



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



**“ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMA DE COMPENSACIÓN
REACTIVA PARA LA NUEVA LÍNEA 4 DE PRODUCCIÓN DE
CAL EN PLANTA CALCESUR CARACOTO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ANIBAL JHONNY CUNO CHURA

Bach. YIMI LUZA VILCA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación está dedicado a mis padres de quienes recibí el apoyo para mi desarrollo personal y en mi educación para poder prepararme y desempeñarme en el campo ocupacional.

YIMI LUZA VILCA



DEDICATORIA

El presente proyecto de tesis está dedicado a mis padres, quienes forjaron mi camino ya que muchos de mis logros se los debo a ellos. También va dedicado a mi compañera de vida, por sus palabras y el apoyo incondicional en los momentos más difíciles y turbulentos presentados.

ANIBAL JHONNY CUNO CHURA



AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a las personas que hicieron posible este proyecto de investigación y a los docentes de mi carrera que aportaron en mi formación profesional. También agradecer a todos mis compañeros del trabajo que aportaron en mi formación profesional y ocupacional.

YIMI LUZA VILCA

Ante todo, agradecer a Dios por haberme permitido desarrollar mi formación profesional en la Universidad Nacional del Altiplano; asimismo, agradezco a los docentes que me alimentaron de conocimiento para poder desempeñarme como profesional en los distintos rubros de la Ingeniería Mecánica Eléctrica.

ANIBAL JHONNY CUNO CHURA



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 15

1.1.1. Problema general 15

1.1.2. Problemas específicos..... 16

1.2. HIPÓTESIS 16

1.2.1. Hipótesis general 16

1.2.2. Hipótesis específicas..... 16

1.3. JUSTIFICACIÓN..... 16

1.3.1. Justificación técnica..... 16

1.3.2. Justificación social..... 16

1.3.3. Justificación económica..... 17

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS 17

1.4.1. Objetivo general..... 17

1.4.2. Objetivos específicos 17

1.5. VARIABLE 17



1.5.1. Variable.....	17
1.5.2. Indicadores.....	17
1.5.3 Operacionalización de variables	18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES.....	19
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	19
2.1.2. Antecedentes nacionales	20
2.1.3. Antecedentes regionales	20
2.2 MARCO TEÓRICO	21
2.2.1 Energía reactiva	21
2.2.2 Factor de potencia.....	24
2.2.3 Compensación de energía reactiva	27
2.2.4 Tipos de corrección de potencia reactiva.....	34
2.2.5 Armónicos & factor de potencia.....	37
2.2.6 Resonancia.....	43
2.2.7 Banco de condensadores desintonizados	47
2.2.8 Filtro pasivo sintonizado simple.....	49
2.2.9 Filtro activos	49

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES.....	51
3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	51
3.2.1 Ámbito	51
3.2.2 Población y selección de la muestra	52



3.2.3 Nivel, tipo y diseño de estudio	52
3.3 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.	53
3.4 PROCEDIMIENTO	54
3.4.1 Recolección de datos	54
3.4.2 Equipos utilizados para medición	54
3.4.3 Procesamiento de datos.....	55
3.4.4 Diagrama de flujo del proceso	55
3.5 PROCESAMIENTO DE DATOS	56
3.5.1 Datos utilizados	56

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA CON LA NUEVA LÍNEA 4.	62
4.2 RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR EL NIVEL DE ARMÓNICOS Y RESONANCIA DEL SISTEMA	65
4.3 DISCUSIÓN	71
4.3.1 Discusión del objetivo específico 1	71
4.3.2 Discusión del objetivo específico 2	72
4.3.3 Contrastación de hipótesis	72
V. CONCLUSIONES.....	74
VI. RECOMENDACIONES	75
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

ÁREA: Electricidad.

LÍNEA: Compensación Reactiva.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 20 de julio de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Consumo de energía reactiva.....	22
Figura N° 2.2: $\text{Cos}\phi$ como rendimiento eléctrico.....	23
Figura N° 2.3: Instalación sin compensar.....	24
Figura N° 2.4: Instalación con compensación.....	25
Figura N° 2.5: Triángulo de potencias, corrección de fdp	26
Figura N° 2.6: Flujo de energía reactiva con banco de condensadores.....	29
Figura N° 2.7: Compensador síncrono en sobreexcitación	30
Figura N° 2.8: Compensador síncrono en subexcitación.....	30
Figura N° 2.9: Esquemas básicos de un TCR y un TSC	31
Figura N° 2.10: Esquema de condensador	32
Figura N° 2.11: Tipo de condensadores	33
Figura N° 2.12: Capacitancia de condensadores	33
Figura N° 2.13: Tensión vs potencia reactiva	34
Figura N° 2.14: Corrección distribuida	35
Figura N° 2.15: Corrección por grupos	36
Figura N° 2.16: Corrección centralizada	36
Figura N° 2.17: Representación de armónicos	38
Figura N° 2.18: Clasificación de armónicos según secuencia.....	39
Figura N° 2.19: Impedancia inductiva y capacitiva.	43
Figura N° 2.20: Frecuencia de resonancia.....	44
Figura N° 2.21: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en serie	45
Figura N° 2.22: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en paralelo.....	46
Figura N° 2.23: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en paralelo.....	46
Figura N° 2.24: Impedancia de un filtro sintonizado	47



Figura N° 3.1: Ubicación del proyecto.....	52
Figura N° 3.2: Diagrama de flujo del proyecto	55



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Operacionalización de variables	18
Tabla N° 2.1: $\cos\phi$ de los aparatos más usuales.	23
Tabla N° 2.2: Aumento de potencia activa con corrección de fdp	28
Tabla N° 2.3: Coeficiente multiplicador de la sección del conductor	28
Tabla N° 2.4: Armónicos según su secuencia	39
Tabla N° 2.5: Límites de distorsión de voltaje	41
Tabla N° 2.6: Límites de distorsión de demanda total (para sistemas de 120V a 69kV)	42
Tabla N° 3.1: Materiales y equipos	51
Tabla N° 3.2: Métodos, técnicas e instrumentos	53
Tabla N° 3.3: Parámetros eléctricos de la red equivalente – Alimentador Juliaca.....	56
Tabla N° 3.4: Datos de placa de transformadores de potencia de 02 devanados	56
Tabla N° 3.5: Datos de placa de transformadores de potencia de 03 devanados	57
Tabla N° 3.6: Datos de manuales de fuentes armónicas de planta	57
Tabla N° 3.7: Parámetros eléctricos de perfil de armónicos - Datos de planta	58
Tabla N° 3.8: Parámetros eléctricos de filtros de armónicos – Datos de planta.....	59
Tabla N° 3.9: Cuadro de cargas de planta – Datos de medición de Relés.....	59
Tabla N° 3.10: Perfil de tensión en la barra de 22.9 kV – Datos de medición de Relés	60
Tabla N° 3.11: Límites de perfil de armónicas para 22.9 kV – Datos de planta	60
Tabla N° 3.12: Límites de perfil de armónicas para 460V – Datos de planta.....	61
Tabla N° 4.1: Resultados de potencia reactiva y factor de potencia sin filtro LC.....	62
Tabla N° 4.2: Resultados de potencia reactiva y factor de potencia con filtro LC.....	64
Tabla N° 4.3: Armónicos de corriente sin filtro LC	65
Tabla N° 4.4: Armónicos de tensión sin filtro LC.....	66



Tabla N° 4.5: Armónicos de corriente con filtro LC	69
Tabla N° 4.6: Armónicos de tensión con filtro LC.....	69



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ACRÓNIMO :	SIGNIFICADO
Z	: Impedancia Eléctrica
L	: Inductancia
C	: Capacitancia
X_L	: Reactancia Inductiva
X_C	: Reactancia Capacitiva
THD_i	: Distorsión Armónica de Corriente
THD_v	: Distorsión Armónica de Tensión
THD	: Distorsión Armónica de Total
TDD	: Distorsión de Demanda Total
P	: Potencia Activa
Q	: Potencia Reactiva
S	: Potencia Aparente
fdp	: Factor de Potencia
Cos ϕ	: Factor de Potencia
MW	: Mega Watio
MVA	: Mega Volt Amperio
MVAR	: Mega Volt Amperio Reactivo
SE	: Subestación Eléctrica
MT	: Media Tensión
BT	: Baja Tensión



RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó en la empresa productora de cal, ubicada en el distrito de Caracoto región Puno. En el proceso de producción se identificó un bajo factor de potencia en la alimentación de energía eléctrica debido a la operación del ventilador que es accionado por un motor de 2.5 MW en media tensión trifásica en 22.9 kV, controlado por un variador de frecuencia que produce distorsiones armónicas que ocasionan resonancia con los capacitores. Para elevar el factor de potencia se diseña un sistema de compensación de energía reactiva de tipo centralizada, conformado por un banco de capacitores (filtro de rechazo desintonizado) conexión en delta, conectado en paralelo en la barra principal a la salida del sistema de alimentación, que permite corregir el factor de potencia del motor y del sistema eléctrico en general. El sistema diseñado permite proteger los capacitores de las distorsiones armónicas de quinto orden y evita el efecto de resonancia en el sistema de operación eléctrica. Todo el diseño se realiza aplicando una investigación de nivel predictivo y tipo experimental; los datos de potencia activa, potencia reactiva, $\cos\phi$, nivel de armónicos se obtienen de las mediciones registradas por el analizador de redes AEMC 3945 en las celdas de media tensión de la barra principal, como resultado del análisis de potencia reactiva, $\cos\phi$, nivel de armónicos y resonancia se plantea instalar un filtro de rechazo desintonizado en conexión delta de 1080 kVAR que permite aumentar el factor de potencia a un valor de 0,97 y además proteger los condensadores de distorsiones armónicas evitando efectos de resonancia.

Palabras clave: Compensación reactiva, distorsión armónica, factor de potencia, filtro de rechazo, resonancia.



ABSTRACT

The research work was carried out in the lime producing company, located in the district of Caracoto, Puno region. In the production process, a low power factor was identified in the electrical energy supply due to the operation of the fan, which is driven by a 2.5 MW three-phase medium voltage motor at 22.9 kV, controlled by a frequency variator that produces distortions. harmonics that cause resonance with capacitors. To raise the power factor, a centralized reactive power compensation system is designed, made up of a capacitor bank (detuned rejection filter) delta connection, connected in parallel on the main bus at the power system output, that allows correcting the power factor of the motor and the electrical system in general. The designed system allows to protect the capacitors from harmonic distortions of fifth order and avoids the effect of resonance in the electrical operation system. The entire design is carried out by applying a predictive level and experimental type of research; The data on active power, reactive power, $\cos\phi$, level of harmonics is obtained from the measurements recorded by the AEMC 3945 network analyzer in the medium voltage cells of the main bus, as a result of the analysis of reactive power, $\cos\phi$, level of harmonics. harmonics and resonance it is proposed to install a 1080 kVAR detuned rejection filter in delta connection that allows the power factor to be increased to a value of 0.97 and also protects the capacitors from harmonic distortions avoiding resonance effects.

Keywords: Reactive compensation, harmonic distortion, power factor, rejection filter, resonance.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Calcesur, ante el creciente mercado de la minería y la cal como insumo, implementa la nueva Línea 4 de producción de cal, donde se instaló variedad de equipos eléctricos y electrónicos, los cuales generan un bajo factor de potencia, armónicos y resonancia, para ello se analizó y diseñó un sistema de compensación reactiva de acuerdo al análisis de flujo de potencia, análisis de niveles de armónicos y resonancia eléctrica, con este análisis y diseño del sistema de compensación reactiva se obtienen beneficios como incrementar la capacidad del transformador, reducir el consumo de reactivos de la red y reducir las pérdidas en equipos y cables. Para el análisis y diseño del sistema de compensación se usaron datos de mediciones y registro de datos, los cuales fueron trasladados al Software ETAP 19 para su respectivo análisis considerando cinco casos o escenarios posibles simulados inicialmente sin un sistema de compensación, posteriormente se analizó los datos simulados y se diseñó el sistema de compensación de tipo centralizado en la barra de 22.9 kV, luego se volvió a simular las diferentes situaciones con el sistema de compensación diseñado previamente.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se ha identificado un bajo factor de potencia presente en la celda AD311 de la Línea 4, ubicado en la barra principal de 22.9 kV, por lo cual se pretende mejorar el bajo factor de potencia, las caídas de tensión y la presencia de armónicos en la barra principal de 22.9 kV.

1.1.1. Problema general

- ¿Se puede analizar y diseñar el sistema de compensación reactiva con la nueva Línea 4?



1.1.2. Problemas específicos

- ¿Se puede corregir el factor de potencia con la nueva Línea 4?
- ¿Se puede evaluar el nivel de armónicos y resonancia del sistema?

1.2. HIPÓTESIS

Se planteó las siguientes hipótesis del proyecto de investigación:

1.2.1. Hipótesis general

- Es posible analizar y diseñar el sistema de compensación reactiva con la nueva Línea 4.

1.2.2. Hipótesis específicas

- Es posible corregir el factor de potencia con la nueva Línea 4.
- Es posible evaluar el nivel de armónicos y resonancia del sistema.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Justificación técnica

Con la corrección del factor de potencia en la barra principal de 22.9 kV, se aumentará la capacidad de la potencia en el transformador y en los cables y se podrán ingresar más equipos eléctricos, así mismo con el control de armónicos se aumentará la vida útil de los equipos eléctricos, condensadores y se consumirá menos energía reactiva del sistema.

1.3.2. Justificación social

Se tiene más energía eléctrica para que pueda usar la población, pues se consume menos energía del sistema y en la ejecución del proyecto el beneficio fue la generación de puestos de trabajo tanto para profesionales como operarios, e indirectamente a personal de transporte, proveedores de materiales y herramientas, alimentación entre otros, todo esto para el montaje del equipamiento del sistema de compensación reactiva.



1.3.3. Justificación económica

Al ser compensación reactiva de tipo general, el cual se instaló en la barra principal en media tensión, se disminuyó el consumo de energía reactiva, en consecuente también se mejoró económicamente los costes por uso de energía eléctrica. También se incrementó la utilidad de las máquinas y cables, por consecuente se disminuyó los costeos de mantenimiento y paradas por fallas de equipos, teniendo más producción continua lo cual significa mayores ingresos para la planta.

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

- Analizar y diseñar el sistema de compensación reactiva con la nueva Línea 4.

1.4.2. Objetivos específicos

- Corregir el factor de potencia con la nueva Línea 4.
- Evaluar el nivel de armónicos y resonancia del sistema.

1.5. VARIABLE

1.5.1. Variable

Variable dependiente = Sistema de compensación reactiva.

Variable Independiente = Potencia reactiva total.

1.5.2. Indicadores

- $\text{Cos}\phi$ = Factor de potencia.
- Q_c = Potencia reactiva del sistema de compensación.
- THD_v = Armónicos de tensión.
- THD_i = Armónicos de corriente.
- P = factor de desintonía.

1.5.3 Operacionalización de variables

Tabla N° 1.1: Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	ITEM	INSTRUMENTOS VALOR FINAL
V1	La compensación de potencia reactiva constituye un procedimiento general para el control de las condiciones de operación de una red eléctrica. Sin embargo, dependiendo del subsistema eléctrico difiere en el propósito principal que se persigue.	El sistema de compensación busca mejorar el factor de potencia, según el análisis de los niveles de armónicos y resonancia para seleccionar los equipos adecuados.	Parámetros del sistema de compensación reactiva	Factor de potencia ($\cos\phi$)	$\cos\phi = \frac{P}{S}$	Registro de Mediciones de medidores
SISTEMA DE COMPENSACION REACTIVA				Armónicos de tensión (THDv)	$THDv = \frac{V_h}{V_1}$	Registro de medición de Analizador de redes
				Armónicos de corriente (THDi)	$THDi = \frac{I_h}{I_1}$	Registro de medición de Analizador de redes
				Resonancia (Hz)	Factor de desintonía: $\rho = \frac{f_1}{f_2}$	Fórmula
V2	Energía necesaria para generar campos magnéticos para el correcto funcionamiento de algunas máquinas eléctricas.	La potencia reactiva total es obtenida de la red, como también puede ser obtenida de bancos de capacitores	Parámetros de potencia reactiva	Potencia reactiva necesaria (kVAR)	$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$	Fórmula
				Potencia reactiva total (kVAR)	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	Fórmula

Elaborado por el equipo de trabajo



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes internacionales

(Durán Neira, 2021) en su estudio titulado: “Implementación de un sistema de compensación reactiva en una planta de generación eólica”, tuvo como objetivo la implementación de un sistema de compensación reactiva en una planta de producción de energía eólica. En los resultados, se demostró que se necesitan 6 circuitos en MT con cables para media tensión en 34.5 kV. y necesita una plataforma para el montaje de los equipos de compensación reactiva de unos 3100 m² de área con sus respectivas obras civiles, drenajes, cimentaciones, canales subterráneos y mallas de seguridad física. Llegando a la conclusión que, al poner en marcha el sistema de compensación de reactivos, se logran cumplir los requerimientos del código de electricidad, el cual indica un porcentaje de 33% de potencia reactiva, con relación a la potencia activa.

(Ríos García, 2021) en su estudio: ” Evaluación e operación de filtro pasivo armónico en red eléctrica desbalanceada contaminada con armónicos”, tuvo como objetivo evaluar la compensación del factor de potencia y evaluar el comportamiento de las distorsiones en el banco de capacitores, la metodología para el procesamiento de datos fue el Software PSCAD en base a la norma IEEE-519 simulando un sistema inicial sin compensación y posteriormente en un sistema compensado, los resultados que obtuvo es que a partir de los desbalances de tensión se elevan los niveles de distorsión armónica de tensión, a partir de 8% de desbalance y llegó a la conclusión que con la implementación de un filtro pasivo sintonizado, se reducen satisfactoriamente los niveles de distorsión armónica.



2.1.2. Antecedentes nacionales

(Rojas Palacios, 2021) en su estudio titulado: “Optimización del sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en la Unidad Minera Chungar e Islay ”, tuvo como objetivo corregir el factor de potencia para hacer una mejora en la calidad de la energía eléctrica en las unidades mineras Chungar e Islay. La metodología que usó es cuantitativa, donde su estudio es aplicado y de diseño pre experimental. Como resultado, se encontró un bajo factor de potencia (entre 0.75 a 0.87 inductivo). Llegando a la conclusión que propone la instalación de 3,000 kVAR en la subestación Animón en el lado de 23 kV.

(Oyanguren Ramírez, 2020) en su informe titulado: “Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva”, planteó como objetivo determinar la minimización de armónicos usando filtros en redes con compensación reactiva, la metodología que utilizó es de enfoque cuantitativo con tipo de diseño descriptivo, explicativo y correlacional con un diseño no experimental, en sus resultados mostró la disminución de THD_v y THD_i que produce un filtro pasivo y como conclusión indica que un filtro pasivo mejora drásticamente los indicadores de THD_v y THD_i en una red con compensación reactiva.

2.1.3. Antecedentes regionales

(Ticona Coila, 2017) en su estudio “Evaluación de parámetros de una subestación eléctrica de distribución en 22.9/0.38/0.22 KV con compensación reactiva capacitiva para compañía minera el Dorado Ananea – Puno”, tuvo como objeto la valoración de parámetros de una Subestación Eléctrica de Distribución 22.9/0.38/0.22 KV con un sistema de compensación reactiva capacitiva para la empresa minera el Dorado Ananea Puno, la metodología aplicada en su trabajo contiene el análisis de parámetros eléctricos, procesando un análisis técnico y económico de la subestación eléctrica en 22.9 kV, así



como la metodología y los medios a usar en su preparación, buscando alcanzar como resultado, el control del factor de potencia y por lo tanto disminuir los gastos en electricidad, disminuir las pérdidas en los cables, minimizar las caídas de tensión y aumentar la cantidad de potencia disponible, como resultado de su alternativa 3 indicó que se necesita el montaje de un banco de capacitores de 200 kVAR en 22.9 kV con el fin de incrementar los niveles de tensión, y en su conclusión obtuvo una mejora en el factor de potencia y potencia reactiva en la subestación de distribución en 22.9 kV.

(Lopez Mamani & Cruz Flores, 2020) en su estudio “Determinación de equipos para compensación reactiva en media tensión 22.9 kV para las subestaciones eléctricas de transformación Puno, Ilave y Pomata, utilizando software para simulación y proyección a futuro”, tuvo por objetivo determinar y diseñar equipos de compensación de energía reactiva y su optimización mediante simulación con el software NEPLAN, para las subestaciones eléctricas de Puno, Ilave y Pomata, y redes de distribución primaria. Donde uso el método analítico comparativo mediante la simulación en el Software NEPLAN, como resultados de su simulación y diseño obtuvo un equipo de compensación reactiva automático SVC, de 250 kVAR ubicado en la línea primaria 22.9 kV de los alimentadores 0101 y 0104 Puno, 1.5 MVAR en 22.9 kV ubicado en la subestación de Ilave y 1.5 MVAR en 22.9 kV en la subestación Pomata. Como conclusión de sus simulaciones obtuvo mejoras en la corrección del fdp y mejoras económicas en el consumo excesivo de energía reactiva.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Energía reactiva

a) Energía activa

La energía activa es la utilizada para producir el trabajo en una maquina eléctrica, esta energía es medida en kWh y se le llama energía activa o energía útil.

Los elementos que usan solo esta clase de energía son elementos resistivos y se encuentran en casi todas las maquinas eléctricas como motores, equipos de iluminación, maquinarias y demás. (Schneider Electric, 2010, p. 343)

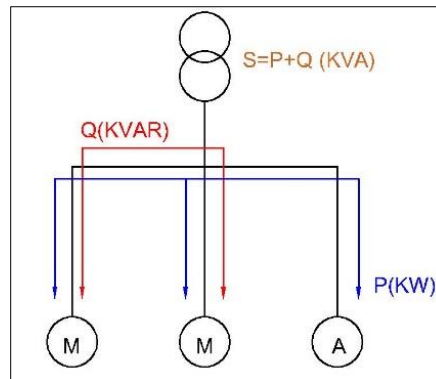


Figura N° 2.1: Consumo de energía reactiva

Fuente: Compensación de energía reactiva (Schneider Electric, 2019).

b) Energía reactiva

En algunas cargas se encuentra la necesidad de generar campos magnéticos para su buena operación tales como transformadores, motores, hornos, entre otros y estas aparte de consumir energía activa, consumen también energía denominada energía reactiva necesaria para su correcta operatividad. (Schneider Electric, 2010, p. 343)

La causa se debe a que estos tipos de máquinas inductivas necesitan consumir energía reactiva de la red, para generar sus campos magnéticos necesarios para su adecuado funcionamiento. La circulación de energía dada entre una carga y la fuente, causa efectos negativos como pérdidas de energía en los cables, caídas de voltaje en las cargas, y un uso de energía complementario, no aprovechado pero necesario para las cargas.

c) Factor de potencia ($\cos\phi$)

Los equipos inductivos en una red eléctrica de distribución provocan un desfase dada entre la onda de la corriente y la tensión necesarios para su funcionamiento. El factor

de potencia fasorialmente es el ángulo que hay entre la potencia aparente y la potencia activa de una instalación eléctrica, con equipos que consumen reactivos, este mismo desfase existe entre la corriente y la tensión de la instalación.

Por ende, el $\cos\phi$ nos muestra la correspondencia entre la potencia activa y la potencia aparente de la red eléctrica (los kVA total que se dispone para el consumo de electricidad). Entonces podemos decir que el $\cos\phi$ muestra el “rendimiento eléctrico” en una carga o instalación eléctrica.

$$FP = \cos\phi = \frac{P}{S}$$

Donde:

ϕ = Angulo de desfase entre corriente (A) y el voltaje (V)

P = Potencia activa en KW

S = Potencia aparente en KVA.

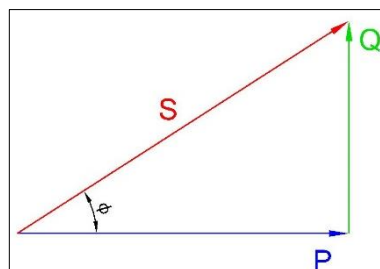


Figura N° 2.2: $\cos\phi$ como rendimiento eléctrico

Fuente: Circuitos Eléctricos (Edminister, 1965).

Tabla N° 2.1: $\cos\phi$ de los aparatos más usuales.

Aparato	Carga	$\cos\phi$	$\text{tg}\phi$
	0	0,17	5,8
	0.25	0,55	1,52
Motor asíncrono ordinario	0.5	0,73	0,94
	0.75	0,8	0,75
	1	0,85	0,62
Lámparas de incandescencia	-	1	0
Lámparas de fluorescencia	-	0,5	1,73
Lámparas de descarga	-	0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
Hornos de resistencia	-	1	0

(continuación...)			
Hornos de inducción	-	0,85	0,62
Hornos de calefacción dieléctrica	-	0,85	0,62
Máquinas de soldar por resistencia	-	0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
Centros estáticos monofásicos de soldadura al arco	-	0,5	1,73
Grupos rotativos de soldadura al arco	-	0,7 a 0,9	1,02
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco	-	0,7 a 0,9	1,02 a 0,75
Hornos de arco	-	0,8	0,75

Fuente: Factor de potencia de equipos eléctrico (Schneider Electric, 2019).

2.2.2 Factor de potencia

a) Factor de potencia y desempeño energético

Si el desfaseamiento es consecuencia de la presencia de un inductor entonces el fdp es inductivo o atrasado (la corriente I viene en retraso con respecto a la tensión V) LAG. Si el desfaseamiento es consecuencia de la presencia de un capacitor entonces el fdp es capacitivo o adelantado (la corriente I viene en adelante con respecto a la tensión V) LEAD. Entre más pequeño es el ángulo de desfaseamiento del voltaje y la corriente, el fdp se acerca más a la unidad.

Un fdp cercano a la unidad implica que casi toda la potencia entregada por la fuente de tensión se transforma en trabajo. A continuación, se visualiza el desempeño de la energía activa y reactiva en sistema eléctrico sin compensar y en un sistema compensado.

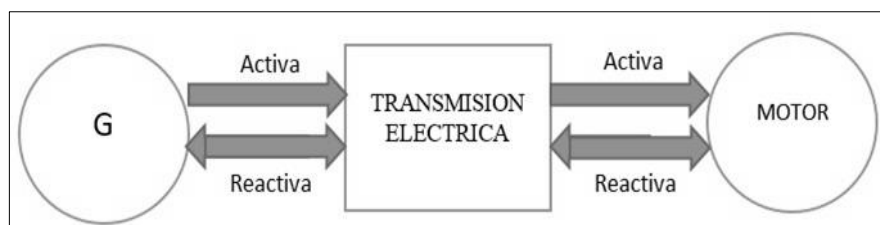


Figura N° 2.3: Instalación sin compensar

Elaborado por el equipo de trabajo

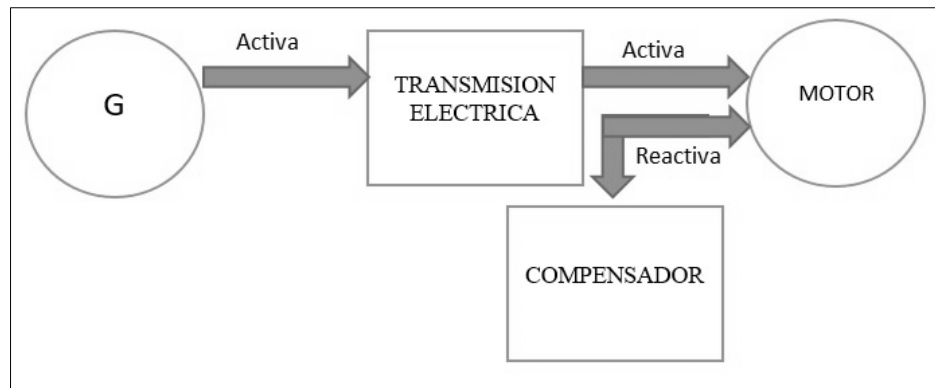


Figura N° 2.4: Instalación con compensación

Elaborado por el equipo de trabajo

b) Corrección del factor de potencia

Generalmente se puede llegar a regular el factor de potencia de una red a valores muy cercanos a la unidad, se le denomina corrección del factor de potencia y se implementa a través de la conexión de motores síncronos, capacitores, bancos de condensadores o de inductancias, filtros activos entre otras soluciones, según sea la necesidad de las cargas y del análisis de armónicos o resonancia que tenga la instalación. Por ejemplo, algunas veces podemos instalar motores síncronos, los que se encargan de suministrar potencia reactiva capacitiva variando solo la corriente de excitación del motor.

Las pérdidas en las líneas de transmisión eléctrica crecen con la elevación de la intensidad. Como se sabe, cuanto menos es el factor de potencia de una red, se requiere mucha más corriente para lograr la igualdad en cantidad de energía útil. Por tanto, como ya se sabe, las empresas encargadas del suministro de energía eléctrica, para lograr una máxima eficiencia en su red, necesitan que los consumidores, preferentemente aquellos que usan gigantescas potencias como las industrias mineras, mantengan los valores del factor de potencia de sus cargas correspondientes, dentro de rangos especificados, en la normativa peruana, de lo contrario, están sujetos a gastos adicionales por energía reactiva los cuales se verán reflejados en las facturas.

La corrección del fdp tiene que ser manejada de una manera cuidadosa con el objetivo de mantenerlo lo más elevado posible sin alcanzar a la unidad y bajo los límites establecidos según las normativas nacionales e internacionales. Por ejemplo, en casos de grandes diferencias y variación en el perfil de carga durante un periodo de tiempo, entonces es recomendable que la corrección se realice de manera automática y buscar las soluciones más adecuadas según el perfil de carga y otros análisis.

Se sabe que en una red de tipo inductiva donde las potencias P, Q y S forma el triángulo de potencias. Si se quiere mejorar el $\cos\phi$ a un $\cos\phi'$ mejorado, sin cambiar la potencia activa P, se tiene que conectar un banco de compensación puesta en paralelo al ingreso de la instalación de la carga y generar los reactivos Q_c de signo contrario al de Q_1 , para así lograr una potencia reactiva final Q_2 . (Yumpu, 2021)

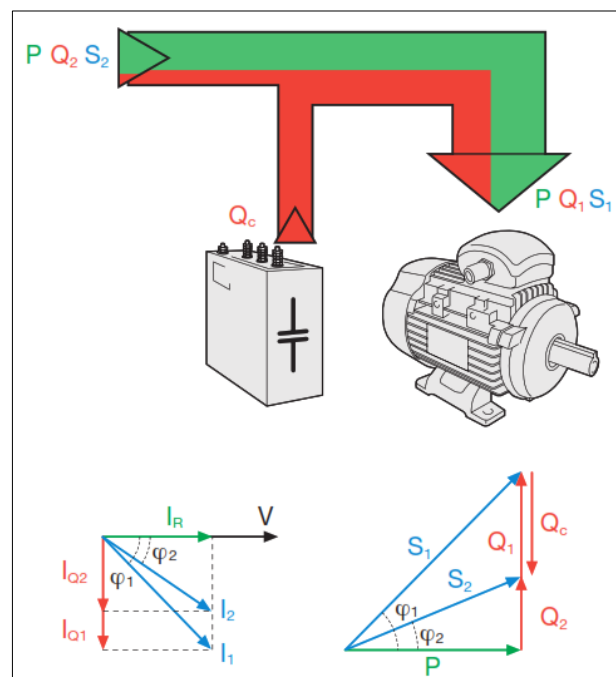


Figura N° 2.5: Triángulo de potencias, corrección de fdp

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

$$Q_1 = P \cdot \tan\phi_1$$

$$Q_2 = P \cdot \tan\phi_2$$



$$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

Donde:

Q_1, ϕ_1 = Energía reactiva y el ángulo de desfase pre corrección.

Q_2, ϕ_2 = Energía reactiva y el ángulo de desfase post corrección.

Q_c = Es la energía reactiva de corrección

P = Potencia activa en KW

2.2.3 Compensación de energía reactiva

a) Ventajas de la compensación reactiva

- Reducción en el recibo de electricidad:

Las empresas eléctricas cobran la energía reactiva consumida con la finalidad de cubrir los costos de generación y transmisión de mayor energía.

- Incremento de la potencia disponible:

Un factor de potencia mayor a 0.9 mejora los elementos de una red eléctrica optimizando su rendimiento eléctrico.

El montaje de condensadores minimiza el consumo de energía reactiva entre una fuente y las cargas de una instalación eléctrica. Los compensadores conceden de energía reactiva suministrando a la red desde el punto de conexión de los condensadores hacia aguas arriba de la red. (Heredía Caballero, 2001)

Por lo tanto, es factible incrementar la potencia disponible en el lado secundario del transformador, realizando el montaje de un dispositivo de corrección del factor de potencia en el lado de baja tensión. En la siguiente tabla se muestra el incremento de la potencia activa (kW) que puede proveer un transformador con un factor de potencia corregido hasta $\cos\phi = 1$.

Tabla N° 2.2: Aumento de potencia activa con corrección de fdp

cos ϕ inicial	Aumento de potencia disponible
1	0,0 %
0,98	+ 2,0 %
0,95	+ 5,2 %
0,90	+ 11,1 %
0,85	+ 17,6 %
0,80	+ 25,0 %
0,70	+ 42,8 %
0,65	+ 53,8 %
0,50	+ 100,0 %

Fuente: Compensación de Energía Reactiva (Schneider Electric, 2019).

- Reducción del calibre de los conductores:

Un beneficio del sistema de compensación reactiva en una planta industrial es reducir el calibre de los conductores a lo calculado inicialmente, puesto que para una misma potencia útil se tiene que la corriente resultante de la planta compensada es menor, por lo cual habrá más capacidad en los cables. La siguiente tabla se observa el coeficiente multiplicador del calibre del conductor en función del $\cos\phi$ de la instalación.

Tabla N° 2.3: Coeficiente multiplicador de la sección del conductor

cos ϕ inicial	Factor multiplicador de la sección de cable
1	1
0,80	1,25
0,60	1,67
0,40	2,50

Fuente: Compensación de Energía Reactiva (Schneider Electric, 2019).

- Disminución de las pérdidas:

La implementación de un banco de capacitores permite la disminución de las pérdidas producidas por el efecto Joule en los transformadores y conductores. Dichas pérdidas son medidas como energía consumida (kWh) en el medidor.

- Disminución de caída de tensión:

Uno de los efectos del montaje del banco de condensadores es la disminución de las caídas de voltaje hacia aguas arriba del punto de conexión del grupo de compensación.

- Liberación del transformador

Según la potencia reactiva Q_1 requerida por la carga, no tiene que circular por el transformador, ya que el banco de capacitores debe encargarse de suministrar una cantidad de potencia reactiva Q_c , de tal forma que a través del transformador solamente circule una cantidad de potencia reactiva Q_2 .

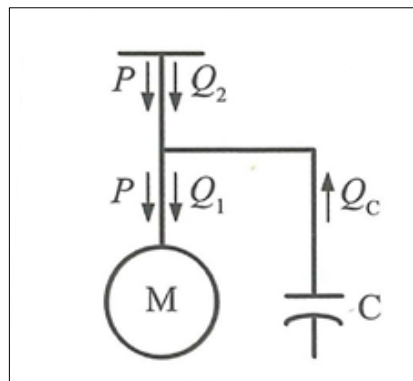


Figura N° 2.6: Flujo de energía reactiva con banco de condensadores

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

- b) Medios de producción de potencia reactiva

Las formas más importantes para el suministro de energía reactiva son:

- Alternadores sincrónicos:

Los alternadores sincrónicos son equipos eléctricos muy utilizados en la producción de energía eléctrica. Proporcionan de energía eléctrica a usuarios consumidores a través de redes de distribución y transmisión. En este se puede trabajar en la excitación del alternador y regular el valor del voltaje generado, con ello controlar los suministros de potencia reactiva a la red, con el objetivo de realizar mejoras en los rangos de voltaje del sistema y minimizar las pérdidas por el efecto Joule en las líneas.

- Compensadores sincrónicos:

Son motores sincrónicos que trabajan en vacío, operando en sincronismo con la red de distribución, el cual su labor es atrapar la potencia reactiva excedente (operatividad en subexcitación) o bien suministrar la potencia faltante (operatividad en sobreexcitación).

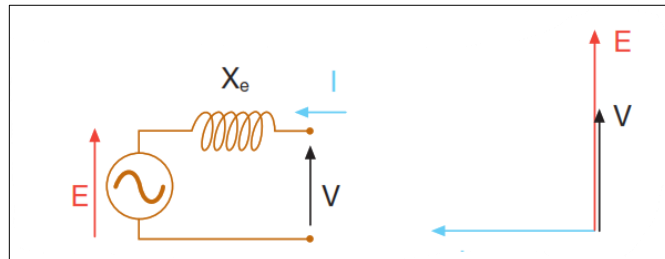


Figura N° 2.7: Compensador síncrono en sobreexcitación

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

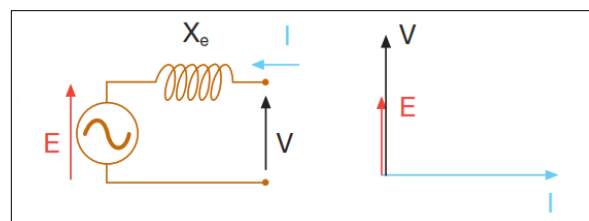


Figura N° 2.8: Compensador síncrono en subexcitación

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

- E : f.e.m. inducida en las fases de estátor
- V : tensión de fase de la red en los bornes del alternador
- I : corriente del estátor
- X : reactancia del estátor

Particularmente, estos equipos de compensación son usados en puntos y nodos fijos de la red de transmisión y subtransmisión para el control de la tensión y los flujos de reactivos. Dentro de las líneas de distribución, el uso de estos equipos no es recomendable por los altos precios de mantenimiento, instalación y coste de equipos.

- Compensadores estáticos:

Los grandes avances tecnológicos en la electrónica de potencia hacen que se reemplacen los compensadores sincrónicos por nuevos sistemas estáticos que permiten modernizar el control de la potencia reactiva como es el caso de los TSC ("thyristor switched capacitors") y los TCR ("thyristor controlled reactors"), son una mejora electrónica de los sistemas de compensación de reactivos fundamentados en elementos electromecánicos, sin embargo, en el proceso de ingreso de los distintos capacitores no se da por el control de apertura y el cierre de contactores, sino por medio del control de parejas de tiristores en antiparalelo. (ABB, 2011)

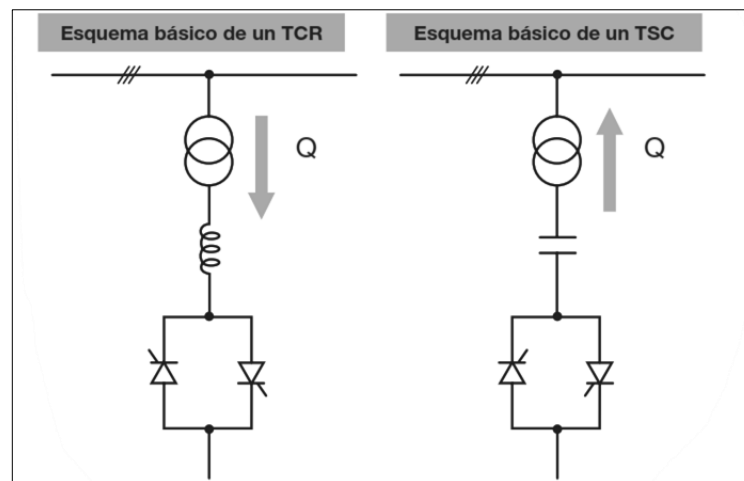


Figura N° 2.9: Esquemas básicos de un TCR y un TSC

Fuente: Corrección de fdp (ABB. 2011).

Basadas en electrónica de potencia la respuesta de inserción de estos equipos permite el control gradual de la potencia reactiva proporcionado por grupos de capacitores, puesto que con los TCR se varía con la constancia de la energía reactiva atrapada por las inductancias. Con el montaje de un TSC y un TCR se puede llevar a cabo un control modulado con permanencia de la energía reactiva generada y consumida.

Viendo desde un punto de vista aplicado, estos equipos son utilizados particularmente en redes de alta tensión y muy alta tensión.

- Baterías de condensadores estáticos:

El capacitor es un equipo bipolo pasivo conformado por un par de áreas conductoras, denominadas láminas, en medio de ellas se encuentra un dieléctrico que puede ser de distintos materiales.

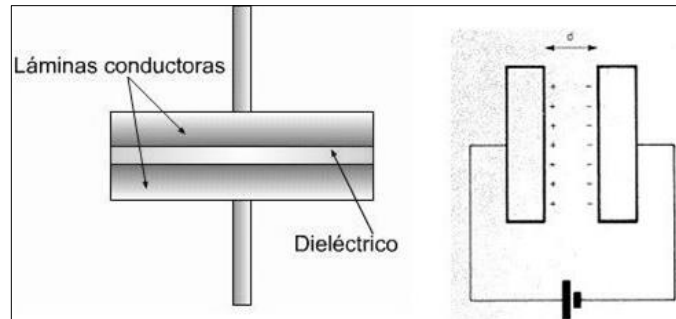


Figura N° 2.10: Esquema de condensador

Fuente: www.areatecnologia.com

El capacitor es un equipo que puede almacenar energía, cuya capacidad se adecua en función a la mezcla de elementos en serie o paralelo. Este elemento demanda corriente que se encuentra a 90° con respecto a la tensión, de tal forma que constituye un medio para corregir el fdp.

Los últimos capacitores fabricados son de tipo seco, estos están sujetos a un proceso específico para mejorar sus características eléctricas. Los capacitores en seco son equipos que no muestran peligros de contaminación ambiental generada por la pérdida del material impregnante. (ABB, 2011)

Según la forma geométrica de las armaduras metálicas, estas pueden ser:

- Condensadores planos.
- Condensadores cilíndricos.
- Condensadores esféricos.

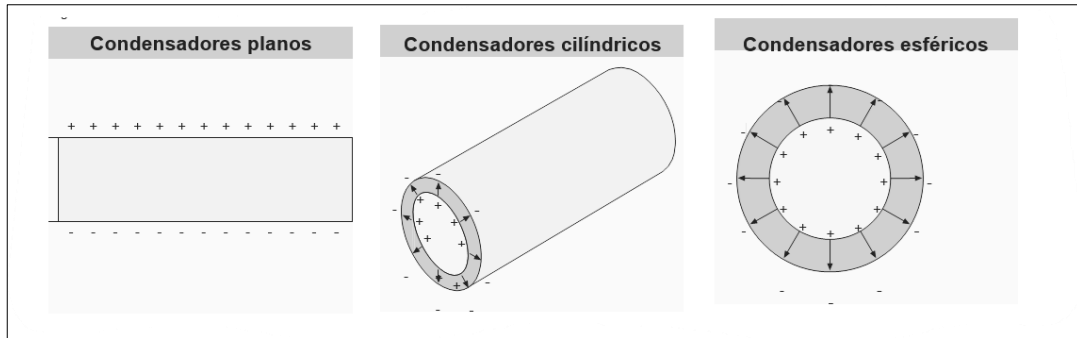


Figura N° 2.11: Tipo de condensadores

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

La capacitancia es la unidad de medición de la capacidad de almacenamiento de carga en las placas de un capacitor eléctrico.

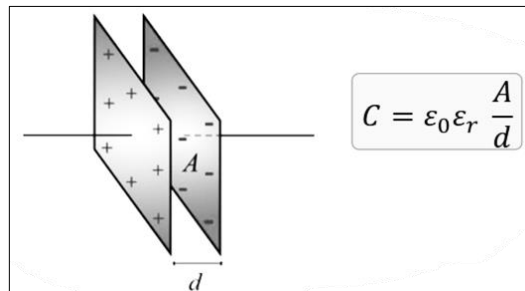


Figura N° 2.12: Capacitancia de condensadores

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

- ϵ_0 : Permitividad del vacío ($8.85 \times 10^{-12} \text{F}$)
- ϵ_r : Permitividad relativa del material dieléctrico entre las placas
- A : Sección entre las placas conductoras
- d : Distancia de separación entre placas

En la siguiente figura, se observa la relación proporcional entre la tensión (V) y potencia reactiva (Q_c):

$$Q_c = \frac{V^2}{\omega C}$$

Donde:

- Q_c : Energía reactiva capacitiva

- V : Tensión
- ω : Frecuencia Angular
- C : Capacitancia

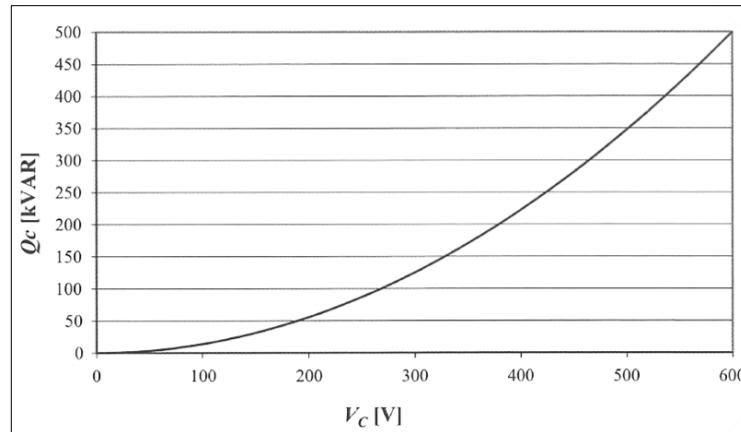


Figura N° 2.13: Tensión vs potencia reactiva

Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.4 Tipos de corrección de potencia reactiva

Una de las principales modalidades es según la ubicación de los capacitores, los métodos más importantes de corrección de potencia reactiva son:

a) Corrección del factor de potencia distribuida

Esta forma de corrección se hace instalando los capacitores correctamente dimensionados y en los terminales del equipo que consumen la potencia reactiva. El montaje es sencillo y poco costoso: el condensador estático y la carga pueden compartir las mismas protecciones eléctricas para las sobre corrientes y también se insertan o desconectan al mismo tiempo.

Esta corrección es recomendable para equipos grandes con carga y fdp no variables y tiempos de conexión largos; normalmente, es usado por motores y lámparas fluorescentes. En la siguiente figura se presentan los esquemas más usados en el conexasiónado para la corrección del factor de potencia de las maquinas inductivas.

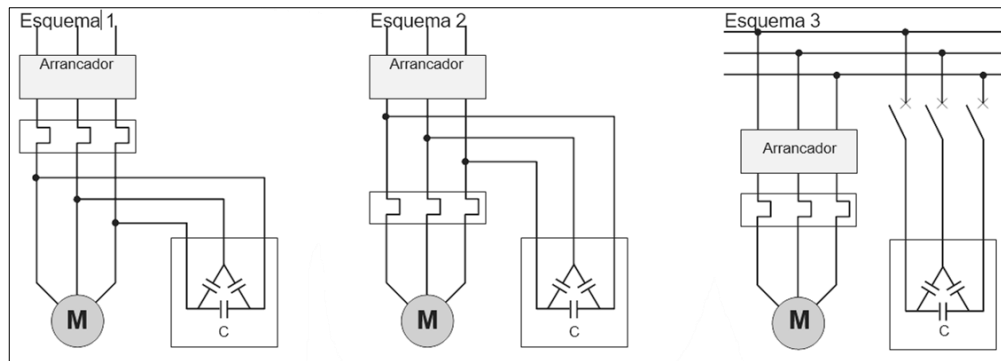


Figura N° 2.14: Corrección distribuida

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

En el caso de fijación directa del esquema 1 y 2, existe el peligro de que, tras el corte de suministro de energía, el motor va seguir girando (energía cinética residual) y auto excitándose con la energía reactiva proporcionada por las baterías de capacitores, y este se convierte en un generador asíncrono. Pero si esto sucede, el voltaje sigue en el lado de carga del dispositivo de maniobra y control, con riesgo de generar peligrosas sobretensiones (hasta el doble de la tensión nominal). (ABB, 2011)

De la figura en el esquema 3, la batería de compensación reactiva se fija al motor sólo cuando se encuentra en funcionamiento y se corta el mismo antes de que suceda el corte de suministro al motor, evitando el problema de autoexcitación. En esta forma de corrección, la red de alimentación de la carga consume energía con un fdp alto; por lo contrario, esta técnica es más costosa.

b) Corrección del factor de potencia por grupos

Esta manera de corrección consiste en mejorar un grupo de cargas con propiedades de operación similares mediante el montaje de un banco de capacitores. Este tipo de corrección es regularmente económico en una instalación, puesto que los beneficios de la corrección trabajan sólo en los circuitos aguas arriba, en relación al punto en el que se encuentran conectadas las baterías de los capacitores, como se muestra en la figura.

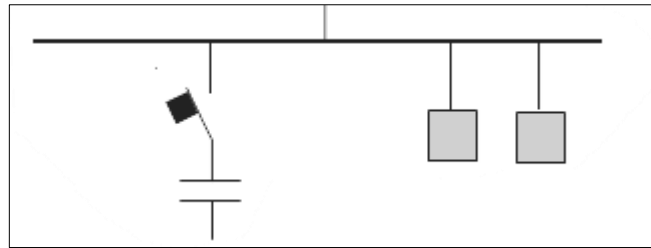


Figura N° 2.15: Corrección por grupos

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

c) Corrección del factor de potencia centralizada

Esta forma es usada cuando el funcionamiento de las cargas es por determinadas horas del día, quedando sin uso en el restante de horas, este tipo de corrección optimiza los costes del banco de condensadores, pero presenta desventajas en las redes de distribución de una planta industrial aguas abajo del equipo de corrección, tienen que estar diseñadas tomando en cuenta toda la potencia reactiva consumida por todas las cargas.

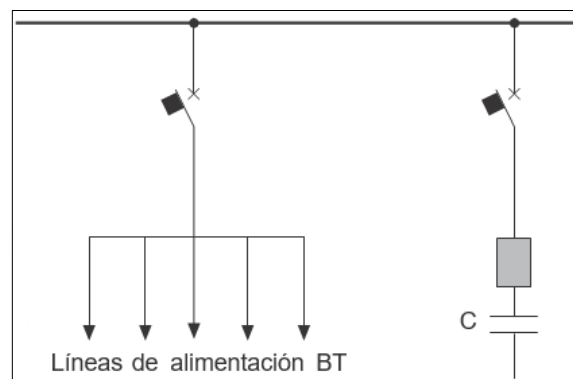


Figura N° 2.16: Corrección centralizada

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

d) Corrección del factor de potencia mixta

Esta forma de corrección combina las correcciones distribuidas y la corrección centralizada, se utilizan por lo general cuando hay cargas grandes que necesitan una corrección independiente, mientras tanto las demás cargas se aplica la corrección centralizada haciendo más efectivo todo el sistema de compensación reactiva.



e) Corrección del factor de potencia automática

De esta manera se usa equipos de condensadores en forma escalonada, en un banco de capacitores automático la compensación reactiva se efectúa mediante pasos conformados por condensadores de diferentes capacidades que están controlados mediante equipos de medición y control.

2.2.5 Armónicos & factor de potencia

a) Definición, conceptos y efectos de los armónicos

Los armónicos son los componentes de una onda distorsionada y su uso permite analizar cualquier forma de onda periódica no sinusoidal, descomponiendo esta onda distorsionada en distintas componentes sinusoidales.

De acuerdo al teorema de Fourier, una función periódica de periodo T normalmente continua y limitada puede ser representada por la suma de infinitos términos sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la función original o frecuencia natural. (Zea Meléndez, 2012)

El armónico fundamental o natural, es el cual su frecuencia iguala al del período de la onda inicial y el armónico con frecuencia igual a " n " veces la natural es llamada armónico de orden " n ". De acuerdo al teorema de Fourier, una forma de onda perfectamente sinusoidal no contiene armónicos de orden diferente a la onda natural.

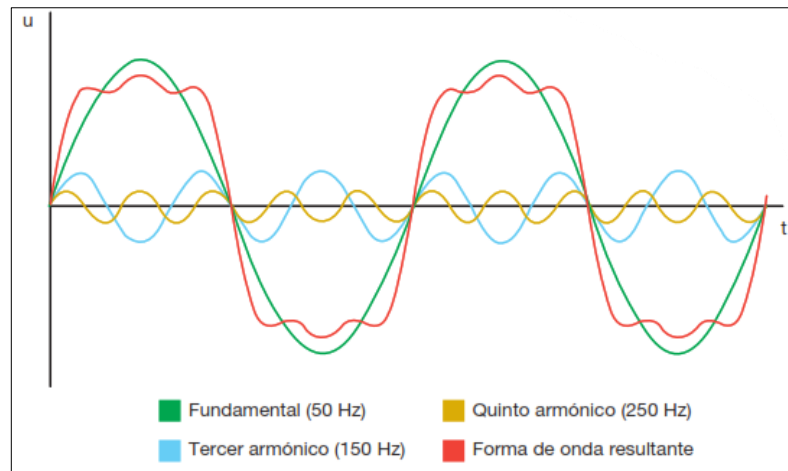


Figura N° 2.17: Representación de armónicos

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

La existencia de armónicos en una red eléctrica, nos indica que existe una malformación de la forma de onda de la tensión y/o de la corriente, lo que provoca una distribución de energía eléctrica el cual podría relacionarse con el funcionamiento deficiente de los equipos, generalmente generados por equipos basados en electrónica de potencia. Algunas de las principales máquinas generadoras de armónicos son:

- PC estacionarias, laptop.
- Lámparas fluorescentes y de descarga en gas.
- Convertidores estáticos.
- Grupos de continuidad
- Soldadoras industriales.
- Hornos de arco y de inducción.
- UPS, variadores de velocidad.

Generalmente, la distorsión de la forma de onda se da por la presencia interna en los equipos, de impedancias no lineales o de tiempo variante o de puentes rectificadores por cuyos dispositivos semiconductores circulan corriente, sólo durante una fracción de todo el periodo, generando comportamientos discontinuos con la consecuente generación de varios armónicos. (ABB, 2011)

b) Clasificación de armónicos

Los armónicos se clasifican:

- Según su secuencia

Secuencia positiva: Estos armónicos tienden a acelerar las maquinas rotativas como en el caso del motor.

Secuencia negativa: Estos armónicos se oponen a la velocidad de una máquina rotativa y tiende a desacelerar.

Secuencia Homopolar: No tienen una secuencia definida y son corrientes parasitas, desgastando el aislamiento de los motores y generando recalentamientos.

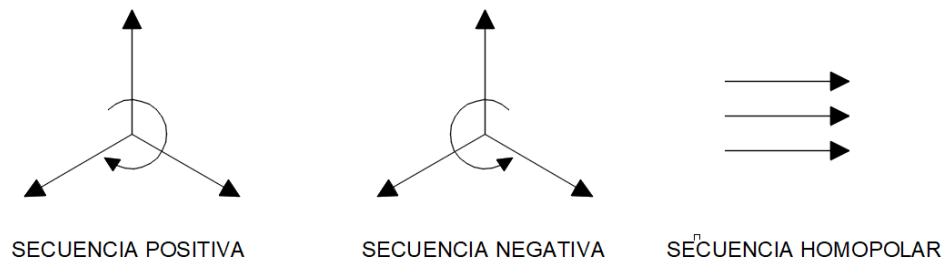


Figura N° 2.18: Clasificación de armónicos según secuencia

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 2.4: Armónicos según su secuencia

Armónico	Fundamental	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-

Elaborado por el equipo de trabajo

- Según su característica
- Armónicos Impares: Son los armónicos más predominantes y comunes de encontrar en las redes, tales como el armónico 3, 5, 7, etc.
- Armónicos Pares: Son los armónicos de numero par tales como el 2, 4, 6, etc.
- Interarmónicos: Producidos por fallas en equipos, equipos de arco eléctrico, no es número múltiplo entero de la frecuencia fundamental.



- Subarmónicos: Es el armónico que está por debajo de la frecuencia fundamental 60Hz, son poco frecuentes de concentrar.

c) Origen de armónicos

Según el tipo de cargas los armónicos se originan en las cargas no lineales las cuales modifican la forma de la onda de la corriente y de voltaje, generalmente producidos por los equipos fundamentados en electrónica de potencia, que para su funcionamiento usan corrientes a frecuencias diferentes a la onda fundamental, estos representan el 90% de los armónicos en un sistema. Entre algunos de los equipos generadores de armónicos utilizados en la industria se tienen:

- Variadores de velocidad.
- Rectificadores.
- Conversores.
- Hornos de arco.
- Equipos de soldadura.

El 1% de armónicos son producidos por dispositivos ferromagnéticos entre ellos se tienen los transformadores, motores generadores y el 9% es generado por equipos que funciona con arco eléctrico. Se sabe que, para el correcto funcionamiento de los condensadores, el máximo de cargas no lineales en el sistema, no debe superar el 25%, al sobrepasar este porcentaje se producirán deterioros y sobrecargas y pérdida de aislamiento en los condensadores. Dicho esto, si un condensador que es una carga lineal, pero es alimentado con una fuente distorsionada el banco de condensadores generara amplificación de la distorsión.

d) Indicadores del contenido de armónicos: THDi & THDv

- THD: Es la medida que cuantifica la cantidad de contenido armónico que tiene una onda distorsionada.



- THD_v: Es la distorsión armónica total de la tensión.

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} * 100\%}{V_1}$$

V₁: Voltaje de la onda fundamental

- THD_i: Es la distorsión armónica total de la corriente.

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} * 100\%}{I_1}$$

I₁: Corriente de la onda fundamental.

- TDD: Es la distorsión de demanda total, aplica solo a las corrientes, donde se relaciona el contenido armónico de la corriente distorsionada y el valor de la corriente de la carga máxima.

$$TDD = \frac{I_h}{I_L}$$

I_h : Corriente distorsionada.

I_L : Corriente de la carga máxima.

Límites de distorsión armónica

Se establecieron límites de distorsión armónica, según las normativas IEEE 519-2014 y la IEC 61800-3.

Tabla N° 2.5: Límites de distorsión de voltaje

Bus voltaje V en punto de acople	Armónico Individual (%)	Distorsión Armónica Total (THD) (%)
$V \leq 1\text{kV}$	5	8
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3	5
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$161\text{kV} < V$	1	1.5

Fuente: IEEE 519 (IEEE, 2014).

Tabla N° 2.6: Límites de distorsión de demanda total (para sistemas de 120V a 69kV)

Distorsión de corriente armónica máxima						
Orden individual de armónicos						
Isc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Fuente: IEEE 519 (IEEE, 2014)

e) Efectos de armónicos

Los armónicos son una fuente de problemas en un sistema eléctrico y causan diferentes efectos en los dispositivos del sistema como:

- Efectos en transformadores:
 - Riesgo de resonancia.
 - Incremento de pérdidas.
 - Incremento de temperatura.
 - Sobrecarga del transformador.
- Efectos en condensadores:
 - Riesgo de resonancia.
 - Incremento de pérdidas.
 - Incremento de temperatura.
 - Sobrecarga del condensador.
- Efectos en el sistema:
 - Aumento de pérdidas.
 - Sobrecalentamiento de neutro y peligro de incendio.
 - Aumento de campo electromagnético.

- Baja calidad de energía.
- Efectos en los cables:
 - Aumento de pérdidas.
 - Sobrecalentamiento de neutro y peligro de incendio.
- Efectos en las computadoras:
 - Interferencias.
 - Pérdidas de datos.
 - Mal funcionamiento.

2.2.6 Resonancia

La resonancia “es el efecto producido cuando coinciden la frecuencia natural de un sistema que puede ser mecánico o eléctrico, con una fuente externa de la misma frecuencia” (Fornieles, 2022).

a) Impedancia inductiva y capacitiva

La impedancia en una inductancia (X_L), es directamente proporcional a la frecuencia, en la representación gráfica de impedancia vs frecuencia se observa que se produce una recta que a medida que aumente la frecuencia la impedancia también aumentará, por otro lado, la impedancia capacitiva (X_C) es inversamente proporcional a la frecuencia, lo que significa que se disminuye al aumentar la frecuencia.

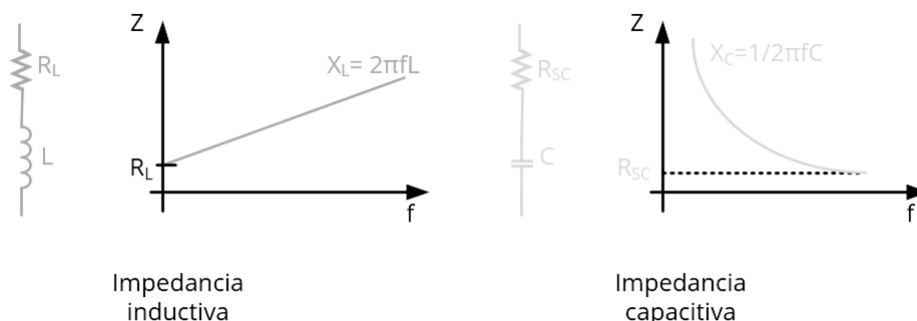


Figura N° 2.19: Impedancia inductiva y capacitiva.

Fuente: <https://fornieles.es/>

b) Resonancia eléctrica

Este fenómeno se produce en un circuito eléctrico con una frecuencia resonante, cuando las impedancias o admitancias se cancelan entre sí, cuando el valor de impedancia llega a su máximo y está igual a la impedancia inductiva del transformador con la impedancia capacitiva del banco de condensadores. Entonces se produce a una frecuencia determinada, la cual es denominada frecuencia de resonancia (f_R).

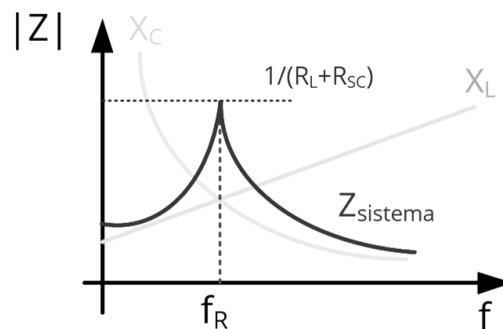


Figura N° 2.20: Frecuencia de resonancia

Fuente: <https://fornieles.es/>

La resonancia eléctrica tiene 2 principales efectos los cuales son:

- Amplificación de la distorsión en tensión:

Cuando se incrementa la impedancia del sistema a una frecuencia de resonancia, la presencia de corrientes armónicas próxima a dicha frecuencia provocará una mayor caída de tensión armónica, y por lo tanto se incrementará el valor de THD_v para toda la instalación.

- Degradación de la batería de condensadores:

Al elevarse la distorsión en tensión y la impedancia a la frecuencia de resonancia, provocará que los condensadores absorban más corriente armónica, provocando un mayor calentamiento de los capacitores, dañándolos con rapidez en función de la severidad de la resonancia. (Fornieles, 2022)

En el sector industrial se encuentran dos tipos de resonancia los cuales son:

Resonancia en serie: Este tipo de resonancia es producido en un circuito en serie conformado por los 3 tipos de impedancia, resistiva, inductiva y capacitiva, se produce cuando la impedancia inductiva se iguala a la impedancia capacitiva, produciendo que estas se anulen y solo quede la parte resistiva, provocando una elevación en la corriente, cuando se alcanza la mínima impedancia indica la frecuencia de resonancia; se presenta más en líneas de transmisión.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Donde:

L : Reactancia inductiva

C : Reactancia capacitiva

Fr : Frecuencia de resonancia

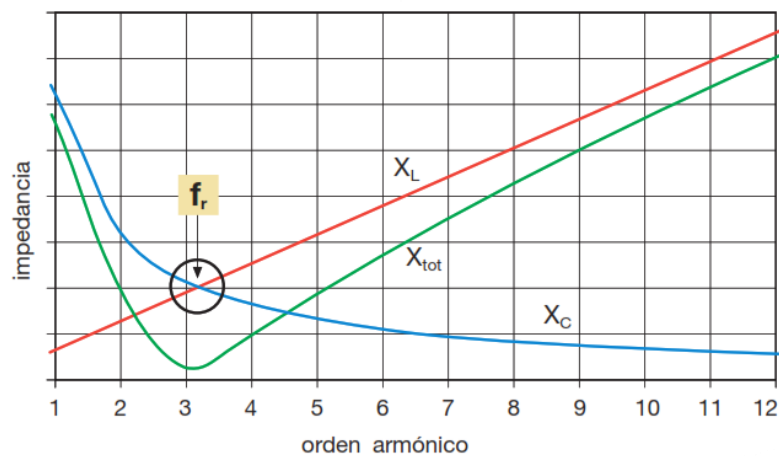


Figura N° 2.21: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en serie

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

Resonancia en paralelo: En un circuito en paralelo que toma alimentación de armónicos de corrientes distorsionadas, se da lugar a la generación de sobretensiones en el armónico de resonancia, este tipo de armónicos son más comunes de encontrar en una industria.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}}$$

Donde:

L : Reactancia inductiva

C : Reactancia capacitiva

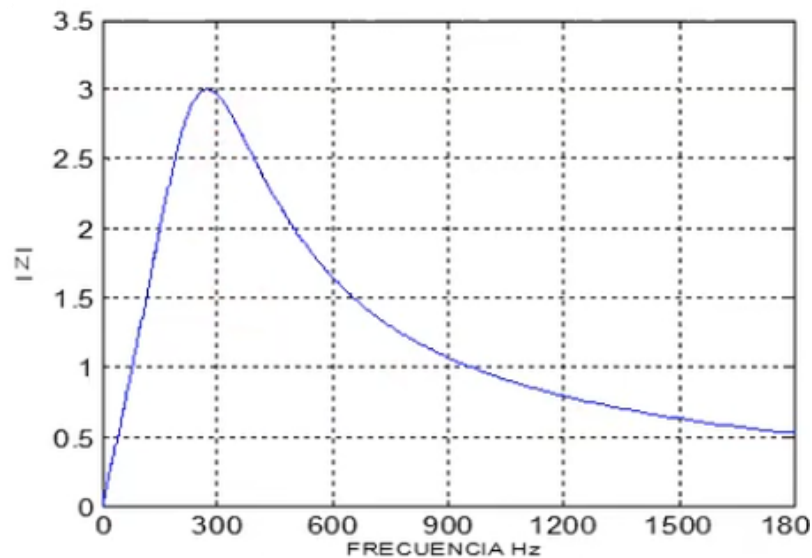


Figura N° 2.22: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en paralelo

Fuente: Corrección de fdp (ABB, 2011).

La resonancia en paralelo en media tensión y baja tensión, depende de la capacidad del banco de capacitores, potencia de cortocircuito, ubicación de banco de capacitores (en media o baja tensión).

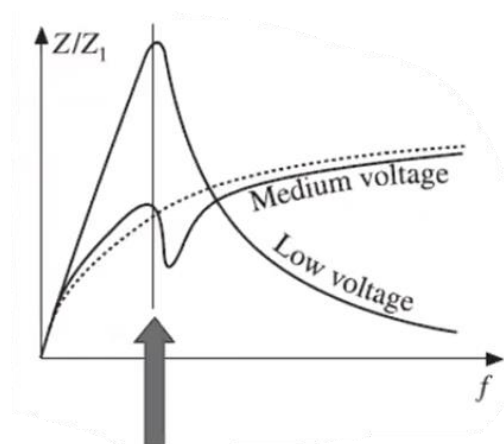


Figura N° 2.23: Gráfica impedancia vs frecuencia, resonancia en paralelo

Fuente: Power Systems Harmonics Fundamentals (Wakileh, 2001).

2.2.7 Banco de condensadores desintonizados

Una de las soluciones más avanzadas ante la presencia de armónicos y banco de capacitores, son los bancos de condensadores desintonizados, orientados a proteger a los condensadores y mitigar los efectos de resonancia que provoca la instalación de bancos de condensadores en un ambiente con armónicos. Los armónicos buscan las bajas impedancias y los condensadores son equipos que a medida que aumenta la frecuencia disminuye su impedancia, es por ello que son propicios a daños por sobretensiones, sobrecalentamientos, reducción de vida útil y explosiones de estos. Para ello las soluciones a este problema viene dado por los bancos de condensadores desintonizados, los cuales están compuestos por reactancias capacitivas y reactancias inductivas, esta última actúa a una sintonía, el cual se encuentra entre el 10% - 20% antes de llegar a la frecuencia del orden armónico más predominante, estas reactancias inductivas elevan la impedancia del equipo haciendo que se rechacen las corrientes armónicas por lo cual también son conocidos como filtros de rechazo.

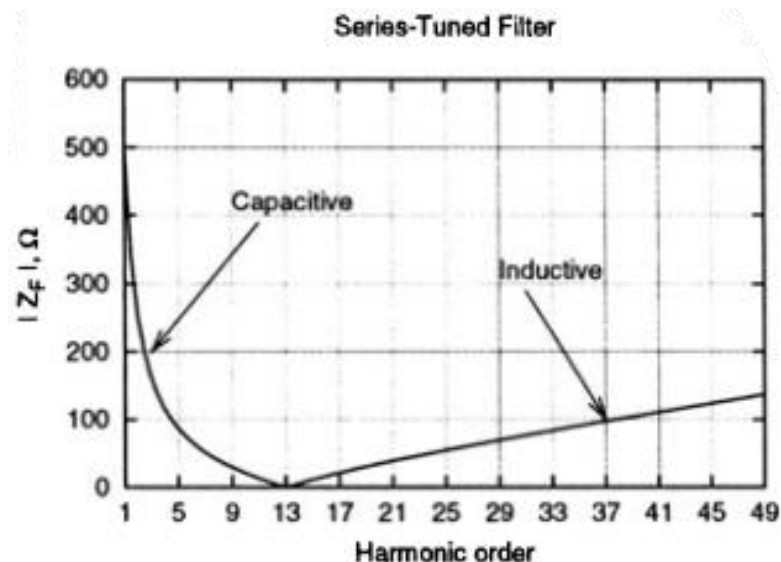


Figura N° 2.24: Impedancia de un filtro sintonizado

Fuente: Power Systems Harmonics Fundamentals (Wakileh, 2001).

La sintonización de los bancos de condensadores desintonizados se viene dado por el factor de sintoniza:



$$\rho = \frac{X_L}{X_C} = \left(\frac{f_1}{f_s}\right)^2 = \frac{1}{h_s^2}$$

Donde:

- ρ : Factor de desintonía
 X_L : Reactancia inductiva
 X_C : Reactancia capacitiva
 f_1 : Frecuencia base
 f_s : Frecuencia de sintonización
 h_s : Orden de sintonización

La tensión de operación del condensador y la potencia efectiva vienen dada por la siguiente igualdad:

$$V_{SC} = \frac{V_{RED}}{1-\rho}$$

V_{sc} : Tensión de operación del condensador

$$Q_{efectivo} = \frac{Q_n}{(1-\rho)} \left(\frac{V_{RED}}{V_n}\right)^2$$

- $Q_{efectivo}$: Potencia reactiva efectiva
 Q_n : Potencia reactiva nominal
 V_n : Tensión nominal

Para el cálculo de la capacitancia e inductancia se tiene las siguientes formulas:

$$C = \frac{Q_{efectivo} (1-\rho)}{2\pi f V_{RED}^2}$$

C: Capacitancia (μF)

$$L = \frac{\rho}{(2\pi f)^2 C}$$

L: Inductancia (mH)

2.2.8 Filtro pasivo sintonizado simple

A diferencia de los bancos de condensadores desintonizados, estos equipos se sintonizan a una frecuencia 3%-10% por debajo del armónico que se quiere filtrar, por estar cercano al armónico se le llama filtro sintonizados, donde a la menor impedancia atrae al armónico y lo disipa en forma de calor, a baja frecuencia entrega potencia reactiva y a altas frecuencias se comporta como un inductor, otra diferencia son las características del condensador e inductor que tienen que tener una linealidad alta.

Características de los filtros pasivos:

- Se utilizan para el control de frecuencias de bajo orden como el 5to, 7mo, 11vo, 13vo, en ordenes armónicos superiores su efecto no es perceptible.
- Está compuesto de un circuito RLC sintonizado a la frecuencia que desea atenuarse.
- Por lo general se conectan en paralelo con la carga a compensar.
- Debe de operar con la carga por encima del 80% de la carga total.
- Son propensos a la desintonía, se pueden acercar al orden armónico y generar resonancia.

2.2.9 Filtro activos

Esta solución está basada en electrónica de potencia, orientada al uso en cargas dinámicas donde el factor de potencia y la potencia reactiva están constantemente variando y se requiere la mitigación de armónicos, esta solución está compuesta de elementos electrónicos mas no de elementos resistivos ni capacitivos, por lo cual no se generará resonancia si se usa solamente este sistema. Continuamente se viene mejorando las deficiencias de esta solución, y el costo elevado que mantenían en sus inicios, se está reduciendo a medida que se mejoran y perfecciona este método con las nuevas tecnologías.



Funciones de los filtros activos:

- Reducción de armónicos de corriente.
- Reducción de corrientes por el neutro.
- Reducción de armónicos de tensión.
- Corrección del factor de potencia.
- Balance de corriente y tensión en las diferentes fases.
- Regulación de tensión y control de flicker.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

Los equipos que se usaron para el desarrollo del proyecto de investigación, tanto para el manejo las mediciones y el procesamiento de datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.1: Materiales y equipos

Materiales y equipos		
Descripción	Unidad	Cantidad
Multímetro Digital	Equipo	1
Analizador de redes	Equipo	1
Relé de protección	Equipo	1
Revelador de tensión	Und	1
Cables de control	m	10
Laptop	Equipos	1
Maleta de Herramientas	Jgo	1

Elaborado por el equipo de trabajo

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Ámbito

La investigación se encuentra dentro de las instalaciones de Cal & Cemento Sur S.A.

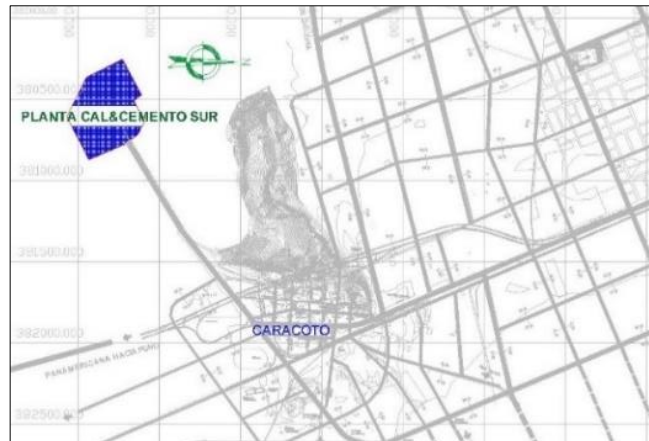


Figura N° 3.1: Ubicación del proyecto

Elaborado por el equipo de trabajo

3.2.2 Población y selección de la muestra

a) Población

Constituido por los datos de los parámetros eléctricos de los equipos de la subestación, líneas de distribución y equipos eléctricos de planta.

b) Muestra

Son los datos en la barra principal de 22.9 kV y celdas de entrada y salida donde se realizó el análisis del sistema de compensación, ubicado en la sala eléctrica 360.

3.2.3 Nivel, tipo y diseño de estudio

a) Nivel de investigación

Es predictivo, porque se analizó el sistema de compensación reactiva necesario para la corrección del factor de potencia, posteriormente se seleccionó los equipos para su implementación.

b) Tipo de investigación

El tipo de investigación es experimental, por como se muestra a continuación:

- Según la intervención del investigador: Experimental.
- Según la planificación de las medidas: Prospectivo.
- Según el número de mediciones de las variables de estudio: Transversal.

- Según el número de variables analíticas: Descriptivo.

La investigación es de enfoque cuantitativo, experimental con intervención porque se aplicará el conocimiento científico existente para analizar las variables involucradas en el proyecto y alcanzar nuestros objetivos.

c) Diseño y esquema de la investigación

El diseño de la investigación es cuasi experimental con pre análisis y post análisis, en vista que se realizó una pre simulación con los datos existentes, luego se dimensiono y simulo el sistema de compensación en el software para el análisis correspondiente, con lo cual se estará usando el método científico para los diferentes cálculos y las simulaciones que usa el software.

$$G \quad : \quad O1 \quad X \quad O2$$

Donde:

G : Barra 22.9 kV.

X : Sistema de compensación reactiva.

O1 : Factor de potencia inicial.

O2 : Factor de potencia final.

3.3 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.

Métodos, técnicas e instrumentos utilizados son:

Tabla N° 3.2: Métodos, técnicas e instrumentos

Método	Técnica	Instrumentos
Síntesis bibliográfica	Sistematización bibliográfica	Fichas de trabajo bibliográfico
Recolección de datos	Sistematización de datos	Registro de mediciones
Análisis de datos	Uso de Software de análisis y diseño	ETAP

Elaborado por el equipo de trabajo



3.4 PROCEDIMIENTO

3.4.1 Recolección de datos

Se realizó mediante el método de síntesis bibliográfica y de datos, luego se recolecto de los siguientes datos:

- Datos de placa recopilados en campo.
- Metrado de cables de energía principales.
- Planos de equipos eléctricos como unifilares, conexiones.
- Datos de placa de variadores de velocidad tomados en campo.
- Registro de mediciones tomado de los medidores de energía.
- Registro de mediciones tomados con el analizador de redes.

3.4.2 Equipos utilizados para medición

Para la medición de armónicos se utilizó el analizador de redes trifásico según las siguientes características:

- Marca : AEMC
- Modelo : 3945-B
- Tipo : Trifásico

Para los datos de mediciones de factor de potencia, potencia consumida, tensión y corrientes se usaron los registros de los siguientes equipos de monitoreo de planta:

- Marca : ABB
- Modelo : RET630
- Tipo : Relé
- Marca : ABB
- Modelo : REG630
- Tipo : Relé

Las figuras de las mediciones y equipos usados se encuentran en el Anexo 4.

3.4.3 Procesamiento de datos

Se ingresaron los datos de los registros al Software ETAP 19, se simuló el sistema con los equipos existentes, se diseñó el sistema de compensación reactiva más óptimo y se volvió a simular el sistema con la compensación reactiva, se comparó los datos obtenidos con los datos iniciales y se seleccionó los equipos y materiales más adecuados para el proyecto.

3.4.4 Diagrama de flujo del proceso

En la siguiente figura, se distingue el diagrama de flujo del proceso para la realización del proyecto.

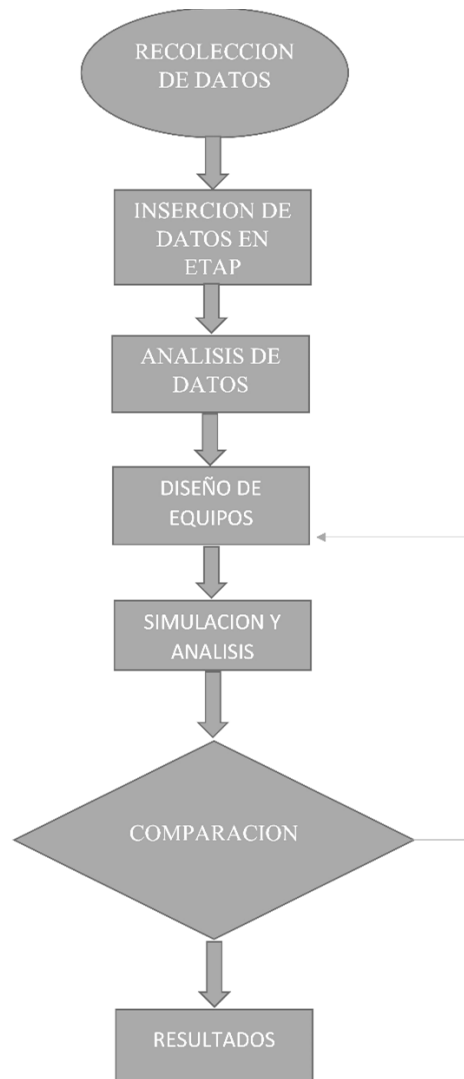


Figura N° 3.2: Diagrama de flujo del proyecto

Elaborado por el equipo de trabajo

3.5 PROCESAMIENTO DE DATOS

3.5.1 Datos utilizados

Tabla N° 3.3: Parámetros eléctricos de la red equivalente – Alimentador Juliaca

Red equivalente	Voltaje	Sk'' (3f)	Ik'' (3f)	X/R	Sk'' (1f)	X/R	Ik'' (1f)
Juliaca 60KV	(%V)	(MVA)	(KA)		(MVA)		(KA)
Avenida Máxima	102	220.54	2.12	26.04	97.34	26.04	2.81
Avenida Mínima	102	221.36	2.13	26.03	97.34	26.03	2.81

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.4: Datos de placa de transformadores de potencia de 02 devanados

Sub-Estación	Potencia nominal (KVA)	Tensión nominal primario (KV)	Tensión nominal secundario (KV)	Tensión de cortocircuito Vcc(%)	Tensión de cortocircuito (KVA)	Grupo de conexión
TR Línea 1	5000	22,9±2x2.5%	2,40	5,40	5000	Ynd11
TR Molienda de cal	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,83	5000	Dyn5
TR Pet Coke	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,41	5000	Dyn5
TR Horno 1	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,58	5000	Dyn5
TR Horno 2	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,47	5000	Dyn5
TR Horno 3	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,55	5000	Dyn5
TR S.E. 410	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,66	5000	Dyn5
TR S.E. 420	2000	22,9±2x2.5%	0,48	7,67	5000	Dyn5
TR Grupo electrógeno	2000	22,9±2x2.5%	0,46	6,15	5000	Dyn5

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.5: Datos de placa de transformadores de potencia de 03 devanados

Sub- Estación	Potencia Nominal (MVA)	Tensión Nominal (KV)	Tensión de Cortocircuito Vcc (%)	Tensión de Cortocircuito REF (MVA)	Grupo de Conexión
TR Caracoto	16/20	60.00±10x1% (P – Primario)	9.7% (P-S)	15	Ynyn0d5
	14/18.75	22.90 (S– Secundario)	4.3% (S-T)	4	
	4/5	10.00 (T – Terciario)	1.2% (T-P)	4	

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.6: Datos de manuales de fuentes armónicas de planta

Fuente	Nivel (V)	Ubicación	Tecnología	Descripción de la carga
ALLEN BRADLEY PF7000	4160	Sala 360 (Línea 4)	18 Pulsos	4150 Motor Ventilador
VFD ABB (ACS800)	460	FP410 (Línea 4)	6 Pulsos	Tablero de variadores
VFD ABB (ACS800)	460	FP420 (Línea 4)	6 Pulsos	4790.3 Motor molino de carbón
VFD ABB (ACS800)	460	FP420 (Línea 4)	6 Pulsos	4170 Motor ventilador molino de carbón
VFD ABB (ACS800)	460	FP420 (Línea 4)	6 Pulsos	4525 Chancadora Mclanahan
VFD ABB (ACS800)	460	FP420 (Línea 4)	6 Pulsos	4525.1 Motor Chan. martillos
VFD SINAMICS S120	460	FP310 (Línea 3)	6 Pulsos	Tablero de variadores MCC312



(continuación...)

VFD SINAMICS S120	460	FP320 (Línea 3)	6 Pulsos	Tablero de variadores MCC322
VFD SINAMICS S120	460	FP330 (Línea 3)	6 Pulsos	Tablero de variadores MCC332
VFD ABB (ACS800)	460	FP350 (Línea 3)	6 Pulsos	3757 motor soplador
VFD SANTERNO	460	FP350 (Línea 3)	6 Pulsos	3741 motor Molino Raymond
Variadores Varios	2400	Barra 1 y 2 (Línea 1)	6 Pulsos	Carga concentrada

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.7: Parámetros eléctricos de perfil de armónicos - Datos de planta

Orden de Armónica	VFD Sinamics S120	VFD ABB	VFD Santerno	PF700 Allen Bradley	Planta 1
5	23.52	42	2.6	2.06	19.1
7	6.08	14.3	1.5	1.32	13.1
11	4.57	7.9	3.7	1.32	7.2
13	4.2	3.2	3.7	1.03	5.6
17	1.8	3.7	0.5	0.19	3.3
19	1.37	2.3	0.3	0.33	2.4
23	0.75	2.3	0.1	0.47	1.2
25	0.56	1.4	0.5	0.28	0.8
29	0.49	-	-	0.05	0.2
31	0.54	-	-	0.14	0.2
35	0.4	-	-	-	0.4
37	-	-	-	-	0.5
41	-	-	-	-	0.5
43	-	-	-	-	0.5
47	-	-	-	-	0.4

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.8: Parámetros eléctricos de filtros de armónicos – Datos de planta

Ubicación	Feeder Panels	Pasos	Capacitor x	Capacitor x	Inductor (mH)
			Paso (Delta/480V) KVAR-3Ph	Paso (Delta/480V) (uF-1Ph)	
Horno 1	FP310	Paso 1	30	115.23	1.425
Horno 1	FP310	Paso 2 al 9	60	230.46	0.713
Horno 2	FP320	Paso 1	30	115.23	1.425
Horno 2	FP320	Paso 2 al 9	60	230.46	0.713
Horno 3	FP330	Paso 1	30	115.23	1.425
Horno 3	FP330	Paso 2 al 9	60	230.46	0.713
Pet Coke	FP350	Paso 1	30	115.23	1.425
Pet Coke	FP350	Paso 2 al 11	60	230.46	0.713
Molienda Cal	FP360	Paso 1	20	76.83	2.16
Molienda Cal	FP360	Paso 2 al 6	40	153.63	1.07
Sala 410	FP410	Paso 1, 2	25.1	96.3	1.421
Sala 410	FP410	Paso 3 al 9	50.2	192.6	0.71
Sala 420	FP420	Paso 1, 2	25.1	96.3	1.421
Sala 420	FP420	Paso 3 al 6	50.2	192.6	0.71

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.9: Cuadro de cargas de planta – Datos de medición de Relés

Ubicación	Circuito	KW	FP (%)	KW	FP (%)	KW	FP (%)
		(Max.)	(Min.)	(Max.)	(Min.)	(Etap)	(Etap)
Línea 1 / AD300	Barra 1 y 2	1137.692	95.989	681.228	95.82	892	96.3
Línea 3 / AD303	Horno 1	1254.603	93.404	549.887	88.155	1176	95
Línea 3 / AD304	Horno 2	1133.709	91.704	529.307	93.58	1100	94.9
Línea 3 / AD305	Horno 3	885.957	94.4	538.615	93.5	866	96.7

(continuación...)

Línea 4 / AD306	Sala 410	454.031	99.027	184.013	92.673	425	99.9
Línea 3 / AD307	Pet coke	653	95	297.869	92.626	568	98.3
Línea 3 / AD308	Planta De Carbón	199.581	96.664	68.78	88.561	132	96.7
Línea 4 / AD309	Sala 420	657.375	95.802	305.343	97.791	573	96.6
Línea 4 / AD311	4150 ventilador	1383.19	71.666	797.193	56.213	947	59.3

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.10: Perfil de tensión en la barra de 22.9 kV – Datos de medición de Relés

Ubicación	Uab (Máx.)	Ubc (Máx.)	Uca (Máx.)	Uab (Min.)	Ubc (Min.)	Uca (Min.)	Uab (Prom.)	Ubc (Prom.)	Uca (Prom.)
AD302	23.2	23.3	23.2	22.4	22.5	22.4	22.8	22.9	22.8
AD302	22.7	22.7	22.6	22.3	22.4	22.2	22.5	22.6	22.5
AD302	23.1	23.2	23.1	22.6	22.7	22.5	22.8	22.9	22.8

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.11: Límites de perfil de armónicas para 22.9 kV – Datos de planta

Ubicación	Circuito	KV	S (KVA*)	ISC (A)	IL (A)	ISC/IL	THD- I (%)	THD-V (%)
AD300	Línea 1	23	1054	2280	26.57	85.798	12	5
AD302	Celda Principal	23	5869	2280	148	15.408	5	5
AD303	Línea 3 - Horno 1	23	1200	2280	30.26	75.359	12	5
AD304	Línea 3 - Horno 2	23	1279	2280	32.25	70.705	12	5



(continuación...)

AD305	Línea 3 - Horno 3	23	945	2280	23.83	95.694	12	5
AD306	Línea 4 - Sala 410	23	446	2280	11.24	202.76	15	5
AD307	Línea 3 - Pet Coke	23	722	2280	18.2	125.25	15	5
AD308	Línea 3 - Mol Cal	23	243	2280	6.13	372.15	15	5
AD309	Línea 4 - Sala 420	23	606	2280	15.28	149.23	15	5
AD310	Celda Generación	23	680	2280	17.14	132.99	15	5
AD311	Línea 4 - Vfd4150	23	1534	2280	38.68	58.951	12	5

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 3.12: Limites de perfil de armónicas para 460V – Datos de planta

Ubicación	Circuito	KV	S (KVA*)	ISC (A)	IL (A)	ISC/IL	THD-I (%)	THD-V (%)
FP310	Horno 1	0.5	1200	27010	1506.2	17.93	5	8
FP320	Horno 2	0.5	1279	27880	1605.3	17.37	5	8
FP330	Horno 3	0.5	945	27680	1186.1	23.34	8	8
FP350	Pet Coke	0.5	722	30260	906.22	33.39	8	8
FP360	Mol. Cal	0.5	243	25520	305	83.67	12	8
FP410	Sala 410	0.5	446	27940	559.8	49.91	8	8
FP420	Sala 420	0.5	606	28400	760.62	37.34	8	8

Elaborado por el equipo de trabajo

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA CON LA NUEVA LÍNEA 4.

Para el análisis del factor de potencia y sus parámetros que intervienen, se realizó la simulación del flujo de carga en el Software ETAP 19, sin filtro y con filtro como se muestra en los siguientes casos:

Flujo de carga sin filtro LC en 22.9 kV

- Caso 0: Sin Línea 4 (Operación Línea 1 y Línea 3 “Hornos 1/2/3”).
(Anexo 2 - Figura A2.1.)
- Caso 1: Con Línea 4 (Operación Línea 1 y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.2)
- Caso 2: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.3)
- Caso 3: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1/2” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.4)
- Caso 4: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1/2/3” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.5)

Tabla N° 4.1: Resultados de potencia reactiva y factor de potencia sin filtro LC

Parámetros	Unidad	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Potencia Aparente	kVA	4908	3294	5197	6310	7230
Potencia Activa	kW	4724	2835	4716	5777	6683
CosØ (fdp inicial)	-	0.96	0.86	0.9	0.91	0.92
CosØ (fdp final)	-	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
K	tabla	0.041	0.343	0.234	0.205	0.175
Q requerida 3f	kVAR	193.68	972.41	1103.54	1184.29	1169.53



(continuación...)

Banco elegido	kVAR	250	1020	1020	1020	1020
---------------	------	-----	------	------	------	------

Elaborado por el equipo de trabajo

De la tabla 4.1 se calculó la potencia reactiva necesaria para elevar el fdp a 0.97 del sistema en 5 escenarios posibles, que a continuación se analiza:

Caso 0: Se observa que sin el compensador tiene un fdp aceptable, por lo que no necesita corregir el fdp.

Caso 1: Se observa que sin el compensador tiene un bajo fdp de 0.86, se necesita de reactivos capacitivos de 972.41 kVAR, para poder corregir el fdp a 0.97.

Caso 2: Se observa que sin el compensador tiene un bajo fdp de 0.9, se necesita de reactivos capacitivos de 1103.54 kVAR, para alcanzar un fdp de 0.97.

Caso 3: Se observa que sin el compensador tiene un bajo fdp de 0.91, se necesita de reactivos capacitivos de 1184.29 kVAR, para alcanzar un fdp de 0.97.

Caso 4: Se observa que sin el compensador tiene un bajo fdp de 0.92, se necesita de reactivos capacitivos de 1169.53 kVAR, para alcanzar un fdp de 0.97.

De acuerdo a estos resultados obtenidos, se seleccionó un compensador de 1020 kVAR., para corregir el fdp en todos los casos a excepción del caso 0, para la selección se eligió un compensador con el valor más cercano comercial y cercano a los resultados obtenidos, con este valor seleccionado de 1020kVAR, en la siguiente sección se analizó y diseñó el sistema de compensación resultando en un filtro de rechazo desintonizado de 1080kVAR, con este equipo se volvió a calcular los parámetros para la corrección del fdp de acuerdo a los siguientes casos:

Flujo de Carga con Filtro LC en 22.9 kV

- Caso 0: Sin Línea 4 (Operación Línea 1 y Línea 3 “Hornos 1/2/3”).

(Anexo 2 - Figura A2.6)

- Caso 1: Con Línea 4 (Operación Línea 1 y Línea 4).
(Anexo - Figura A2.7)
- Caso 2: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.8)
- Caso 3: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1/2” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.9)
- Caso 4: Con Línea 4 (Operación Línea 1, Línea 3 “Hornos 1/2/3” y Línea 4).
(Anexo 2 - Figura A2.10)

Tabla N° 4.2: Resultados de potencia reactiva y factor de potencia con filtro LC

Parámetros	Unidad	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Potencia Aparente	kVA	4802	2895	4840	5957	6885
Potencia Activa	kW	4797	2835	4716	5777	6683
CosØ (obtenido)	-	0.99	0.98	0.975	0.97	0.97
Banco Desintonizado	kVAR	1080	1080	1080	11080	1080

Elaborado por el equipo de trabajo

De la tabla 4.2 se muestra los resultados del flujo de potencia con el filtro desintonizado de 1080 kVAR, a continuación, se evalúa cada caso:

Caso 0: Se observa que, con un compensador de 1080 kVAR, el fdp se eleva a 0.99 en cual está cercano a la unidad, por lo cual provocaría el efecto de resonancia.

Caso 1: Se observa que, con un compensador de 1080kVAR, el fdp se eleva a 0.98, el cual sobrepasa ligeramente el valor requerido, pero es cercano y aceptable.

Caso 2: Se observa que, con un compensador de 1080kVAR, el fdp se eleva a 0.975, el cual sobrepasa ligeramente el valor requerido, pero es cercano y aceptable.

Caso 3: Se observa que, con un compensador de 1080kVAR, el fdp se eleva a 0.97, iguala al valor requerido, este valor obtenido es óptimo.

Caso 4: Se observa que, con un compensador de 1080kVAR, el fdp se eleva a 0.97, iguala al valor requerido, este valor obtenido es óptimo.

De acuerdo a estos resultados obtenidos, se seleccionó un compensador de 1020 kVAR., pero en la siguiente sección se muestra el cálculo del compensador con sus características correspondientes los cuales se usaron en esta sección para el cálculo del fdp, los resultados muestran que el fdp se incrementa por encima de 0.97, los cuales son óptimos para la corrección, también se observa que en el caso 0 el fdp se aproxima a la unidad, lo cual indica que en dicho caso no es necesaria una compensación adicional.

4.2 RESULTADO DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR EL NIVEL DE ARMÓNICOS Y RESONANCIA DEL SISTEMA

A continuación, se muestran los resultados del flujo de armónicos de corriente y tensión en cada celda de MT.

Tabla N° 4.3: Armónicos de corriente sin filtro LC

Tag de Celda	Ubicación	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Límites THDi/IEEE 519-214
AD-300	Línea 1	23.75	23.75	23.93	23.74	23.58	< 12
AD-302	Llegada	7.91	6.17	4.54	4.69	4.62	< 5
AD-303	Línea 3 - Horno 1	9.6	-	11.44	10.07	10.36	< 12
AD-304	Línea 3 - Horno 2	9.32	-	-	10.01	9.57	< 12
AD-305	Línea 3 - Horno 3	8.07	-	-	-	8.15	< 12
AD-306	Línea 4 - Sala 410	-	11.64	13.61	15.77	17.07	< 15
AD-307	Línea 3 - Petcoke	14.33	-	10.09	11.6	12.5	< 15
AD-308	Línea 3 - Molienda	8.28	-	5.16	6.37	7.17	< 15
AD-309	Línea 4 - Sala 420	-	11.54	12.58	13.42	13.85	< 15
AD-311	Transformador - Variador	-	4.24	4.13	3.96	3.82	< 12

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 4.4: Armónicos de tensión sin filtro LC

Tensión	Ubicación	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	THDv/IEEE 519-214
22.9	Barra	4.22	2.73	3.04	3.45	3.63	< 5
2.4	Barra Línea 1	5.69	4.14	4.5	4.85	4.98	< 5
0.46	Línea 3 - Horno 1 (FP310)	6.48	-	5.7	5.9	5.93	< 8
AD-304	Línea 3 - Horno 2 (FP320)	6.41	-	-	5.81	5.95	< 8
AD-305	Línea 3 - Horno 3 (FP330)	5.42	-	-	-	5.04	< 8
AD-307	Línea 3 - Petcoke (FP350)	2.43	-	2.04	2.12	2.14	< 8
AD-308	Línea 3 - Molienda (FP360)	3.92	-	2.82	3.2	3.37	< 8
AD-306	Línea 4 - Sala 410 (FP410)	-	1.94	2.08	2.19	2.21	< 8
AD-309	Línea 4 - Sala 420 (FP20)	-	2.87	3.04	3.11	3.08	< 8

Elaborado por el equipo de trabajo

A continuación, se evalúa el nivel de armónicos, sin el sistema de compensación según los casos planteados:

Caso 0: Se observa que, sin el compensador, en la celda AD300 correspondiente a la línea 1 se supera fuertemente los límites de armónicos de corriente; y en la celda AD302 correspondiente a la llegada, se supera ligeramente los límites de armónicos de corriente y de tensión, y en el resto de puntos los armónicos se mantienen dentro de los límites permitidos; de las figuras del anexo 3 se ve que el armónico predominante es el de orden 5.

Caso 1: Se observa que, sin el compensador, en la celda AD300 correspondiente a la línea 1 se supera fuertemente los límites de armónicos de corriente; y en la celda



AD302 correspondiente a la llegada, se supera ligeramente los límites de armónicos de corriente, y en el resto de puntos los armónicos se mantienen dentro de los límites permitidos; de las figuras del anexo 3 se ve que los armónicos predominantes son del orden 5 y orden 7.

Caso 2: Se observa que, sin el compensador, en la celda AD300 correspondiente a la línea 1 se supera fuertemente los límites de armónicos de corriente; en el resto de puntos los armónicos se mantienen dentro de los límites permitidos; de los gráficos de impedancia del anexo 3 se ve que los armónicos predominantes son del orden 5 y orden 7.

Caso 3: Se observa que, sin el compensador, en la celda AD300 correspondiente a la línea 1 se supera fuertemente los límites de armónicos de corriente; en el resto de puntos los armónicos se mantienen dentro de los límites permitidos; de los gráficos de impedancia del anexo 3 se ve que los armónicos predominantes son del orden 5 y orden 7.

Caso 4: Se observa que, sin el compensador, en la celda AD300 correspondiente a la línea 1 se supera fuertemente los límites de armónicos de corriente; en el resto de puntos los armónicos se mantienen dentro de los límites permitidos; de los gráficos de impedancia del anexo 3 se ve que los armónicos predominantes son del orden 5 y orden 7.

Según los resultados obtenidos se observa la existencia de armónicos de tensión y de corriente, la mayor cantidad de armónicos de corriente se presenta en la celda AD300 correspondiente a la línea 1, los niveles de THDi sobrepasan los límites permitidos, y según los gráficos presentados en los Anexos 3 correspondientes a las simulaciones de armónicos de distorsión de tensión total en la barra de 22.9 kV y distorsión de corriente en la celda AD302 donde se observan las distorsiones totales, se observa que el armónico

más predominante es el de orden 5, que concuerda con las mediciones realizadas mostradas en el Anexo 4, donde los armónicos predominantes son el armónico de orden 5 y el de orden 7; en el Anexo 3 los gráficos de impedancia vs frecuencia se observa que en el armónico de orden 5 se presenta casos de resonancia, por lo cual se seleccionó como equipo de compensación reactiva a un filtro desintonizado, para lo cual se calculó de la siguiente manera:

Determinación del factor de desintonía

- Armónico predominante: 5
- Factor de calidad a frecuencia de sintonía: 80
- Potencia reactiva necesaria: 1020 kVAR
- Factor de desintonía: $\rho = 4.2$

Determinación de la potencia reactiva del filtro

$$Q_{\text{filtro}} = \frac{Q_c \cdot \rho^2}{\rho^2 - 1} = 1081 \text{ kVAR}$$

$$Q_{\text{filtro}} = 1080 \text{ kVAR}$$

Determinación de la reactancia del capacitor:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = 514.12 \text{ Ohm}$$

Determinación de la capacitancia por fase:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = 5.159 \mu\text{F}$$

Determinación de la reactancia del inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{\rho^2} = 29.145 \text{ ohm}$$

Determinación de la inductancia por fase

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = 77.31 \text{ mH}$$

Con estos datos calculados se procedió a ingresar al Software ETAP 19, para su simulación con el sistema de compensación reactiva mediante filtro desintonizado o filtro de rechazo y se obtuvo los siguientes resultados para cada caso:

Tabla N° 4.5: Armónicos de corriente con filtro LC

Tag de Celda	Ubicación	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Límites THDi/IEEE 519-214
AD-300	Línea 1	24.02	23.46	23.99	23.94	23.86	< 12
AD-302	Llegada	14.09	13.28	7.72	7.66	7.3	< 5
AD-303	Línea 3-Horno 1	8.34	-	10.93	10.07	9.76	< 12
AD-304	Línea 3-Horno 2	7.07	-	-	8.74	8.35	< 12
AD-305	Línea 3-Horno 3	5.44	-	-	-	6.54	< 12
AD-306	Línea 4-Sala 410	-	14.84	16.62	19.87	21.55	< 15
AD-307	Línea 3-Petcoke	19.83	-	11.76	14	15.19	< 15
AD-308	Línea 3-Molienda	14.03	-	7.68	9.45	10.48	< 15
AD-309	Línea 4-Sala 420	-	11.35	13.1	14.5	15.15	< 15
AD-311	Transformador - Variador	-	4.02	3.88	3.69	3.59	< 12

Elaborado por el equipo de trabajo

Tabla N° 4.6: Armónicos de tensión con filtro LC

Tensión	Ubicación	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Límites THDv/IEEE 519-214
22.9	Barra	5.05	2.87	2.89	3.56	3.89	< 5
2.4	Barra Línea 1	6.31	4.12	4.24	4.85	5.15	< 5
0.46	Línea 3-Horno 1 (FP310)	6.82	-	5.48	5.88	6.03	< 8
AD-304	Línea 3-Horno 2 (FP320)	6.77	-	-	5.73	5.96	< 8
AD-305	Línea 3-Horno 3 (FP330)	5.82	-	-	-	5.04	< 8
AD-307	Línea 3-Petcoke (FP350)	3.05	-	2.07	2.34	2.47	< 8



(continuación...)

AD-308	Línea 3-Molienda (FP360)	4.66	-	2.66	3.28	3.59	< 8
AD-306	Línea 4-Sala 410 (FP410)	-	2.04	1.94	2.19	2.33	< 8
AD-309	Línea 4-Sala 420 (FP20)	-	2.95	2.79	3.02	3.11	< 8

Elaborado por el equipo de trabajo

A continuación, se evalúa el nivel de armónicos con el sistema de compensación, según los casos planteados:

Caso 0: Se observa que, con el compensador, en las celdas AD300, AD302 y AD307, se elevaron los niveles de armónicos de corriente, superando los límites permitidos y los armónicos de tensión se mantuvieron en el mismo valor; en los gráficos de impedancia del anexo 3, se ve que el armónico más predominante es el de orden 5.

Caso 1: Se observa que, con el compensador, en la celda AD302 correspondiente a la celda de llegada se incrementa notablemente los niveles de armónicos de corriente y supera los límites permitidos, se notan ligeros incrementos en las demás celdas; en los gráficos de impedancia del anexo 3, se ve que el armónico más predominante es de orden 5.

Caso 2: Se observa que, con el compensador, en la celda AD302 correspondiente a la celda de llegada se incrementa notablemente los niveles de armónicos de corriente y supera los límites permitidos, se notan ligeros incrementos en las demás celdas sin superar los límites permitidos; asimismo se encontró que el 5to armónico es el predominante.

Caso 3: Se observa que, con el compensador, en la celda AD302 correspondiente a la celda de llegada y en la celda AD306 se incrementan notablemente los niveles de armónicos de corriente y superan los límites permitidos, se notan ligeros incrementos en



las demás celdas sin superar los límites permitidos; asimismo se encontró que el armónico predominante es el de orden 5.

Caso 4: Se observa que, con el compensador, en la celda AD302 correspondiente a la celda de llegada y en las celdas AD306, AD307 Y AD309 se incrementan notablemente los niveles de armónicos de corriente superando los límites permitidos, se notan ligeros incrementos en las demás celdas sin superar los límites permitidos; en los gráficos de impedancia del anexo 3, se ve que el armónico más predominante es de orden 5.

Del análisis realizado se observa que en un sistema con compensación se incrementa los niveles de armónicos de corriente en la celda AD302, esto es debido a la instalación de los capacitores y los cuales atraen a los armónicos y generan incrementos de armónicos, para lo cual es necesario que se realice filtrado de armónicos en el lado de baja tensión.

Según las tablas 4.5 y 4.6 obtenidas de la simulación se observa que los niveles de armónicos se mantienen en el sistema, lo cual es propio de un filtro de rechazo desintonizado cuya finalidad no es eliminar los armónicos, sino proteger los condensadores de la resonancia generada por los armónicos de orden 5.

4.3 DISCUSIÓN

4.3.1 Discusión del objetivo específico 1

De acuerdo a los resultados obtenidos, se necesita una compensación de 1020 kVAR para elevar el factor de potencia a 0.97, y según los resultados del análisis de armónicos se seleccionó un filtro de rechazo desintonizado con una capacidad de 1080 kVAR, y según (Ticona Coila, 2017) en su investigación concluye que el incremento de la potencia reactiva capacitiva en 22.9 kV, mejora el factor de potencia, con lo que se



confirma que aparte de las mejoras en el factor de potencia, también reduce las pérdidas de energía y se reducen los costos por energía reactiva.

4.3.2 Discusión del objetivo específico 2

Según las simulaciones realizadas y mediciones tomadas se encontró la presencia de armónicos y efectos de resonancia, el armónico con más presencia es el de 5to orden, por lo que se diseñó un filtro de rechazo para este armónico y proteger el banco de condensadores de los armónicos y según (Lopez Mamani & Cruz Flores, 2020), en su investigación encontró que en las barras de 22.9 kV de sus objetivos de estudio, encontró presencia de armónicos del 5to orden, con un THD de 2.47, por lo que se considera que esta dentro de los rangos permisibles, a comparación de nuestro estudio donde se encontraron cantidades superiores de armónicos, y según la comparación entre un sistema de transmisión y un sistema de distribución industrial se encontró, que en un sistema eléctrico industrial se encuentra más presencia de armónicos que en un sistema de transmisión, como es en nuestro caso.

4.3.3 Contrastación de hipótesis

- Contrastación de hipótesis 1:

1) Planteamiento de hipótesis

Ho: No es posible corregir el factor de potencia con la nueva Línea 4.

H1: Es posible corregir el factor de potencia con la nueva Línea 4.

2) Prueba de hipótesis

Se utilizó el método empírico de acuerdo a los resultados obtenidos y según la tabla 4.1 y 4.2, se observa que con la implementación de un filtro de rechazo desintonizado de 1080 kVAR el factor de potencia se eleva por encima de 0.97



3) Toma de decisiones

Se aprueba la hipótesis alterna donde se indica que es posible corregir el factor de potencia a 0.97 con la instalación de un filtro de rechazo desintonizado de 1080 kVAR

- Contrastación de hipótesis 2:

1) Planteamiento de hipótesis

Ho: No es posible evaluar el nivel de armónicos y resonancia del sistema.

H1: Es posible evaluar el nivel de armónicos y resonancia del sistema.

2) Prueba de hipótesis

Se utilizó el método empírico de acuerdo a los resultados obtenidos y según la tabla 4.3 y 4.4, se evaluó la presencia de armónicos de tensión y corriente respectivamente y en los gráficos de impedancia vs frecuencia del Anexo 3 se evaluó la presencia de resonancia en el orden armónico 5.

3) Toma de decisiones

Se aprueba la hipótesis alterna donde se indica que es posible evaluar el nivel de armónico y resonancia, pues estos hacen presencia por la existencia de variadores de velocidad y bancos de condensadores.



V. CONCLUSIONES

1. Con la implementación del filtro de rechazo desintonizado de 1080 kVAR conexión delta en 22.9kV nos permite elevar el factor de potencia del motor de accionamiento del ventilador, esta corrección al estar conectada a la barra principal también corrige el fdp del sistema en general, de los cinco casos posibles planteados y de los resultados se indica que en el caso cero, no es necesario una corrección del fdp, pues produciría efectos de resonancia y un efecto capacitivo en el sistema, por lo que el filtro desintonizado no deberá ingresar en operación cuando el sistema esté operando solo la línea 1 y la línea 3 de producción, para los demás casos donde la línea 4 si este en operación, el sistema de compensación debe estar en operación para corregir el factor de potencia.
2. Se evaluó el nivel de armónicos y resonancia para el sistema de compensación de energía reactiva en la barra principal de media tensión, donde se identificó la presencia de armónicos de quinto y séptimo orden predominantes, tanto en la distorsión armónica de tensión y corriente, se observó que con la implementación del filtro de rechazo desintonizado L-C, se protege los condensadores y se evita el efecto de resonancia, también de los resultados se ve un incremento en los niveles de distorsión armónica de corriente, esto se debe a los armónicos generados por la línea 1 pues estos afectan a todo el sistema.



VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un análisis y evaluación de compensación reactiva, para en los circuitos de la celda AD301 que corresponde a la Línea 1 donde se supera los niveles de distorsión armónica permitidos, que al ser una línea antigua están instalados bancos de condensadores simples y variadores de velocidad, mas no existe un sistema de filtrado de armónicos ya sean filtros pasivos o activos, por lo cual se debe realizar una investigación de análisis y diseño de sistemas de mitigación de armónicos para que no afecten al resto del sistema.
2. En caso de existir modificaciones en la capacidad o nuevas instalaciones de equipos de compensación reactiva, se recomienda realizar un nuevo estudio de análisis de compensación reactiva y armónicos pues la implantación de nuevos equipos ya sean variadores incrementara la distorsión armónica los cuales podrían afectar al sistema y equipos existentes.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (2011). *Corrección de factor de potencia y filtrado de armónicos en instalaciones eléctricas*. (A. B. Boveri, Ed.) Obtenido de <https://bit.ly/3lLwLBa>
- Areatecnología. (s.f.). *Areatecnología*. Obtenido de <https://www.areatecnologia.com>
- Durán Neira, A. (2021). *Implementación de un sistema de compensación reactiva en una planta de generación eólica*. [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio digital de tesis y trabajos de investigación . Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/15460>
- Edminister, J. (1965). *Circuitos Electricos*. Akron, Ohio, EEUU: Mc Graw Hill.
- Fornieles, F. (2022). *Resonancia eléctrica, batería de condensadores y armónicos*. Obtenido de <https://bit.ly/3zdYgM3>
- Heredia Caballero, R. (2001). *Proyecto de accionamiento y equipo eléctrico de una fábrica de bidones*. Universitat Rovira, Ingeniería Electrónica Eléctrica. [Tesis de pregrado, Universitat Rovira]. Repositorio digital de tesis y trabajos de investigación. Obtenido de <https://bit.ly/3yW2ebJ>
- IEEE, S. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Lopez Mamani, F., & Cruz Flores, J. S. (2020). *Determinación de equipos para compensación reactiva en media tensión 22.9 KV para las subestaciones eléctricas de transformación Puno, Ilave y Pomata, utilizando software para simulación y proyección a futuro*. Puno.
- Oyanguren Ramírez, F. J. (2020). *Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva*. Lima, Callao.



- Pierre Fernandez, J. (2018). Calcesur, rumbo a consolidarse como uno de los mayores productores de cal en Sudamérica. *Revista ENERGIMINAS*, 1.
- Ríos García, A. (2021). Evaluación e operación de filtro pasivo armónico en red eléctrica desbalanceada contaminada con armónicos. Torreón, Coahuila, Mexico.
- Rojas Palacios, P. F. (2021). *Optimización del sistema de compensación reactiva para mejorar la calidad de energía eléctrica en la Unidad Minera Chungar e Islay*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio digital de tesis y trabajos de investigación . Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/10518>
- Schneider Electric. (22 de 06 de 2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas*. (S. Electric, Ed.) Obtenido de <https://bit.ly/3wMuviw>
- Schneider Electric. (01 de 06 de 2019). *Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos*. Obtenido de Schneider Electric: <https://bit.ly/38gCDPT>
- Ticona Coila, D. (2017). *Evaluación de parámetros de una subestación eléctrica de distribución en 22.9/0.38/0.22 KV con compensación reactiva capacitiva para compañía minera el Dorado Ananea – Puno*. Puno.
- Wakileh, G. (2001). *Power Systems Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design*. New York: Springer.
- Yumpu. (2021). *Mercado Ideal*. Obtenido de <https://bit.ly/3PCavI1>
- Zea Meléndez, A. A. (2012). *Mejoramiento del suministro de energía de una carga crítica mediante uso de transferencias de conmutación en baja tensión y grupos electrógenos*. Lima: Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería.