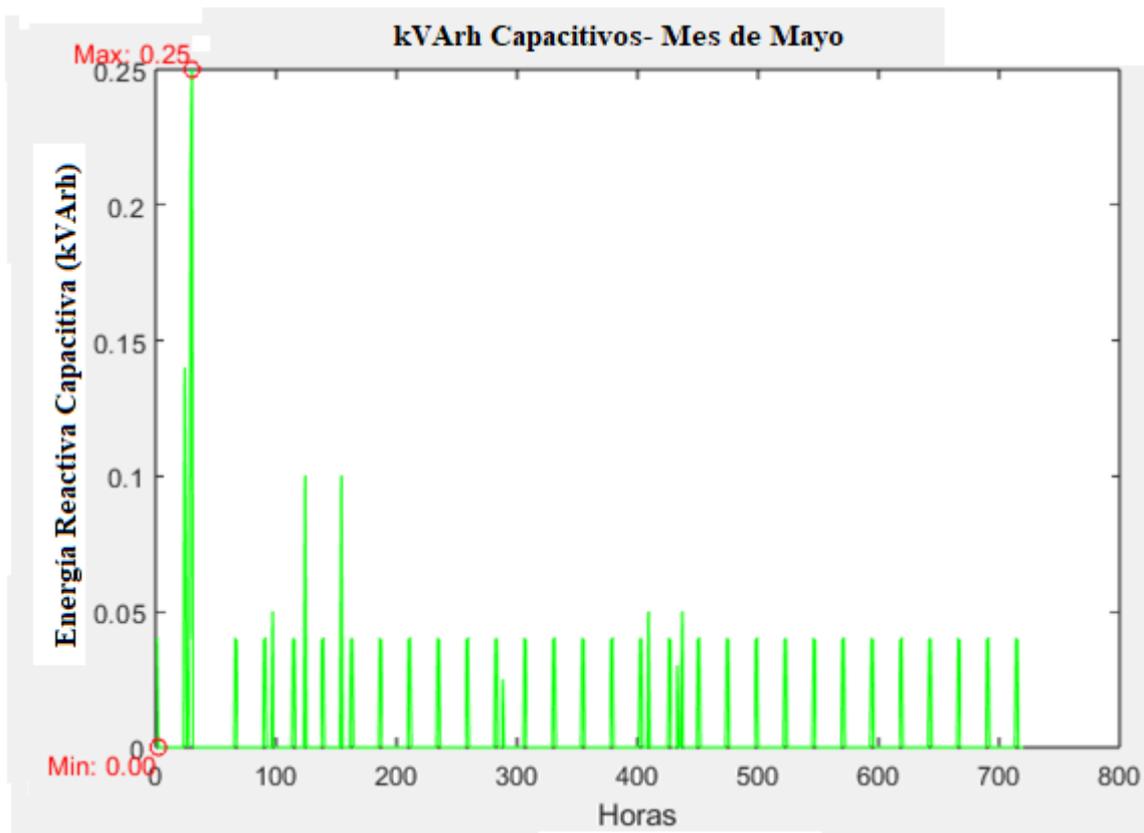


Figura 7. Consumo de energía Reactiva capacitiva mes mayo.

5.1. Cálculo y Configuración del Banco de Condensadores

Teniendo en cuenta las mediciones que nos indican la energía reactiva total Q de 131.56 kVAr y se desea reducir esta energía reactiva a 0 kVAr para mejorar el factor de potencia sin necesidad de generar energía reactiva capacitiva en los tiempos de conmutación de cada paso. Para esto se dejará configurado el banco para intentar mantener los valores en 0 kVAr. La capacidad del banco de condensadores necesaria se calcula de la siguiente manera:

$$Q_C = Q - Q_{des} \quad (17)$$

$$Q_C = 131.56 \text{ kvar} - 0 \text{ kvar} = 131.56 \text{ kvar} \approx 132 \text{ kvar} \quad (18)$$

Por ello, se necesitaría un banco de condensadores con una capacidad aproximada de 132 kVAr con el fin de lograr la compensación deseada si se tiene en cuenta la potencia reactiva máxima registrada.

Para determinar la correcta configuración del banco de condensadores se va a realizar un script que nos permitirá evaluar el comportamiento del banco de condensadores y la cantidad de activaciones de cada uno de los pasos. A continuación, en la tabla 2, se puede ver un algoritmo de cómo se realizó este procedimiento donde se ve un análisis de la complejidad de cada paso. La complejidad dominante está en el Paso 8, donde iteramos sobre n unidades de tiempo, y dentro de cada iteración evaluamos hasta k pasos de capacitores.

Tabla 2. Algoritmo para la optimización del banco de condensadores con análisis de complejidad

Paso	Descripción	Complejidad
Paso 1	Definir la ruta del archivo de entrada y salida.	O(1)
Paso 2	Cargar los datos de potencia reactiva inductiva.	O(n) (lectura de datos).
Paso 3	Extraer fechas y horas de los datos cargados.	O(n)
Paso 4	Aplanar los datos (combinar en un único conjunto, p. ej., un mes).	O(n)
Paso 5	Definir los pasos de capacitores.	O(k) , donde k es el número de pasos de capacitores.
Paso 6	Inicializar matrices para el seguimiento de la potencia reactiva.	O(n)
Paso 7	Definir el rango objetivo para la compensación.	O(1)
Paso 8 (Iterar por cada tiempo)	Iterar sobre cada unidad de tiempo (n) y calcular compensaciones. Subprocesos:	O(n · k)
- a. Calcular potencia reactiva neta	Restar valores actuales (operación constante).	O(1) por iteración.
- b. Determinar objetivo de compensación	Operación constante para definir el objetivo.	O(1) por iteración.
- c. Activar pasos de capacitores	Iterar sobre k pasos para ajustar la compensación.	O(k) por iteración.
Paso 9	Calcular potencia reactiva neta después de la compensación.	O(n)
Paso 10 (Graficar resultados)	Graficar comportamiento y resultados (depende de la herramienta de graficado, pero suele ser lineal con los datos).	O(n)

La Figura 8 se presenta un diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del banco de condensadores y de cómo se obtienen los registros de activación de cada condensador del banco.

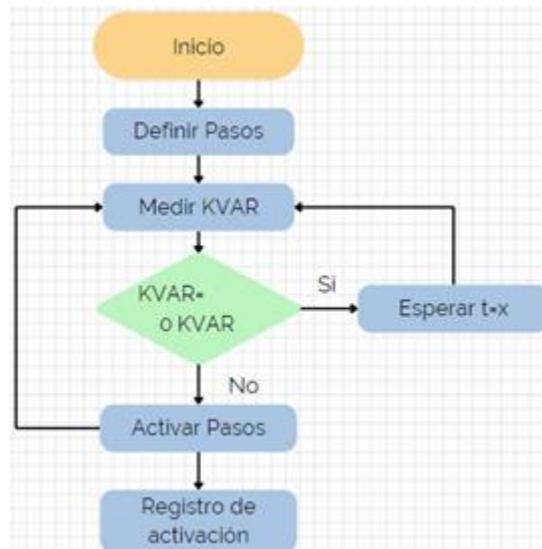


Figura 8. Diagrama de flujo funcionamiento banco de condensadores.

Para probar la distribución de los pasos se realiza una prueba con varios condensadores de distintos valores de kVAr escogidos del catálogo de la figura 28 anexa, para determinar la mejor configuración de acuerdo con el número de operaciones realizadas en la compensación de Q.

Distribución de los Pasos de prueba:

- 1 paso de 40 kVAr
- 6 pasos de 20 kVAr
- 4 pasos de 10 kVAr
- 4 pasos de 2.5 kVAr

Para optimizar el banco de condensadores es necesario ejecutar una simulación del comportamiento del banco de condensadores por medio de un algoritmo en MATLAB y determinar qué pasos se requieren y cuáles no.

5.2. Configuración del Banco de Capacitores Automático

Rango objetivo: El banco de capacitores automático intenta mantener la potencia reactiva neta dentro o cercana a 0 kVAr.

Además de garantizar el rango objetivo el sistema debe cumplir la siguiente relación:

$$Q_{neta} = Q_{inductiva} - Q_{capacitiva-auto} \quad (19)$$

Dentro de un script en Matlab la Q capacitiva-Auto se calcula mediante un algoritmo que permite encender la cantidad de pasos necesaria para compensar la potencia reactiva que está consumiendo el sistema.

Cálculo de la Potencia Reactiva Neta:

En la tabla 3 se puede ver el registro de activaciones de cada uno de los pasos de acuerdo con la configuración del controlador de factor de potencia simulado.

Tabla 3. Registro de activaciones de los pasos propuestos

Step	Activaciones	Total-kVAr
Paso 1: 50 kVAr	143	7150
Paso 2: 20 kVAr	379	7580
Paso 3: 20 kVAr	97	1940
Paso 4: 20 kVAr	11	220
Paso 5: 20 kVAr	1	20
Paso 6: 20 kVAr	0	0
Paso 7: 10 kVAr	306	3060
Paso 8: 10 kVAr	0	0
Paso 9: 10 kVAr	0	0
Paso 10: 10 kVAr	0	0
Paso 11: 2.5 kVAr	484	1210
Paso 12: 20 kVAr	0	0
Paso 13: 2.5 kVAr	320	800
Paso 14: 40 kVAr	0	0
Paso 1: 50 kVAr	143	7150
Total, de Activaciones	1741	
Total, kVAr compensados		21980

De acuerdo con los resultados de la tabla 1 se encuentra que luego de todas las operaciones necesarias para lograr el objetivo planteado de 0 kVAr. Se puede ver que varios de los pasos nunca entraron en operación por tal motivo se realiza la configuración de acuerdo con este historial de operaciones.

5.3. Selección de los pasos del Banco de Condensadores:

En la tabla 3 se puede observar los pasos seleccionados para la construcción del banco de condensadores y el total compensado por cada paso, se puede ver que se compensaron 21 Mvar.

La figura 10 se presenta el comportamiento de la potencia reactiva del caso base y el comportamiento simulado luego de instalar el banco de condensadores, hay que tener en cuenta que estas mediciones se realizaron en la frontera comercial del operador de red y por temas operativos no es posible instalar el banco en este punto.

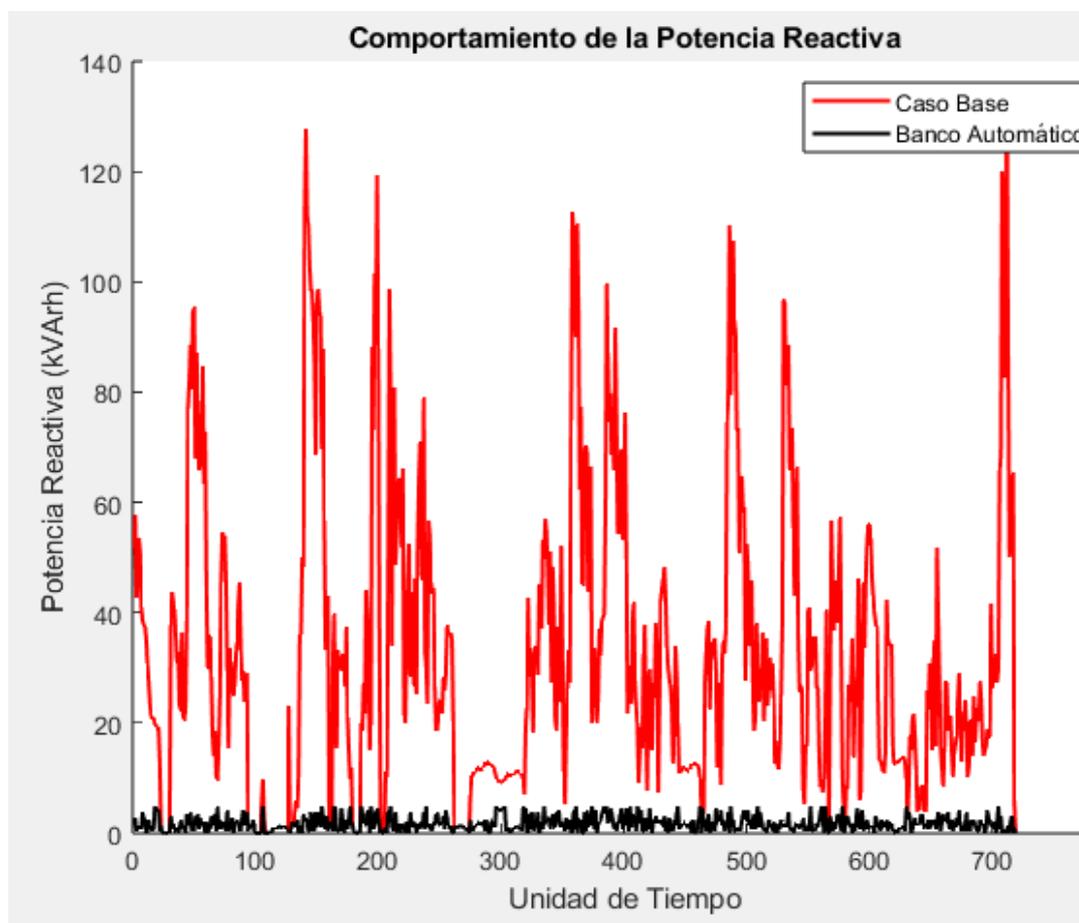


Figura 9. Potencia reactiva- Caso Base y Banco automático incluido.

En la Figura 11 se puede ver un comparativo del nivel de tensión en el caso base y el esperado luego de instalar el banco de condensadores, se puede ver un incremento en los niveles pasando de la zona marginal a la zona de operación normal, mostrando una mejoría en los perfiles de voltaje.

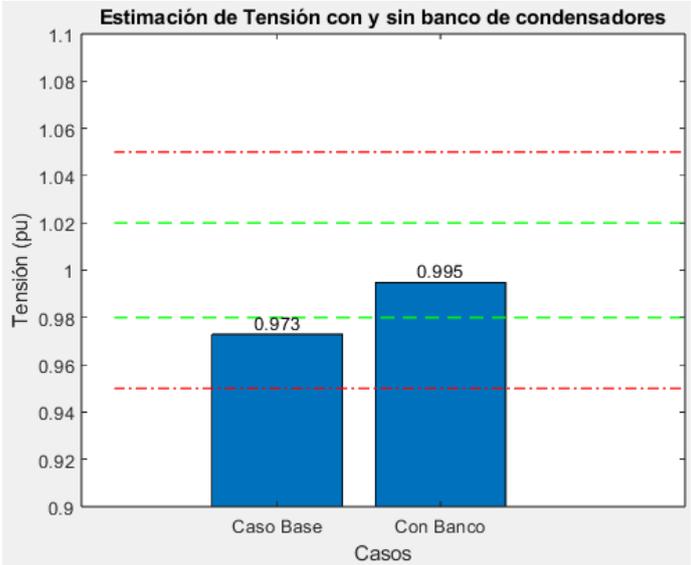


Figura 10. Comparativa tensión barraje principal vs estimado luego de instalar el banco.

La figura 12 se observa el unifilar propuesto para el banco de condensadores necesario por el sistema de acuerdo con la matriz de consumo de la planta, esta distribución de los pasos se seleccionó de acuerdo con el historial de operaciones de la tabla 1.

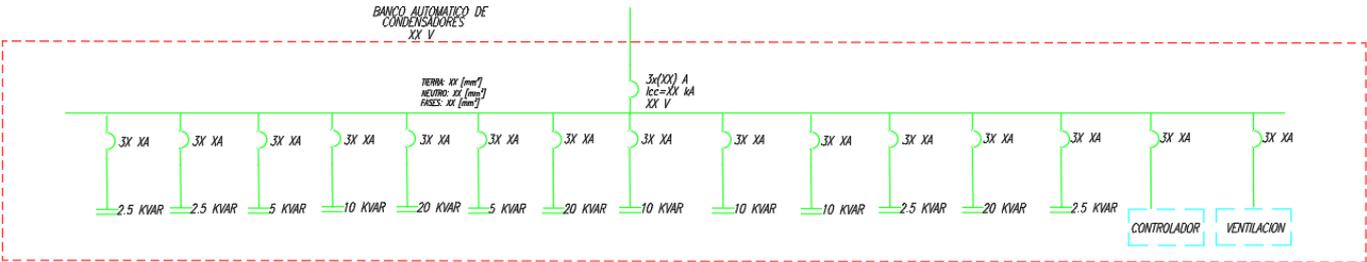


Figura 11. Diagrama unifilar Propuesto

Ahora por medio de simulaciones exhaustivas se va a definir la mejor ubicación con el método de búsqueda exhaustiva para determinar la mejor barra de conexión que en este caso puede ser a 440V o 220V.

6. UBICACIÓN DEL BANCO DE CONDENSADORES

La correcta designación del banco de capacitores fue muy importante para maximizar la eficiencia y efectividad en la compensación de potencia reactiva en el sistema eléctrico de la planta ASME de SERTECPET S.A. Esta sección describe el proceso y los criterios utilizados para determinar la disposición óptima de los bancos de capacitores, así como los resultados obtenidos.

6.1. Método de Búsqueda Exhaustiva

Se utilizó el método de búsqueda exhaustiva para evaluar todas las posibles ubicaciones de los bancos de capacitores en el sistema eléctrico. Este enfoque implica la simulación de diferentes escenarios en el software ETAP, variando la ubicación y la capacidad de los capacitores en cada nodo del sistema. Todas las posibles ubicaciones que se puede ver en la Figura 13. Donde se puede ver en verde las ubicaciones a evaluar.

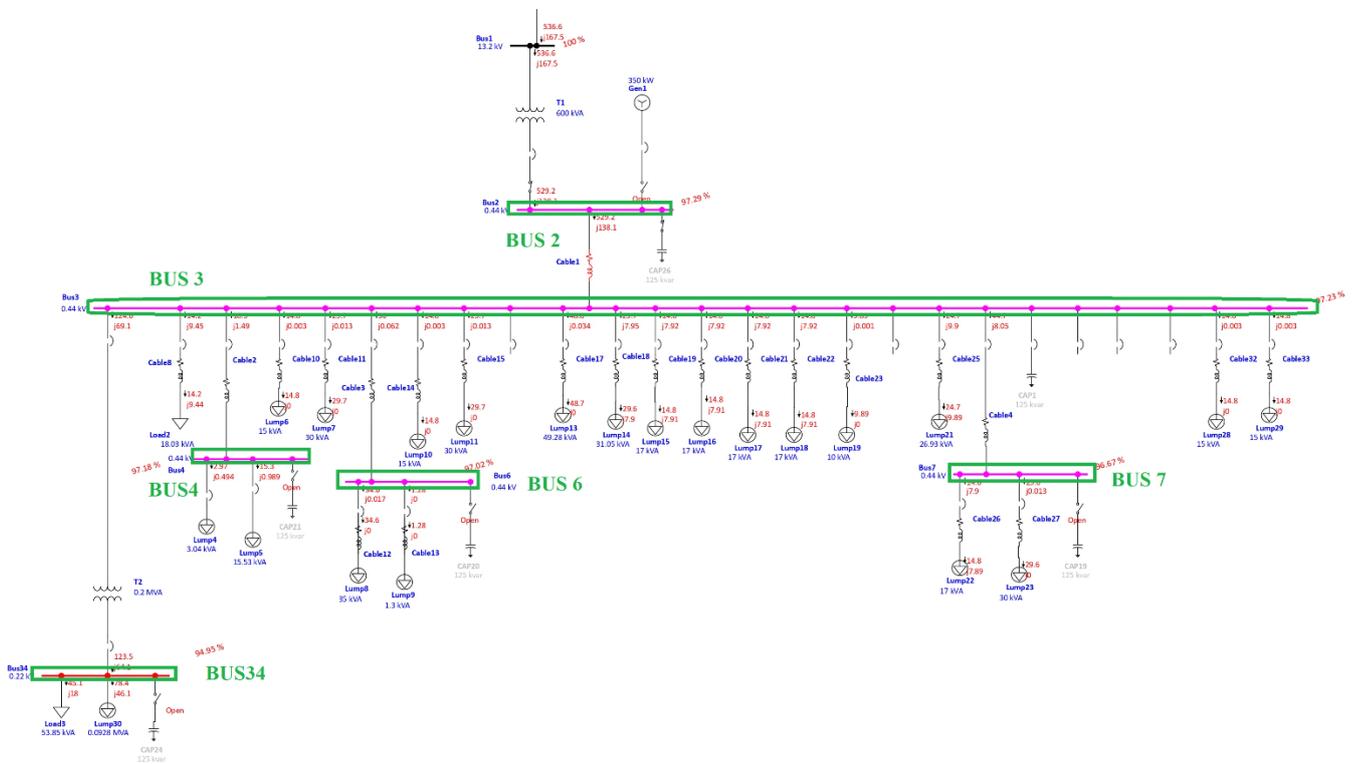


Figura 12. Ubicaciones para evaluar

6.1.1. Simulaciones en ETAP

Se configuró un modelo detallado del sistema eléctrico de la planta en el software ETAP, incluyendo todos los componentes relevantes y sus características operativas. Se realizaron simulaciones para valorar el cambio que tiene la instalación de los bancos de capacitores en diferentes nodos del sistema.

El sistema de potencia analizado se compone de un total de 26 nodos, de los cuales 6 son barras principales. Las barras son los puntos críticos donde se conectan las cargas y se mide el voltaje, mientras que los nodos representan las interconexiones entre las ramas del sistema. La generación de energía proviene de la red del operador local, la cual suministra energía al sistema a un nivel de 13.2 kV. Esto asegura una adecuada provisión de energía para cubrir las demandas del sistema y mantener la calidad de la energía.

6.1.2. Características del Sistema

En la tabla 4 se pueden ver las características generales del flujo de potencia que se llevó a cabo en ETAP, se puede ver un resumen de la cantidad de buses, líneas, consumo, generación y pérdidas de energía.

Tabla 4. Características generales del sistema base

Study ID	1
Study Case ID	LF
Data Revision	Base
Configuration	Normal
Loading Cat	Design
Generation Cat	Design
Diversity Factor	Normal Loading
Buses	26
Branches	25
Generators	0
Power Grids	1
Loads	23
Load-MW	0.527
Load-Mvar	0.132

Generation-MW	0.537
Generation-Mvar	0.167
Loss-MW	0.0094
Loss-Mvar	0.0351

La generación de energía, proporcionada por la red del operador local, es crucial para el sistema. La generación se realiza a un nivel de 13.2 kV, lo cual es transformado adecuadamente para satisfacer las demandas del sistema a niveles de voltaje inferiores, como 0.44 kV y 0.22 kV, en las diferentes barras y nodos del sistema. Esta generación cubre la carga total del sistema y permite mantener un pequeño margen de reserva.

6.1.3. Datos de Voltaje y Carga de Barras

Las barras principales del sistema tienen voltajes que varían entre 97.09% y 94.64%. La mayoría de las cargas están bien equilibradas con la capacidad de los transformadores y líneas de transmisión. Por ejemplo, la barra Bus2 posee una carga de 529.2 kW y 138.1 kVAr con un voltaje de 97.09%, mientras que la barra Bus34, que opera a un voltaje más bajo de 94.95%, posee una carga de 123.5 kW y 64.1 kVAr. En la tabla 5 se puede visualizar un resumen de estos valores.

Tabla 5. Tensión y carga en las barras

Bus ID	Nominal kV	Voltage	Carga kW	Carga kVAr
Bus2	0.44	97.29	529.2	138.1
Bus3	0.44	97.23	528.9	137.8
Bus4	0.44	97.18	18.29	1.48
Bus6	0.44	97.02	35.89	0.0174
Bus7	0.44	96.67	44.43	7.91
Bus34	0.22	94.95	123.5	64.1

6.1.4. Flujo de Potencia en Líneas y Transformadores

Las líneas de transmisión del sistema muestran diferentes niveles de flujo de potencia. Por ejemplo, el Cable1 maneja 529.2 kW y 138.1 kVAr con una corriente de 752.3 amperios, operando al 101.4% de su capacidad. Las pérdidas en este cable son de 299 W y 355 var. Otros cables, como el Cable2, manejan flujos menores de 18.3 kW y 1.5 kvar con pérdidas de 8.2 W y 4.9 var, operando al 11.4% de su capacidad.

Los transformadores también desempeñan un papel crucial en el sistema. El transformador T1 maneja una potencia de 506 kW y 196 kVAr, con una corriente de 23.74 amperios, y tiene una eficiencia del 95.46%. Las pérdidas en T1 son de 7.41kW y 29.36 kVAr. En la tabla 6 se puede ver una síntesis de los valores del flujo de potencia.

Tabla 6. Flujo de potencia en el caso base

ID	kW-flujo	kVAr - flujo	% PF	% carga	kW -pérdidas	kVAr-pérdidas
Cable1	529.2	138.1	96.76	101.4	0.299	0.355
Cable2	18.3	1.49	99.67	11.4	0.0082	0.0049
Cable3	35.97	0.062	100	22.2	0.0748	0.0445
Cable4	44.67	8.05	98.41	27.1	0.236	0.141
Cable8	14.18	9.45	83.21	10.5	0.0071	0.0042
Cable10	14.84	0.0032	100	9.2	0.0054	0.0032
Cable11	29.68	0.0128	100	18.4	0.0214	0.0128
Cable12	34.61	0.0174	100	21.4	0.0293	0.0174
Cable13	1.28	0	100	0.8	0	0
Cable14	14.84	0.0032	100	9.2	0.0054	0.0032
Cable15	29.68	0.0128	100	18.4	0.0214	0.0128
Cable17	48.77	0.0344	100	30.2	0.0579	0.0344
Cable18	29.72	7.95	96.6	19	0.0804	0.0478
Cable19	14.84	7.92	88.23	10.4	0.0069	0.0041
Cable20	14.84	7.92	88.23	10.4	0.0069	0.0041
Cable21	14.84	7.92	88.23	10.4	0.0069	0.0041
Cable22	14.84	7.92	88.23	10.4	0.0069	0.0041
Cable23	9.89	0.0014	100	6.1	0.0024	0.0014
Cable25	24.74	9.9	92.84	16.5	0.0173	0.0103
Cable26	14.81	7.9	88.23	10.4	0.0069	0.0041
Cable27	29.62	0.0129	100	18.4	0.0216	0.0129
Cable32	14.84	0.0032	100	9.2	0.0054	0.0032
Cable33	14.84	0.0032	100	9.2	0.0054	0.0032
T1	536.6	167.5	95.46	91.2	7.41	29.36
T2	124.6	69.15	87.44	69.6	1.07	5.04

6.1.5. Detalles de las Cargas Conectadas

Las cargas combinadas varían en tamaño y necesidades. Por ejemplo, el requisito para la carga Load2 es 14,11 kW y 9,4 kVAr, mientras que el requisito para la carga máxima Lump30 es 78,33 kW y 46,02 kvar. La mayoría de las cargas funcionan cerca de la potencia nominal, con factores de potencia que oscilan entre el 83,21 % y el 100 %. En la Tabla 7 se puede ver el detalle de las cargas agregadas al sistema.

Tabla 7. Detalle de las cargas en el caso base

ID	Rating/Limite	kV	kW	kVAr	A	% PF	V terminales %
Load2	18.03 kVA	0.44	14.17	9.44	22.99	83.21	97.18
Load3	53.85 kVA	0.22	45.08	18.03	134.2	92.85	94.95
Lump4	3.04 kVA	0.44	2.97	0.494	4.061	98.64	97.18
Lump5	15.53 kVA	0.44	15.33	0.989	20.74	99.79	97.18
Lump6	15 kVA	0.44	14.83	0	20.03	100	97.19
Lump7	30 kVA	0.44	29.66	0	40.06	100	97.16
Lump8	35 kVA	0.44	34.58	0	46.8	100	96.94
Lump9	1.3 kVA	0.44	1.28	0	1.738	100	97.02
Lump1 0	15 kVA	0.44	14.83	0	20.03	100	97.19
Lump1 1	30 kVA	0.44	29.66	0	40.06	100	97.16
Lump1 3	49.28 kVA	0.44	48.72	0	65.83	100	97.11
Lump1 4	31.05 kVA	0.44	29.64	7.9	41.52	96.62	96.94
Lump1 5	17 kVA	0.44	14.83	7.91	22.7	88.24	97.18
Lump1 6	17 kVA	0.44	14.83	7.91	22.7	88.24	97.18
Lump1 7	17 kVA	0.44	14.83	7.91	22.7	88.24	97.18
Lump1 8	17 kVA	0.44	14.83	7.91	22.7	88.24	97.18
Lump1 9	10 kVA	0.44	9.89	0	13.35	100	97.2
Lump2 1	26.93 kVA	0.44	24.72	9.89	35.96	92.85	97.15
Lump2 2	17 kVA	0.44	14.8	7.89	22.78	88.24	96.63
Lump2 3	30 kVA	0.44	29.6	0	40.2	100	96.6
Lump2 8	15 kVA	0.44	14.83	0	20.03	100	97.19
Lump2 9	15 kVA	0.44	14.83	0	20.03	100	97.19
Lump3 0	92.78 kVA	0.22	78.43	46.08	251.4	86.22	94.95

6.1.6. Generación

El sistema cuenta con un grupo transformador identificado como U1 (correspondiente al operador de red) con una potencia de 506,4 kW y 195,5 kVAr, una corriente de 23,74 amperios y un factor de potencia del 93,29%. El transformador se encarga de suministrar electricidad a la

instalación a través de la red de 13,2 kV del operador local, asegurando que se satisfagan todas las necesidades del sistema y las pérdidas asociadas.

6.2. Búsqueda exhaustiva con MATLAB

En este apartado se realiza un análisis comparativo de las pérdidas de potencia activa y reactiva y los niveles de tensión en buses del sistema eléctrico utilizando MATLAB para procesar y visualizar los datos obtenidos en el caso de estudio. Después de determinar la capacidad del banco de condensadores necesaria para la compensación de potencia reactiva, el siguiente paso es encontrar una ubicación adecuada para este banco de condensadores en el sistema eléctrico. Para ello se utiliza un enfoque exhaustivo que implica posicionar las baterías de condensadores en diferentes buses posibles y determinar la ubicación óptima en función de los parámetros que se ha establecido. Estos parámetros son:

- **Reducción de Pérdidas:** Reducir las pérdidas de potencia en el sistema.
- **Mejora del Factor de Potencia:** Incrementar el factor de potencia a niveles óptimos para mejorar la eficiencia energética.
- **Perfiles del Voltaje:** Mantener los niveles de voltaje dentro de los límites permitidos para aseverar la operación óptima del sistema.

El procedimiento se describe a continuación:

1. Ubicación del Banco en Buses Posibles:

Ubicar el banco calculado en todos los buses posibles y simular cada caso en detalle en ETAP para que los datos puedan exportarse posteriormente para su evaluación.

2. Evaluación de Parámetros:

Se evaluaron cuatro parámetros establecidos para cada posición simulada utilizando MATLAB. Los datos de las simulaciones se procesan para comparar las pérdidas activas y reactivas, así como los perfiles de tensión en los diferentes buses del sistema.

6.2.1. Análisis de Perfiles de Tensión en los Buses

Se realizó un estudio de los perfiles de tensión en la totalidad de buses del sistema eléctrico. Para esto, se importaron los datos desde la segunda hoja de cada archivo Excel, donde se especifican los voltajes en cada bus. Los valores de tensión se convirtieron a unidades por unidad (p.u.) dividiendo los valores de tensión obtenidos entre 100. En la figura 12 se puede ver los resultados y como estos datos fueron organizados y almacenados para generar gráficos de barras que muestran los niveles de tensión en todos los buses para cada estudio de caso.

En la figura 14 se puede ver los niveles de tensión para cada ubicación del banco en el SP. Cada barra en los gráficos de niveles de tensión representa el voltaje en un bus específico, y se utilizaron diferentes colores para distinguir el producto de cada estudio de caso. Se añadieron líneas de referencia en los gráficos para indicar los límites de tensión marginales y críticos (0.97, 1.03, 0.95, y 1.05 p.u.), facilitando la identificación visual de cualquier desviación significativa de los valores nominales.

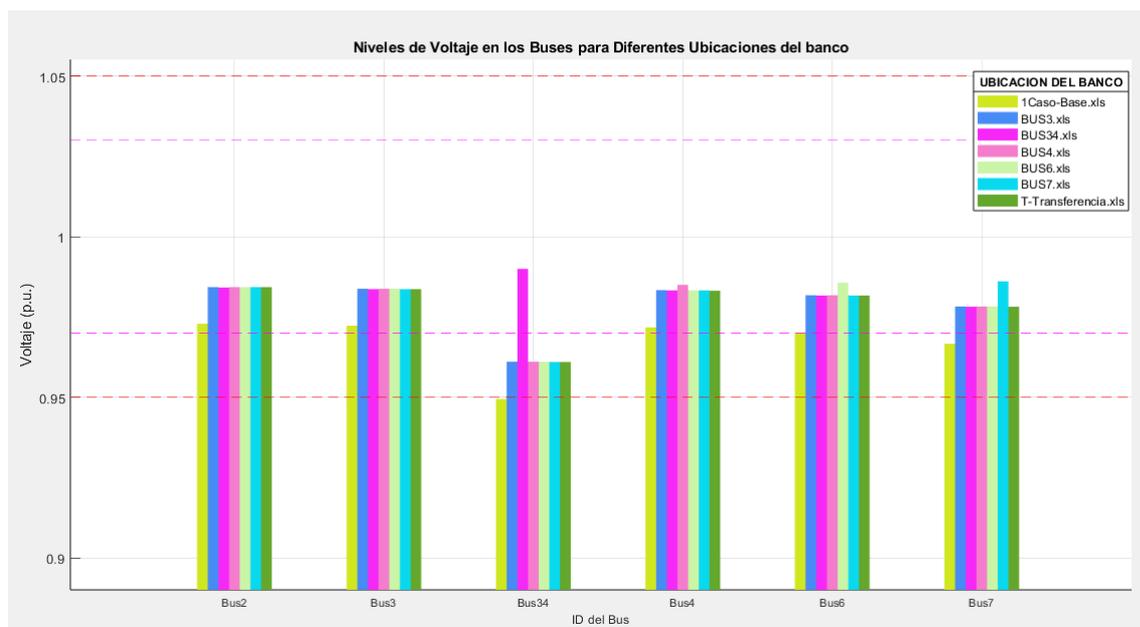


Figura 13. Niveles de tensión para cada caso en todos los buses.

La tabla 8 se puede ver el resumen de los valores de tensión de cada uno de los buses en los escenarios evaluados.

Tabla 8. Niveles de tensión para cada caso en todos los buses

Ubicación del banco	Bus ID	Nominal kV	Voltaje p.u.
1Caso-Base	Bus2	0.44	0,9729
BUS3	Bus2	0.44	0,9843

BUS34	Bus2	0.44	0,9842
BUS4	Bus2	0.44	0,9843
BUS6	Bus2	0.44	0,9843
BUS7	Bus2	0.44	0,9843
T-Transferencia	Bus2	0.44	0,9843
1Caso-Base	Bus3	0.44	0,9723
BUS3	Bus3	0.44	0,9838
BUS34	Bus3	0.44	0,9837
BUS4	Bus3	0.44	0,9838
BUS6	Bus3	0.44	0,9838
BUS7	Bus3	0.44	0,9837
T-Transferencia	Bus3	0.44	0,9837
1Caso-Base	Bus3	0.22	0,9495
	4		
BUS3	Bus3	0.22	0,9611
	4		
BUS34	Bus3	0.22	0,99
	4		
BUS4	Bus3	0.22	0,9611
	4		
BUS6	Bus3	0.22	0,9611
	4		
BUS7	Bus3	0.22	0,961
	4		
T-Transferencia	Bus3	0.22	0,961
	4		
1Caso-Base	Bus4	0.44	0,9718
BUS3	Bus4	0.44	0,9834
BUS34	Bus4	0.44	0,9833
BUS4	Bus4	0.44	0,985
BUS6	Bus4	0.44	0,9833
BUS7	Bus4	0.44	0,9833
T-Transferencia	Bus4	0.44	0,9832
1Caso-Base	Bus6	0.44	0,9702
BUS3	Bus6	0.44	0,9818
BUS34	Bus6	0.44	0,9817
BUS4	Bus6	0.44	0,9818
BUS6	Bus6	0.44	0,9857
BUS7	Bus6	0.44	0,9817
T-Transferencia	Bus6	0.44	0,9817
1Caso-Base	Bus7	0.44	0,9667
BUS3	Bus7	0.44	0,9783
BUS34	Bus7	0.44	0,9782
BUS4	Bus7	0.44	0,9783
BUS6	Bus7	0.44	0,9783
BUS7	Bus7	0.44	0,9861

T-Transferencia	Bus7	0.44	0,9782
-----------------	------	------	--------

6.2.2. Análisis de consumo y pérdidas activas y reactivas

Se realizó un comparativo de los consumos de energía reactiva y activa de acuerdo con la ubicación del banco de condensadores en el sistema para ver el impacto. En la figura 15 se puede ver un comparativo con el caso base y se ve que en todos los casos hay una notable disminución en la potencia reactiva del sistema.

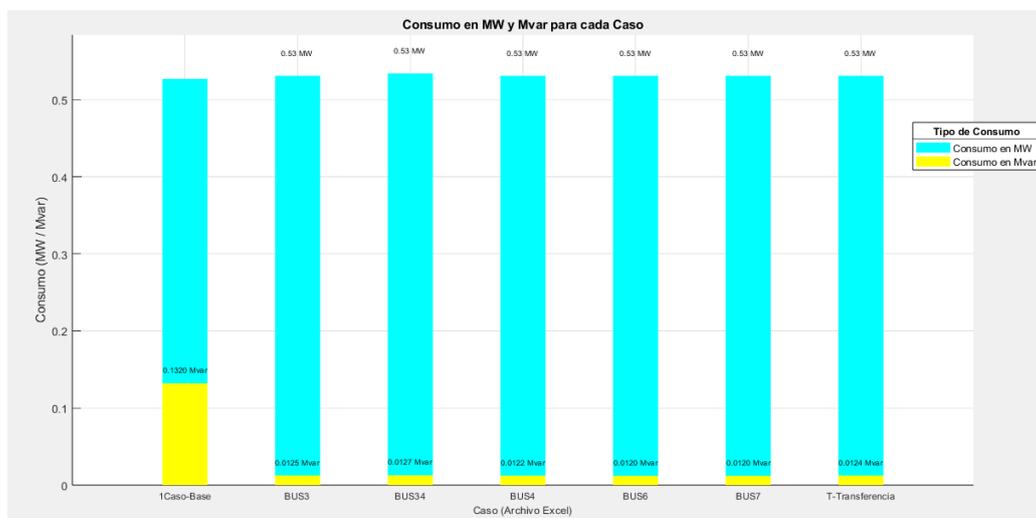


Figura 14. Comparativo del consumo de potencia activa y reactiva vs ubicación del banco.

Para cada uno de los estudios de caso, se importaron los datos de pérdidas activas (Loss-MW) y reactivas (Loss-Mvar) desde la primera hoja de los archivos Excel proporcionados. Estos valores fueron convertidos a unidades más pequeñas, específicamente a kilovatios (kW) y kilovoltio amperios reactivos (kVAr), multiplicando las pérdidas activas por 1000 para obtener los kW y las pérdidas reactivas por 1000 para obtener los kVAr. Este procesamiento se realizó para facilitar una comparación detallada en el rango de 0 a 50 kW, permitiendo una visualización más clara de las pérdidas en el sistema.

Se calculó también la potencia aparente (kVA) a partir de los valores de pérdidas activas y reactivas mediante la ecuación:

Estos cálculos se almacenaron en un arreglo y se utilizaron para generar gráficos de barras en el cual se puede ver en la Figura 16, con colores diferenciados para pérdidas activas y reactivas.

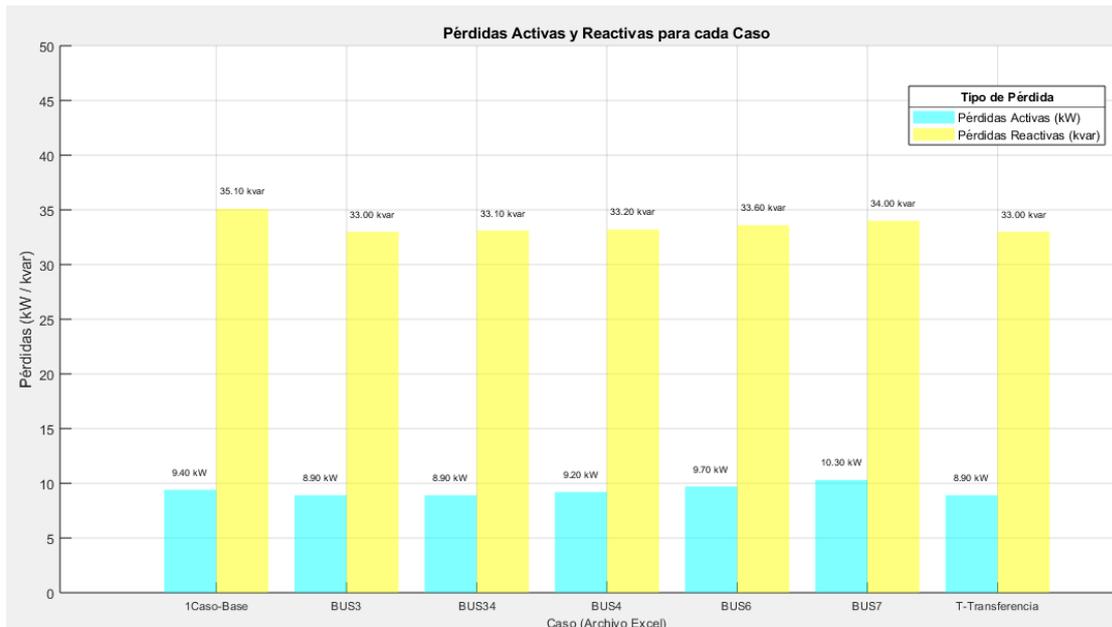


Figura 15. Pérdidas Potencia Activa Y Reactiva para cada caso

Se puede observar como todos los puntos reflejan una mejora respecto al caso base, la instalación en el bus 3 refleja menores pérdidas respecto a las otras ubicaciones.

6.2.3. Análisis del Factor de potencia en la Frontera

Es un indicador importante de la eficiencia del consumo de energía. Un factor de potencia aproximado a 1 indica un uso más eficiente de la electricidad. En el caso base, se registró un factor de potencia de 0,9676, lo que indica un uso de la electricidad bastante eficiente, aunque no ideal. Este valor sirve como punto de referencia para otras situaciones. Se observó un factor de potencia de 0,9994 para ubicaciones en BUS3, BUS4, BUS6, BUS34 y BUS7, lo que indica un uso de energía muy eficiente. Este valor es el más cercano a indicar que este bus en particular opera casi sin pérdidas de potencia reactiva, lo cual es ideal para la eficiencia del sistema. Finalmente, la ubicación en la segunda placa del adaptador de bus muestra un factor de potencia de 0,9675, lo que muestra que incluso si la corriente se usa efectivamente en la línea del transformador, el valor sigue siendo ligeramente menor que el caso base. Este valor es alto, lo que indica que el transformador está funcionando de manera eficiente con pérdidas mínimas de potencia reactiva. En la Figura 17 se puede ver como en todos los casos muestran un factor de potencia que indica un uso eficaz de la electricidad, con valores cercanos o muy cercanos a 1. El efecto, si bien es válido, es superado por los demás casos en términos de eficiencia del factor

de potencia. Para otras ubicaciones, se deben considerar otros factores determinantes para determinar la mejor ubicación.

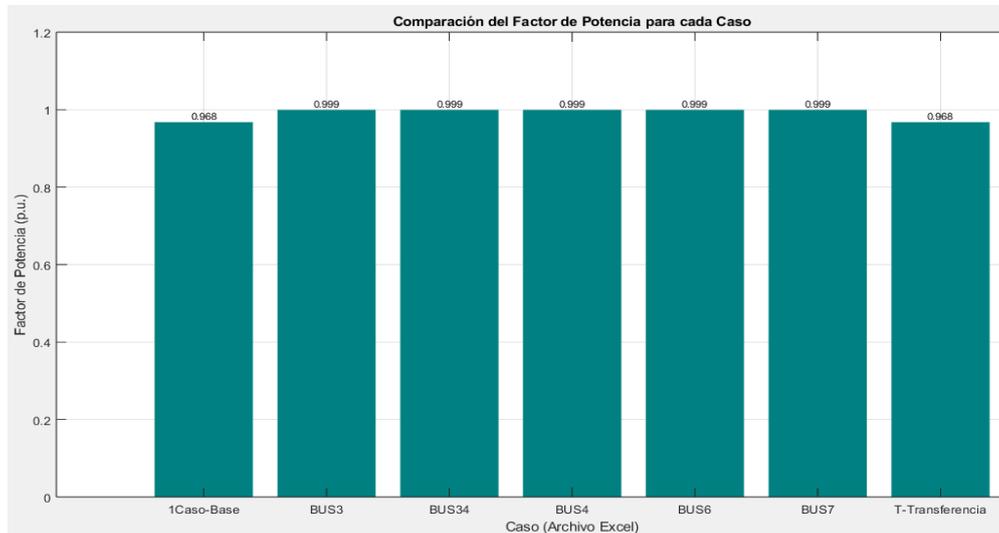


Figura 16. Factor de potencia en cada ubicación del banco.

6.2.4. Cargabilidad del alimentador principal

En los lugares BUS34 (220V), BUS4, 6, 7, como se sabe que la instalación requerirá reprogramar el alimentador del BUS3, debido a que su capacidad está limitada a la carga actualmente conectada, por lo que se debe evaluar el impacto en cada lugar en relación con el alimentador principal. La capacidad de carga mide la carga que un cable puede soportar combinada con su capacidad máxima. Cuando se tiene un valor superior al 100% nos indica que la línea ha alcanzado el límite de su capacidad (posiblemente el límite térmico), lo que puede resultar peligroso si se producen cambios de carga inesperados. Respecto al caso base, la capacidad de carga al máximo consumo de corriente de la estación es del 100,4%, lo que significa que la línea supera la capacidad máxima que el transformador puede proporcionar.

Es necesario monitorear cuidadosamente esta línea para evitar sobrecargas, que pueden causar fallas en el sistema. El factor de carga del BUS3 es del 97,7%, ligeramente inferior al caso base. Aunque este valor es alto, indica que la línea está funcionando cerca de su capacidad máxima durante momentos de alta demanda en la planta. Se debe realizar una medición continua para garantizar que no se exceda la capacidad de la línea durante los períodos de carga máxima. El índice de carga de los buses BUS4, BUS6 y BUS7 es del 97,8%, 97,9% y 98% respectivamente. Estos valores indican que la línea se acerca a su capacidad máxima. Todas las simulaciones

muestran alta capacidad de carga, un buen indicador para el sistema, pero no es determinante para escoger una ubicación.

Estos valores indican que los alimentadores en baja tensión están excediendo su capacidad máxima y aumentos adicionales en la carga pueden causar problemas de aislamiento. Se deben adoptar estrategias de gestión de carga o mejoras de infraestructura para satisfacer la alta demanda. Se puede observar una capacidad de carga del 98,4% en el tablero principal de 220V, un valor alto y cercano a la capacidad térmica de la línea. Esto puede significar que en condiciones de alto consumo hay pérdidas excesivas por calentamiento de los conductores y un deterioro mayor al de condiciones nominales.

En la Figura 18 se puede observar cómo en todos los casos como se muestran los valores de capacidad de carga, indicando que la línea está operando cerca de la capacidad máxima. Se requieren opciones de mitigación y monitoreo continuo para evitar fallas y sobrecargas del sistema. La infraestructura debe ser probada y reforzada de acuerdo con los requisitos necesarios para asegurar la eficiencia y operación óptima del sistema eléctrico.

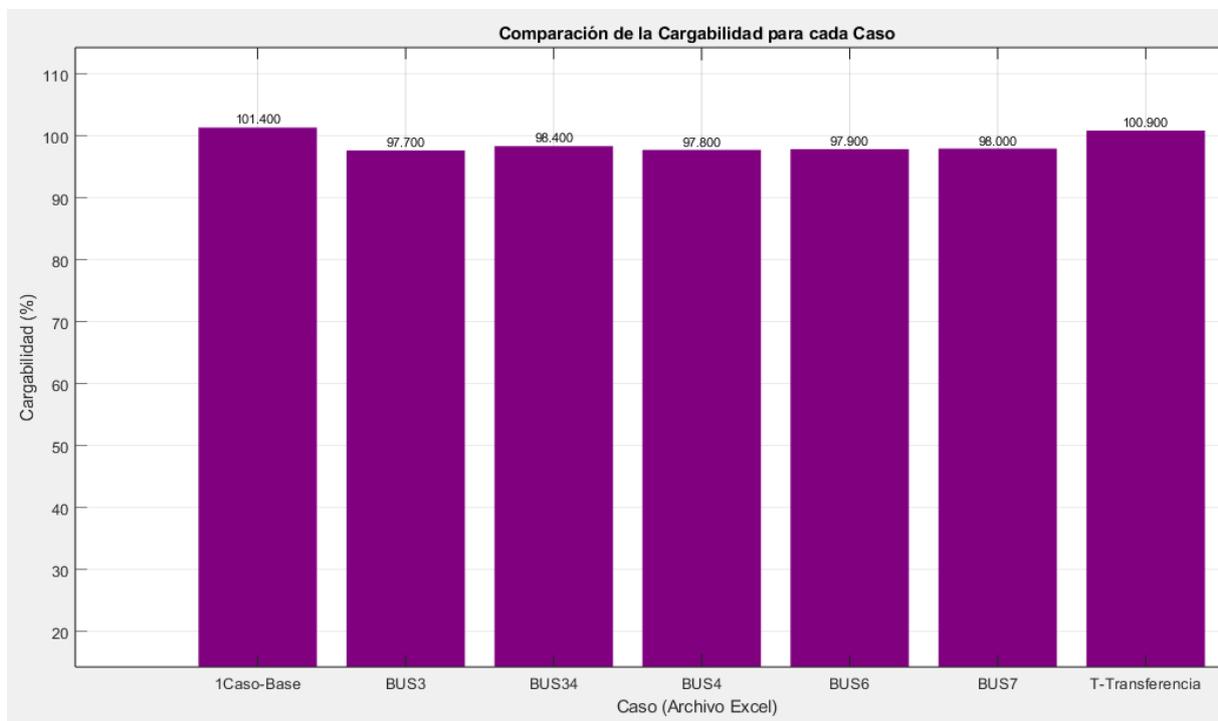


Figura 17. Cargabilidad del alimentador principal en cada ubicación del banco.

Se puede visualizar que los mejores resultados se poseen al ubicar el banco en el bus 3 es decir en el tablero principal de 440V.

7. ANÁLISIS FINAL

En este apartado se presenta un análisis más minucioso de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, con el objetivo de determinar cuál es el mejor bus para ubicar el banco de capacitores. El análisis se basa en los factores de potencia, la Cargabilidad de las líneas, los niveles de tensión en los buses y las pérdidas de potencia para cada uno de los casos anteriormente analizados.

7.1. Análisis del Factor de Potencia

Es un indicador clave de la eficiencia del uso de la potencia eléctrica. Un valor cercano a 1 es ideal, ya que muestra una disminución de potencia reactiva, por lo tanto, una mayor eficiencia. En el estudio, se observaron los siguientes factores de potencia:

Tabla 9. Resumen factor de potencia en la frontera con el operador de red

BUS	Factor de Potencia (p.u.)
1-CASOBASE	0.9676
BUS3	0.9994
BUS4	0.9994
BUS6	0.9994
BUS7	0.9994
TD220	0.9994
TTransf	0.9675

En este caso con el factor de potencia no es determinante, en la tabla 9 se puede ver que la ubicación en casi todos los buses nos da un valor del factor de potencia de 0.9994 con excepción del caso base con 0.9676 y en el tablero de transferencia de 0.9675.

7.2. Análisis de la Cargabilidad

En la tabla 10 se puede ver la cargabilidad, que mide la proximidad de la carga actual de la línea a su capacidad máxima. Valores cercanos al 100% indican que la línea está casi al límite de su capacidad, lo que puede ser riesgoso. Los resultados de cargabilidad son los siguientes:

Tabla 10. Resumen cargabilidad en la frontera con el operador de red

Archivo	Cargabilidad (%)
----------------	-------------------------

1-CASOBASE.xls	100.4
BUS3.xls	97.7
BUS4.xls	97.8
BUS6.xls	97.9
BUS7.xls	98
TD220.xls	98.4
TTransf.xls	100.9

El caso base presenta una cargabilidad muy alta de 100.4%, lo que indica que la línea está operando por encima del límite en condiciones de alto consumo. Similarmente, ubicar el banco en el tablero de 220V también muestra una alta cargabilidad de 98.4%. En comparación, ubicarlo en el BUS3 tiene una cargabilidad menor de 97.7% con respecto a las demás ubicaciones, lo que proporciona un margen de seguridad adicional.

7.3. Análisis de Niveles de Tensión en los Buses

El análisis de los niveles de tensión es crucial para asegurar que la totalidad de los buses del sistema eléctrico operen en los límites aceptables de tensión, evitando así problemas de estabilidad y eficiencia. De acuerdo con los resultados de la figura 12 y tabla 7 se puede ver como en todos los casos a excepción del caso base se encuentran dentro de los límites marginales de funcionamiento establecidos para este estudio. Logrando un mejoramiento porcentual en la caída de tensión en todos los buses respecto al caso base.

7.4. Análisis de las Pérdidas de Potencia

Las pérdidas de potencia, tanto activa como reactiva, son un indicador importante de la eficiencia del sistema eléctrico. Estas pérdidas deben minimizarse para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema. En breve, se presenta la tabla 11 donde las pérdidas de potencia para cada caso:

Tabla 11. Resumen pérdidas de potencia

Ubicación	Pérdidas Activas (kW)	Pérdidas Reactivas (kvar)	Pérdidas Aparente(kVA)
CASOBASE	9,4	35,1	36,33
BUS3	7.8	30.2	34,17
BUS4	8,9	33,1	34,27
BUS6	9,2	33,2	34,45
BUS7	9,7	33,6	34,97
TD220	10,3	34	35,52
T-Transf	8,9	33	34,17

La ubicación con menores pérdidas activas y reactivas es BUS3, con 7.8 kW y 30.2 kvar respectivamente. Esto indica una mayor eficiencia en este bus en comparación con los demás casos.

7.5. Determinación del Mejor Bus para Ubicar el Banco de Capacitores

Para determinar el mejor bus para ubicar el banco de capacitores, se debe considerar tanto la eficiencia en el uso de la potencia (factor de potencia) como la capacidad de la línea (cargabilidad), los niveles de tensión y las pérdidas de potencia.

Analizando todos los resultados anteriores y la información de las Tablas 7, 8, 9 y 10, se puede concluir que la ubicación en el bus 3 es ligeramente más destacada que las demás. En la Figura 19, puede ver los niveles de voltaje en todos los buses; compare el caso base con la posición en el bus 3. Se puede observar una mejora significativa en los niveles de tensión alcanzados.

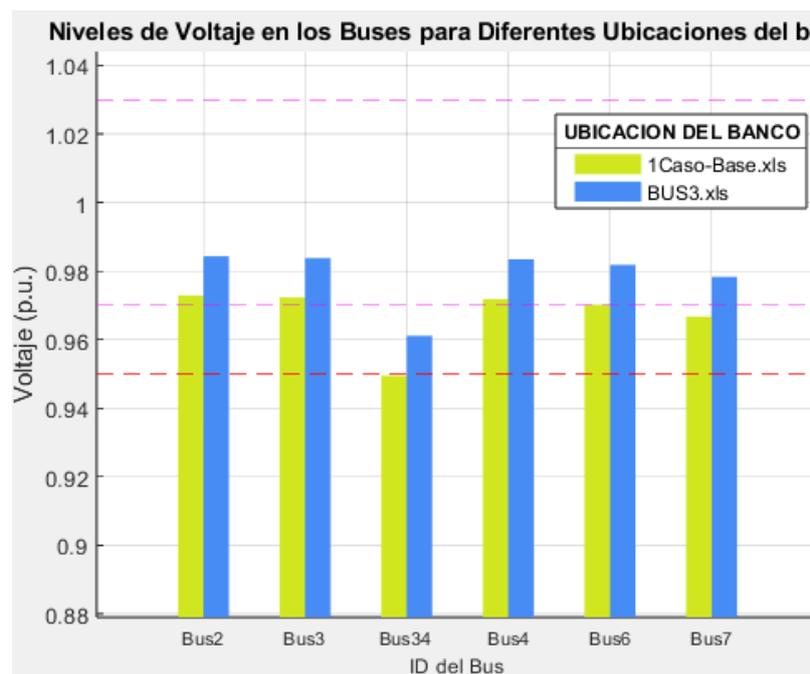


Figura 18. Nivel de tensión comparativo mejor caso con caso Base

Ahora Respecto a las pérdidas. En la Figura 20 se pueden ver las pérdidas de potencia comparando el caso base con la ubicación en el Bus 3. Se pude observar una notable, aunque muy poco significativo en las pérdidas obtenidas con respecto al caso base.

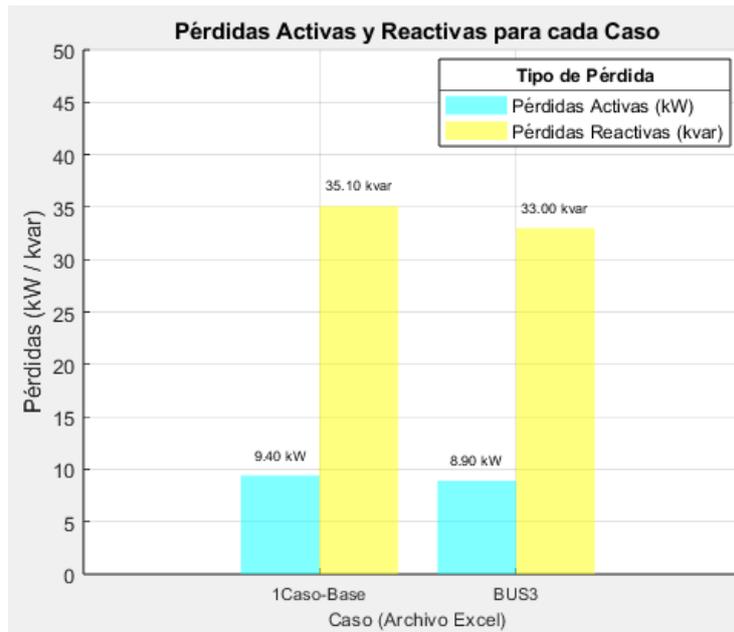


Figura 19. Cargabilidad del alimentador principal en cada ubicación del banco.

Ahora Respecto al factor de potencia. En la Figura 21 se pueden ver el factor de potencia donde se ve una mejoría alcanzando un factor de potencia de 0.999.

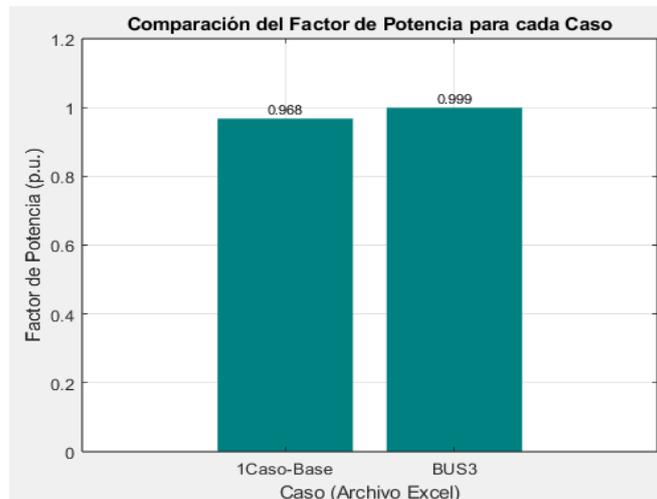


Figura 20. Comparación factor de potencia en la Frontera comercial

Finalmente, sobre la capacidad de carga. En la Figura 22 se puede ver como la capacidad de carga se reduce significativamente del 101,4% al 97,7%, resultando resultados positivos para la correcta operación y eficiencia del sistema eléctrico. Esta reducción significa que las líneas de transmisión ya no están operando por encima de su capacidad máxima, lo cual es fundamental para evitar sobrecargas y posibles fallas. De esta manera se reduce la tensión en los componentes eléctricos, extendiendo la vida útil de los transformadores, cables y otros equipos. En resumen, la reducción del factor de carga del suministro principal del 101,4% al

97,7% resultó ser una mejora significativa, que incide positivamente en la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico, garantizando una operación más confiable y sostenible.

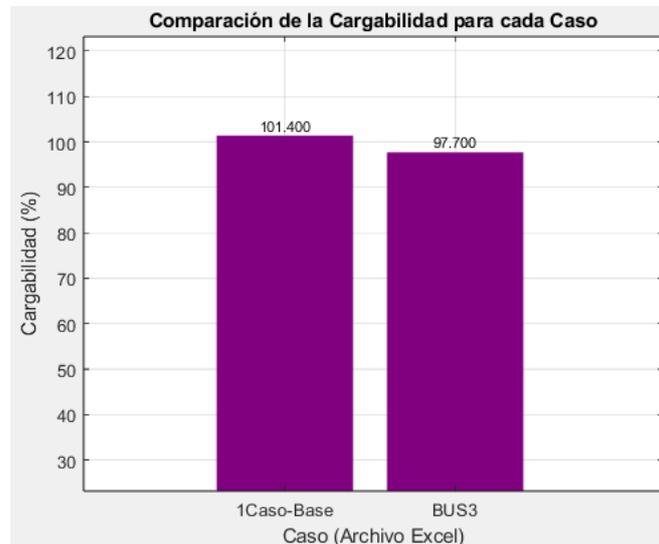


Figura 21. Cargabilidad del alimentador principal en Baja tensión.

Los resultados mostrados en figura 19 a 22 han demostrado que la ubicación del banco de capacitores en el Bus 3 es la opción óptima. Esta ubicación mejora los niveles de tensión, el factor de potencia y reduce significativamente la cargabilidad y las pérdidas de potencia. Estas mejoras no solo aumentan la eficiencia operativa del sistema, sino pueden ocasionar una prolongación de la duración de los equipos y mejoran la seguridad del suministro eléctrico. Implementar el banco de capacitores en el Bus 3 proporcionará beneficios duraderos y sostenibles para la planta ASME de SERTECPET S.A.

8. CONCLUSIONES

- En función del análisis de factores de potencia, capacidad de carga, niveles de tensión y pérdidas de potencia, se determina que el bus más adecuado para la ubicación del banco de capacitores es el BUS3. Este bus proporciona la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la potencia, un margen de seguridad en términos de capacidad de carga, niveles de tensión apropiados, así como las menores pérdidas de potencia.
- La implementación del banco de capacitores en el BUS3 permite reducir la cargabilidad del alimentador principal del 101. 4% al 97. 7%, mejorando así las condiciones de operación durante los momentos de máxima demanda.
- Los resultados obtenidos indican que la conexión de un banco de capacitores al BUS3 mejora el factor de potencia del alimentador principal, el cual pasa de 0. 968 a 0. 999, lo que evidencia una reducción en las pérdidas de energía reactiva.
- El método de búsqueda exhaustiva utilizado en las simulaciones realizadas con la herramienta ETAP ha demostrado ser efectivo, ya que se observó un incremento en los niveles de tensión en el bus principal BUS3, que se elevaron de 0. 9729 a 0. 999 p. u., lo que mejora globalmente el perfil de tensión de la planta.
- La combinación de simulaciones en ETAP junto con un análisis comparativo en MATLAB posibilita una evaluación robusta y precisa del desempeño del sistema eléctrico, confirmando la efectividad de las soluciones implementadas.

9. RECOMENDACIONES

9.1. Mejora Continua del Sistema Eléctrico

1. Repotenciación del alimentador principal:

- De acuerdo con los resultados encontrados se recomienda repotenciar el alimentador que va desde el transformador a la transferencia y desde la transferencia hasta el tablero principal de 440V, esto para garantizar que el alimentador puede soportar toda la potencia que el transformador puede entregar.

2. Monitoreo Regular del Sistema:

- Instaurar un sistema de monitoreo continuo para vigilar los niveles de potencia activa, reactiva y aparente. Esto permitirá identificar rápidamente cualquier desviación y tomar medidas correctivas de manera oportuna.
- Utilizar sistemas de gestión de energía (EMS) avanzados que integren tecnologías de Internet de las Cosas (IOT) para una supervisión en tiempo real y un análisis predictivo.

3. Mantenimiento Preventivo:

- Constituir un programa de mantenimiento preventivo para todos los equipos eléctricos, con especial atención a las conexiones sueltas detectadas durante la inspección técnica.
- Incluir inspecciones térmicas y pruebas de resistencia de aislamiento como parte del mantenimiento preventivo para identificar problemas antes de que ocurran fallas.

9.2. Optimización de la Compensación de Potencia Reactiva

1. Revisión Periódica de la Configuración de los Bancos de Capacitores:

- Realizar revisiones periódicas de la configuración y ubicación de los bancos de capacitores para asegurar que sigan siendo óptimas a medida que las condiciones operativas de la planta cambian.

- Considerar la instalación de controladores automáticos de factor de potencia que ajusten dinámicamente la compensación de potencia reactiva según la carga instantánea del sistema.
- **Evaluación de Nuevas Tecnologías:**
- Evaluar la incorporación de nuevas tecnologías de compensación de potencia reactiva, como los sistemas de compensación estática (SVC) o compensadores síncronos, que pueden ofrecer una respuesta más rápida y eficiente a las variaciones en la carga.

9.3. Integración de Energías Renovables

1. Estudio de Factibilidad:

- Realizar un estudio de factibilidad para la incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas, que puedan mitigar la dependencia de fuentes convencionales y mejorar el factor de potencia de la planta.
- Evaluar los resultados de la integración de energías renovables en el equilibrio del sistema eléctrico y en la compensación de potencia reactiva.

● Proyectos Piloto:

- Implementar proyectos piloto de energías renovables para evaluar su desempeño y viabilidad en el contexto específico de la planta ASME de SERTECPET S.A.

9.4. Capacitación y Desarrollo del Personal

1. Programas de Capacitación:

- Desarrollar e implementar planificaciones de capacitación periódica para el personal de operación y mantenimiento, enfocados en los mejores hábitos para la gestión de la energía y la compensación de potencia reactiva.

- Incluir módulos sobre el uso de herramientas de simulación como ETAP y MATLAB para que el personal esté capacitado para realizar análisis avanzados y optimizaciones del sistema eléctrico.
- **Fomentar la Cultura de Eficiencia Energética:**
- fomentar una cultura de eficiencia energética entre todos los trabajadores de la planta, incentivando prácticas que aporten a la disminución del consumo de energía y la mejora del factor de potencia.

9.5. Investigaciones Futuras

1. Exploración de Nuevos Métodos de Optimización:

- Investigar y desarrollar nuevos métodos de optimización para la ubicación y dimensionamiento de bancos de capacitores, utilizando técnicas avanzadas como algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, redes neuronales y generación distribuida.
- Evaluar el desempeño de estos métodos en comparación con la búsqueda exhaustiva para determinar su efectividad y aplicabilidad.

- **Análisis de Impacto Ambiental:**

- Realizar estudios sobre el impacto ambiental de las estrategias de compensación de potencia reactiva y la integración de energías renovables, considerando factores como la mitigación de emisiones de CO₂ y la huella de carbono.

9.6. Mejoras en la Documentación y Reportes

1. Estandarización de Informes:

- Establecer formatos estandarizados para los informes de inspección y mantenimiento, asegurando que toda la información sobresaliente se documente de manera explícita y consistente.

- Incluir secciones específicas para recomendaciones de mejora y seguimiento de acciones correctivas en los informes.
- **Automatización de la Generación de Reportes:**
- Implementar sistemas de software que automaticen la recopilación y generación de reportes de datos de consumo de energía y desempeño del sistema eléctrico, teniendo una mejor observación y toma de resoluciones.

Anexo 2. Tablas

Tabla 12. Matriz de consumo energía activa

Nombre	Tipo	Fecha	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	Total Activa
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-01	266	261	253	242	249	262	249	241	239	237	214	176	149	135	121	111	108	101	98,6	95,6	94,5	56,6	7,76	7,45	3974,2
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-02	7,4	7,44	7,5	7,5	7,4	11	227	263	244	235	206	175	197	116	134	209	120	135	145	197	392	388	407	379	4219,6
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-03	407	396	294	354	321	274	268	257	306	245	275	174	140	226	244	153	118	125	172	194	150	138	165	213	5607,9
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-04	241	239	220	223	170	123	166	160	144	104	102	158	219	208	192	134	165	135	140	127	126	10,5	7,06	7,03	3517,6
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-05	7,1	1,57	0,2	0	0	0	0	0	3,2	9,2	20	30	36,8	39,6	39,8	55	42,2	5,71	6,57	7,1	6,95	7,03	7,06	6,73	331,29
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-06	6,6	6,62	6,8	6,7	6,6	17	197	51,5	41	39	42	52	111	92,5	117	199	203	215	226	450	511	462	473	454	3986,1
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-07	406	394	358	337	295	370	393	369	352	274	320	204	138	162	192	13	8,59	20,1	191	197	155	117	146	130	5541,8
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-08	126	158	179	128	141	224	161	115	77	76	40	36	32,2	18,3	20,6	22	13,5	137	158	165	91,2	207	221	145	2690,5
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-09	98	102	421	403	463	411	499	390	138	21	13	56	56,7	73,7	103	245	457	359	179	332	350	235	241	255	5902
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-10	260	249	228	268	148	142	237	242	264	213	250	255	189	215	184	332	309	319	335	318	369	224	214	190	5952,3
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-11	297	283	250	242	256	207	143	160	172	156	183	166	172	163	184	221	201	203	202	202	150	7,41	7,02	6,95	4236,9
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-12	7	6,99	7	7	7	6,8	4,3	4,24	4,3	4,3	4,3	4,4	4,35	4,37	4,45	4,4	4,45	4,66	6,81	7,06	6,99	7,03	7,02	7,09	136,28
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-13	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	6,3	4,4	4,2	4,2	4,3	4,2	4,4	4,27	4,34	4,3	4,4	4,41	4,52	6,81	7,02	6,84	6,88	6,92	6,91	135,04
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-14	6,9	6,95	6,9	6,9	6,9	8,2	117	188	180	261	198	203	179	164	202	201	211	188	279	267	249	296	286	314	4025
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-15	311	295	263	300	201	280	248	176	155	162	165	154	264	235	158	144	254	262	246	278	432	552	551	496	6582
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-16	493	553	490	360	411	307	298	361	363	355	264	291	351	199	204	270	226	223	276	293	233	260	273	262	7615,4
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-17	332	508	474	435	446	414	404	367	431	373	298	299	345	328	285	306	368	300	239	253	265	239	264	286	8259,2
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-18	265	246	229	225	197	235	242	263	258	202	162	240	241	195	216	233	229	242	232	149	256	270	262	265	5556,2
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-19	267	227	180	155	138	123	100	5,37	43	135	101	54	5,45	5,59	5,31	5,4	5,33	5,45	7,66	7,83	7,7	7,47	7,8	7,76	1606,9
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-20	7,8	7,8	7,8	7,7	7,8	11	153	206	138	206	239	222	238	197	221	216	226	229	249	198	223	225	195	275	3905,6
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-21	270	220	277	397	433	534	439	468	487	452	412	368	359	285	298	300	289	293	219	300	283	249	292	298	8222
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-22	263	188	230	303	320	269	214	229	249	174	230	254	255	178	219	262	255	261	211	239	227	198	226	273	5727,7
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-23	278	499	505	459	500	489	395	397	389	322	255	255	333	252	211	216	209	139	141	168	216	302	287	294	7513,2
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-24	274	313	281	275	253	226	207	141	141	162	158	196	264	179	69	222	308	266	226	252	253	297	326	330	5619,5
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-25	257	192	169	166	177	201	244	196	247	281	188	230	236	224	295	48	117	270	295	289	341	268	265	265	5460,7
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-26	239	182	155	136	123	115	51	5,06	5,1	5,2	5,1	5,1	26	177	121	110	101	95,9	20,3	7,2	7,24	7,19	7,17	7,24	1712,3
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-27	7,2	7,13	7,1	7,1	7,1	22	170	178	198	186	210	198	207	191	171	175	135	170	166	195	176	157	240	227	3407,1
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-28	254	264	195	264	254	226	326	242	212	180	179	161	190	249	239	195	222	233	196	198	221	165	193	229	5283,6
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-29	235	193	164	205	209	208	181	178	159	198	191	167	250	193	194	274	233	254	255	237	209	225	234	233	5076,4
SERTECPET S.A.	kWh	2024-05-30	240	226	286	229	242	201	208	206	220	327	338	488	500	426	477	542	442	320	322	332	378	60	13,2	13,1	7036,9

Tabla 13. Matriz de consumo energía reactiva Inductiva

Nombre	Tipo	Fecha	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	Total Reactiva Ind
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-01	52	57,7	42,7	46,4	53,6	51,1	40,83	38,7	37,8	37,4	35,1	30,5	27,4	23,4	21,31	20,55	20,9	20	19,5	19,1	19,24	12,98	1,4	0,11	729,52
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-02	0	0,08	0,11	0	0	0,29	38,05	43,8	41,9	40,5	35,5	30,9	32,7	23,2	22,27	36,22	21,3	21	22,7	38,6	77,13	81,55	88,6	80,48	776,27
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-03	94,4	95,5	68	87	78,3	65,8	67,75	66,5	84,7	63,4	72,6	44,7	30	35,7	35,76	28,07	17,8	14	18,3	10,5	9,58	15,78	24,72	45,71	1174,47
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-04	54,6	53,9	53,7	45,5	29,1	15,4	33,53	31,1	27,9	25	26,8	31,9	34,7	41,5	45,35	33,02	27,7	29	24	24,5	28,83	0,6	0,96	1,22	719,77
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-05	1,07	2,39	0,21	0	0	0	0	0	5,42	9,73	2,53	0	0	0	0,18	0,11	0	0,9	0,75	0,71	0,85	1,15	1,22	1,11	28,32
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-06	1,04	1,08	1,36	1,18	0,71	0,51	22,94	0,04	0,74	2	1,46	3,91	5,95	4,77	10,09	35,99	36,3	50	48,3	112	127,7	111,9	110,4	103	793,72
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-07	98,6	98,3	92,8	85,7	68,8	96,3	98,6	94,6	93,7	69,8	87,8	56,4	33,2	38,2	43,06	1,57	1,78	1,6	30,5	39,8	19,46	15,43	32,95	30,56	1329,53
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-08	30,5	29,5	32,5	30	26,5	37,3	20,73	14,9	9,76	11,9	1,42	0,18	0,11	0,07	0,04	0,25	0	20	18,6	27,1	21,66	44	38,94	28,25	444,16
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-09	15,1	19,8	88	73,3	101	88,7	119,3	87,8	30,9	0	0	0	0,53	11,1	10,22	48,87	98,8	80	34	73,1	80,61	48,67	55,18	61,32	1226,61
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-10	64,3	60,1	51,8	66,1	21,1	20,1	34,63	45,6	52,7	28,6	37,5	43,6	26,9	46,3	25,22	51,63	63,5	71	47,1	45,9	78,83	33,13	29,96	23,58	1068,96
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-11	56,6	53,7	45,4	43,3	44,5	26,4	18,5	18,7	21,6	24	24,2	21,8	28,2	26	29,03	37,66	36,4	36	36,4	35,1	20,06	0,83	1,25	1,15	686,8
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-12	1,15	1,29	1,29	1,22	1,12	1,14	1	0,33	0,25	0,12	7,16	10,3	10,6	11	11,41	11,55	11,9	12	11,4	11,6	11,76	12,22	12,86	12,4	167,08
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-13	12,8	12,6	12,6	12,3	12,2	11,8	10,97	9,98	9,58	9,59	9,11	9,27	9,37	9,49	9,65	10,34	10,7	11	10,2	10,5	10,55	10,65	11,01	11,07	257,12
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-14	11,2	11,2	10,9	10,8	10,6	9,65	7,13	19,5	22,9	42,6	28,5	33,4	28,9	18,4	30,57	34,06	33,6	29	45,1	40,7	37,05	53,22	49,87	56,89	675,37
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-15	54,6	47,7	37,7	50,9	27,4	48,4	41,11	21	18,7	37,2	29,1	23,7	52,2	31,4	10,97	5,38	17,8	27	33,3	27,5	75,13	112,9	109,1	93,12	1032,63
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-16	90	110	97,1	62,4	77,2	45,1	45	68,8	70,3	68,9	43,8	47,1	66,5	19,9	27,76	33,31	29,2	20	24	37	32,38	38,45	39,19	39,69	1233,3
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-17	58,7	99,7	86,9	74,7	79,5	68,8	72,25	65,8	91,6	75,4	54,6	54,3	68,7	69,4	53,4	57,14	76,3	49	21,9	30,4	29,64	23,69	38,55	41,89	1442,68
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-18	27,5	22,9	19,8	9,3	14,5	19,1	15,35	32,9	37,8	20,5	7,79	25,7	29,6	16,3	15,17	27,22	26,9	38	24,3	7,4	24,3	42,25	44,39	46,14	595,05
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-19	48,1	42,8	33,6	30,2	27,9	26,7	23,05	12,8	17,5	33,8	28,9	19,9	10,9	11,2	11,47	11,79	12	12	11,3	11,2	11,4	11,8	12,65	12,4	485,14
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-20	12,7	12,6	12,5	12,3	11,8	9,94	5,13	9,66	3,6	27,3	32,9	36,9	38,3	22,5	31,67	34,74	33,7	35	29,4	11,9	27,1	24,69	8,91	31,49	517,35
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-21	34,8	32,8	36,7	74,6	78,9	110	79,59	96,8	107	92,9	90,5	72,9	73,5	50,9	63,06	64,66	58,7	59	27,6	52,2	49,16	33,85	42,18	45,85	1528,61
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-22	27,3	18,5	20,7	38	29,9	23,7	28,72	27,5	36,2	20,5	26,2	35,2	23,3	27,5	31,56	25,87	30,7	24	12,6	16,8	12,54	11,44	15,76	24,94	589,74
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-23	36,9	96,7	96,1	81,3	86,7	88,7	65,9	73	73,5	55,1	43,3	46,6	66,5	35,9	25,8	26,75	26	7,7	5,42	16,2	16,06	40,26	40,97	29,68	1180,73
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-24	30,4	35,5	32,9	35,7	26,5	26,2	14,58	8,63	9,8	7,35	10,1	19,9	40,5	22,7	0	28,04	56,6	46	36,9	45,9	44,07	38,44	47,36	57,22	720,83
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-25	33,1	9,77	5,06	0,6	8,22	8,1	27,11	23,8	26,6	35,2	13,9	22,8	24,5	29,5	46,29	5,91	7,37	29	45,5	33,6	45,82	52,22	56	56,07	646,2
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-26	53,6	46,5	43,1	40,1	38,1	37,2	24,06	13,3	13	12,4	11,2	11	14,8	42,4	35,34	34,38	34	34	15,6	12,6	12,83	12,79	12,75	13,43	618,43
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-27	13,3	13,5	13,7	13,7	12,8	9,69	2,46	8,76	17,8	15,1	20,7	21,6	17,7	11,5	3,88	6,81	4,31	8,3	8,62	6,06	3,74	4,02	25,9	22,47	286,32
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-28	30,8	23,9	15	31,9	34,8	15,9	51,7	38,9	27,7	15,3	12	8,47	14,7	27,5	27,01	18,77	21	21	14,9	10,3	14,54	16,13	17,82	24,08	534,37
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-29	29	21,9	13	20,3	20,3	24,2	18,56	10,4	12,1	20,4	17,4	14,1	24,8	16,5	20,63	22,76	20,4	27	24,5	16,8	13,99	15,03	15,78	18,91	458,88
SERTECPET S.A.	kVArh	2024-05-30	17,7	17,5	41,5	26,2	30,9	27,2	32,53	27,4	29,8	65,8	68,1	120	103	82,8	110,3	132,8	86,4	50	52,2	58,3	65,26	5,81	0	0	1192,16

Tabla 14. Matriz de consumo energía reactiva capacitiva

Nombre	Tipo	Fecha	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	Total Reactiva Cap	
SERTECPET S.A.	kVArh	1/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,18
SERTECPET S.A.	kVArh	2/05/2024	0,1	0	0	0	0,2	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,59
SERTECPET S.A.	kVArh	3/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	4/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	5/05/2024	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,13
SERTECPET S.A.	kVArh	6/05/2024	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,18
SERTECPET S.A.	kVArh	7/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,18
SERTECPET S.A.	kVArh	8/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	9/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	10/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	11/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	12/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,105
SERTECPET S.A.	kVArh	13/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	14/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	15/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	16/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	17/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	18/05/2024	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,13
SERTECPET S.A.	kVArh	19/05/2024	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,16
SERTECPET S.A.	kVArh	20/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	21/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	22/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	23/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	24/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	25/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	26/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	27/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	28/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	29/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08
SERTECPET S.A.	kVArh	30/05/2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0	0	0	0	0,08

Anexo 3. Registro fotográfico y figuras adicionales



Figura 23. Placa característica AM8053



Figura 24. Placa característica Transformador trifásico

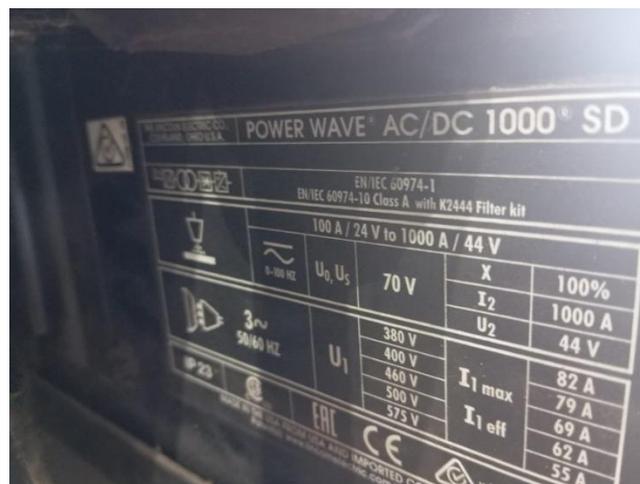


Figura 25. Placa característica Power Wave 1000SD

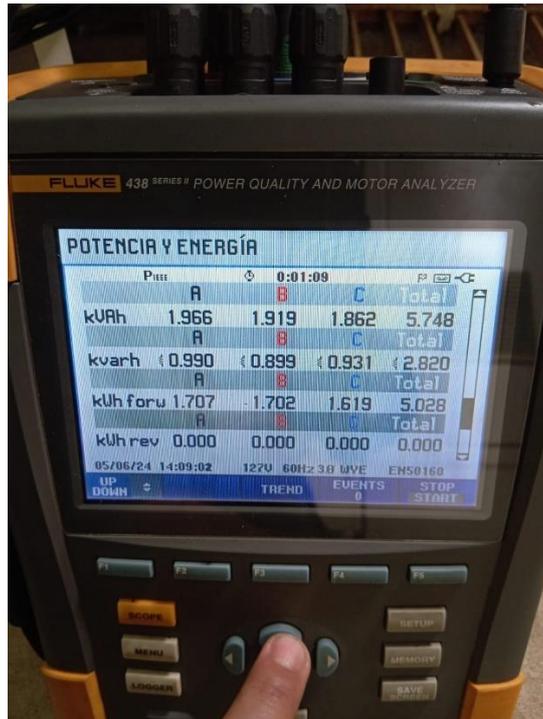


Figura 26. Potencia reactiva registrada en el analizador de redes.

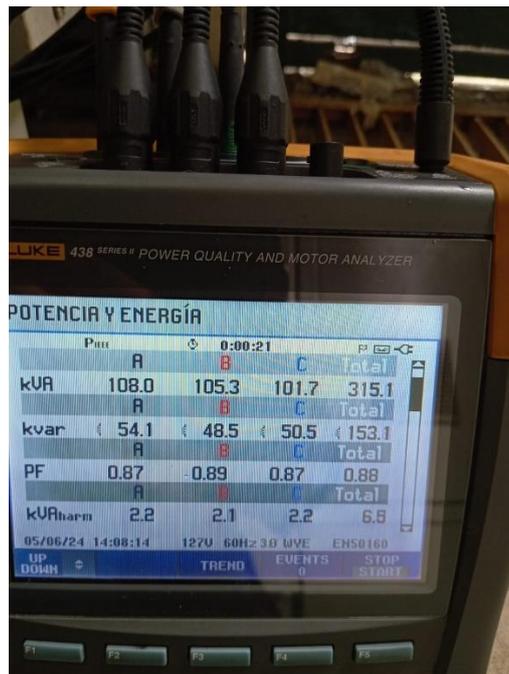


Figura 27. Potencia y fp. registrad en el analizador de redes.

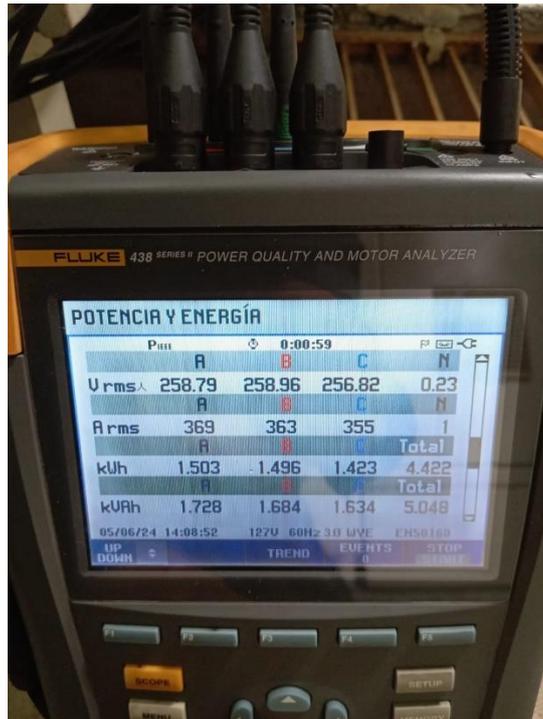


Figura 28. Tensión y corriente registrados en el analizador de redes.

Línea de productos

Condensador trifásico - UCWT HD (Heavy Duty)													
Tensión (V)	50 Hz		60 Hz		Capacitancia (µF)	Serie	Referencia	Dimensiones Ø x H (mm)	Diseño ¹	Resistencia de descarga		Código	Peso (kg)
	Potencia reactiva (kvar)	Corriente nominal In (A)	Potencia reactiva (kvar)	Corriente nominal In (A)						Resistor de descarga	Tiempo de descarga		
440	0,4	0,5	0,5	0,7	2,3 x 3	HD	UCWT0,5V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046013	0,50
	0,5	0,7	0,6	0,8	2,7 x 3	HD	UCWT0,5V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10072545	0,50
	0,6	0,8	0,8	1,0	3,4 x 3	HD	UCWT0,75V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046014	0,50
	0,8	1,0	0,9	1,2	4,1 x 3	HD	UCWT0,75V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10072546	0,51
	0,8	1,1	1,0	1,3	4,6 x 3	HD	UCWT1V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046015	0,51
	1,0	1,3	1,2	1,6	5,5 x 3	HD	UCWT1V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10072547	0,52
	1,3	1,6	1,5	2,0	6,9 x 3	HD	UCWT1,5V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046016	0,53
	1,5	2,0	1,8	2,4	8,2 x 3	HD	UCWT1,5V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046254	0,54
	1,7	2,2	2,0	2,6	9,1 x 3	HD	UCWT2V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046017	0,55
	2,0	2,6	2,4	3,1	11 x 3	HD	UCWT2V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10072548	0,57
	2,1	2,7	2,5	3,3	11,4 x 3	HD	UCWT2,5V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046018	0,56
	2,5	3,3	3,0	3,9	13,7 x 3	HD	UCWT3V48 L10 HD	60 x 156	A	Resistor interno	30	10046019	0,55
	3,0	3,9	3,6	4,7	16,4 x 3	HD	UCWT3V48 L16 HD	60 x 204	A	Resistor interno	30	10072549	0,66
	4,2	5,5	5,0	6,6	22,8 x 3	HD	UCWT5V48 L16 HD	60 x 204	A	Resistor interno	30	10046020	0,75
	5,0	6,6	-	-	27,4 x 3	HD	UCWT5V48 L16 HD	60 x 204	A	Resistor interno	30	10046256	0,76
	6,3	8,2	7,5	9,8	34,3 x 3	HD	UCWT7,5V48 N20 HD	75 x 225	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11314663	1,51
	7,5	9,8	9,0	11,8	41,1 x 3	HD	UCWT7,5V48 N20 HD	75 x 225	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11758819	1,51
	8,3	10,9	10,0	13,1	45,7 x 3	HD	UCWT10V48 N20 HD	75 x 225	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11758279	1,52
	10,0	13,1	12,0	15,7	54,8 x 3	HD	UCWT10V48 N22 HD	75 x 285	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11758824	1,98
	10,4	13,7	12,5	16,4	57,1 x 3	HD	UCWT12,5V48 N22 HD	75 x 285	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11314665	1,80
	12,5	16,4	15,0	19,7	68,5 x 3	HD	UCWT12,5V48 N22 HD	75 x 285	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11758875	1,82
	12,5	16,4	15,0	19,7	68,5 x 3	HD	UCWT15V48 N22 HD	75 x 285	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11314666	1,82
	12,5	16,4	15,0	19,7	68,5 x 3	HD	UCWT15V48 Q26 HD	100 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917005	2,17
	14,6	19,1	17,5	23,0	79,9 x 3	HD	UCWT17,5V48 Q26 HD	100 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917006	2,18
	15,0	19,7	18,0	23,6	82,2 x 3	HD	UCWT15V48 Q26 HD	100 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917040	2,18
	16,7	21,9	20,0	26,2	91,3 x 3	HD	UCWT20V48 Q26 HD	100 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917007	2,18
	17,5	23,0	-	-	95,9 x 3	HD	UCWT17,5V48 Q26 HD	100 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917041	2,07
	18,8	24,6	22,5	29,5	102,8 x 3	HD	UCWT22,5V48 S26 HD	116 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917018	2,70
	20,0	26,2	24,0	31,5	109,6 x 3	HD	UCWT20V48 S26 HD	116 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917043	2,70
	20,8	27,3	25,0	32,8	114,2 x 3	HD	UCWT25V48 S26 HD	116 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	30	11917021	3,26
	22,5	29,5	-	-	123,3 x 3	HD	UCWT22,5V48 S26 HD	116 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	11917045	2,70
	25,0	32,8	-	-	137 x 3	HD	UCWT25V48 S26 HD	116 x 230	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	11917058	2,71
	25,0	32,8	30,0	39,4	137 x 3	HD	UCWT30V48 S28 HD	116 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	12272719	3,50
29,2	38,3	35,0	45,9	159,8 x 3	HD	UCWT35V48 S28 HD	116 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	12272780	3,50	
30,0	39,4	-	-	164,4 x 3	HD	UCWT30V48 S28 HD	116 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	15824794	3,50	
33,3	43,7	40,0	52,5	182,7 x 3	HD	UCWT40V48 U28 HD	136 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	13365671	4,45	
37,5	49,2	45,0	59,0	205,5 x 3	HD	UCWT45V48 U28 HD	136 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	13365672	4,45	
40,0	52,5	-	-	219,2 x 3	HD	UCWT40V48 U28 HD	136 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	16333404	4,45	
41,7	54,7	50,0	65,6	228,4 x 3	HD	UCWT50V48 U28 HD	136 x 290	B	3 x 150 kΩ / Delta	90	13365673	4,45	

Figura 29. Información de producto condensadores WEG.