

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

Maestría en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Compensación reactiva en sistemas eléctricos industriales

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

AUTOR:

Ing. César Augusto Tacury Tinoco

DIRECTOR:

Ing. Jorge Carrión González, PhD

Loja – Ecuador

2022



Certificación

Loja, 07 de Noviembre de 2022

Ingeniero

Jorge Enrique Carrión González, Ph.D.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado:

Compensación reactiva en sistemas eléctricos industriales, previo a la obtención del título de

Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia, de autoría del estudiante

César Augusto Tacury Tinoco con cédula de identidad Nro 1104074958, una vez que el trabajo

cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto,

autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Jorge Enrique Carrión González, Ph.D.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

ii

Autoría

Yo, César Augusto Tacury Tinoco, declaro ser autor del Trabajo de Titulación y eximo

expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles

reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a

la Universidad Nacional de Loja la publicación del trabajo de titulación en el Repositorio

Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1104074958

Fecha: 16/11/2022

Correo electrónico: cesar85_catt@hotmail.com

Teléfono o celular: 0993838162

iii

Carta de autorización por parte del autor para la consulta, reproducción parcial o total,

y/o publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, César Augusto Tacury Tinoco declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado:

Compensación reactiva en sistemas eléctricos industriales, como requisito para optar el título

de Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia, autorizo al sistema

Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la

producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente

manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las

redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de

Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los diez y seis días del mes de

Noviembre del dos mil veintidós.

Firma:

Autor: César Augusto Tacury Tinoco

Cédula de Identidad: 1104074958

Dirección: Macará

Correo electrónico: cesar85_catt@hotmail.com

Teléfono: 0993838162

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Jorge Enrique Carrión González, Ph.D.

iν

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico ante todo a Dios y la Virgen Santísima por haberme dado la capacidad intelectual y fortaleza para culminar con éxito mis estudios, a mi querida madre Janina Tinoco y abuelita Carmen Vega, en especial a mi esposa Andrea Ullauri porque sin su apoyo no hubiera llegado a mi meta académica, a mis familiares quienes con sus palabras de aliento y apoyo me han permitido llegar a estas instancias de mi etapa académica.

César Augusto Tacury Tinoco

Agradecimiento

En primer lugar a Dios, a mi madre, abuelita y principalmente mi esposa, quienes me han brindado su apoyo incondicional en todo momento, los mismos que me han ayudado a superar cada reto presentado y a todos aquellos que de una u otra forma me brindaron su apoyo durante mi período estudiantil de la Maestría en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

En segundo lugar a mi director del Trabajo de Titulación el Ing. Jorge Enrique Carrión González, Ph.D, agradecido por brindarme todos sus conocimientos para el desarrollar de mi trabajo de titulación, también por el tiempo prestado para dar los criterios de ingeniería y dar sus recomendaciones para el mismo; quien también me apoyó incondicionalmente y me prestó su valiosa ayuda intelectual, equipos e información necesaria sobre el tema.

César Augusto Tacury Tinoco

Índice de contenidos

Portad	la		İ
Certifi	cación		. ii
Autorí	a		iii
Carta	de autoriza	ıción	, iv
Dedica	ıtoria		v
Agrad	ecimiento		. vi
		dos	
		Tablas:	
		Figuras:	
		Anexos:	
1. Títu			
2. Res			
2 Intr	2.1.	Abstract	
4. Mai	rco teórico.		
	4.1.	Definición de factor de potencia	6
	4.1.1.	Beneficios de la mejora del factor de potencia	7
	4.1.1.1.	Costos de utilidad	7
	4.1.2.	Técnicas para mejorar el factor de potencia	8
	4.1.3.	Tipos de potencia	8
	4.1.3.1.	Potencia Activa	9
	4.1.3.1.1.	Potencia reactiva	9
	4.1.3.1.2.	Potencia aparente	10
	4.1.3.2.	Tipos de carga	10
	4.1.3.2.1.	Cargas resistivas	
	4.1.3.2.2.	Cargas inductivas	10
		Cargas inductivas	

4.1.3.2.4.	Carga compuesta	. 11
4.1.3.3.	Factor de potencia	. 11
4.1.3.3.1.	Potencia	. 12
4.1.3.3.2.	Energía	. 12
4.1.4.	Causas de un bajo factor de potencia	. 12
4.1.4.1.	Iluminación de descarga o de arco	. 13
4.1.4.2.	Motores de inducción de pequeña y gran capacidad	. 13
4.1.4.3.	Motores sobredimensionados	. 13
4.1.4.4.	Transformadores operando en vacío o con pequeñas cargas	. 13
4.1.4.5.	Transformadores sobredimensionados	. 13
4.1.4.6.	Nivel de tensión por encima del nominal	. 13
4.1.4.7.	Hornos eléctricos de arco voltaico	. 14
4.1.4.8.	Soldadoras eléctricas de corriente alterna	. 14
4.1.5.	Consecuencias de un bajo factor de potencia	. 14
4.1.5.1.	Ventajas de un correcto factor de potencia	. 15
4.1.5.2.	Uso optimizado de las máquinas eléctricas	. 15
4.2.	Métodos de corrección de factor de potencia	. 16
4.2.1.1.	Capacitores	. 16
4.2.2.	Tipos de compensación	. 16
4.2.2.1.	Compensación individual	. 16
4.2.2.2.	Compensación grupal	. 17
4.2.2.3.	Compensación central	. 18
4.2.3.	Tipos de bancos de capacitores	. 19
4.2.3.1.	Capacitores fijos	. 19
4.2.3.2.	Capacitores automáticos	. 20
4.2.3.3.	Compensación combinada	. 20
4.2.4.	Elección de un banco de capacitores	. 20
4.2.4.1.	Elección de un banco de capacitores automático	. 20
4.2.5.	Formas de conexión de capacitores	. 21
4.2.5.1.	Principios de compensación	. 21
4.2.6.	Métodos de cálculo de potencia reactiva para el banco de capacitores	. 21

	4.2.6.1.	Método 1 – triángulo de potencia	22
	4.2.7.	Métodos de cálculo para mejorar el factor de potencia	23
	4.2.8.	Ubicación de la fuente de alimentación reactiva	24
	4.2.9.	Componentes de un banco de condensadores automático	25
	4.2.9.1.	Controlador automático de factor de potencia	. 25
	4.2.9.2.	Elementos externos del relé corrector de factor de potencia	26
	4.2.9.2.1.	Lectura de corriente	. 26
	4.2.9.2.2.	Lectura de tensión	. 26
	4.2.9.3.	Principios de protección	. 26
	4.2.9.4.	Dispositivos de protección	27
	4.2.9.5.	Protección individual por capacitor	. 27
	4.2.9.6.	Conductores	. 28
5. Meto	odología		. 29
	5.1.	Problema de investigación	. 29
	5.2.	Hipótesis de investigación	. 29
	5.3.	Metodología de la investigación	. 29
	5.4.	Método de la investigación	. 29
	5.4.1.	Análisis de la situación actual	. 30
	5.4.1.1.	Descripción de la Empresa	. 30
6. Resu	ltados		. 31
	6.1.	Levantamiento de cargas y parámetros eléctricos	. 31
		Levantamiento de carga.	
	6.1.2.	Suministro de energía	
	6.1.3.	Análisis y medición de parámetros eléctricos	
	6.1.4.	Facturación de potencia y energía	
	6.1.5.	Diseño del Banco de Condensadores	
	6.1.5.1.	Cálculo de la potencia reactiva para la corrección del factor de potencia	
	6.1.6.	Selección del tipo de banco de condensadores.	. 38
	6.1.6.1.	Tipo de banco de condensadores para transformador TR1 (50 kVA)	
	6.1.6.2.	Tipo de banco de condensadores TR2 (125 kVA) y TR3 (250kVA)	
	6.1.7.	Dimensionamiento de los componentes para los bancos de Condensadores.	

	6.2.	Simulaciones en software especializado	40
7. D	iscusión		49
8. C	onclusione	es	50
9. R	ecomenda	ciones	51
10.	Bibliogr	afía	52
11.	Anexos.		53

Índice de Tablas:

Tabla 1. Factor de potencia de cargas industriales usuales.	14
Tabla 2. Tabla kVAR de mejora del factor de potencia	24
Tabla 3. Levantamiento de cargas	31
Tabla 4. Equipos de transformación	33
Tabla 5. Facturación transformador TR1	33
Tabla 6. Facturación transformador TR2 y TR3	34
Tabla 7. Resumen potencia reactiva TR1	36
Tabla 8. Resumen potencia reactiva TR2 y TR3	36
Tabla 9. Cálculo potencia reactiva por planillas del transformador TR2 y TR3 con factor	C 36
Tabla 10. Cálculo potencia reactiva por planillas TR1 con el factor C	37
Tabla 11. Equipos seleccionados para compensar la potencia reactiva	40
Tabla 12. Resumen total de resultados del modelo simplificado con cargas promedio	41
Tabla 13. Resultados del modelo simplificado con cargas promedio y condensadores	43
Tabla 14. Suministro del banco de capacitores en modelo simplificado con carga promedio	o 43

Índice de Figuras:

Figura 1.	Carga real compuesta por una carga resistiva y una carga reactiva
Figura 2.	Demanda facturada del transformador TR1
Figura 3.	Demanda facturada del transformador TR2 y TR3
Figura 4.	Potencia reactiva vs hora (TR1)
Figura 5.	Potencia reactiva vs hora (TR2 y TR3)
Figura 6.	Esquema simplificado de cargas promedio
Figura 7.	Esquema simplificado de cargas promedio con condensadores
Figura 8. 1	Perfil de carga diario de la empresa simulado en software especializado42
Figura 9. 1	Flujo de carga simplificado de cargas promedio con condensadores
Figura 10	. Carga proyectado del TR1 en software especializado sin banco de capacitores 44
Figura 11.	. Carga proyectado del TR1 en software especializado con banco de capacitores 45
Figura 12	Potencia proyectado del TR1 en software especializado con banco de capacitores. 46
Figura 13.	. Carga proyectado TR2-TR3 en software especializado sin banco de capacitores 46
Figura 14	. Carga proyectado TR2-TR3 en software especializado con banco de capacitores 47
Figura 15.	Potencia proyectado TR2-TR3 en software con banco de capacitores
Índice de .	Anexos:
Anexo 1.	Potencia reactiva necesaria para compensación de factor de potencia del TR1 53
Anexo 2.	Potencia reactiva necesaria para compensación de factor de potencia TR2 y TR3 56
Anovo 2	Cartificado da traducción da reguman

1. Título

Compensación reactiva en sistemas eléctricos industriales

2. Resumen

En este estudio se analiza el factor de potencia de la red trifásica de baja tensión de una empresa dedicada a la comercialización de GLP, con su planta envasadora ubicada en la provincia de Loja, se realiza un análisis del estado actual de la red trifásica de alimentación, que incluye circuitos eléctricos instalados en los cuales se determinan los niveles de voltaje, flujos de potencia, factores de potencia, capacidad de bancos de capacitores existentes.

Con los datos obtenidos se implementa un modelo analítico para proponer mejoras en la red de baja tensión.

Palabras claves: Compensación de potencia reactiva, redes eléctricas industriales, bancos de condensadores.

2.1. Abstract

This research analyzes the power factor of the low voltage three-phase network of a company dedicated to the commercialization of liquefied petroleum gas. The bottling plant is located in the province of Loja. The study begins with an analysis of the current state of the three-phase power net, which includes installed electrical circuits in which voltage levels, power flows, power factors and capacity of existing capacitor banks are determined.

The data obtained will be used to implement an analytical model that proposes improvements in the low voltage network.

Keywords: Reactive power compensation, industrial electrical networks, capacitor banks.

3. Introducción

La empresa en análisis está dedicada a la comercialización de GLP, con su planta envasadora ubicada en la provincia de Loja actualmente recibe el servicio de energía eléctrica brindado por la Empresa Eléctrica Regional Del Sur S.A. (EERSSA), por lo que está obligada a cumplir con los requerimientos que se establecen en la "Norma técnica para el diseño de redes eléctricas urbanas y rurales", la misma que indica en el capítulo 8, literal 8.2 referido a la corrección del factor de potencia, que:

"La EERSSA exige a sus clientes que el factor de potencia promedio mensual sea mayor o igual a 0.92 en retraso, caso contrario se aplicará la penalización por bajo factor de potencia contemplada en la reglamentación vigente.

Si la EERSSA detecta que el factor de potencia es inferior al valor mencionado, notificará al cliente para que efectúe su corrección, otorgándole un plazo perentorio.

Es necesario que previo a la instalación de los bancos de capacitores, la EERSSA apruebe el estudio técnico, en el cual se describirá claramente el funcionamiento actual del sistema, especificará la forma de instalación, conexión, operación, capacidad y demás características técnicas del equipo".

En la planta envasadora se dispone de 3 transformadores trifásicos de 50, 125 y 250 kVA que prestan servicio para el taller de mantenimiento de vehículos y para la planta de envasado correspondientemente. Estos equipos de transformación alimentan a cargas de tipo inductivo como de tipo resistivo que permiten desarrollar las diferentes funciones de la planta.

Actualmente el sistema eléctrico presenta un bajo factor de potencia debido a la presencia de cargas inductivas como transformadores, motores y lámparas fluorescentes. En estas condiciones se presentan una serie de inconvenientes como incremento de las pérdidas en los conductores, sobre carga de los transformadores y líneas de distribución, aumento de la caída de tensión, incremento de la potencia aparente, incremento de la facturación eléctrica y sanciones por parte de la empresa eléctrica.

Por lo que en el presente documento se presenta un estudio para determinar el consumo de potencia activa y reactiva con lo cual posteriormente se dimensionará un banco

de capacitores para corregir el bajo factor de potencia y así evitar los inconvenientes que se presentan actualmente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Identificar un procedimiento de cálculo que permita analizar la corrección del factor de potencia para cargas industriales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar un procedimiento que permita compensar potencia reactiva utilizando mediciones de calidad de energía.
- Dimensionar equipos de compensación reactiva considerando el régimen de trabajo de cargas industriales.

4. Marco teórico

4.1. Definición de factor de potencia

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (vatios) y los voltios amperios cuadráticos medios (rms) totales. Varía de uno a cero, pero generalmente se da en porcentajes. La potencia activa suele ser menor que la potencia aparente debido a que la onda de voltaje a la frecuencia fundamental del sistema de potencia. La forma de onda actual difiera o esté "distorsionada" de una forma de onda sinusoidal. Esta definición se basa en la suposición de que la onda de voltaje de la fuente de alimentación de una planta es una onda sinusoidal. Por lo tanto, el factor de potencia "total" es el producto de dos componentes: el factor de potencia de desplazamiento y el factor de potencia de distorsión.

El factor de potencia de desplazamiento es la relación entre la potencia activa de la onda fundamental, en vatios, y la potencia aparente de la onda fundamental, en voltamperios. Esta relación de desplazamiento es el factor de potencia como se indica en la medición de los medidores de vatios-hora y VAR-hora, suponiendo que los voltajes de CA (corriente alterna) son sinusoidales.

El factor de potencia de distorsión es la relación entre la corriente del circuito fundamental y la corriente cuadrática media total. Esta relación será menor que la unidad siempre que haya cargas no lineales suministradas por el circuito.

Si bien el factor de potencia de desplazamiento puede mejorarse agregando una fuente un banco de compensación de potencia reactiva; el factor de potencia de distorsión solo puede mejorarse filtrando las corrientes armónicas que distorsionan la corriente fundamental. (IEEE, 1993).

"Cuando la corriente del circuito no está distorsionada, el factor de potencia de distorsión será igual a uno o la unidad. E factor de potencia total será igual al factor de potencia de desplazamiento. La mayor parte de este capítulo se ocupará del factor de potencia de desplazamiento y se referirá al factor de potencia de desplazamiento como el factor de potencia." (IEEE, 1993)

4.1.1. Beneficios de la mejora del factor de potencia

Los beneficios proporcionados por las mejoras del factor de potencia provienen de la reducción del flujo de potencia reactiva en los sistemas de distribución de servicios públicos y plantas. Esa reducción puede resultar en:

- Menores costos de servicios públicos si se hace cumplir una cláusula de factor de potencia o los cargos de servicios públicos por la demanda de kVA.
- Liberación de capacidad eléctrica del sistema
- Mejora de tensión.
- Menores pérdidas del sistema.

Los beneficios máximos se obtienen cuando la corrección del factor de potencia se logra cerca o en las cargas de factor de potencia bajo. Sin embargo, hacerlo no siempre es práctico, particularmente cuando la carga no es lineal. Es muy importante que la corrección del factor de potencia se logre de forma que no cause interferencias.

4.1.1.1. Costos de utilidad

"Las tarifas de servicios públicos de electricidad para instalaciones industriales y comerciales generalmente se componen de al menos dos componentes. Uno es la "tarifa de energía", o el cargo por kilovatio-hora, que está relacionado con el costo que representa la producción y entrega de esa energía. Un segundo es la "tasa de demanda", el cargo por demanda de kilovatios o kVA. Esto suele estar relacionado con la inversión de capital que se debe realizar para construir las instalaciones de generación, transmisión y distribución necesarias para llevar la energía eléctrica al consumidor." (IEEE, 1993)

Dado que la capacidad del sistema de generación y distribución de energía de la empresa de servicios públicos está limitada por la cantidad de corriente que podría transportar, la capacidad de suministro de la empresa de servicios públicos se ve afectada por el factor de potencia de la carga. Dado que el componente reactivo de la corriente no se registra en el medidor de kilovatios hora, las empresas de servicios públicos cobran por bajo factor de potencia aplicando penalizaciones o recargos, o aplicando cargos por demanda en kVA, o demanda de potencia aparente en lugar de kW. Estos cargos de facturación de servicios públicos suelen ser lo suficientemente costosos como para que sea ventajoso para los clientes mejorar el factor de potencia.

4.1.2. Técnicas para mejorar el factor de potencia

"El factor de potencia de un sistema de energía o carga determinado se mejora al reducir la demanda de VAR que ese sistema o carga impone a su fuente eléctrica. Esto se puede lograr suministrando los VAR localmente desde capacitores o motores síncronos, controlando (reduciendo) la necesidad de VAR mediante controladores estáticos, o desactivando motores inactivos y transformadores descargados." (IEEE, 1993)

Un ejemplo que solo cambia la necesidad de vars implica la aplicación de controladores de factor de potencia estáticos. Estos controladores modulan el voltaje aplicado a un motor para proporcionar la capacidad de arranque suave en aplicaciones que requieren un arranque de voltaje reducido o cuando se inician cargas sensibles a impactos. Además, estos controladores mantienen una relación de ángulo de fase constante entre el voltaje y la corriente del motor, lo que mejora el factor de potencia (y la eficiencia) del motor cuando funciona a menos de la carga total.

El concepto de un capacitor como generador de kilovar es útil para comprender su uso para mejorar el factor de potencia. Un capacitor se puede considerar un generador de kilovar porque proporciona el requisito de magnetización (kilovars) a los dispositivos de inducción. Esta acción puede explicarse en términos de la energía almacenada en capacitores y dispositivos de inducción. Como el voltaje en los circuitos CA varía sinusoidalmente, pasa alternativamente a través de puntos de voltaje cero y puntos de voltaje máximo. A medida que el voltaje pasa por el voltaje cero y comienza a alcanzar el voltaje máximo, el capacitor almacena energía en su campo electrostático y el dispositivo de inducción cede energía de su campo electromagnético. A medida que el voltaje pasa por un punto máximo y comienza a disminuir, el capacitor cede energía y el dispositivo de inducción almacena energía. De este modo, cuando se instalan un condensador y un dispositivo de inducción en el mismo circuito, habrá un intercambio de corriente magnetizante entre ellos, y el condensador realmente suministrará los requisitos de magnetización del dispositivo de inducción. El condensador libera así a la línea de alimentación de la necesidad de suministrar corriente magnetizante.

4.1.3. Tipos de potencia

Aplicando la ley de Ohm en términos de potencia y multiplicando las dos componentes de la corriente (activa y reactiva) por la tensión de alimentación o tensión aplicada, se obtendrán las respectivas potencias activa (P) y potencia reactiva (Q).

4.1.3.1. Potencia Activa

"La potencia activa permite conocer la capacidad con la cual un circuito en su proceso de operación transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía. La potencia activa o real es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Es también conocida como potencia promedio o útil y su unidad de medida sn los vatios [W]." (Juan Higuera, 2019)

Matemáticamente relaciona de forma directa el voltaje de línea, la corriente de línea y el coseno de Θ , el cual indica el desfase entre la señal de voltaje y de corriente. En la ecuación 1 se representa dicha relación:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta$$
 Ec1.

Donde:

- P = Potencia activa [Vatios W].
- V_L = Voltaje de línea de alimentación [Voltios V].
- I_L = Corriente de línea [Amperios A]
- $\theta = \text{Ángulo equivalente del factor de potencia [Grados °]}$

4.1.3.1.1. Potencia reactiva

La potencia reactiva es la utilizada para la formación del campo magnético en equipos que están compuestos por bobinas o capacitores internamente. En estos, la energía se almacena en energía magnética, que produce un campo magnético dando origen al flujo magnético necesario para su funcionamiento. Este tipo de energía no es disipada, fluctúa entre los componentes y la fuente y su unidad de medida son los voltamperios reactivos [VAR].(Juan Higuera, 2019)

Matemáticamente relaciona directamente el voltaje de línea, corriente de línea y seno de Θ, esta potencia se encuentra desfasada 90 grados eléctricos. En la ecuación 2 esta expresada esta relación:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \operatorname{sen} \theta$$
 Ec2.

Donde:

- P = Potencia reactiva [Vatio amperios reactivos W].
- V_L = Voltaje de línea de alimentación [Voltios V].

- I_L = Corriente de línea [Amperios A]
- $\theta = \text{Ángulo equivalente del factor de potencia [Grados °]}$

4.1.3.1.2. Potencia aparente

"La potencia compleja de un circuito eléctrico de corriente alterna, cuya magnitud se conoce como potencia aparente y es la suma vectorial entre la potencia que se disipa en dicho circuito y se transforma en calor o en trabajo (también conocida como potencia promedio, activa o útil) y la potencia utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes" "La potencia aparente es la potencia eléctrica que realmente es absorbida por la carga. Esta potencia es solo útil cuando el factor de potencia es igual a la unidad, indica que la potencia activa es igual a la potencia aparente y no se tiene ningún consumo de energía reactiva. Su unidad de medida es el voltamperio [VA]" (Diego Chicaiza & Esteban Arcos, 2015).

Dado que la potencia activa P es la que define el trabajo útil en una instalación eléctrica que se puede llegar a considerar fija, es decir que a mayor potencia reactiva Q mayor potencia aparente S y mayor circulación de intensidad de corriente por la instalación eléctrica y viceversa.

4.1.3.2. Tipos de carga

En una red o circuito eléctrico a los elementos pasivos se les conoce como cargas ya que por medio de ellos la energía eléctrica se consume dependiendo de la intensidad de corriente que circule en los mismos, por lo que a dicha corriente se le conoce como corriente de carga, de características resistiva, inductiva o capacitiva dependiendo del tipo de carga que el sistema posea. (Freddy Llumiquinga, 2012)

4.1.3.2.1. Cargas resistivas

"En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, calefactores, resistencias de carbón (es toda energía que se convierte en luz y calor) el voltaje y la corriente están en fase. En este caso, se tiene un factor de potencia unitario" (Freddy Llumiquinga, 2012). La característica de estas cargas es que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es cero.

4.1.3.2.2. Cargas inductivas

En las cargas inductivas o bobinas como los motores y transformadores la característica principal de estos elementos es la de almacenar y consumir la energía eléctrica convirtiéndola en energía magnética por medio del campo magnético que genera a la circular corriente eléctrica por

estos elementos, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje, es decir, existe un desfase negativo (-90). En este caso se tiene un factor de potencia retrasado. (Freddy Llumiquinga, 2012)

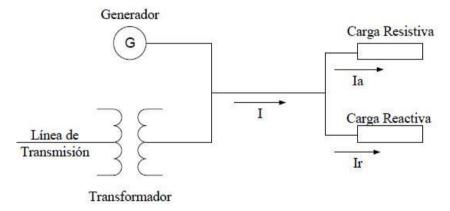
4.1.3.2.3. Cargas capacitivas

En las cargas capacitivas como los condensadores o cables aislados en media tensión tendidos en canalizaciones subterráneas, la corriente se encuentra adelantada respecto del voltaje por esta razón hay un desfase positivo. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. Aquí la corriente se encuentra adelantada 90° con respecto al voltaje. (Freddy Llumiquinga, 2012)

4.1.3.2.4. Carga compuesta

Una carga compuesta está formada por una parte puramente resistiva, dispuesta en paralelo con otra parte reactiva ideal, en cargas tales como las ocasionadas por lámparas incandescentes y aparatos de calefacción, la parte de carga reactiva puede considerarse como prácticamente nula. Sin embargo, en las cargas representadas por líneas de transmisión y distribución, transformadores, lámparas fluorescentes, motores eléctricos, equipos de soldadura, hornos eléctricos, etc., la parte reactiva de la carga suele ser de una magnitud similar a la de parte puramente resistiva (Freddy Llumiquinga, 2012). Ver Figura 1.

Figura 1.Carga real compuesta por una carga resistiva y una carga reactiva.



Fuente:(Freddy Llumiquinga, 2012)

4.1.3.3. Factor de potencia

El factor de potencia define la relación entre la energía que se convierte en trabajo útil y la energía eléctrica consumida por un circuito o dispositivo. Se representa con las siglas FP, es un valor adimensional, solo puede tomar valores entre 0 y 1 (ya sea inductivo o capacitivo) y viene determinado por el tipo de cargas conectadas en una instalación eléctrica.

Cuando el factor de potencia está cercano a la unidad, se dice que su componente reactivo es muy bajo, caso contrario cuando está cercano a ser nulo, se tiene una gran componente reactiva, lo que hace que se tengan mayores pérdidas. Cálculo del factor de potencia

4.1.3.3.1. Potencia

Conociendo los valores demandados de potencia activa (kW) y de potencia aparente (kVA) en un periodo de tiempo, se utiliza la relación observada en la ecuación 3 para obtener el valor del factor de potencia. (Juan Higuera, 2019)

$$FP = \frac{Potencia\ Activa}{Potencia\ Aparente} = \frac{P}{S}$$
 Ec3.

Donde:

- P = Potencia activa [Vatios W].
- S = Potencia aparente [Voltio amperios VA].
- FP = Factor de potencia [Adimensional FP].

4.1.3.3.2. Energía

Conociendo los valores demandados de energía activa (kWh) y de energía reactiva (kVARh) en un periodo de tiempo, se utiliza la relación observada en la ecuación 4 para obtener el valor del factor de potencia. (Juan Higuera, 2019)

$$FP = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + kVAR}h^2}$$
 Ec4.

Donde:

- kWh = Energía activa [Kilo Vatios hora kWh].
- kVARh = Energía reactiva [Kilo Vatio amperios VA].
- FP = Factor de potencia [Adimensional FP].

4.1.4. Causas de un bajo factor de potencia

El bajo factor de potencia se debe parcialmente a la carga de los motores de inducción, ya que frecuentemente se trabaja con exceso de estos, también debido a balastros, transformadores y en general a cualquier tipo de inductancia, etc. El bajo factor de potencia se debe a que estas son cargas no lineales que contaminan la red eléctrica, en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con relación al voltaje lo que provoca un bajo factor de potencia (Freddy Llumiquinga, 2012).

A continuación, se exponen algunas causas por la cual se produce un bajo factor de potencia:

4.1.4.1. Iluminación de descarga o de arco

Estas lámparas para su funcionamiento requieren en algunos casos de una inductancia o de un transformador, como se mencionó anteriormente estos elementos son los que consumen energía reactiva y al tener la presencia de varias de estas lámparas se tendrá una mayor demanda de energía reactiva por ende producen un factor de potencia bajo (Freddy Llumiquinga, 2012)

4.1.4.2. Motores de inducción de pequeña y gran capacidad

Estos motores son generalmente la causa principal de los factores de potencia bajos, por ser numerosos en los establecimientos industriales, y por naturaleza propia de la máquina ya que necesitan de una potencia magnetizante y lo más importante es que están formados por inductores o bobinas que permiten el funcionamiento y movimiento del rotor del motor (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.1.4.3. Motores sobredimensionados

Este es un caso particular de lo anterior, cuyas consecuencias son análogas. Generalmente los motores que son sobredimensionados, presentan una gran conservación de energía.

Es muy común la sustitución de un motor por otro de mayor potencia, principalmente en los casos de mantenimiento y reparación que, por comodidad, la sustitución transitoria pasa a ser permanente, sin saber que un sobredimensionamiento provocará un bajo factor de potencia (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.1.4.4. Transformadores operando en vacío o con pequeñas cargas

Análogamente a los motores, los transformadores, operando en vacío o con pequeñas cargas, consumen una cantidad de energía reactiva relativamente grande, comparada con la energía activa, provocando un bajo factor de potencia.

4.1.4.5. Transformadores sobredimensionados

Es un caso particular de lo anterior, donde transformadores de gran potencia son utilizados para alimentar, durante largos períodos, pequeñas cargas.

4.1.4.6. Nivel de tensión por encima del nominal

Con una tensión superior al nominal, en el arranque de motores de inducción, se da el aumento de consumo de energía reactiva y, por tanto, disminuye el factor de potencia (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.1.4.7. Hornos eléctricos de arco voltaico

Su factor de potencia varia en un amplio margen al calentarse el horno, oscila entre 0.5 y 0.85, luego de un cierto tiempo de trabajo se aproxima a un valor constante. El factor de potencia de los hornos es bajo las condiciones. El arco al comienzo del ciclo tiene menor conductividad, de manera que la corriente está en atraso con relación al voltaje. Cuando el arco está en cortocircuito, en donde es necesario disponer de una reactancia para limitar la intensidad de corriente a un valor fuera de peligro, siendo esta reactancia la causa de un bajo factor de potencia.

4.1.4.8. Soldadoras eléctricas de corriente alterna

Son máquinas que se caracterizan por tener o producir un bajo factor de potencia, debido a que son construidas con una reactancia interna, para limitar las corrientes de cortocircuito en el momento que se produce el arco, esta reactancia es la que produce un bajo factor de potencia.(Freddy Llumiquinga, 2012)

A continuación, se presenta la Tabla 1 en la cual se muestra el factor de potencia de las cargas más usuales.

Tabla 1.Factor de potencia de cargas industriales usuales.

Aparato		Factor de potencia
Cargas a:	0%	0.17
	25%	0.55
Motor asíncrono	50%	0.73
	75%	0.80
	100%	0.85
Lámparas incandescentes		1
Tubos fluorescentes		0,93
Lámparas de descarga		0.4 a 0.6
Hornos de resistencias		1
Hornos de inducción con compensación		0.85
Hornos a calentamiento dieléctrico		0.85
Hornos de arco		0.8
Máquinas de soldar a resistencia		0.8 a 0.9
Transformadores – rectificadores de soldadura de arco		0.7 a 0.9

Fuente:(Freddy Llumiquinga, 2012)

4.1.5. Consecuencias de un bajo factor de potencia

Un bajo FP (entre 0 y 0,9) comparado con otro alto (superior a 0,9 hasta 1), origina, para una misma potencia, una mayor demanda de corriente, lo que implica la necesidad de utilizar

cables de mayor sección, para llevar esta corriente demandada de manera eficiente, evitando pérdidas y caídas de tensión en la red de alimentación. (Juan Higuera, 2019)

La potencia aparente (S) es tanto mayor cuanto más bajo sea el FP, lo que origina una mayor dimensión de los generadores, transformadores, cables y equipos que alimentan las cargas de los usuarios. Ambas situaciones causan un mayor costo de la instalación eléctrica. Esto no resulta práctico ni eficiente para las compañías eléctricas, ni para el usuario, puesto que el gasto de energía eléctrica es mayor con un FP bajo.

De manera resumida, las siguientes son consecuencias de un bajo factor de potencia:

- Calentamiento de cables.
- Calentamiento de embobinados de los transformadores de distribución.
- Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección.
- Sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución.
- Aumento de la caída de tensión.
- Mayor consumo de corriente.
- Incremento de la facturación eléctrica por mayor consumo de potencia en pérdidas.
- Penalizaciones económicas variadas, incluyendo corte de suministro en caso de bajo factor potencia.

4.1.5.1. Ventajas de un correcto factor de potencia

Al aplicar la corrección en una instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria, se reduce el valor de la corriente a igual potencia útil requerida, y, por lo tanto, la potencia global consumida aguas arriba; esto conlleva numerosas ventajas, entre ellas, un uso optimizado de las máquinas (generadores y transformadores) y de las líneas eléctricas (transmisión y distribución).

4.1.5.2. Uso optimizado de las máquinas eléctricas

Los generadores y los transformadores son dimensionados a partir de la potencia aparente S. Por lo tanto, compensando la instalación, las máquinas pueden ser dimensionadas en relación con una potencia aparente inferior, aún proporcionando la misma potencia activa.

4.2. Métodos de corrección de factor de potencia

La corrección del factor de potencia en los sistemas eléctricos se puede realizar mediante el uso o implementación de distintos componentes ubicados en diferentes y estratégicos nodos al interior del sistema de interés. Estos dispositivos entregan la energía reactiva necesitada por los cargas o receptores para su correcto funcionamiento.

4.2.1.1. Capacitores

"Los capacitores son dispositivos capaces de almacenar energía por medio de una ordenación de electrones en los dieléctricos que se da cuando se aplica una diferencia de potencial en sus terminales. Usualmente son implementados para contrarrestar la potencia reactiva entregada por las cargas mixtas presentes en el sistema y con ello obtener un óptimo factor de potencia". (Juan Higuera, 2019)

Una manera inmediata de corregir el factor de potencia es utilizando capacitores para compensar o equilibrar la energía reactiva que demandan las cargas inductivas (motores, transformadores e inductancias).

Esta práctica conocida como mejora o corrección del factor de potencia, se realiza mediante la conexión a través de condensadores individuales o en grupo (denominados bancos de condensadores).

Además, estos capacitores cuentan con un sistema anti-explosión por sobrepresión que permite desconectar el capacitor en caso de ser utilizado en condiciones eléctricas y térmicas extremas e inadmisibles. Dicho sistema, actúa expandiendo la tapa de los terminales interrumpiendo la conexión del termina con el elemento capacitivo.

4.2.2. Tipos de compensación

Las ubicaciones generalmente utilizadas para los capacitores, con el fin de compensar y corregir el factor de potencia se pueden dividir en 3 grupos fundamentales:

- Compensación individual.
- Compensación en grupo.
- Compensación central.

4.2.2.1. Compensación individual

Cada carga de carácter reactivo está provista de su propia unidad de capacitor o banco de capacitores, con el fin de que por este circuito circule una corriente menor reduciendo las pérdidas. Es

implementada en equipos que mantenga una operación fija y en los cuales se tenga un consumo representativo. (Juan Higuera, 2019)

Algunas ventajas que tiene este tipo de compensación son:

- Optimiza toda la instalación eléctrica ya que la corriente reactiva se abastece en el mismo lugar de su consumo, reduciendo las pérdidas en la instalación.
- Produce mejoras en el nivel de tensión dentro de la instalación.
- Permite una potencia adicional ya que descarga el centro de transformación.

Algunas desventajas que tiene este tipo de compensación son:

- La implementación directa a cada una de las cargas hace que el costo de la solución sea mayor por la cantidad de capacitores que deben ser implementados.
- Como no todas las cargas se encuentras siempre en funcionamiento en momentos existirá subutilización en la compensación.
- Si el tipo de compensación que se implementa no posee un sistema de control, se tendrán sobrecostos por transporte de energía reactiva capacitiva (Freddy Llumiquinga, 2012).

Este tipo de corrección es aconsejable para grandes equipos con carga y factor de potencia constantes y tiempos de conexión prolongados; por lo general, es utilizado para motores y lámparas fluorescentes.

4.2.2.2. Compensación grupal

En el caso de grandes instalaciones eléctricas con un gran número de consumidores de potencias diferentes y de conexión variable, se utilizan bancos de capacitores reunidos en un solo punto con una unidad de regulación que en cada momento conecta o desconecta de manera automática los capacitores necesarios para adaptarse a la demanda total de potencia reactiva. (Juan Higuera, 2019).

Para este tipo de compensación se implementa un banco de capacitores para compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas específicas.

Las ventajas que tiene este tipo de compensación son:

- El implementar una solución para un conjunto de cargas es más económico.
- Se puede llegar a descargar el transporte de energía reactiva inductiva de las líneas asociadas al sistema eléctrico.
- Si se cuenta con un sistema de control, la compensación sólo entra en funcionamiento cada vez que la carga lo necesite, con esto, no se generará sobrecosto por transporte de energía reactiva capacitiva.

- Permite consumir la misma cantidad de energía aparente, pero con un mejor factor de potencia. Es decir que disminuye el consumo de energía reactiva y ajusta la necesidad real de la instalación en kW.
- Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).

Las desventajas que se tiene con este tipo de compensación son:

- Si no se cuenta con un sistema de control, se tendrá una compensación fija, lo cual puede generar un sobrecosto por transporte de energía reactiva capacitiva.
- La sobrecompensación durante períodos de poco consumo reactivo aumenta la tensión con los riesgos que ello implica.
- Si la carga del sistema llegase a cambiar con el paso del tiempo de forma notoria y significativa, la compensación podría quedar corta y entrar en una región de subcompensación (Freddy Llumiquinga, 2012).

Este caso es viable para redes eléctricas con muchos motores instalados con potencias variadas. En este caso se agrupan las cargas o motores, reuniendo en un grupo a los motores de potencias pequeñas y en otro grupo los de potencias grandes.(Juan Higuera, 2019)

4.2.2.3. Compensación central

La ubicación de este tipo de compensación es directamente en la acometida, lo cual hace que sea una solución generalizada ya que suministra la potencia reactiva capacitiva según la demanda de potencia reactiva inductiva de todos los tableros y ML (Carga maestra) derivados de este nodo.

Las ventajas que se tiene con este tipo de compensación son:

- Optimiza la instalación.
- Mejor regulación de voltaje en el sistema.
- Si se cuenta con un sistema de control, sólo entrará en funcionamiento cada vez que la carga lo necesite con lo cual no se generará sobrecostos por transporte de energía reactiva capacitiva.
- Descarga el centro de transformación (Potencia disponible en kW).
- La energía reactiva no se transporta desde la localización hasta el transformador (Juan Higuera, 2019)

Las desventajas que se tiene con este tipo de compensación son:

• Es necesario la implementación de un sistema de control y medida, para que la compensación se realice con base a los requerimientos de la carga del sistema, lo cual repercuta en mayores costos (Freddy Llumiquinga, 2012)

4.2.3. Tipos de bancos de capacitores

4.2.3.1. Capacitores fijos

Se habla de compensación fija ya que el condensador no posee ninguna parte o dispositivo móvil, con lo cual la unidad se mantendrá conectada al sistema, con una entrega constante de reactivos capacitivos. Los bancos de capacitores fijos son aquellos que quedan conectados permanentemente al sistema y para los cuales se prevén solo algunas operaciones de conexión y desconexión en un período de tiempo largo (Juan Higuera, 2019).

- Los bancos de capacitores fijos se instalan principalmente cuando:
- La demanda de potencia reactiva de la carga que se pretende compensar es constante o poco variable.
- Se pretende reducir las pérdidas por efecto Joule, o aumentar la potencia activa en transformadores y generadores.
- Se tratan de elevar los niveles de tensión en líneas de transmisión o distribución.

Las ventajas que tiene este tipo de compensación son:

- Fácil instalación, gran seguridad en su funcionamiento y su mantenimiento es muy mínimo.
- Tienen pequeñas perdidas, no ocupan mucho espacio, razón por la cual pueden conectarse a puntos cercanos de la carga.
- Son construidos a diferentes potencias según la necesidad.

Las desventajas que tiene este tipo de compensación son:

- Cuando las variaciones de carga son significativas, el capacitor puede quedar corto en la entrega de potencia reactiva o en caso contrario puede presentar instantes de sobrecompensación.
- Es necesario la implementación de un sistema de descarga del condensador, para los casos que sea desconectado de la línea y mitigar posibles peligros al personal.
- Debido a las variaciones de carga, posiblemente se puede presentar mayor entrega de potencia reactiva capacitiva al sistema, lo cual con lleva a cobros adicionales en la factura de energía (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.2.3.2. Capacitores automáticos

"Se habla de compensación automática cuando el condensador posee una parte o dispositivo móvil, el cual le permite conectar y desconectar sus unidades según los requerimientos del sistema, que son registrados por medio de su sistema de medida. Son utilizados cuando el requerimiento total de potencia reactiva no es constante y permiten adaptar automáticamente la potencia reactiva a las necesidades del sistema." (Juan Higuera, 2019)

Se tienen mayores costos ya que el sistema es un poco más robusto y necesita de contactores, sistema de medida (implementación de transformadores de corriente) y sistema de control (implementación de transformador de tensión).

Los capacitores que conforman el banco generalmente son trifásicos y están colocados en el mismo gabinete. Éstos pueden disponerse como grupos de unidades en paralelo conectados en serie y asociados con contactores. A los grupos de unidades individuales conectadas en paralelo se les denomina usualmente como secciones o pasos del banco.

4.2.3.3. Compensación combinada

Se habla de compensación combinada cuando se implementan módulos fijos y automáticos, es utilizada en aquellos nodos en los que se necesitan realizar una compensación para cargas que tengan una parte constante y otra variable.

Los bancos de capacitores fijos son aquellos que quedan conectados permanentemente al sistema y para los cuales se prevén solo algunas operaciones de conexión y desconexión en un período de tiempo largo. Los bancos fijos se instalan principalmente cuando (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.2.4. Elección de un banco de capacitores

En la elección de un banco de capacitores se deben tener en cuenta varios aspectos tales como:

- Rentabilidad del material.
- Limitaciones del sistema como son: armónicos, niveles de voltaje, niveles de cortocircuito entre otros.
- Conocimiento de los equipos cuyo factor de potencia es importante.

4.2.4.1. Elección de un banco de capacitores automático

Para el caso de la compensación automática, su elección deberá tener en cuenta 3 datos que definen una batería automática de condensadores son los siguientes:

• La potencia en kVAR, que vendrá dada por los cálculos efectuados y dependerá del factor de potencia objetivo que se desea tener en la instalación.

- La tensión nominal, que siempre deberá ser mayor o igual a la tensión de red.
- La regulación de la batería, que indicará el escalonamiento físico de la misma.

Es importante recalcar que el dimensionamiento óptimo de un banco de capacitores, está relacionado con la optimización entre el número de capacitores (escalones-pasos) a utilizar, precio, volumen y espacio físico disponible.

4.2.5. Formas de conexión de capacitores

Las formas de conexión básicas utilizadas son las siguientes:

- Conexión delta.
- Conexión y aterrizada.
- Conexión y no aterrizada.

Existen otros tipos de configuraciones más desarrolladas las cuales se utilizan en instalaciones de alto voltaje como son:

- Conexión y con resistencia de puesta a tierra.
- Conexión doble y con puesta directa a tierra, con resistencia a tierra, o sin puesta a tierra.
- Conexión doble delta.

Los bancos en Y con puesta a tierra se utilizan en sistemas con múltiples puestas a tierra o en sistema efectivamente aterrizados, en sistemas con impedancia de puesta a tierra o aquellos en donde el conductor neutro se lleva por todo el circuito. La conexión en delta se usa en sistemas con neutro aislado donde las corrientes de falla no sean excesivas (Edgar Aguado & Rubén Bravo, 1995)

4.2.5.1. Principios de compensación

La potencia aparente de un circuito de corriente alterna, es la suma fasorial de la potencia activa y reactiva (Juan Higuera, 2019). El coseno del ángulo de fase entre estas dos, nos representan el factor de potencia de la carga.

El mejoramiento del factor de potencia se obtendrá por la variación de la potencia reactiva en oposición de fase a la de la carga para este caso es la que llega aportar un capacitor.

4.2.6. Métodos de cálculo de potencia reactiva para el banco de capacitores

Para ejemplificar cada uno de los métodos que se describirán y detallarán a continuación, se planteará un ejemplo en el que, dadas unas condiciones iniciales, se calculará la potencia reactiva que un banco de capacitores necesitaría para llevar y corregir el factor de potencia a un valor deseado. Esto con el propósito de observar la congruencia entre los resultados de cada uno de los métodos y su precisión.

4.2.6.1. Método 1 – triángulo de potencia

Este método para el cálculo de los capacitores adecuados para realizar la compensación de energía reactiva optima, consiste en encontrar mediante las relaciones trigonométricas basadas en el triángulo de potencias, la potencia reactiva inicial Q_i y la potencia reactiva final Q_f para un factor de potencia inicial $FP_{inicial}$ y un factor de potencia final o deseado FP_{final} .

Se realizará el mismo procedimiento para una condición inicial y una final, como se muestra a continuación:

Partiendo del $FP_{inicial}$ y el FP_{final} o deseado, se encontrará los ángulos θ_i y θ_f para cada caso.

INICIAL	FINAL
$\cos heta_{inicial}$ = A	$\cos heta_{final}$ = B
$\theta_i = cos^{-1}(A)$	$\theta_f = cos^{-1}(B)$

Conociendo los ángulos $\theta_{inicial}$ y θ_{final} se procede a encontrar la potencia aparente para cada condición de:

$$S_{inicial} = \frac{P}{\cos \theta_{inicial}}$$
 Ec5. $S_{final} = \frac{P}{\cos \theta_{final}}$ Ec6.

Conociendo las potencias aparentes de la ecuación 5 $S_{inicial}$ y S_{final} ecuación 6, aplicando relaciones trigonométricas, se encuentra las potencias reactivas para cada condición de:

$$Q_{inicial} = S_{inicial} \cdot \text{sen } \theta_{inicial}$$
 Ec7. $Q_{final} = S_{final} \cdot \text{sen } \theta_{final}$ Ec8.

Una vez encontrada cada potencias reactivas al aplicar la ecuación 7 $Q_{inicial}$ y Q_{final} ecuación 8, se procede a encontrar la potencia reactiva del banco de capacitores denominada Q_C , restando las potencias reactivas encontradas, como se observa en la ecuación 9.

$$Q_C = Q_{inicial} - Q_{final}$$
 Ec9.

4.2.7. Métodos de cálculo para mejorar el factor de potencia

Se utilizan las siguientes expresiones de cálculo:

$$\cos \phi = \frac{poder\ activo}{poder\ aparente} = \frac{kW}{kVA}$$
 Ec10.

$$\tan \phi = \frac{poder\ reactivo}{poder\ activo} = \frac{kVAR}{W}$$
 Ec11.

$$\sin \phi = \frac{poder\ reactivo}{poder\ aparente} = \frac{kVAR}{kVA}$$
 Ec12.

Suponiendo, para fines de cálculo, que el componente de potencia activa permanece constante y que los componentes de potencia aparente y potencia reactiva cambiarían con el factor de potencia de las ecuaciones 10-11-12, la expresión que involucra el componente de potencia activa es la más conveniente de usar. Esta expresión se puede reescribir en las ecuaciones 13a y 13b como: (IEEE, 1993)

potencia reactivo = potencia activo
$$\cdot \tan \phi$$
 Ec13a.

$$kvar = (kW)(tan\phi)$$
 Ec13b.

donde el valor de $tan\phi$ corresponde al ángulo del factor de potencia (ϕ)

Por ejemplo, si es necesario determinar la clasificación del condensador para mejorar la carga factor de potencia, se tiene las siguientes expresiones de cálculo.

potencia reactiva al factor de potencia original = poder activo $\cdot \tan \phi_1$

$$= (kW)(tan\phi_1)$$
 Ec14.

potencia reactiva con factor de potencia mejorado = poder activo $\cdot \tan \phi_2$

$$= (kW)(tan\phi_2)$$
 Ec15.

donde ϕ_1 es el ángulo del factor de potencia original y ϕ_2 es el ángulo de la potencia mejorada factor. Por lo tanto, la clasificación del capacitor requerida esta expresada en las ecuancione16a y 16b para mejorar el factor de potencia es:

Potencia reactiva
$$kvar = potencia activa \cdot (tan\phi_1 - tan\phi_2)$$
 Ec16a.

$$kvar = (kW) \cdot (tan\phi_1 - tan\phi_2)$$
 Ec16b.

Para simplificar,) $\cdot (tan\phi_1 - tan\phi_2)$ a menudo se escribe como Δtan .

Todas las tablas, gráficos y curvas que tienen un multiplicador de kW para determinar la potencia reactiva, como se muestra en la ecuación (17a) y (17b).

Potencia reactiva = potencia activa
$$\cdot \Delta tan$$
 Ec17a.

 $kvar = (kW) \cdot (\Delta tan)$ Ec17b.

4.2.8. Ubicación de la fuente de alimentación reactiva

Los beneficios derivados de la instalación de capacitores, máquinas síncronas o cualquier otro medio para mejorar el factor de potencia resultan de la reducción del flujo de potencia reactiva en el sistema. Por lo tanto, los capacitores y las máquinas síncronas deben instalarse lo más cerca posible de la carga a la cual se está mejorando el factor de potencia. Sin embargo, a veces es difícil mantener en línea los capacitores de bajo voltaje, ya que el dispositivo de sobrecorriente se disparará si resuenan. Por tanto, es aconsejable agrupar los condensadores donde estén, o puedan estar, aislados de las corrientes armónicas. (IEEE, 1993). Para determinar los kVAR necesarios para mejor el factor de potencia, se utiliza un multiplicador C como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Tabla kVAR de mejora del factor de potencia.

de potencia inicial 0,86 0,87 0,88 0,89 0,90 0,91 0,92 0,93 0,94 0,95 0,96 0,97 0,98 0,99 1,0 0,50 1,139 1,165 1,192 1,220 1,248 1,276 1,306 1,337 1,369 1,403 1,440 1,481 1,529 1,589 1,73 0,52 1,050 1,076 1,103 1,159 1,187 1,217 1,248 1,280 1,314 1,351 1,392 1,440 1,500 1,64 0,54 0,966 0,992 1,019 1,047 1,075 1,103 1,133 1,164 1,196 1,230 1,267 1,308 1,316 1,416 1,559 0,56 0,887 0,913 0,940 0,968 0,996 1,024 1,054 1,061 1,188 1,229 1,277 1,337 1,488 0,58 0,812 0,863 0,821 0,840 0,877 0,979 1,010																
0,52 1,050 1,076 1,103 1,131 1,159 1,187 1,217 1,248 1,280 1,314 1,351 1,392 1,440 1,500 1,64 0,54 0,966 0,992 1,019 1,047 1,075 1,103 1,133 1,164 1,196 1,230 1,267 1,308 1,356 1,416 1,55 0,56 0,887 0,913 0,940 0,968 0,996 1,024 1,054 1,085 1,117 1,151 1,188 1,229 1,277 1,337 1,48 0,58 0,812 0,838 0,865 0,893 0,921 0,949 0,979 1,010 1,042 1,076 1,113 1,154 1,202 1,262 1,40 0,6 0,740 0,766 0,793 0,821 0,840 0,877 0,907 0,938 0,970 1,004 1,041 1,082 1,101 1,133 1,26 0,64 0,660 0,634 0,661 0,689 <th>potencia</th> <th>0,86</th> <th>0,87</th> <th>0,88</th> <th>0,89</th> <th>0,90</th> <th>0,91</th> <th>0,92</th> <th>0,93</th> <th>0,94</th> <th>0,95</th> <th>0,96</th> <th>0,97</th> <th>0,98</th> <th>0,99</th> <th>1,0</th>	potencia	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,0
0,54 0,966 0,992 1,019 1,047 1,075 1,103 1,133 1,164 1,196 1,230 1,267 1,308 1,356 1,416 1,55 0,56 0,887 0,913 0,940 0,968 0,996 1,024 1,054 1,085 1,117 1,151 1,188 1,229 1,277 1,337 1,48 0,58 0,812 0,838 0,865 0,893 0,921 0,949 0,979 1,010 1,042 1,076 1,113 1,154 1,202 1,262 1,40 0,6 0,740 0,766 0,793 0,821 0,840 0,877 0,907 0,938 0,970 1,004 1,041 1,082 1,130 1,190 1,33 0,62 0,673 0,626 0,754 0,782 0,810 0,840 0,838 0,877 0,909 0,950 0,998 1,068 1,123 1,26 0,66 0,545 0,561 0,682 0,612 0,622 <td>0,50</td> <td>1,139</td> <td>1,165</td> <td>1,192</td> <td>1,220</td> <td>1,248</td> <td>1,276</td> <td>1,306</td> <td>1,337</td> <td>1,369</td> <td>1,403</td> <td>1,440</td> <td>1,481</td> <td>1,529</td> <td>1,589</td> <td>1,732</td>	0,50	1,139	1,165	1,192	1,220	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,589	1,732
0,56 0,887 0,913 0,940 0,968 0,996 1,024 1,054 1,085 1,117 1,151 1,188 1,229 1,277 1,337 1,48 0,58 0,812 0,838 0,865 0,893 0,921 0,949 0,979 1,010 1,042 1,076 1,113 1,154 1,202 1,262 1,40 0,6 0,740 0,766 0,793 0,821 0,840 0,877 0,907 0,938 0,970 1,004 1,041 1,082 1,130 1,190 1,33 0,62 0,673 0,699 0,726 0,754 0,782 0,810 0,840 0,871 0,903 0,937 0,974 1,015 1,063 1,123 1,26 0,64 0,668 0,634 0,661 0,689 0,717 0,745 0,775 0,806 0,887 0,999 0,950 0,998 1,068 1,20 0,666 0,545 0,571 0,588 0,566 0,594 </td <td>0,52</td> <td>1,050</td> <td>1,076</td> <td>1,103</td> <td>1,131</td> <td>1,159</td> <td>1,187</td> <td>1,217</td> <td>1,248</td> <td>1,280</td> <td>1,314</td> <td>1,351</td> <td>1,392</td> <td>1,440</td> <td>1,500</td> <td>1,643</td>	0,52	1,050	1,076	1,103	1,131	1,159	1,187	1,217	1,248	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643
0,58 0,812 0,838 0,865 0,893 0,921 0,949 0,979 1,010 1,042 1,076 1,113 1,154 1,202 1,262 1,40 0,6 0,740 0,766 0,793 0,821 0,840 0,877 0,907 0,938 0,970 1,004 1,041 1,082 1,130 1,190 1,33 0,62 0,673 0,699 0,726 0,754 0,782 0,810 0,840 0,871 0,903 0,937 0,974 1,015 1,063 1,123 1,26 0,64 0,608 0,634 0,661 0,689 0,717 0,745 0,775 0,806 0,838 0,872 0,909 0,950 0,998 1,068 1,20 0,666 0,545 0,571 0,598 0,626 0,654 0,682 0,712 0,743 0,775 0,809 0,846 0,887 0,935 0,995 1,13 0,670 0,425 0,511 0,538 0,566<	0,54	0,966	0,992	1,019	1,047	1,075	1,103	1,133	1,164	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,559
0,6 0,740 0,766 0,793 0,821 0,840 0,877 0,907 0,938 0,970 1,004 1,041 1,082 1,130 1,190 1,33 0,62 0,673 0,699 0,726 0,754 0,782 0,810 0,840 0,871 0,903 0,937 0,974 1,015 1,063 1,123 1,26 0,64 0,608 0,634 0,661 0,689 0,717 0,745 0,775 0,806 0,838 0,872 0,909 0,950 0,998 1,068 1,20 0,66 0,545 0,571 0,598 0,626 0,654 0,682 0,712 0,743 0,775 0,809 0,846 0,887 0,935 0,995 1,13 0,68 0,485 0,511 0,538 0,566 0,594 0,622 0,652 0,683 0,715 0,749 0,786 0,827 0,875 0,935 1,07 0,70 0,427 0,453 0,480 0,508 0,536 0,564 0,594 0,625 0,657 0,691 0,728 0,769 0,817 0,877 1,02 0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,706 0,766 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,354 0,395 0,443 0,503 0,64 0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88	0,56	0,887	0,913	0,940	0,968	0,996	1,024	1,054	1,085	1,117	1,151	1,188	1,229	1,277	1,337	1,480
0,62	0,58	0,812	0,838	0,865	0,893	0,921	0,949	0,979	1,010	1,042	1,076	1,113	1,154	1,202	1,262	1,405
0,64 0,608 0,634 0,661 0,689 0,717 0,745 0,775 0,806 0,838 0,872 0,909 0,950 0,998 1,068 1,20 °0,66 0,545 0,571 0,598 0,626 0,654 0,682 0,712 0,743 0,775 0,809 0,846 0,887 0,935 0,995 1,13 0,68 0,485 0,511 0,538 0,566 0,594 0,622 0,652 0,683 0,715 0,749 0,786 0,827 0,875 0,935 1,07 0,70 0,427 0,453 0,480 0,508 0,536 0,564 0,594 0,625 0,657 0,691 0,728 0,769 0,817 0,877 1,02 0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,337<	0,6	0,740	0,766	0,793	0,821	0,840	0,877	0,907	0,938	0,970	1,004	1,041	1,082	1,130	1,190	1,333
°0,66 0,545 0,571 0,598 0,626 0,654 0,682 0,712 0,743 0,775 0,809 0,846 0,887 0,935 0,995 1,13 0,68 0,485 0,511 0,538 0,566 0,594 0,622 0,652 0,683 0,715 0,749 0,786 0,827 0,875 0,935 1,07 0,70 0,427 0,453 0,480 0,508 0,536 0,564 0,594 0,625 0,657 0,691 0,728 0,769 0,817 0,877 1,02 0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,706 0,766 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,318<	0,62	0,673	0,699	0,726	0,754	0,782	0,810	0,840	0,871	0,903	0,937	0,974	1,015	1,063	1,123	1,266
0,68 0,485 0,511 0,538 0,566 0,594 0,622 0,652 0,683 0,715 0,749 0,786 0,827 0,875 0,935 1,07 0,70 0,427 0,453 0,480 0,508 0,536 0,564 0,594 0,625 0,657 0,691 0,728 0,769 0,817 0,877 1,02 0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,706 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 </td <td>0,64</td> <td>0,608</td> <td>0,634</td> <td>0,661</td> <td>0,689</td> <td>0,717</td> <td>0,745</td> <td>0,775</td> <td>0,806</td> <td>0,838</td> <td>0,872</td> <td>0,909</td> <td>0,950</td> <td>0,998</td> <td>1,068</td> <td>1,201</td>	0,64	0,608	0,634	0,661	0,689	0,717	0,745	0,775	0,806	0,838	0,872	0,909	0,950	0,998	1,068	1,201
0,70 0,427 0,453 0,480 0,508 0,536 0,564 0,594 0,625 0,657 0,691 0,728 0,769 0,817 0,877 1,02 0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,766 0,766 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 </td <td>°0,66</td> <td>0,545</td> <td>0,571</td> <td>0,598</td> <td>0,626</td> <td>0,654</td> <td>0,682</td> <td>0,712</td> <td>0,743</td> <td>0,775</td> <td>0,809</td> <td>0,846</td> <td>0,887</td> <td>0,935</td> <td>0,995</td> <td>1,138</td>	°0,66	0,545	0,571	0,598	0,626	0,654	0,682	0,712	0,743	0,775	0,809	0,846	0,887	0,935	0,995	1,138
0,72 0,371 0,397 0,424 0,452 0,480 0,508 0,538 0,569 0,601 0,635 0,672 0,713 0,761 0,821 0,96 0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,706 0,766 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 </td <td>0,68</td> <td>0,485</td> <td>0,511</td> <td>0,538</td> <td>0,566</td> <td>0,594</td> <td>0,622</td> <td>0,652</td> <td>0,683</td> <td>0,715</td> <td>0,749</td> <td>0,786</td> <td>0,827</td> <td>0,875</td> <td>0,935</td> <td>1,078</td>	0,68	0,485	0,511	0,538	0,566	0,594	0,622	0,652	0,683	0,715	0,749	0,786	0,827	0,875	0,935	1,078
0,74 0,316 0,342 0,369 0,397 0,425 0,453 0,483 0,514 0,546 0,580 0,617 0,658 0,706 0,766 0,90 0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,342 <td< td=""><td>0,70</td><td>0,427</td><td>0,453</td><td>0,480</td><td>0,508</td><td>0,536</td><td>0,564</td><td>0,594</td><td>0,625</td><td>0,657</td><td>0,691</td><td>0,728</td><td>0,769</td><td>0,817</td><td>0,877</td><td>1,020</td></td<>	0,70	0,427	0,453	0,480	0,508	0,536	0,564	0,594	0,625	0,657	0,691	0,728	0,769	0,817	0,877	1,020
0,76 0,262 0,288 0,315 0,343 0,371 0,399 0,429 0,460 0,492 0,526 0,563 0,604 0,652 0,712 0,85 0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,342 0,395 0,443 0,503 0,64 0,88 0,000 0,026 0,053 0,081 </td <td>0,72</td> <td>0,371</td> <td>0,397</td> <td>0,424</td> <td>0,452</td> <td>0,480</td> <td>0,508</td> <td>0,538</td> <td>0,569</td> <td>0,601</td> <td>0,635</td> <td>0,672</td> <td>0,713</td> <td>0,761</td> <td>0,821</td> <td>0,964</td>	0,72	0,371	0,397	0,424	0,452	0,480	0,508	0,538	0,569	0,601	0,635	0,672	0,713	0,761	0,821	0,964
0,78 0,209 0,235 0,262 0,290 0,318 0,346 0,376 0,407 0,439 0,473 0,510 0,551 0,599 0,659 0,80 0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,354 0,395 0,443 0,503 0,64 0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 <td< td=""><td>0,74</td><td>0,316</td><td>0,342</td><td>0,369</td><td>0,397</td><td>0,425</td><td>0,453</td><td>0,483</td><td>0,514</td><td>0,546</td><td>0,580</td><td>0,617</td><td>0,658</td><td>0,706</td><td>0,766</td><td>0,909</td></td<>	0,74	0,316	0,342	0,369	0,397	0,425	0,453	0,483	0,514	0,546	0,580	0,617	0,658	0,706	0,766	0,909
0,80 0,157 0,186 0,210 0,238 0,266 0,294 0,324 0,355 0,387 0,421 0,458 0,499 0,547 0,609 0,75 0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,354 0,395 0,443 0,503 0,64 0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 0,397 0,54 0,90 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,0	0,76	0,262	0,288	0,315	0,343	0,371	0,399	0,429	0,460	0,492	0,526	0,563	0,604	0,652	0,712	0,855
0,82 0,105 0,131 0,158 0,186 0,214 0,242 0,272 0,303 0,335 0,369 0,406 0,447 0,495 0,555 0,69 0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,354 0,395 0,443 0,503 0,64 0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 0,397 0,54 0,90 0,900 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,001 0,003 0,063 0,0	0,78	0,209	0,235	0,262	0,290	0,318	0,346	0,376	0,407	0,439	0,473	0,510	0,551	0,599	0,659	0,802
0,84 0,053 0,079 0,106 0,134 0,162 0,190 0,220 0,251 0,283 0,317 0,354 0,395 0,443 0,503 0,64 0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 0,397 0,54 0,90 0,90 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,92 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,001 0,003 0,003 0,097 0,134 0,175 0,223 0,283 0,42	0,80	0,157	0,186	0,210	0,238	0,266	0,294	0,324	0,355	0,387	0,421	0,458	0,499	0,547	0,609	0,750
0,86 0,000 0,026 0,053 0,081 0,109 0,137 0,167 0,198 0,230 0,264 0,301 0,342 0,390 0,450 0,59 0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 0,397 0,54 0,90 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,031 0,063 0,097 0,134 0,175 0,223 0,283 0,42	0,82	0,105	0,131	0,158	0,186	0,214	0,242	0,272	0,303	0,335	0,369	0,406	0,447	0,495	0,555	0,698
0,88 0,000 0,029 0,056 0,084 0,114 0,145 0,177 0,211 0,248 0,289 0,337 0,397 0,54 0,90 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,031 0,063 0,097 0,134 0,175 0,223 0,283 0,42	0,84	0,053	0,079	0,106	0,134	0,162	0,190	0,220	0,251	0,283	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503	0,646
0,90 0,000 0,028 0,058 0,089 0,121 0,155 0,192 0,233 0,281 0,341 0,48 0,92 0,000 0,031 0,063 0,097 0,134 0,175 0,223 0,283 0,42	0,86	0,000	0,026	0,053	0,081	0,109	0,137	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,342	0,390	0,450	0,593
0,92 0,000 0,031 0,063 0,097 0,134 0,175 0,223 0,283 0,42	0,88			0,000	0,029	0,056	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397	0,540
	0,90					0,000	0,028	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,233	0,281	0,341	0,484
0.04	0,92							0,000	0,031	0,063	0,097	0,134	0,175	0,223	0,283	0,426
0,94 0,000 0,034 0,071 0,112 0,160 0,220 0,36	0,94									0,000	0,034	0,071	0,112	0,160	0,220	0,363

Factor de potencia inicial	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,0
0,96											0,000	0,041	0,089	0,149	0,292
0,98													0,000	0,060	0,203

Fuente: (IEEE, 1993)

Hay una amplia gama de condensadores para elegir, con variaciones existentes en la clasificación de kVAR disponible, el voltaje, las clasificaciones de aislamiento y en la disponibilidad de diseños de unidades monofásicas y trifásicas. También se debe considerar la economía al determinar la ubicación del capacitor. El costo por kVAR de los capacitores de media tensión es significativamente menor que el tipo de baja tensión, pero esta ventaja se compensa con el costo del dispositivo de conmutación de media tensión que se requiere para el banco de mayor tensión. El costo del dispositivo de conmutación, cuando sea necesario, debe incluirse en la comparación de costos.

La economía de comprar, instalar, proteger y controlar un solo banco grande, y la capacidad de obtener aislamiento de las fuentes de corrientes armónicas, pueden inclinar la decisión hacia la ubicación de un bus principal. La combinación de las necesidades del sistema, la conFiguración del sistema, los requisitos operativos, incluida la necesidad de controlar los voltajes armónicos y la corriente, más el costo de comprar e instalar el equipo, influirán en la selección de la ubicación del banco.

4.2.9. Componentes de un banco de condensadores automático

Un equipo de compensación automático debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia reactiva de la instalación; para conseguir y mantener el factor de potencia de la instalación entre el rango permitido por la norma. Un banco de compensación automático está constituido por 4 principales elementos:

- Controlador automático de factor de potencia.
- Elementos externos del relé corrector del factor de potencia.
- Capacitores.
- Contactores.

4.2.9.1. Controlador automático de factor de potencia

El controlador automático de factor de potencia tiene como objetivo medir el factor de potencia de la instalación y dar órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al factor de potencia objetivo, conectando los diferentes pasos de potencia reactiva (Freddy Llumiquinga, 2012). Evitando de este modo que se presente una sobrecompensación o una subcompensación.

4.2.9.2. Elementos externos del relé corrector de factor de potencia

Para el funcionamiento del equipo de compensación automático, es necesaria la toma de datos de la instalación, para esto, es necesario la utilización de elementos externos que le permitirán al relé actuar correctamente y de manera oportuna.

4.2.9.2.1. Lectura de corriente

• Transformador de corriente (TC)

Se deberá conectar un transformador de corriente que lea el consumo de la totalidad de corriente de la instalación. Para esto se tomará la corriente del secundario del transformador de la subestación el cual será el nodo en donde estará conectado el banco (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.2.9.2.2. Lectura de tensión

Se deberá conectar al dispositivo una medida directa de la tensión en el punto de conexión, tal como se muestra en el esquema de conexión de la Figura 23. Además, será necesario una alimentación auxiliar para el funcionamiento del controlador automático de factor de potencia. Capacitores trifásicos

Estos son los elementos fundamentales del banco de capacitores, los que permitirán generar energía reactiva para la corrección del factor de potencia.

Los capacitores cilíndricos trifásicos están compuestos de 3 capacitores monofásicos que son introducidos en un envolvente metálico, son de tipo seco usando polipropileno metalizado con dieléctrico. Cada capacitor tiene un elemento de desconexión por sobrepresión que protege contra la ruptura interna de la unidad, posee resistencia de descarga incluidas para reducir el voltaje después de que se ha desenergizado el capacitor. Los elementos del capacitor están encapsulados con resina de poliuretano en un envase de aluminio cilíndrico y herméticamente sellado de modo que puedan ser aislados de la acción corrosiva del aire y asegurando una buena disipación de calor interno hacia el medio ambiente. Estos capacitores están especialmente indicados para la compensación a través de la construcción de bancos de capacitores (Freddy Llumiquinga, 2012).

4.2.9.3. Principios de protección

Se deben observar varios principios fundamentales en la selección de fusibles para la aplicación de condensadores. Son los siguientes:

a) El eslabón fusible debe ser capaz de transportar continuamente el 135 % de la corriente nominal del capacitor.

- b) El cortocircuito fusible debe tener suficiente capacidad de interrupción para manejar con éxito la corriente de falla disponible, el voltaje de despeje y la energía disponible antes de que se rompa el tanque del capacitor.
- c) El eslabón fusible debe soportar, sin daño, la corriente transitoria normal durante la energización o desenergización del banco. De manera similar, debe soportar la corriente de descarga de la unidad de capacitor durante un corto de terminal a terminal.
- d) Para bancos en estrella sin conexión a tierra, la corriente de falla máxima generalmente se limita a tres veces la corriente de línea normal. El eslabón fusible debe despejarse dentro de los cinco minutos al 95% de la corriente de falla disponible.
- e) Para una protección efectiva del capacitor, la corriente de falla rms asimétrica máxima no debe exceder el valor actual en la intersección de la curva característica de tiempo-corriente (TCC) de ruptura del tanque y el tiempo mínimo que se muestra en la curva característica de tiempo-corriente de despeje máximo del fusible.
- f) La curva TCC de despeje máximo del eslabón fusible debe coordinarse con la curva TCC de ruptura del tanque del capacitor.(IEEE, 1993)

4.2.9.4. Dispositivos de protección

Un banco de capacitores es un equipo eléctrico muy vulnerable, tanto bajo fallas como en condiciones anormales de operación. En cualquier instalación de capacitores de potencia es necesario planear una protección adecuada. Estos dispositivos están destinamos a mantener la continuidad del servicio, evitando los posibles daños al personal y al equipo.

Para el banco de capacitores automático se necesitará de un interruptor principal y de protecciones individuales para cada paso, es decir, para cada capacitor, los objetivos de una protección para bancos de capacitores son:

- Evitar que el daño de un capacitor origine interrupciones en el suministro de energía.
- Proteger las unidades sanas del banco, equipos próximos y al personal en el caso de una falla.
- Evitar que las unidades restantes en el banco puedan funcionar con una tensión excesiva.

4.2.9.5. Protección individual por capacitor

En un banco de capacitores trifásico es necesario proteger cada fase correspondiente a cada paso eléctrico que compone el mismo. Esta protección tiene como propósito:

La protección sacará de servicio al capacitor en caso de falla, permitiendo que el resto del banco quede en funcionamiento.

Previene daño en los capacitores cercanos a la unidad fallada, como también a los equipos en cercanías al banco.

Facilita la detección visual de fallas, ya que da un indicativo del lugar al interior del banco en donde se presentó la falla debido al disparo de este.

Para la selección de la protección individual se tendrá en cuenta un factor de 50% garantizando la seguridad al capacitor en caso de ocurrencia de fallas.

La protección individual se recomienda realizarla a través de interruptores automáticos termomagnéticos de caja moldeada (Freddy Llumiquinga, 2012)

4.2.9.6. Conductores

Los cables de alimentación de los capacitores, deben dimensionarse teniendo en cuenta que su corriente nominal puede verse incrementada hasta un 50%. Entonces para dimensionar los conductores se utilizará la corriente nominal de cada capacitor y también la corriente total del banco de capacitores.

5. Metodología

5.1. Problema de investigación

En las redes eléctricas de baja tensión que suministran energía a la empresa dedicada a la comercialización de GLP seleccionada como caso de estudio, ubicada en la provincia de Loja, se evidencia que el bajo factor de potencia genera problemas técnicos de operación y funcionamiento de las diferentes cargas que conforman esta empresa, con la respectiva penalización económica por bajo factor de potencia, siendo necesario determinar las causas que generan el bajo factor de potencia con el respectivo beneficio económico que representa

5.2. Hipótesis de investigación

El bajo factor de potencia es generado por la instalación de cargas industriales sin el debido planteamiento técnico y económico en las redes de baja tensión.

5.3. Metodología de la investigación

A continuación, se presentan las actividades que se implementaron para el logro de los objetivos propuestos.

- > Actividad 1: Recopilación de información. Para dar cumplimiento a esta actividad, se realizó una revisión de literatura técnica.
- Actividad 2: Análisis técnico económico de análisis de equipos, redes trifásicas, sistemas de medición. Para la realizar el análisis y estudio del sistema eléctrico de la empresa dedicada a la comercialización de GLP, se estudió el factor económico y las principales características eléctricas que debían cumplir los equipos para el desarrollo de esta investigación.
- Actividad 3: Procesamiento y análisis de datos. Para dar cumplimiento esta actividad se corroboró la veracidad de los datos obtenidos, a través de la clasificación de datos de manera ordenada y sistemática.

5.4. Método de la investigación

En la actualidad para regular el consumo de energía eléctrica y controlar el factor de potencia en el sector industrial se ha venido implementando sistemas de monitoreo de parámetros eléctricos por medio analizadores de energía. Estos dispositivos brindan la facilidad de que las empresas tengan conocimiento del estado actual de las instalaciones eléctricas. Tener control de los parámetros eléctricos es importante para el funcionamiento correcto de todo el sistema eléctrico de una empresa, los motores eléctricos son las maquinas que con mayor frecuencia se encuentran

en el sector industrial, estos equipos son cargas de tipo inductivo y afectan directamente el factor de potencia. Las variables dependientes serán conocidas por los resultados del análisis y estudio de flujos de potencia. Las cuales se calculan de acuerdo al método de barrido.

5.4.1. Análisis de la situación actual

5.4.1.1. Descripción de la Empresa

Estas instalaciones se dividen en:

<u>Taller de mantenimiento de vehículos:</u> Aquí se realiza mantenimiento a los vehículos de la empresa, la carga eléctrica está conformada por equipos como taladros, soldadoras, cortadoras, luminarias y otros, en la Tabla 3 se describirá en detalle los equipos.

<u>Área de envasado:</u> En este sector se descargan de los vehículos todos los cilindros vacíos se almacenan y posteriormente se llenan nuevamente para ser embarcados en los vehículos. La carga eléctrica está comprendida principalmente por motores de inducción que mueven las bandas transportadoras.

Zona de descarga y almacenamiento: La descarga y almacenamiento de GLP se la realiza simultáneamente, cuando llegan los graneleros cargados, se procede al vaciado de la unidad al mismo tiempo que se inserta el contenido en los tanques estacionarios. Precisamente este proceso demanda de equipos de bombeo de gran potencia es aquí donde la carga eléctrica queda explicada. Posteriormente se enlistarán los equipos con sus respectivas potencias.

<u>Área de mantenimiento de cilindros:</u> En el área de mantenimiento de cilindros se determina cuáles son los cilindros que necesitan ser reparados, se retira la válvula macho y se los embarca en camiones para transportarlos a Cuenca, que es en donde se fabrican los cilindros para la empresa.

<u>Oficinas:</u> Aquí se encuentran agrupadas las oficinas, la principal carga está conformada por la iluminación y equipos electrónicos ya sean computadoras, impresoras, teléfonos, aires acondicionados, etc.

6. Resultados

6.1. Levantamiento de cargas y parámetros eléctricos

6.1.1. Levantamiento de carga.

En las distintas áreas de la empresa se tienen cargas como motores, lámparas fluorescentes, computadoras, reflectores, etc. El detalle de las cargas instaladas se indica en la **Tabla 3**; todas las cargas instaladas en el taller de mantenimiento corresponden al transformador TR1 y el resto de cargas corresponden al transformador TR2 y transformador TR3.

Tabla 3. *Levantamiento de cargas*

LUGAR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	POTENCIA UNITARIA (W)	POTENCIA TOTAL (W)
Garita	Computador	1	300	300
	Teléfono	1	30	30
	Impresora de cinta	1	110	110
	Modem Internet	1	30	30
	Foco	4	100	400
	Luces de Emergencia	2	20	40
Patio	Focos puente de revisión	3	100	300
	Luminarias	3	400	1200
	Bomba 1/2 HP dispersores de agua	1	372	372
Cuarto de Máquinas (Taller)	Soldadora 1	1	1440	1440
cuares as maquinas (runer)	Motor (Compresor)	ī	7500	7500
	Modem Internet	1	30	30
	Soldadora 2	1	105800	105800
	Taladro de banco	1	550	550
	Esmeril	1	462	462
	Lámpara fluorescente	1	60	60
Bodega	Molador 1	1	2100	2100
0	Molador 2	1	700	700
	Taladro 1	1	1050	1050
	Taladro 2	1	650	650
	Lámpara fluorescente	6	60	360
Taller de Mantenimiento	Nitrogen Tyre inflation system	1	7500	7500
	Tyre Changer TWC-802	1	2200	2200
	Aire Acondicionado	1	1200	1200
	Computador	1	300	300
Área de Descarga	Luminarias	2	400	800
	Foco	1	125	125
	Máquina de descarga	1	430	430
	Cámara de seguridad	2	100	200
	Reflectores Led	2	150	300
Área de Llenado	Luminarias High bay EVO	4	190	760
	Focos laterales	3	100	300
Sala de bombas y compresores de GLP	Motobomba 1 (90HP)	1	14900	14900

TIG L D		G 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	POTENCIA		
UGAR	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNITARIA	TOTAL	
			(W)	(W)	
	Motobomba 2	1	11170	11170	
	Motobomba 3	1	14900	14900	
	Motobomba 10HP	1	7450	7450	
	Motobomba 12HP	1	8940	8940	
	Foco	1	100	100	
	Reflector tipo jeta	1	250	250	
	Motor máquina de llenado	1	1100	1100	
	Motor 1 banda transportadora (50HP)	1	37250	37250	
	Motor 2 banda transportadora (50HP)	1	37250	37250	
Garita 2	Focos ahorradores	3	24	72	
Oficinas (sección 1)	Aire Acondicionado LG	1	1200	1200	
	Aire Acondicionado Samsung	2	1200	2400	
	Focos	1	100	100	
	Impresora de cinta	1	110	110	
	Computador	2	300	600	
	Impresora	1	120	120	
	Minibar	1	100	100	
Baños	Secador de Manos	1	1800	1800	
	Lámpara fluorescente	3	60	180	
Sala de Reuniones	Ventilador de pared	3	125	375	
	Lámpara fluorescente	2	60	120	
Oficina Bodega	Computador	1	300	300	
9	Impresora de cinta	1	110	110	
	Focos	2	100	200	
Sala de bombas contra incendios	Reflector led	1	150	150	
	Focos	6	100	600	
	Motor 10HP	1	7450	7450	
	Motor 15HP	1	11175	11175	
	Motor 3HP	1	2235	2235	
	Esmeril	1	462	462	
ARGA TOTAL INSTALADA				300768	

6.1.2. Suministro de energía

La empresa cuenta con 3 transformadores que alimentan las cargas descritas en la **Tabla** 3; los tres equipos de transformación toman la energía eléctrica desde la red pública de la Empresa Eléctrica Regional Del Sur a nivel de 13,8 kV.

Dos de los transformadores alimentan a las áreas de envasado, descarga y almacenamiento, oficinas e iluminación, y el transformador restante corresponde al taller de mantenimiento de vehículos. Los datos técnicos generales de los transformadores se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. *Equipos de transformación*

Equipos de transformación

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	POTENCIA NOMINAL (KVA)	NÚMERO DE FASES	VOLTAJE EN PRIMARIO (V)	VOLTAJE EN SECUNDARIO (V)
Transformador 1 TR1	1	50	3	13800	110/220
Transformador 2 TR2	1	125	3	13800	110/220
Transformador 3 TR3	1	250	3	13800	110/220

Fuente: Autor

6.1.3. Análisis y medición de parámetros eléctricos

6.1.4. Facturación de potencia y energía

En la **Tabla 5** se muestran los datos de facturación de la carga conectada al transformador TR1.

Tabla 5.

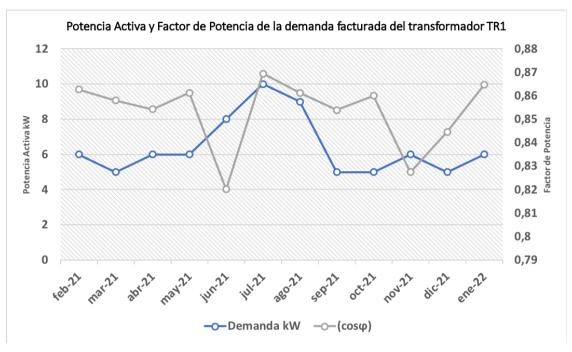
Facturación transformador TR1

PERIODO DE CONSUMO		DEMANDA	CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA	FACTOR DE POTENCIA	PENALIZACIÓN	SUBTOTAL SERVICIO ELÉCTRICO
Desde	Hasta	(kW)	(kWh)	(cos ϕ)	(\$)	(\$)
ene-21	feb-21	6	532	0,862614	5,37	86,06
feb-21	mar-21	5	461	0,857993	5	74,16
mar-21	abr-21	6	562	0,854259	6,43	89,97
abr-21	may-21	6	493	0,86118	5,26	82,25
may-21	jun-21	8	625	0,820156	12,07	111,18
jun-21	jul-21	10	885	0,869409	34,85	168,24
jul-21	ago-21	9	647	0,861231	18,83	124,82
ago-21	sep-21	5	494	0,853976	5,96	83,04
sep-21	oct-21	5	450	0,860025	5,08	77,98
oct-21	nov-21	6	529	0,827454	8,99	89,4
nov-21	dic-21	5	571	0,844574	7,54	91,94
dic-21	ene-22	6	494	0,864679	4,93	82,01
PROME	DIO	6,42	561,92	0,85	10,03	96,75

Fuente: Autor

En la Figura 2 se muestra una gráfica de los valores de facturación de potencia activa y factor de potencia descritos en la **Tabla 5**.

Figura 2.Demanda facturada del transformador TR1.



En la **Tabla** 6 se tabulan los datos de la demanda de potencia, la penalización por bajo factor de potencia, el factor de potencia, el consumo total del servicio eléctrico y el consumo total de energía.

El transformador de 125 kVA y el de 250 kVA cuentan con un medidor único, es decir, la medición del consumo energético se la realiza en nivel de media tensión por lo que las planillas contemplan el consumo energético de estos dos.

Tabla 6.

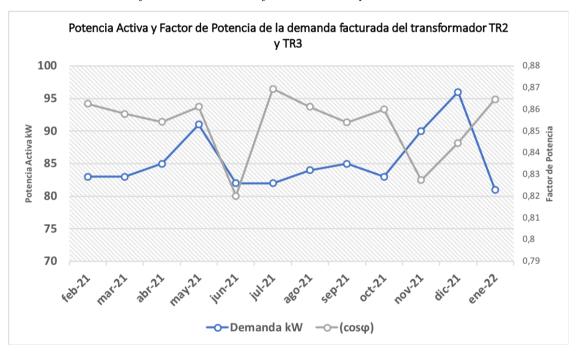
Facturación transformador TR2 y TR3

PERIODO DE CONSUMO		DEMANDA	CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA	FACTOR DE POTENCIA	PENALIZACIÓN	SUBTOTAL SERVICIO ELÉCTRICO
Desde	Hasta	(kW)	(kWh)	(cos \phi)	(\$)	(\$)
ene-21	feb-21	83	17891	0,864816	134,22	2237,64
feb-21	mar-21	83	15786	0,872839	102,84	2006,28
mar-21	abr-21	85	18843	0,869501	127,97	2331,41
abr-21	may-21	91	17366	0,867606	126,32	2218,18
may-21	jun-21	82	18659	0,87398	114,34	2285,93
jun-21	jul-21	82	16994	0,875011	103,52	2116,93
jul-21	ago-21	84	18292	0,872048	118,02	2264,32
ago-21	sep-21	85	18996	0,872501	120,74	2338,71

PERIODO DE CONSUMO		DEMANDA	CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA	FACTOR DE POTENCIA	PENALIZACIÓN	SUBTOTAL SERVICIO ELÉCTRICO
sep-21	oct-21	83	17134	0,872876	109,67	2141,17
oct-21	nov-21	90	17471	0,877338	101,97	2199,02
nov-21	dic-21	96	20076	0,875087	121,8	2495,06
dic-21	ene-22	81	17014	0,85679	148,33	2158,85
PROME	DIO	85,42	17876,83	0,87	119,15	2232,79

En la Figura 3 se muestra una gráfica de los valores de facturación de potencia activa y factor de potencia descritos en la **Tabla** 6.

Figura 3.Demanda facturada del transformador TR2 y TR3



Fuente: Autor

6.1.5. Diseño del Banco de Condensadores

Para el diseño del banco de condensadores se hizo uso de los datos registrados, y dado que las mediciones se realizan en cada uno de los tres transformadores, se propondrá un bando de condensadores para cada transformador.

El uso de los valores que se obtuvieron en las mediciones permite dimensionar la capacidad del banco de condensadores y a más de eso, determinar si estos bancos deben ser fijos o automáticos.

6.1.5.1. Cálculo de la potencia reactiva para la corrección del factor de potencia.

El periodo que se considera para el cálculo será de un día laborable, así cumplir con los requerimientos que presente la planta en cuanto a potencia reactiva y así corregir el factor de potencia. Estos valores se pueden apreciar a detalle en el Anexo 1 y Anexo 2.

Para un día laborable, en condiciones normales, el valor mínimo, promedio y máximo de potencia reactiva que se necesita para corregir el factor de potencia del TR1 se muestra en la **Tabla** 7 y los valores para corregir el factor de potencia del transformador TR2 y TR3 se muestra en la **Tabla 8**. Estos valores son muy cambiantes y dependen del día de trabajo y las actividades que se realicen dentro de la empresa.

Tabla 7.

Resumen potencia reactiva TR1

Potencia Reactiva	Qc (VAR) = P(tan \opi - tan \opi f)	Qc (kVAR)
Promedio	595,67	0,60
Máxima	3269,51	3,27
Mínima	-1704,74	-1,70

Fuente: Autor

Tabla 8.

Resumen potencia reactiva TR2 y TR3

Potencia Reactiva	$Qc(VAR) = P(tan \phi i - tan \phi f)$	Qc (kVAR)
Promedio	20910,94	20,91
Máxima	34068,65	34,07
Mínima	0,00	0,00

Fuente: Autor

Además se realiza el cálculo de la potencia reactiva necesaria, haciendo uso de las planillas de consumo energético, de las cuales se dispone valores de potencia demandada en kW y el factor de potencia general de la planta medido a nivel de media tensión.

En este método se multiplica un factor "C"(véase Tabla 2) por la potencia demandada o instalada para obtener la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.

Los resultados obtenidos para el TR2 y TR3 se muestran en la **Tabla 9** y los resultados por planillas del TR1 se muestran en la **Tabla 10**.

Tabla 9.

Cálculo potencia reactiva por planillas del transformador TR2 y TR3 con factor C

Periodo do	e Consumo	Demanda	Factor de Potencia deseado	Factor de Potencia	Coeficiente	Potencia Reactiva
Desde	Hasta	(kW)	(cos \phi)	(cos ϕ)	(C)	(kVAR)
ene-21	feb-21	83	0,92	0,86482	0,15448	12,82171
feb-21	mar-21	83	0,92	0,87284	0,13277	11,01965
mar-21	abr-21	85	0,92	0,86950	0,14230	12,09528
abr-21	may-21	91	0,92	0,86761	0,14722	13,39742
may-21	jun-21	82	0,92	0,87398	0,12946	10,61556
jun-21	jul-21	82	0,92	0,87501	0,12647	10,37038
jul-21	ago-21	84	0,92	0,87205	0,13506	11,34511
ago-21	sep-21	85	0,92	0,87250	0,13375	11,36850
sep-21	oct-21	83	0,92	0,87288	0,13266	11,01075
oct-21	nov-21	90	0,92	0,87734	0,11972	10,77478
nov-21	dic-21	96	0,92	0,87509	0,12625	12,11978
dic-21	ene-22	81	0,92	0,85679	0,17470	14,15102
PROM	1EDIO	85,42	0,92	0,87	0,14	11,78
MÁX	KIMO	96,00	0,92	0,88	0,17	14,15
MÍN	IMO	81,00	0,92	0,86	0,12	10,37

Tabla 10.

Cálculo potencia reactiva por planillas TR1 con el factor C

Periodo de	Consumo	Demanda	Factor de Potencia deseado	Factor de Potencia	Coeficiente	Potencia Reactiva
Desde	Hasta	(kW)	(cos φ)	(cos ϕ)	(C)	(kVAR)
ene-21	feb-21	6	0,92	0,862614	0,1602036	0,9612216
feb-21	mar-21	5	0,92	0,857993	0,1718168	0,859084
mar-21	abr-21	6	0,92	0,854259	0,1807784	1,0846704
abr-21	may-21	6	0,92	0,86118	0,163932	0,983592
may-21	jun-21	8	0,92	0,820156	0,2685944	2,1487552
jun-21	jul-21	10	0,92	0,869409	0,1425366	1,425366
jul-21	ago-21	9	0,92	0,861231	0,1637994	1,4741946
ago-21	sep-21	5	0,92	0,853976	0,1814576	0,907288
sep-21	oct-21	5	0,92	0,860025	0,166935	0,834675
oct-21	nov-21	6	0,92	0,827454	0,2496196	1,4977176
nov-21	dic-21	5	0,92	0,844574	0,2051076	1,025538
dic-21	ene-22	6	0,92	0,864679	0,1548346	0,9290076
PROM	EDIO	6,42	0,92	0,85	0,18	1,18
MÁX	IMO	10,00	0,92	0,87	0,27	2,15
MÍN	IMO	5,00	0,92	0,82	0,14	0,83

Fuente: Autor

6.1.6. Selección del tipo de banco de condensadores.

En esta sección se analiza la mejor opción para cada uno de los transformadores, dado que se puede corregir el factor de potencia mediante banco de condensadores fijos o automático.

Un criterio muy aceptable para determinar qué tipo de banco se aplicará es respecto a la variación entre el mínimo y máximo factor de potencia, será factible un banco automático sólo cuando dicha variación sea mayor al 15 %.

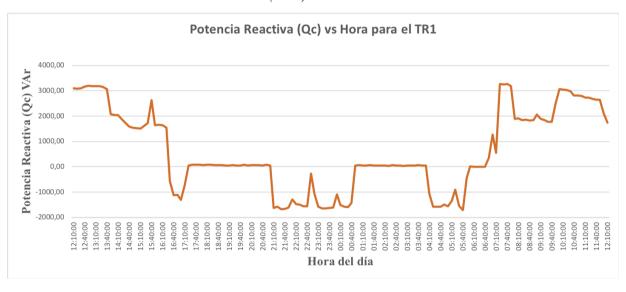
6.1.6.1. Tipo de banco de condensadores para transformador TR1 (50 kVA)

Para el transformador TR1 correspondiente al taller de mantenimiento de vehículos bajo las mediciones que se efectuaron, se puede observar que el consumo de potencia reactiva es variable a lo largo del día.

Existen periodos durante el día en los cuales se requiere un mínimo de potencia reactiva, pero estos requerimientos varían cuando entran en funcionamiento algunos equipos y es cuando se hace necesaria la compensación en potencia de reactivos. Se aprecia en la Figura 4.

Figura 4.

Potencia reactiva vs hora (TR1)



Fuente: Autor

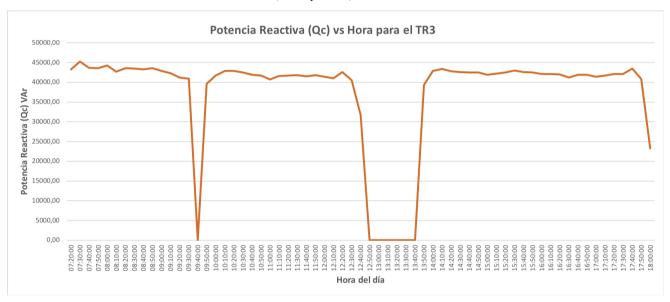
6.1.6.2. Tipo de banco de condensadores TR2 (125 kVA) y TR3 (250kVA)

En la Tabla 25 se expone que la potencia reactiva que se necesita compensar es totalmente variable. La hora en que se termina labores es dependiente de la demanda que tenga la planta por lo que es variable entre los días de la semana, en la Figura 8 se evidencia que en dos intervalos de tiempo se presenta un factor de potencia igual a 1, lo mismo ocurre todos los días a la misma hora;

Si se compensara con el valor máximo demandado de potencia reactiva existiría una sobre compensación durante estos dos intervalos horarios.

La demanda máxima se presenta de 07:20 am a 12:50 pm y de 13:40 pm a 18:00 pm que son los momentos en los que la planta se encuentra trabajando a plena carga. Si se compensara a la potencia reactiva mínima se presentaría una sub-compensación durante los periodos en los que la planta trabaja a toda su capacidad. La gráfica de una demanda diaria promedio de la potencia reactiva se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5.Potencia reactiva vs hora (TR2 y TR3)



Fuente: Autor

6.1.7. Dimensionamiento de los componentes para los bancos de Condensadores.

Los equipos seleccionados para compensar la potencia reactiva de acuerdo a la potencia reactiva necesaria para mejorar el factor de potencia en base al consumo mensual de la empresa se muestran en la **Tabla** 11.

Tabla 11.

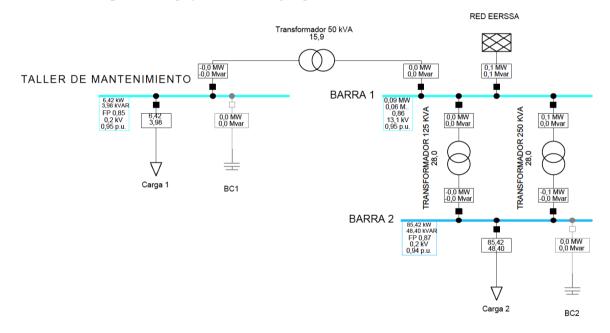
Equipos seleccionados para compensar la potencia reactiva

DESCRIPCIÓN	Canti dad	CAPACIDAD DE CONDENSADORES (KVAR)
Transformador 1 TR1	1	2,5
Transformador 2 TR2	7	2.5
Transformador 3 TR3	1	2,5

6.2. Simulaciones en software especializado

Para determinar cómo se mejora el factor de potencia utilizando los equipos descritos en la **Tabla 12**, se realiza una simulación en software especializado. En la Figura 6 se representa un esquema simplificado de las cargas con un consumo promedio para el posterior análisis.

Figura 6. *Esquema simplificado de cargas promedio.*



Fuente: Autor

Con esta configuración se realiza un flujo de carga para determinar el correcto comportamiento del sistema. Estos datos se pueden evidenciar en la **Tabla 12**.

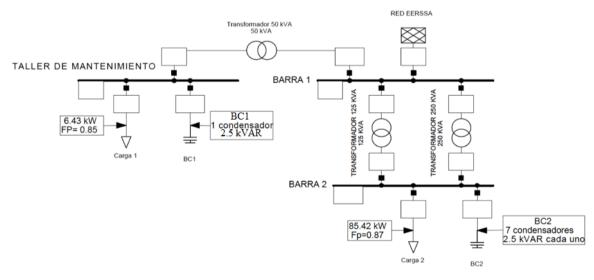
Tabla 12.

Resumen total de resultados del modelo simplificado con cargas promedio

RESUMEN TOTAL	KW	KVAR	KVA	FP(%)
Fuentes (Potencia de equilibrio)	91,73	51,01	104,96	87,40
Generadores	0,00	0,00	0,00	0,00
Producción total	91,73	51,01	104,96	87,40
Carga leída (no regulada)	91,55	49,10	103,88	88,13
Carga utilizada (regulada)	91,56	49,13	103,90	88,12
Condensadores shunt (regulados)	0,00	0,00	0,00	0,00
Reactancias shunt(reguladas)	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores	0,00	0,00	0,00	0,00
Cargas totales	91,56	49,13	103,90	88,12
Capacitancia del cable	0,00	0,00	0,00	0,00
Capacitancia de la línea	0,00	0,00	0,00	0,00
Capacitancia shunt total	0,00	0,00	0,00	0,00

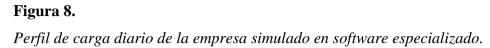
En la Figura 7 se representa un esquema simplificado de las cargas con un consumo promedio y la instalación de los capacitores dimensionados.

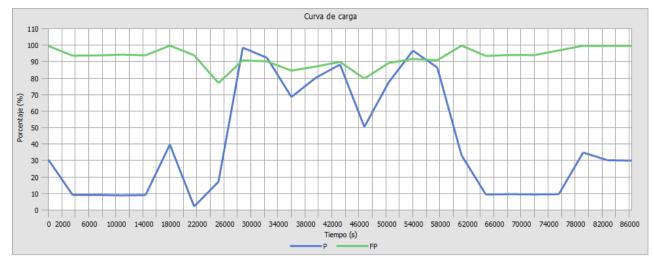
Figura 7. *Esquema simplificado de cargas promedio con condensadores.*



Fuente: Autor

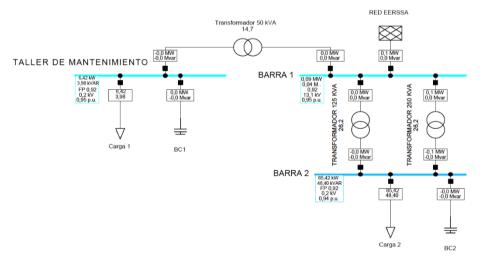
El perfil de carga diario de la empresa se muestra en la Figura 8, el cual es ingresado en el software para determinar su comportamiento a lo largo del tiempo.





En la Figura 9, se puede apreciar el flujo de cargas del modelo simplicado con cargas promedio y la verificación del estado de la red luego de la instalación de los bancos de capacitores.

Figura 9.Flujo de carga simplificado de cargas promedio con condensadores.



Fuente: Autor

El reporte sumario de esta configuración se puede apreciar en la Tabla 13

Tabla 13.

Resultados del modelo simplificado con cargas promedio y condensadores.

RESUMEN	KW	KVAR	KVA	FP(%)
TOTAL				
Fuentes (Potencia de equilibrio)	91,73	33,86	97,78	93,81
Generadores	0,00	0,00	0,00	0,00
Producción total	91,73	33,86	97,78	93,81
Carga leída (no regulada)	91,55	49,10	103,88	88,13
Carga utilizada (regulada)	91,56	49,13	103,90	88,12
Condensadores shunt (regulados)	0,00	-15,4	-15,4	0,00
Reactancias shunt(reguladas)	0,00	0,00	0,00	0,00
Motores	0,00	0,00	0,00	0,00
Cargas totales	91,56	31,98	96,98	94,41
Capacitancia del cable	0,00	-0,01	0,01	0,00
Capacitancia de la línea	0,00	0,00	0,00	0,00
Capacitancia shunt total	0,00	-20	-20	0,00

En la **Tabla** *14* se muestra el suministro de cada uno de los capacitores instalados en el modelo simplicado con cargas promedio. Los valores requeridos son similares a los calculados en la sección 6.1.5.1. El modelo es cambiante acorde a las pérdidas asumidas, ya que no se cuenta con datos exactos.

Tabla 14. Suministro del banco de capacitores en modelo simplificado con carga promedio.

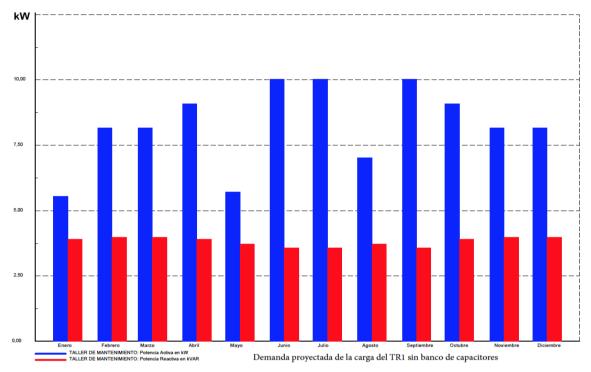
ID EQUIPO	POTENCIA TOTAL DE	TOTAL KVAR	BC1 TOTAL BC2 TOTAL
	PASO	CONDENSADOR	(KVAR) (KVAR)
	(KVAR)	(KVAR)	
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	1.10
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	-1,19 -11,88
Condensador 2.5 kVAR	-1,98	2,500	
Condensador 2.5 kVAR	0	2,500	
Condensador 2.5 kVAR	-1,19	2,500	

Fuente: Autor

En el software especializado se puede hacer uso de las herramientas de perfiles de carga para simular el consumo energético que más se acerque a nuestro caso de estudio. La Figura 10 muestra el perfil de cargas proyectadas en software para la carga del TR1 sin condensadores.

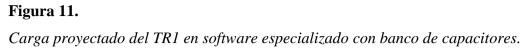
Figura 10.

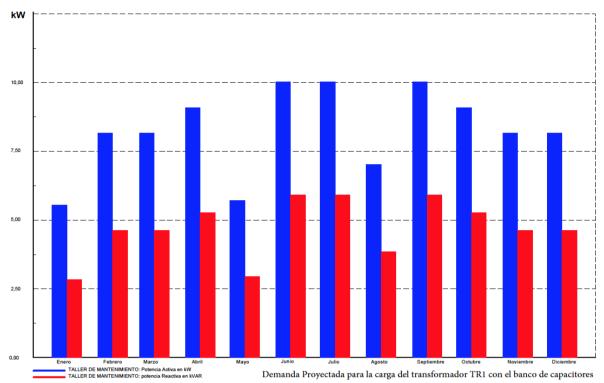
Carga proyectado del TR1 en software especializado sin banco de capacitores.



Fuente: Autor

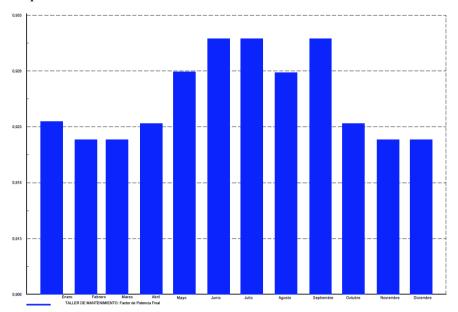
Luego de la instalación del banco de capacitores de tipo fijo, tal como se puede visualizar en la Figura 11, la potencia reactiva se reduce lo que conlleva a la mejora del factor de potencia deseada.





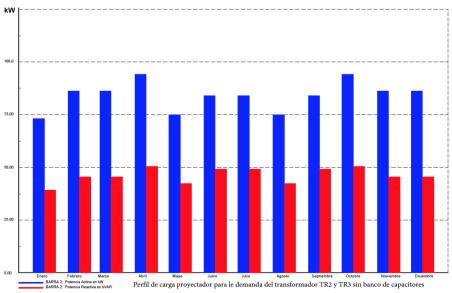
El perfil de factor de potencia proyectado de la carga del transformador TR1 con el banco de capacitores de tipo fijo se puede visualizar en la Figura 12. Este perfil de potencia es simulado con el banco de capacitores fijo, por lo que el factor varía conforme la carga mensual proyectada.

Figura 12.Potencia proyectado del TR1 en software especializado con banco de capacitores.



La Figura 13 muestra el perfil de cargas proyectadas en software para la carga del TR2 y TR3 sin condensadores.

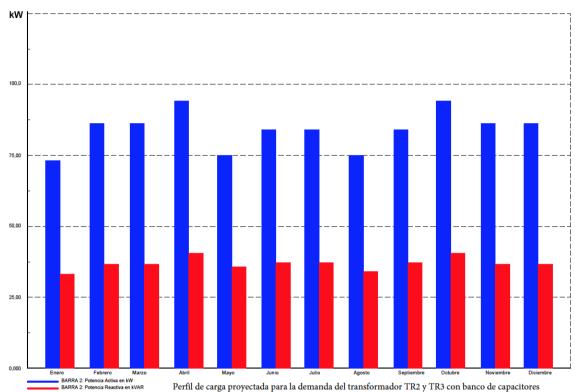
Figura 13.Carga proyectado TR2-TR3 en software especializado sin banco de capacitores.



Fuente: Autor

Luego de la instalación del banco de capacitores de tipo fijo, como se puede visualizar en la Figura 14, la potencia reactiva se reduce.

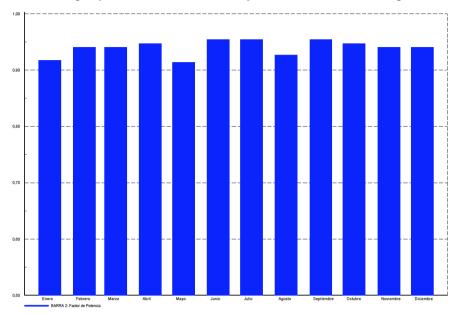
Figura 14.Carga proyectado TR2-TR3 en software especializado con banco de capacitores.



Fuente: Autor

El perfil de factor de potencia proyectado de la carga del transformador TR1 con el banco de capacitores de tipo fijo se puede visualizar en la Figura 15. Este perfil de potencia es simulado con el banco de capacitores fijo, por lo que el factor varía conforme la carga mensual proyectada.

Figura 15.Potencia proyectado TR2-TR3 en software con banco de capacitores.



En caso de utilizar bancos de capacitores de tipo automático que se ajusten a las necesidades de reactivos de la empresa, el perfil de factor de potencia proyectado tendría una tendencia lineal a lo largo de cada uno de los meses o en el tiempo de estudio asumido.

7. Discusión

El levantamiento de cargas, los datos de planillas eléctricas obtenidos y las mediciones de cargas permiten establecer las condiciones necesarias para conocer el estado actual del sistema y el análisis de posibles soluciones.

En el modelo realizado para la simulación, se ha considerado un esquema simplificado con la carga representativa de cada uno de los transformadores que conforman el sistema y así verificar su condición y variación a lo largo del estudio. Cuando no se tiene un detalle minucioso a detalle de conexiones, es complejo modelar un sistema que se asemeje en su totalidad a la realidad, por lo que se trató de esquematizar de una forma que las pérdidas totales del sistema sean asumidas con valores aceptables.

Los bancos de condensadores proporcionan la energía reactiva requerida en los sistemas de distribución, de acuerdo a las necesidades de la carga asociada y con lo cual se pueda mejorar el factor de potencia a niveles requeridos por la empresa. Lo adecuado es instalar la compensación junto a la carga y así reducir la cantidad de potencia reactiva entre la fuente y el usuario final.

Para obtener un mayor beneficio de la compensación reactiva en las redes eléctricas de distribución, se deben mejorar el balanceo y distribución de las cargas entre fases, para equilibrar la demanda, y poder obtener una compensación reactiva más uniforme, con mejores beneficios. Existe software especializado que tras una correcta modelación, permiten realizar el balanceo de carga y definir la correcta ubicación de cada uno de los condensadores de acuerdo a las características de consumo del usuario final y con ello reducir las pérdidas técnicas de energía.

8. Conclusiones

El banco de condensadores del transformador TR1 requerido para mantener el factor de potencia de la carga en 0,92 es de 2,5 kVAR, mientras que el banco de condensadores requerido por los transformadores TR2 y TR3 es de siete condensadores con una capacidad de 2,5 kVAR cada uno. Los resultados demuestran que se puede reducir la potencia reactiva y mejorar el factor de potencia mediante el uso de banco de capacitores, dimensionado con la secuencia de cálculos que se presenta. Se puede optar por bancos de tipo fijo o automático de acuerdo a los requerimientos de la empresa

9. Recomendaciones

Para obtener mejores resultados de ahorro de energía, con el proyecto de compensación reactiva en Baja Tensión para un sistema de distribución, es necesario efectuar un estudio de la red a intervenir, en base a las características del sistema eléctrico (concentración de cargas, consumo y potencias de energía, factor de utilización, porcentaje de instalaciones con redes aéreas o subterráneas, etc.), para determinar y dimensionar la correcta capacidad de los condensadores a instalar, así como la cantidad de equipos a utilizar, evitando realizar sobrecompensaciones. Con este estudio se encontraría las mejores condiciones de operación, para disminuir las pérdidas del sistema, teniendo en cuenta que la compensación del proyecto es fija, se debe considerar la variación de demanda que no es constante durante todo el tiempo, existiendo periodos de máximo y mínimo consumo; es importante establecer un criterio de métodos y modelos matemáticos para encontrar el punto óptimo que permita garantizar una adecuada compensación de energía reactiva, garantizando un ahorro de pérdidas, para que no exista una sobrecompensación.

Dado los avances tecnológicos y al incremento del uso de tecnología, es necesario hacer un estudio de calidad de la energía en el sistema a compensar, para evitar problemas de sobrecompensación o subcompensación. Se debe efectuar una análisis técnico-económico para determinar los beneficios de optar por bancos fijos o automáticos.

10. Bibliografía

- [1.] ARCONEL. (2018). Regulación de Calidad. https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/053-18-Proyect-Regulac-Sustitutiva-a-Reg-N-CONELEC-004-01-Calidad-del-servicio-de-dist-y-comercializaci%C2%A6n-de-EE.pdf
- [2.] Carlos Galarza, Roberto Martínez, & Sergio Ramón. (2016). *Análisis de factibilidad técnica y económica de corrección de factor de potencia con bancos de capacitores distribuidos en Valeo sistemas electrónicos s. De R.L. de C.V.* Centro de Investigación en Materiales Avanzado, S.C.
- [3.] Carmen Martínez. (2018). Análisis y dimensionamiento de la compensación del factor de potencia en instalaciones eléctricas industriales de baja tensión [Universidad del País Vasco]. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/29199/TFG ANALISIS Y DIMENSIONAMIENTO DE L FACTOR DE POTENCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4.] Cristhian Quezada & Jaime Torres. (2018). *Ubicación óptima de compensadores para alimentadores mediante el uso de métodos heurísticos y contrastado con CYMDIST* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15463/1/UPS-CT007599.pdf
- [5.] Cristhian Quezada & Jaime Torres. (2019). Diseño de esquemas de control integrado de tensión y potencia reactiva del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C. A. [Universidad de Cuenca]. TE;360. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5428
- [6.] Daniel Herrera. (2019). Análisis del proyecto de compensación de energía reactiva en baja tensión, implementado por Electronoroeste SA [Universidad de Piurta]. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4243
- [7.] Diego Chicaiza & Esteban Arcos. (2015). *Diseño y construcción de un tablero de control automático para la corrección del factor de potencia, empleando un Módulo DCRA* [Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10583/1/CD-6261.pdf
- [8.] Diego Restrepo. (2020). Dimensionamiento de bancos de capacitores automáticos para las subestaciones eléctricas 14,15 y 16 de la empresa Compañía de Empaques S.A. [Universidad de Antioquia].

 https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18456/14/RestrepoDiego 2021 Dimensi onamientoBancoCapacitores.pdf
- [9.] Edgar Aguado & Rubén Bravo. (1995). *Efectos causados por los armónicos en bancos de condensadores* [Universidad Autónoma de Occidente]. https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/2756/T0001032.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10.] EERSSA. (2012). Normas técnicas para el diseño de redes eléctricas urbanas y rurales. http://www.eerssa.gob.ec/eerssa/lotaip/2017/noviembre/archivos/a3/Normas tecnicas para el diseno de redes electricas urbanas y rurales.pdf
- [11.] Freddy Llumiquinga. (2012). *Diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor de potencia de la empresa Banchisfood S.A* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1888/12/UPS%20-%20KT00020.pdf
- [12.] IEEE. (1993). *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. https://ieeexplore.ieee.org/document/398556
- [13.] Juan Higuera. (2019). Elaboración de una aplicación para la selección de componentes eléctricos usados para la conformación de un banco de condensadores automático para la corrección del factor de potencia para la empresa Disproel S.A. [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/16335

11. Anexos

Anexo 1. Potencia reactiva necesaria para compensación de factor de potencia del TR1

En la Tabla 1A se muestra el cálculo de la potencia reactiva con los valores medidos durante un día laborable promedio de la carga abastecido por el transformador TR1.

Tabla 1A.

Potencia reactiva necesaria para compensación de factor de potencia del TR1

Hora	Potencia Activa (W)	cos φ Total	φ inicial (gra)	φ inicial (rad)	φ final (rad)	Qc (VAR) = P(tan φi - tan φf)
12:10:00	9931,82	0,842	32,65	0,57	0,32	3098,98
12:20:00	9960,86	0,843	32,54	0,57	0,32	3081,99
12:30:00	9750,31	0,84	32,86	0,57	0,32	3093,31
12:40:00	7673,93	0,803	36,58	0,64	0,32	3173,22
12:50:00	7499,69	0,798	37,06	0,65	0,32	3198,81
13:00:00	7477,90	0,798	37,06	0,65	0,32	3189,52
13:10:00	7441,60	0,798	37,06	0,65	0,32	3174,04
13:20:00	7492,43	0,799	36,97	0,65	0,32	3176,19
13:30:00	7470,64	0,8	36,87	0,64	0,32	3147,50
13:40:00	7942,55	0,814	35,51	0,62	0,32	3057,16
13:50:00	11514,52	0,891	27,00	0,47	0,32	2082,51
14:00:00	11478,22	0,892	26,87	0,47	0,32	2044,06
14:10:00	11274,94	0,891	27,00	0,47	0,32	2039,18
14:20:00	12944,76	0,904	25,31	0,44	0,32	1867,28
14:30:00	13300,50	0,909	24,63	0,43	0,32	1726,90
14:40:00	13794,19	0,914	23,94	0,42	0,32	1589,15
14:50:00	14033,77	0,916	23,65	0,41	0,32	1533,66
15:00:00	14324,18	0,917	23,51	0,41	0,32	1522,77
15:10:00	14091,86	0,917	23,51	0,41	0,32	1498,07
15:20:00	13917,61	0,914	23,94	0,42	0,32	1603,37
15:30:00	13641,73	0,91	24,49	0,43	0,32	1731,54
15:40:00	10897,41	0,869	29,66	0,52	0,32	2623,22
15:50:00	14229,80	0,914	23,94	0,42	0,32	1639,34
16:00:00	12814,08	0,909	24,63	0,43	0,32	1663,75
16:10:00	12668,88	0,909	24,63	0,43	0,32	1644,90
16:20:00	12356,69	0,911	24,36	0,43	0,32	1532,38
16:30:00	7688,45	0,969	14,30	0,25	0,32	-566,79
16:40:00	4515,78	0,997	4,44	0,08	0,32	-1133,69
16:50:00	4152,78	0,998	3,62	0,06	0,32	-1101,91
17:00:00	4922,35	0,998	3,62	0,06	0,32	-1306,11
17:10:00	2867,74	0,997	4,44	0,08	0,32	-719,95
17:20:00	348,49	0,913	24,08	0,42	0,32	41,17
17:30:00	1074,50	0,928	21,87	0,38	0,32	78,23
17:40:00	1422,98	0,933	21,09	0,37	0,32	81,16
17:50:00	1422,98	0,933	21,09	0,37	0,32	81,16
18:00:00	1401,20	0,935	20,77	0,36	0,32	70,93
18:10:00	1379,42	0,934	20,93	0,37	0,32	74,26
18:20:00	1379,42	0,934	20,93	0,37	0,32	74,26
18:30:00	1444,76	0,938	20,28	0,35	0,32	59,04
18:40:00	1510,10	0,939	20,12	0,35	0,32	56,74
18:50:00	1502,84	0,937	20,45	0,36	0,32	66,32

Hora	Potencia Activa (W)	cos φ Total	φ inicial (gra)	φ inicial	φ final (rad)	Qc (VAR) = P(tan φi - tan φf)
				(rad)		
19:00:00	1437,50	0,941	19,78	0,35	0,32	44,48
19:10:00	1444,76	0,94	19,95	0,35	0,32	49,51
19:20:00	1495,58	0,937	20,45	0,36	0,32	66,00
19:30:00	1430,24	0,941	19,78	0,35	0,32	44,25
19:40:00	1437,50	0,939	20,12	0,35	0,32	54,01
19:50:00	1481,06	0,935	20,77	0,36	0,32	74,97
20:00:00	1408,46	0,94	19,95	0,35	0,32	48,26
20:10:00	1481,06	0,938	20,28	0,35	0,32	60,52
20:20:00	1444,76	0,936	20,61	0,36	0,32	68,46
20:30:00	1495,58	0,937	20,45	0,36	0,32	66,00
20:40:00	1430,24	0,94	19,95	0,35	0,32	49,01
20:50:00	1510,10	0,933	21,09	0,37	0,32	86,13
21:00:00	1430,24	0,939	20,12	0,35	0,32	53,74
21:10:00	6105,74	0,998	3,62	0,06	0,32	-1620,12
21:20:00	6279,99	0,997	4,44	0,08	0,32	-1576,59
21:30:00	6338,07	0,998	3,62	0,06	0,32	-1681,76
21:40:00	6258,21	0,998	3,62	0,06	0,32	-1660,57
21:50:00	6403,41	0,997	4,44	0,08	0,32	-1607,57
22:00:00	5176,45	0,997	4,44	0,08	0,32	-1299,55
22:10:00	5597,54	0,998	3,62	0,06	0,32	-1485,27
22:20:00	5946,02	0,997	4,44	0,08	0,32	-1492,75
22:30:00	5909,72	0,998	3,62	0,06	0,32	-1568,11
	5895,20	0,998	3,62	0,06	0,32	-1564,25
22:40:00		0,998				
22:50:00	2279,67		11,76	0,21	0,32	-274,59 1072 21
23:00:00	4486,74	0,996	5,13	0,09	0,32	-1072,21 1572.04
23:10:00	6265,47	0,997	4,44	0,08	0,32	-1572,94
23:20:00	6221,91	0,998	3,62	0,06	0,32	-1650,94
23:30:00	6185,61	0,998	3,62	0,06	0,32	-1641,31
23:40:00	6142,04	0,998	3,62	0,06	0,32	-1629,75
23:50:00	6091,23	0,998	3,62	0,06	0,32	-1616,27
00:00:00	4537,56	0,996	5,13	0,09	0,32	-1084,35
00:10:00	5713,70	0,998	3,62	0,06	0,32	-1516,09
00:20:00	5938,76	0,998	3,62	0,06	0,32	-1575,81
00:30:00	5982,32	0,998	3,62	0,06	0,32	-1587,37
00:40:00	5357,96	0,998	3,62	0,06	0,32	-1421,70
00:50:00	1364,90	0,941	19,78	0,35	0,32	42,23
01:00:00	1364,90	0,937	20,45	0,36	0,32	60,24
01:10:00	1364,90	0,94	19,95	0,35	0,32	46,77
01:20:00	1357,64	0,939	20,12	0,35	0,32	51,01
01:30:00	1357,64	0,937	20,45	0,36	0,32	59,92
01:40:00	1372,16	0,94	19,95	0,35	0,32	47,02
01:50:00	1335,86	0,94	19,95	0,35	0,32	45,78
02:00:00	1364,90	0,938	20,28	0,35	0,32	55,77
02:10:00	1350,38	0,938	20,28	0,35	0,32	55,18
02:20:00	1335,86	0,942	19,61	0,34	0,32	36,86
02:30:00	1386,68	0,938	20,28	0,35	0,32	56,66
02:40:00	1350,38	0,938	20,28	0,35	0,32	55,18
02:50:00	1343,12	0,939	20,12	0,35	0,32	50,47
03:00:00	1343,12	0,939	19,44	0,33	0,32	32,01
03:10:00	1364,90	0,943	20,28	0,34	0,32	55,77
03:20:00	1372,16	0,94	19,95	0,35	0,32	47,02 50.74
03:30:00	1350,38	0,939	20,12	0,35	0,32	50,74
03:40:00	1328,60	0,937	20,45	0,36	0,32	58,63

Hora	Potencia Activa (W)	cos φ Total	φ inicial (gra)	φ inicial (rad)	φ final (rad)	Qc (VAR) = P(tan φi - tan φf
03:50:00	1343,12	0,941	19,78	0,35	0,32	41,56
04:00:00	1350,38	0,939	20,12	0,35	0,32	50,74
04:10:00	4443,18	0,996	5,13	0,09	0,32	-1061,80
04:20:00	5916,98	0,998	3,62	0,06	0,32	-1570,03
04:30:00	5938,76	0,998	3,62	0,06	0,32	-1575,81
04:40:00	5975,06	0,998	3,62	0,06	0,32	-1585,44
04:50:00	5967,80	0,997	4,44	0,08	0,32	-1498,22
05:00:00	5895,20	0,998	3,62	0,06	0,32	-1564,25
05:10:00	5067,55	0,998	3,62	0,06	0,32	-1344,64
05:20:00	3978,54	0,995	5,73	0,10	0,32	-908,33
05:30:00	5844,38	0,998	3,62	0,16	0,32	-1550,77
05:40:00	6004,10	0,999	2,56	0,04	0,32	-1704,74
05:50:00	2562,81	0,988	8,89	0,16	0,32	-441,71
06:00:00	326,70	0,939	20,12	0,35	0,32	12,28
06:10:00	0,00	1	0,00	0,00	0,32	0,00
06:20:00	0,00	1	0,00	0,00	0,32	0,00
	0,00					
06:30:00		1 1	0,00	0,00	0,32	0,00
06:40:00	0,00	0,733	0,00	0,00	0,32	0,00
06:50:00	595,33 2548.30	,	42,86	0,75	0,32	356,79 1267.27
07:00:00	2548,30 1200.56	0,771	39,56	0,69	0,32	1267,27
07:10:00	1299,56	0,799	36,97	0,65	0,32	550,91
07:20:00	8610,48	0,816	35,31	0,62	0,32	3269,51
07:30:00	9931,82	0,836	33,28	0,58	0,32	3254,57
07:40:00	9946,34	0,836	33,28	0,58	0,32	3259,32
07:50:00	10214,96	0,842	32,65	0,57	0,32	3187,33
08:00:00	14600,06	0,909	24,63	0,43	0,32	1895,64
08:10:00	14687,19	0,909	24,63	0,43	0,32	1906,95
08:20:00	14563,76	0,91	24,49	0,43	0,32	1848,57
08:30:00	14614,59	0,91	24,49	0,43	0,32	1855,02
08:40:00	14738,00	0,911	24,36	0,43	0,32	1827,69
08:50:00	14810,61	0,911	24,36	0,43	0,32	1836,70
09:00:00	13678,03	0,902	25,58	0,45	0,32	2051,14
09:10:00	13714,33	0,906	25,04	0,44	0,32	1899,57
09:20:00	13903,09	0,908	24,77	0,43	0,32	1845,45
09:30:00	13990,21	0,91	24,49	0,43	0,32	1775,77
09:40:00	14004,73	0,91	24,49	0,43	0,32	1777,61
09:50:00	11848,49	0,88	28,36	0,49	0,32	2500,73
10:00:00	10164,14	0,846	32,22	0,56	0,32	3065,05
10:10:00	10135,10	0,846	32,22	0,56	0,32	3056,30
10:20:00	10062,50	0,846	32,22	0,56	0,32	3034,40
10:30:00	10548,93	0,853	31,46	0,55	0,32	2987,13
10:40:00	11921,09	0,871	29,42	0,51	0,32	2805,75
10:50:00	11935,61	0,871	29,42	0,51	0,32	2809,17
11:00:00	11884,79	0,871	29,42	0,51	0,32	2797,21
11:10:00	11870,27	0,873	29,19	0,51	0,32	2730,01
11:20:00	11884,79	0,873	29,19	0,51	0,32	2733,35
11:30:00	12044,51	0,876	28,84	0,50	0,32	2672,67
11:40:00	12102,59	0,877	28,72	0,50	0,32	2652,83
11:50:00	12233,27	0,878	28,60	0,50	0,32	2648,35
12:00:00	13082,70	0,898	26,10	0,46	0,32	2110,09
12:10:00	14062,81	0,911	24,36	0,43	0,32	1743,96

Anexo 2. Potencia reactiva necesaria para compensación de factor de potencia TR2 y TR3

En la Tabla 2A se muestra el cálculo de la potencia reactiva con los valores medidos durante un día laborable promedio de la carga abastecido por el transformador TR2 y TR3.

Tabla 2A.

Potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia del transformador
TR2 y TR3

Hora	Potencia Activa (W)	cos φ Total	φ inicial (gra)	φ inicial (rad)	φ final (rad)	Qc (VAR) = P(tan \phi - tan \phi f)
07:20:00	68144,89	0,77	43,95	0,77	0,32	34068,65
07:30:00	98234,38	0,84	38,28	0,67	0,32	32446,61
07:40:00	99430,11	0,84	37,53	0,66	0,32	30764,70
07:50:00	99175,28	0,84	37,53	0,66	0,32	30685,85
08:00:00	98332,39	0,84	37,91	0,66	0,32	31452,94
08:10:00	99488,92	0,85	37,16	0,65	0,32	29740,66
08:20:00	97489,49	0,84	37,81	0,66	0,32	30928,74
08:30:00	97724,72	0,84	37,72	0,66	0,32	30748,05
08:40:00	97215,06	0,84	37,72	0,66	0,32	30587,69
08:50:00	97332,67	0,84	37,81	0,66	0,32	30878,99
09:00:00	97607,1	0,84	37,53	0,66	0,32	30200,64
09:10:00	98489,2	0,85	37,16	0,65	0,32	29441,81
09:20:00	99763,35	0,85	36,58	0,64	0,32	28249,91
09:30:00	96430,97	0,85	36,97	0,65	0,32	28320,50
09:40:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
09:50:00	65812,22	0,78	42,95	0,75	0,32	30822,96
10:00:00	98900,85	0,85	36,87	0,64	0,32	28786,10
10:10:00	97058,24	0,84	37,63	0,66	0,32	30284,65
10:20:00	97489,49	0,84	37,53	0,66	0,32	30164,25
10:30:00	97215,06	0,84	37,44	0,65	0,32	29824,96
10:40:00	98312,78	0,85	37,06	0,65	0,32	29131,20
10:50:00	98430,4	0,85	36,97	0,65	0,32	28907,70
11:00:00	99724,15	0,86	36,39	0,64	0,32	27713,18
11:10:00	98665,63	0,85	36,87	0,64	0,32	28717,64
11:20:00	99018,47	0,85	36,87	0,64	0,32	28820,34
11:30:00	95098,01	0,84	37,53	0,66	0,32	29424,30
11:40:00	97979,55	0,85	36,97	0,65	0,32	28775,29
11:50:00	98665,63	0,85	36,97	0,65	0,32	28976,79
12:00:00	98881,25	0,85	36,77	0,64	0,32	28520,50
12:10:00	99802,56	0,85	36,49	0,64	0,32	27998,10

Hora	Potencia Activa (W)	cos φ Total	φ inicial (gra)	φ inicial (rad)	φ final (rad)	Qc (VAR) = P(tan фi - tan фf)
12:20:00	98646,02	0,85	37,25	0,65	0,32	29747,27
12:30:00	99351,7	0,86	36,39	0,64	0,32	27609,67
12:40:00	79827,84	0,86	36,00	0,63	0,32	21340,33
12:50:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:00:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:10:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:20:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:30:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:40:00	0	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00
13:50:00	83532,67	0,88	38,65	0,67	0,32	17403,01
14:00:00	97587,5	0,89	37,53	0,66	0,32	17106,96
14:10:00	97509,09	0,89	37,72	0,66	0,32	17635,44
14:20:00	97411,08	0,89	37,53	0,66	0,32	17076,04
14:30:00	97489,49	0,89	37,44	0,65	0,32	16817,85
14:40:00	97136,65	0,89	37,44	0,65	0,32	16756,98
14:50:00	97156,25	0,89	37,44	0,65	0,32	16760,36
15:00:00	98234,38	0,90	37,06	0,65	0,32	15844,08
15:10:00	97156,25	0,90	37,34	0,65	0,32	16488,76
15:20:00	97234,66	0,89	37,44	0,65	0,32	16773,89
15:30:00	97136,65	0,89	37,63	0,66	0,32	17298,29
15:40:00	97469,89	0,89	37,44	0,65	0,32	16814,47
15:50:00	97332,67	0,89	37,44	0,65	0,32	16790,80
16:00:00	98077,56	0,90	37,16	0,65	0,32	16094,88
16:10:00	98038,35	0,90	37,16	0,65	0,32	16088,44
16:20:00	97959,94	0,90	37,16	0,65	0,32	16075,58
16:30:00	98430,4	0,90	36,77	0,64	0,32	15040,37
16:40:00	98195,17	0,90	37,06	0,65	0,32	15837,76
16:50:00	98253,98	0,90	37,06	0,65	0,32	15847,24
17:00:00	98822,44	0,90	36,77	0,64	0,32	15100,28
17:10:00	98410,8	0,90	36,97	0,65	0,32	15594,84
17:20:00	98724,43	0,90	37,06	0,65	0,32	15923,12
17:30:00	98783,24	0,90	37,06	0,65	0,32	15932,61
17:40:00	97724,72	0,89	37,72	0,66	0,32	17674,44
17:50:00	98685,23	0,90	36,58	0,64	0,32	14517,42
18:00:00	3450	0,92	34,71	0,61	0,32	5836,17

Anexo 3. Certificado de traducción de resumen.

Macará, 17 de Noviembre del 2022

Mg. SUSANA M. GONZÁLEZ SALINAS DOCENTE DE INGLÉS DE LA UNIDAD EDUCATIVA DEL MILENIO 5 DE JUNIO

CERTIFICA

Que, la traducción del documento adjunto solicitado por el Ing. César Augusto Tacury Tinoco con cédula de ciudadanía No. 1104074958, cuyo tema de investigación se titula COMPENSACIÓN REACTIVA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, ha sido realizada por Mg. Susana M. González Salinas.

Esta es una traducción textual del documento adjunto, y el traductor es competente para realizar traducciones.

Lo certifico en honor a la verdad, facultando al portador del presente documento, hacer el uso legal pertinente.

Atentamente

SUSANA MABEL GONZALEZ SALINAS

Mg. Susana M. González Salinas 1104578503