



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica
Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Redes industriales con distorsión armónica y uso de
reactancias antiresonantes en el diseño e implementación de
banco automático de condensadores de la planta de alimentos
RINTI S.A. ATE**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

Julio CHUQUIMIA DEL SOLAR

ASESOR

Alfredo ROCHA JARA

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Chuquimia, J. (2022). *Redes industriales con distorsión armónica y uso de reactancias antiresonantes en el diseño e implementación de banco automático de condensadores de la planta de alimentos RINTI S.A. ATE*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Julio Chuquimia Del Solar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46410157
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5352-6565?lang=es
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Alfredo Rocha Jara
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08645523
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0006-9684
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jesús Huber Murillo Manrique
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07206585
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alfredo Rocha Jara
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08645523
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rejis Renato Paredes Peñafiel
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06758404
Datos de investigación	
Línea de investigación	Calidad de energía en plantas industriales
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	Planta: Rinti S.A. País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurigancho Latitud: -11.995729 Longitud: -76.834733
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2019 - Octubre 2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



UNMSM

Firmado digitalmente por PAREDES
PENAFIEL Rejis Renato FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 29.11.2022 09:49:54 -05:00



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL Nº 031/FIEE-EPIE/2022

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrados por la Comisión Ejecutiva del Programa de Perfeccionamiento Profesional de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha, Bajo La Presidencia Del **Ing. Murillo Manrique, Jesus Huber** integrado por el **Mg. Rocha Jara, Alfredo** y el **Mg. Rejis Renato Paredes Peñafiel**.

Después de escuchar la Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional del **Bach. CHUQUIMIA DEL SOLAR, JULIO** con código N° **09190109** que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentó su Trabajo de Suficiencia Profesional titulada **“REDES INDUSTRIALES CON DISTORSIÓN ARMÓNICA Y USO DE REACTANCIAS ANTIRESONANTES EN EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE BANCO AUTOMÁTICO DE CONDENSADORES DE LA PLANTA DE ALIMENTOS RINTI S.A. ATE”**

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió aprobar otorgándole el calificativo de quince (15).

Ciudad Universitaria, 03 de setiembre del 2022

Ing. Murillo Manrique, Jesus Huber
Presidente de Jurado

Mg. Rocha Jara, Alfredo
Miembro de Jurado

Rejis Renato, Paredes Peñafiel
Miembro Jurado



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELÉCTRICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica.
2. Escuela Profesional de Ingeniería de Eléctrica.
3. Emisor del Informe el director de la Escuela Profesional de Ingeniería de Electrónica.
4. Operador del programa informático de similitudes: Rejis Renato Paredes Peñafiel.
5. Documento evaluado: Trabajo de Suficiencia Profesional para título de (pregrado) "REDES INDUSTRIALES CON DISTORSIÓN ARMÓNICA Y USO DE REACTANCIAS ANTIRESONANTES EN EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE BANCO AUTOMÁTICO DE CONDENSADORES DE LA PLANTA DEALIMENTOS RINTI S.A. ATE"
6. Auto de la tesis: Chuquimia Del Solar, Julio
7. Fecha de aplicación de recepción del documento: 25-10-2022
8. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 25-10-2022
9. Software utilizado: Turnitin.
10. Configuración del programa detector de similitudes:
 - Excluye citas.
 - Excluye bibliografía.
 - Excluye cadenas menores de 40 palabras
11. Porcentaje de similitudes según programa detector: Seis por ciento – 6%
12. Fuentes originales de las similitudes encontradas.

1. hdl.handle.net	1% Fuente de Internet
2. b-dig.iie.org.mx	1% Fuente de Internet
3. 1library.net	<1 % Fuente de Internet
4. cybertesis.unmsm.edu.pe	<1 % Fuente de Internet
5. idoc.pub	<1 % Fuente de Internet
6. repositorio.uncp.edu.pe	<1 % Fuente de Internet
7. sistemamid.com	<1 % Fuente de Internet
8. Shaun A. Forth. "Jacobian code generated by source transformation and vertex elimination can be as efficient as hand-coding", ACM Transactions on Mathematical Software,9/1/2004	Publicación
9. repositorio.utc.edu.ec	<1 % Fuente de Internet
10. dspace.ups.edu.ec	<1 % Fuente de Internet
11. edoc.pub	<1 % Fuente de Internet
12. myslide.es	<1 % Fuente de Internet
13. sedici.unlp.edu.ar	<1 % Fuente de Internet
14. qdoc.tips	<1 % Fuente de Internet
15. www.coursehero.com	<1 % Fuente de Internet
16. García Grajeda Raziél Ernesto, Alvarado Perea Efrén. "Perfil de ahorro energético en servicios comunes de un edificio con tarifa horaria en media tensión", TESIUNAM, 2013	Publicación
17. www.coinsur.com	<1 % Fuente de Internet

12. Observaciones: Ninguna
13. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones.
14. Fecha del informe: 21 de abril del 2023.

Atentamente,

MG. PAREDES PEÑAFIEL, REJIS RENATO DIRECTOR DE LA EPIE

Anexo 1

Redes industriales con distorsión armónica y uso de reactancias antiresonantes en el diseño e implementación de banco automático de condensadores de la planta de alimentos RINTI S.A. ATE

por Julio Chuquimia Del Solar

Fecha de entrega: 21-abr-2023 08:28p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2071809841

Nombre del archivo: TSP_JULIO_CHUQUIMIA_FINAL_VF_19.04.2023.docx (7.85M)

Total de palabras: 18085

Total de caracteres: 94881

Dedicatoria

Antes que nada, agradezco a Dios por permitirme poco a poco lograr los objetivos que me he trazado y por bendecirme con la familia que tengo, por darnos salud y unión. Agradezco enormemente a mi mamá Alina que desde el inicio cuando nadie creía en mí, ella siempre estuvo a mi lado dándome fortaleza, comprensión, apoyo y todo su cariño; ahora me toca a mí lograr sus sueños. Agradezco a mis hermanos que al igual que mi madre son mi motor, motivo y también mi fortaleza, juntos como familia somos invencibles. Todos mis logros son por mi familia y para mi familia. Agradezco también a mi incomparable segundo hogar, mi alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, que sin duda alguna es y será siempre mi más grande orgullo poder hacerme llamar sanmarquino. Finalmente agradezco también a esos amigos que en algún momento de mi vida pasaron a ser un hermano más para mí, me apoyan siempre y sin dudarlo, me da mucha alegría que también estén trazando un buen camino como profesionales, muchas gracias a todos.

RESUMEN

En este artículo se presenta el proceso de análisis e implementación de un banco de condensadores con reactancias antiresonantes para redes con presencia de armónicos en la planta de alimentos Rinti S.A., esta solución adicional a implementar un banco de capacitancias común, considera también el uso de reactancias antiresonantes que hacen la función en conjunto con los condensadores en serie de un filtro pasivo, esto es con el objetivo de poder proteger a los condensadores de los efectos destructivos que tienen los armónicos, de esta manera se puede asegurar un adecuado tiempo de vida para el banco de condensadores y se pueda cumplir la evaluación de tiempo de retorno de la inversión.

Debido al estado del banco antiguo, se evaluó la implementación de un nuevo banco pero con el uso de reactancias antiresonantes, esto ayudo a evitar que los armónicos presentes en la red dañen el banco, así también se apreció que como resultado de la implementación del nuevo banco se mejoró ligeramente el nivel de distorsión armónica así como el nivel de tensión, perdidas y se redujo la carga del transformador, todo esto se vio reflejado en una considerable reducción en la facturación mensual por consumo eléctrico.

Palabras clave: Compensación reactiva, Armónicos, Reactancia antiresonante, Resonancia, calidad de energía.

ABSTRACT

This report presents the analysis and implementation process of a bank of capacitors with antiresonant reactance for networks with the presence of harmonics in the food plant “Rinti S.A.”. This solution, in addition to the implementation of a common capacitor bank, also considers the use of antiresonant reactance that perform the function together with the series capacitors of a passive filter, this is with the objective of being able to protect the capacitors from the destructive effects of the harmonics, in this way an adequate life time for the capacitor bank can be ensured, in consequence the evaluation of the return on investment time can be met.

Due to the state of the old bank, the implementation of a new bank was evaluated using antiresonant reactance, this help to prevent damage in the bank due to the harmonics presence in the network. This solution also help to improve harmonic distortion level and voltage level, also losses and the transformer load was reduced, all this was reflected in a considerable reduction in the monthly billing for electricity consumption.

Keywords: Reactive compensation, Harmonics, Antiresonant reactance, Resonance, power quality.

ÍNDICE

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE PRINCIPAL	v
ÍNDICE DE LAS FIGURAS	ix
ÍNDICE DE LAS TABLAS	x
CAPÍTULO I:	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II:	3
CONTEXTO PARA EL DESARROLLÓ LA EXPERIENCIA	3
2.1 Reseña De La Empresa Donde Se Realizó La Actividad	3
2.2 Periodo De Duración De La Actividad	4
2.3 Finalidad Y Objetivo De La Entidad	4
2.4 Razón Social	4
2.5 Área, Cargo Y Actividades Desempeñadas.....	4
2.6 Correo Electrónico.....	4
CAPÍTULO III:.....	5
ACTIVIDADES DESARROLLADAS	5
3.1 Organización De La Actividad.....	5
3.2 Finalidad Y Objetivos De La Actividad.....	5
3.2.1 Finalidad,	5
3.2.2 Objetivos.....	5
3.3 Problemática.....	6
3.3.1 Problema General,	6
3.3.2 Problema Especificos,	6
3.4 Metodología	6
3.4.1 Antecedentes En La Investigacion,	6
3.4.2 Bases Teoricas,.....	7
3.4.2.1 Cargas Lineales.	7
3.4.2.2 Cargas No Lineales.	7
3.4.2.3 Potencia Activa.....	8

3.4.2.4.	Potencia Reactiva.....	8
3.4.2.5	Potencia Aparente..	8
3.4.2.6	Triangulo De Potencia.....	9
3.4.2.7	Factor De Potencia..	9
3.4.2.8	Armónicos En Los Sistemas Eléctricos De Potencia.....	9
3.4.2.9	Distorsión Armónica Total (THD).....	10
3.4.2.10	Distorsión Armónica De Tensión.	10
3.4.2.11	Distorsión Armónica De Corriente..	11
3.4.2.12	Limites De La Distorsión Armónica De Corriente.....	11
3.4.2.13	Distorsión Armónica Según La NTCSE..	11
3.4.2.14	Origen De Los Armónicos.....	12
3.4.2.15	Expresión De La Magnitud Deformada.....	12
3.4.2.16	Teorema De Fourier..	13
3.4.2.17	Transitorios.....	13
3.4.2.18	Armónicos triples, de 3er orden y múltiplos de 3.	13
3.4.2.19	Efectos De La Distorsión Armónica.....	15
3.4.2.20	Efectos En Los Condensadores..	16
3.4.2.21	Efectos En Los Transformadores.....	16
3.4.2.22	Efectos En Los Motores.....	16
3.4.2.23	Efectos En Los Cables, Conductor Neutro.....	16
3.4.2.24	Resonancia Armónica..	17
3.4.2.25	Potencia En Régimen Estacionario No Senoidal..	18
3.4.2.26	Reducción De Las Perdidas.....	19
3.4.2.27	Evaluación De Parámetros Eléctricos Bajo La Presencia De Armónicos.:	20
3.4.2.28	Análisis De La Respuesta A La Frecuencia Para El Caso Particular.....	22
3.4.3	<i>Formulacion para la Hipotesis</i>	23
3.4.3.1	Hipótesis General..	23
3.4.3.2	Hipótesis Especificas.....	23
3.4.3.3	Variables.	23
3.5	Procedimiento a ser presentado.....	24
3.5.1	<i>Método y Diseño Utilizado.</i>	24
3.5.2	<i>Población y Muestra</i>	24

3.5.3 Instrumentos Y Técnicas Para La Recolección De Datos.....	24
3.5.4 Método Para Análisis De Los Datos.....	25
3.5.5 Recopilación De Datos E Identificación De Planta.....	25
3.5.5.1 Toma De Mediciones En Campo.....	26
3.5.5.2 Registro De Facturación Mensual.....	30
3.5.5.3 Procedimiento De Cálculo Y Diseño.....	31
3.5.5.4 Análisis De Mediciones.....	32
3.5.5.5 Cálculos, Selección De Equipos Y Diseño.....	32
3.5.6 Análisis económico de la implementación.....	42
3.5.6.1 Costo De Implementación.....	42
3.5.6.2 Evaluación De La Factibilidad De Implementación.....	44
3.5.7 Diseño previo para fabricación.....	45
3.5.8 Implementación del banco con reactancias antiresonantes.....	46
3.6 Resultado De La Actividad.....	48
3.6.1 Presentación De Resultados.....	48
3.6.2 Contrastación De Hipótesis.....	48
3.6.3 Discusión De Resultados.....	49
CAPÍTULO IV:.....	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1 Conclusiones.....	50
4.2 Recomendaciones.....	51
CAPÍTULO V:.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	52
CAPÍTULO VI:.....	54
ANEXOS.....	54

ANEXO 1: Registros de potencias obtenidos después de 4 días de medición.	54
ANEXO 2: Mediciones de la distorsión armónica registradas en los cuatro días que estuvo instalado el analizador. Registro de distorsión armónica de tensión (THDv).	55
ANEXO 3: Mediciones de la distorsión armónica registradas en los cuatro días que estuvo instalado el analizador. Registro de distorsión armónica de corriente (THDi).	56
ANEXO 4: Parámetros registrados por el analizador de redes cuando se registró un elevado Q	58
ANEXO 5: Parámetros medidos por el analizador de redes con un elevado THDv	59
ANEXO 6: Registro de facturación mensual de noviembre y diciembre del 2019.....	60
ANEXO 7: Tipos de reactancias desintonizadas trifásicas marca Schneider Electric	61
ANEXO 8: Tipos de condensadores trifásicos marca Schneider Electric.....	62
ANEXO 9: Tabla de cálculo de Potencia Total, banco de condensadores a 525V.	63
ANEXO 10: Tabla Para el cálculo de Potencia Total para un banco de condensadores, calculado de 525V para condensadores de 456V.	64
ANEXO 11: Tabla de Capacitancia calculada para cada condensador.	65
ANEXO 12: Tabla de Inductancias calculadas para cada paso del banco de condensadores.	66
ANEXO 13: Espectro de armónicos registrados por el analizador de redes.	67
ANEXO 14: Tabla de configuración final del banco de condensadores con reactancias antiresonantes.....	68
ANEXO 15: Tabla de relación de equipos para banco de condensadores con reactancia antiresonantes.....	69
ANEXO 16: Tabla de costo total de implementación de banco de condensadores con reactancia.	70
ANEXO 17: Plano eléctrico del diseño previo para el banco de condensadores con reactancias.....	71
ANEXO 18: Registro de facturación mensual detallada del mes de enero del 2020	72
ANEXO 19: NTCSE – Orden de Armónicos y su % de tolerancia. Se considera es de mala calidad, si la tensión se encuentra fuera de tolerancia por un período superior al cinco por ciento (5%) del período de medición.....	72
ANEXO 20: Tabla del límite de distorsión armónica de corriente (IEEE 519-2014). Para el punto de acoplamiento común de otras cargas, con tensiones desde 120 hasta 69,000 V.....	73
ANEXO 21: Características técnicas del controlador de FP automático.	73
ANEXO 22 Descripción del controlador de FP automático utilizado	74
ANEXO 23: Conexión adecuada del transformador de corriente para la señal del banco	74
ANEXO 24: Esquema de conexionado 3F+N, con tres señales de corriente para el controlador automático	75
ANEXO 25: Características técnicas de la reactancia instalada	75
ANEXO 26: Conexionado adecuado de los condensadores en paralelo (recomendado por el fabricante).....	76
ANEXO 27: Sistema de protección interno del condensador ante sobre presión	76
ANEXO 28: Características técnicas de los condensadores utilizados	77
ANEXO 29: Características técnicas de los contactores utilizados	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cargas lineales y forma de onda de tensión y corriente de las tres fases	7
Figura 2. Cargas No lineales y forma de onda de tensión y corriente en las tres fases	7
Figura 3. FP, según el tipo de carga	9
Figura 4. Imagen de una onda deformada	12
Figura 5. Degradación de la tensión de red producida por una carga no lineal.....	13
Figura 6. Corrientes en el neutro resultante de cargas no lineales monofásicas.....	14
Figura 7. Los armónicos múltiplos de 3 circulan en fase por las tres líneas, la corriente en el neutro es equivalente a la suma de las corrientes en las líneas.	14
Figura 8. La imagen representa el resultado en el neutro de las corrientes desequilibradas. .	15
Figura 9. Efecto de sobrecalentamiento en motores y transformadores por armónicos	15
Figura 10. Fenómeno de resonancia en un circuito capacitivo (banco de condensadores), aumento o pico de corriente en frecuencia de resonancia.....	17
Figura 11. Circuito equivalente con reactancia en serie al condensador equivalente.....	17
Figura 12. Circuito equivalente con reactancia en paralelo al condensador equivalente	18
Figura 13. Triángulo de potencias no senoidal en régimen estacionario	18
Figura 14. Configuración de circuito simplificado del sistema original	22
Figura 15. Configuración de circuito simplificado de sistema con banco de condensadores.	22
Figura 16. Configuración simplificada del sistema con BC y reactancia antiresonantes	23
Figura 17. Vista exterior de la subestación y planta Rinti S.A.	26
Figura 18. Diagrama unifilar de la subestación de la planta Rinti S.A	27
Figura 19. Transformador T2 y su placa de características	27
Figura 20. Diagrama unifilar del tablero TG-2.....	28
Figura 21. Principio de conexión de analizador de redes en el punto de la red.....	29
Figura 22. Conexión de analizador de redes Hioki en tablero TG-2.....	29
Figura 23. Programación y registro de parámetros eléctricos relevantes para análisis	29
Figura 24. Reactancia para redes de 480V, 60Hz.....	35
Figura 25. Condensadores marca Schneider Electric de 525V máximo de operación	36
Figura 26. Reactancia para redes de 480V, 60Hz.....	40
Figura 27. Banco de condensadores con reactancias antiresonantes implementado	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límite de distorsión armónica (IEEE 519-2014).....	10
Tabla 2. Límite de THD de tensión según la IEEE 519/92.....	10
Tabla 3 - Cuadro de cargas del tablero TG-2	28
Tabla 4 – Valores iniciales registrados en la red de BT del tablero TG-2	32
Tabla 5 – Validación de corriente máxima permanente de los reactores	42
Tabla 6 – Valores iniciales y finales registrados en la red de BT del tablero TG-2.....	47

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años las industrias buscan la forma de optimizar el uso de la energía eléctrica para poder lograr un ahorro en su facturación mensual, en tal sentido uno de los primeros y más efectivos métodos fue la instalación de Bancos de Capacitores como fuentes de potencia reactiva que les permitía lograr un mejor factor de potencia y reducir así el consumo de energía reactiva, en consecuencia dicho banco traía consigo mejores niveles de tensión, reducción de pérdidas de potencia en las líneas, mayor capacidad de transmisión de energía activa en el transformador, cables y otros, siendo en su momento una atractiva inversión para las industrias.

Con el pasar de los años en la búsqueda de aumentar el ahorro en consumo de energía eléctrica se empezó también con el uso de equipos y dispositivos basados en electrónica de potencia como son variadores de velocidad, arrancadores de estado sólido, entre otros. Así también empezó a aumentar el uso de tecnología LED para los diversos sistemas de iluminación en las plantas industriales, todo lo mencionado entre otras nuevas tecnologías que permitían mejorar el ahorro energético tienen también una gran desventaja que presentó una nueva problemática, la presencia de armónicos de diversos valores de frecuencia diferentes a la frecuencia de la red industrial.

La presencia de los armónicos en la red genera una serie de inconvenientes, entre los más relevantes se tienen los daños a equipos electrónicos conectados a la red aumentando así el costo de mantenimiento correctivo, pero más importante aún es el daño y falla que podrían generar en los bancos de condensadores ya instalados. La impedancia de los bancos de condensadores es dependiente de la frecuencia lo cual trae como consecuencia la ampliación de los armónicos existentes en la red deteriorando así al mismo banco de condensadores y a las cargas del sistema. En un estado crítico puede ocurrir un fenómeno de resonancia donde la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del sistema equivalente se igualan produciendo altos valores de tensión y corriente a frecuencia de resonancia lo cual desencadenaría en el peor de los eventos que es la explosión y destrucción del banco de condensadores y daños a

equipos cercanos generando grandes pérdidas económicas en paradas de planta y posteriores correctivos de emergencia para poder restablecer el suministro de energía.

En respuesta a los graves eventos mencionados se evaluaron diversas alternativas de solución de los cuales se hará mención a la alternativa más común utilizada bajo ciertas condiciones de la red y que permite evitar el evento más crítico que es la explosión del banco de condensadores, el uso de Reactancias Antiresonantes como filtros de rechazo para la protección de los condensadores en redes con presencia de distorsión armónica debido a las cargas no lineales de su sistema.

De acuerdo a lo descrito anteriormente se presentará un caso particular, la industria de fábrica de alimentos para mascotas RINTISA ubicada en la carretera central en el distrito de Ate, actualmente tiene una facturación eléctrica mensual total promedio de S/ 185,000.00 por un consumo de energía activa de 670,000.00 kWh con una demanda promedio de 1,150kW, un pago mensual promedio de energía reactiva de S/ 10,100.00, datos que se encuentran en el pliego tarifario de la concesionaria.

El objetivo principal de este trabajo es describir la evaluación realizada a las instalaciones eléctricas de la planta industrial en mención, debido a su necesidad de reducción de facturación mensual por consumo de energía. Realizando de manera inicial mediciones de su consumo de energía activa y reactiva, así como la evaluación de las potencias máximas y promedios, de igual manera la evaluación de la distorsión armónica de la planta e identificación de los armónicos predominantes y THD de tensión y corriente entre otros. Estas mediciones se realizaron con la ayuda de un equipo analizador de redes instalándolo durante el periodo de 4 días consecutivos en la salida del transformador de 1250kVA que actualmente no tiene banco de condensadores automático para la compensación de la reactiva en el lado de baja tensión por lo que se tiene como objetivo principal el diseño de este banco de capacitancias considerando la distorsión armónica de la red eléctrica de dicha industria y el uso adecuado de reactancias antiresonantes, para lograr un correcto diseño de un banco de condensadores que no se vea afectado por la presencia de los armónicos de dicha red según la problemática descrita en los párrafos anteriores.

Finalmente se realizará diseño del banco de condensadores que permita realizar una compensación de energía reactiva adecuada sin correr el riesgo de sufrir daños materiales y económicos por la presencia de armónicos en la red, logrando el objetivo de reducir los costos de facturación de energía de la planta RINTI SA.

CAPÍTULO II: CONTEXTO PARA EL DESARROLLÓ DE LA EXPERIENCIA

2.1 Reseña De Empresa Donde Se Realizó La Actividad

El 31 de octubre 1967 nació con el nombre de Alimentos Técnicos S.A. y con la Escritura Pública en 1972 el 18 de julio, cambió su nombre a RINTI S.A. Actualmente, en su actividad principal elaboran, comercializan, distribuyen y representan productos alimenticios de consumo animal.

Su producción y comercialización las realizan en sus instalaciones industriales ubicadas en la av. Nicolás Ayllón, en la Carretera Central km. 17.5, Lima; y en sus oficinas principales ubicadas en el Jiron Enrique Caballero Orrego 391 – Piso tres, Distrito de Miraflores, Departamento de Lima.

Rinti S.A., empresa peruana la cual cuenta con más de 50 años de experiencia en la elaboración de alimentos balanceados para mascotas. Es una compañía líder en su rubro, con amplia cobertura de nivel internacional y nacional, exporta a otros países como Bolivia, Colombia, Panamá y Ecuador, con gran proyección de crecimiento.

Rinti S.A. es reconocido en todo el mercado peruano por sus excelentes procesos de producción, los cuales garantizan que sus alimentos son elaborados con insumos de alta calidad. Así también, para su proceso de envasado, usan un proceso de empaques ideales de última generación para garantizar la conservación y frescura de los diversos componentes nutricionales.

Cuentan con un staff de profesionales de primer nivel, dentro del cual tienen a médicos veterinarios involucrados en el desarrollo de nuevos productos, control de calidad y asesoría nutricional. En ese contexto vienen desarrollando sus actividades, con tecnología de última generación e innovación constante en sus procesos.

2.2 Periodo De Duración De La Actividad

Las actividades del presente trabajo se realizaron durante los años 2019 y 2020.

2.3 Finalidad Y Objetivo De La Entidad

La entidad tiene como finalidad ejecutar proyectos y servicios electro mecánicos para sus diversos clientes de los sectores industria, minería, construcción entre otros, a lo largo de todo el Perú. Ser líder en la distribución de productos eléctricos y ejecución de proyectos de ingeniería eléctrica.

2.4 Razón Social

PROMOTORES ELÉCTRICOS S.A.

2.5 Área, Cargo Y Actividades Desempeñadas

Área: Obras, proyectos y Servicios

Cargo: Asesor Técnico de Proyectos y Servicios

2.6 Correo Electrónico

fmejia@promelsa.com.pe

CAPÍTULO III: ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En este capítulo se determina el problema, objetivo general y específicos, el alcance y fundamentos teóricos necesarios para desarrollar el trabajo de investigación.

3.1 Organización Para La Actividad

El área responsable de las actividades es Obras, Proyectos y Servicios, con ellos se coordinó las visitas, toma de datos, diseño y los costos de la implementación.

3.2 Finalidad Y Objetivos De La Actividad

3.2.1 Finalidad, Mejorar el sistema de compensación reactiva en el transformador de la subestación principal para reducir la potencia reactiva en la facturación mensual, teniendo en consideración la distorsión armónica de la red en la planta Rinti S.A.

3.2.2 Objetivos

a) Objetivo General, Implementar un banco de condensadores con reactancias para compensar energía reactiva y que resista los efectos de la distorsión armónica.

b) Objetivos Específicos

1. Mitigar los efectos ocasionados por la falta de compensación de energía reactiva, como el sobrecalentamiento del transformador.

2. Mitigar los efectos destructivos y el deterioro del banco de condensadores a causa de la presencia de armónicos de baja tensión de la planta Rinti S.A.

3. Diseñar un banco de condensadores con reactancias antiresonantes que permita compensar la energía reactiva sin afectarse por la distorsión armónica.

3.3 Problemática

3.3.1 Problema General, ¿Es posible diseñar un banco de condensadores que no se deteriore rápidamente debido a la distorsión armónica para garantizar la reducción de consumo de la energía reactiva en la facturación mensual?

3.3.2 Problema Especificos,

1. ¿Qué efectos ocasiona la falta de compensación de energía reactiva para el sistema en baja tensión de la planta RINTI S.A., en el transformador, etc.?

2. ¿Qué consecuencias tiene la presencia de los armónicos para la red de baja tensión y su relación con el deterioro acelerado del banco de condensadores?

3. ¿Es necesario evaluar un diseño o solución que le permita al banco de condensadores soportar los efectos de la distorsión armónica de la red?

3.4 Metodología

Este trabajo de investigación es real y fue recientemente implementado en la planta Rinti S.A. donde se pudo comprobar los beneficios obtenidos después de la implementación de un banco de capacitores con reactancias antiresonantes.

3.4.1 Antecedentes En La Investigacion, Los antecedentes están basados en la empresa Rinti S.A., una empresa con más de 50 años de antigüedad que ha ido creciendo ligeramente y cambiando la tecnología de los equipos instalados con el objeto de mejorar la eficiencia de su producción así como el consumo energético de la planta, en estos cambios se tuvo el objetivo de la mejora de producción pero no se realizaron adecuados estudios de las nuevas instalaciones eléctricas y su comportamiento masivo en la red de baja tensión.

Al ser el mayor porcentaje de la carga de la planta del tipo inductivo, es decir motores, estos consumen gran cantidad de energía reactiva, por lo que se instaló en su

momento bancos de condensadores automáticos que les permitían generar su propia potencia reactiva reduciendo así su facturación mensual por consumo eléctrico.

3.4.2 Bases Teóricas, Para poder analizar y entender correctamente todos los conceptos utilizados en este análisis, definiremos algunos términos.

3.4.2.1 Cargas Lineales. Las cargas lineales son elementos resistivos, inductivos y condensadores con valores fijos, se tiene una tensión sinusoidal y una corriente sinusoidal con un desfase como se muestra en la figura 1. (Bettega & Fiorina, 2000)

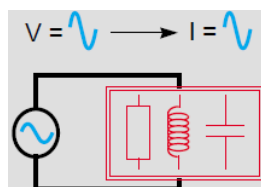


Figura 1. Cargas lineales y forma de onda de tensión y corriente en tres fases
Fuente: Armónicos: rectificadores y compensadores activos. Cuaderno Técnico n° 183. S.E.

3.4.2.2 Cargas No Lineales. Las cargas no lineales como se muestra en la figura 2 son aquellas que demandan una corriente no senoidal. Entre las cargas más comunes se tiene las que utilizan electrónica de potencia, convertidores estáticos, hornos de arco, LED, dispositivos magnéticos saturados, variadores de velocidad. (Bettega & Fiorina, 2000)

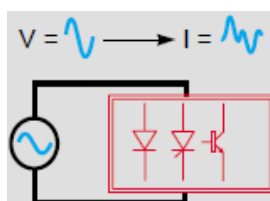


Figura 2. Cargas No lineales y forma de onda de tensión y corriente en tres fases
Fuente: Armónicos: rectificadores y compensadores activos. Cuaderno Técnico n° 183. S.E.

3.4.2.3 Potencia Activa. Esta potencia es la capacidad del circuito para transformar la energía eléctrica en trabajo. Los dispositivos eléctricos que convierten la energía eléctrica en otras formas de energía como: térmica, mecánica, química, lumínica, etc. Se designa con la letra P, se mide en vatios (W). De acuerdo con $P=V \cdot I \cdot \cos\theta$, la ley de Ohm ($V=I \cdot R$) y el triángulo de impedancias se tiene. (Gómez Morales, 2009)

$$P = V \cdot I \cdot \cos\theta = I^2 \cdot R \dots \text{(Ec. 1)}$$

Dónde: P: Potencia Activa en Watts (W)

V: diferencia de potencial en Voltios (V)

R: Resistencia = $Z \cdot \cos\theta$

I: Corriente en Amperios (A)

Z: Impedancia en Ohmios (Ω)

La potencia activa trifásica es la suma de las potencias activas monofásicas.

3.4.2.4. Potencia Reactiva. Aparece cuando existen cargas con bobinas o condensadores, circuitos que generan campos magnéticos y eléctricos, la potencia reactiva posee un valor medio nulo, por lo que no produce un trabajo útil, su medida es en VAR voltamperios reactivos, se denomina con la Q. (Gómez Morales, 2009)

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\theta = I^2 \cdot X = I^2 \cdot Z \cdot \sin\theta \dots \text{(Ec. 2)}$$

X: Reactancia de la línea en ohmios (Ω)

Q: Potencia reactiva en voltamperios reactivos (VAR)

3.4.2.5 Potencia Aparente. Esta potencia en un circuito de corriente alterna es llamada potencia total, es la suma fasorial de la potencia activa y reactiva, es decir es la suma de la energía que disipa el circuito en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes. La potencia aparente determina el tamaño del sistema y capacidad amperimétrica de los diversos dispositivos. La potencia aparente se mide en voltamperios (VA) y se representa con la letra S, donde: $S = I \cdot V$. (Gómez Morales, 2009)

3.4.2.6 Triángulo De Potencia. El triángulo de potencias es la representación gráfica vectorial del factor de potencia y su relación con las potencias reactiva, activa y aparente del sistema de corriente alterna. (Gómez Morales, 2009)

3.4.2.7 Factor De Potencia. Está definido como el cociente entre la potencia activa y aparente. Es un indicador de la eficiencia de un sistema.

Si el factor de potencia es bajo, se debe corregir elevándolo para mejorar el uso de la energía, pues con un factor de potencia alto se utiliza más eficazmente la energía.

El Factor de potencia se define como $FP = \cos \theta = P / S \dots$ (Ec. 3)

- Cargas resistivas, la corriente y la tensión están en fase, $FP=1$, figura (a).
- Cargas inductivas, tienen retrasada la corriente respecto a la señal de tensión, su factor de potencia está retrasado. Ver la figura (b).
- Cargas capacitivas, tiene adelantada la corriente respecto a la tensión, su factor de potencia está adelantado. Ver la figura (c). (López Paiz, 2011)

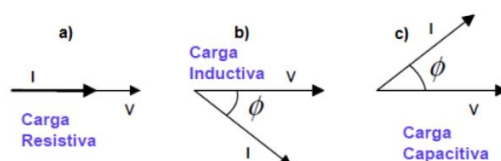


Figura 3. Factor de potencia, según el tipo de carga
Fuente: Gerardo Antonio López Paiz - Tesis

3.4.2.8 Armónicos En Los Sistemas Eléctricos De Potencia. Los sistemas eléctricos han sido diseñados para funcionar a frecuencias de 60Hz y se define como frecuencia fundamental, las otras frecuencias que se presentan como armónicas. La frecuencia fundamental es la única que produce potencia activa. Las armónicas deforman la señal sinusoidal, mientras sea mayor la presencia de armónicos, la forma de onda tiende a ser cuadrada. (Jaco & Gonzáles, 2016)

3.4.2.9 Distorsión Armónica Total (THD). Es la distorsión total y se considera para calcular el efecto de los armónicos de corriente y tensión. Se expresa como el porcentaje de los componentes armónicas con relación a la componente fundamental.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\%$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad \dots \text{ (Ec 4)}$$

El THD_v es el valor de interés para la implementación, la distorsión de tensión tiene límites recomendados según la IEEE 519 se detallan en la Tabla 1. Estos valores son usados para diseño en caso de presencia armónica. Para tiempos más cortos, como arranques los límites pueden exceder el 50%. (Jaco & Gonzáles, 2016)

Tabla 1. Límite de distorsión armónica (IEEE 519-2014)

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

3.4.2.10 Distorsión Armónica De La Tensión. Esta forma de la onda no es de única frecuencia, esto la llaman distorsión de tensión armónica, definida como la suma de las ondas múltiplos de la frecuencia fundamental. (Jaco & Gonzáles, 2016)

La distorsión armónica de tensión se expresa como THD_v. Los límites de THD_v se calculan según la ecuación 5, considerando los límites de la tabla 2:

$$THD_v (\%) = ((\sqrt{\sum V_h^2}) / V_f) * 100 \quad \dots \text{ (Ec. 5)}$$

Tabla 2. THD de tensión, Límite de acuerdo la IEEE 519/92

Tensión nominal	Distorsión Individual de Tensión (%)	THD _v Máximo (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

3.4.2.11 Distorsión Armónica De Corriente. Este fenómeno complementa la distorsión de tensión armónica, es principalmente debida a la corriente de cargas no sinusoidales. Esta distorsión corriente requiere sobredimensionar componentes como transformadores y cables, una corriente con distorsión puede generar más pérdidas que una corriente sinusoidal RMS de valor similar. Este espectro armónico esta integrada principalmente por los armónicos 5°, 7°, 11° y 13° y las ondas de alta frecuencia generadas por el cambio de la frecuencia en los inversores DC/AC. Esta distorsión de corriente se puede nombrar a partir del factor llamado THDi. (Jaco & Gonzáles, 2016)

Límites de distorsión armónica de corriente

$$\text{THDi} (\%) = ((\sqrt{\sum I_h^2}) / I_f) * 100 \dots (\text{Ec. 6})$$

3.4.2.12 Límites De La Distorsión Armónica De Corriente. El límite primario es la corriente armónica que puede inyectar en la red, los límites del THDi se basan en la magnitud del consumidor con referencia al sistema de distribución. El tamaño de la carga es la relación de cortocircuito SCR y punto de acople común PCC. El consumidor se define con la corriente F de la fundamental en la carga I_L . El tamaño del sistema lo define por la corriente de cortocircuito ISC al PCC: (Jaco & Gonzáles, 2016)

$$\text{SCR} = \frac{\text{Potencia de cortocircuito MVA}}{\text{Carga MVA}} = \frac{I_{sc}}{I_L} \dots (\text{Ec 7})$$

Una proporción alta significa que la carga es menor. En la tabla del Anexo 20, se observan los niveles máximos de armónicos en función del SCR y el orden de la armónica. La distorsión armónica total de corriente se relaciona con la distorsión armonica total de la demanda TDD, referencia el porcentaje del THDi respecto a la máxima corriente demandada de carga en rangos de 15 hasta 30 minutos.

$$\text{TDD} = \text{THDi}(\%) \frac{I_F}{I_{\text{Max}}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{max}}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \dots (\text{Ec. 8})$$

3.4.2.13 Distorsión Armónica Según La NTCSE. Según la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos, propicia el control de todo tipo de perturbaciones, en la tabla del Anexo 19 donde se visualiza los límites máx. armónicos por nivel de tensión. (Jaco & Gonzáles, 2016)

3.4.2.14 Origen De Los Armónicos. Los eventos armónicos son generados por cargas no lineales, impedancias no constantes (en relación a la frecuencia y tensión), estas cargas son consideradas inyectores o fuentes de armónicos a la red eléctrica. Las fuentes de armónicos son las cargas y se clasifican según su entorno: (Jaco & Gonzáles, 2016)

- Las cargas industriales
- Equipos de electrónica de potencia: fuentes de alimentación conmutadas, variadores de velocidad, rectificadores con diodos o tiristores, etc.
- Las cargas que generan arco eléctrico como soldadas, hornos de arco, alumbrado (tubos fluorescentes, lámparas).
- Así también generan armónicos temporalmente los arranques de motores con soft starter, variadores y la conexión de transformadores.

Los interarmónicos por otro lado son componentes senoidales, sin embargo no son múltiplos de la frecuencia fundamental, debido a la variación de las potencias que absorben los diversos receptores como las soldadoras, convertidores de frecuencia y hornos de arco. El espectro generado es continuo o discreto y varía de manera aleatoria por las- máquinas de soldar, horno de arco, etc. Para evaluar estos efectos a corto, medio o largo tiempo, las lecturas de los parámetros se deben hacer a intervalos de periodos compatibles con la constante térmica de los equipos.

3.4.2.15 Expresión De La Magnitud Deformada. En la figura 4 se aprecia cómo es una onda fundamental senoidal, como es la onda senoidal del armónico y se aprecia también el resultado de ambas ondas, la onda deformada. (Collombet, et al., 2000)

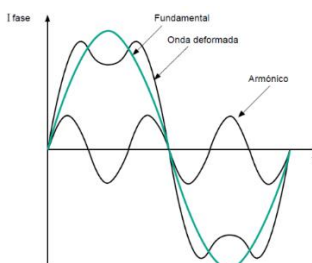


Figura 4. Imagen de una onda deformada
Fuente: Cuaderno técnico N°152 - Schneider Electric

3.4.2.16 Teorema De Fourier. J. B. J. Fourier demostró que las funciones periódicas se podían representar con una serie infinita de senoides. (Fiorina, 1993)

$$f(t) = \sum_{h=0}^{H=\infty} A_h \cos(hw_1 t + \varphi_h)$$

$$w_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{frecuencia angular de la onda fundamental})$$

$$\frac{1}{T} = f_1 \quad (\text{frecuencia de la onda fundamental})$$

$$\varphi_0 = 0$$

... (Ec. 9)

3.4.2.17 Transitorios. Este término caracteriza a los eventos indeseables en el sistema de naturaleza momentánea, en la figura 5 se aprecia el flujo. (Ferracci, 2004)

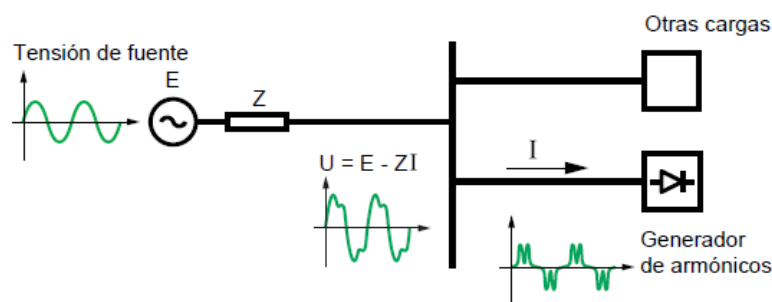


Figura 5. Deformación de la tensión en red debido a la carga no lineal.
Fuente: Cuaderno técnico Nro 199 - Schneider Electric, P. Ferracci

3.4.2.18 Armónicos triples, de 3er orden y múltiplos de 3. Este orden de armónicos es muy importante, la respuesta del sistema difiere. Las señales armónicas triples múltiplos impares de la armónica tercera, tales como 3, 9, 15, 21, 27, etc.

Estos armónicos son causados por cargas monofásicas que hacen que el retorno de las corrientes armónicas se produzca por el neutro, esta problemática resulta crítica para los conductores de neutro, generalmente esto es ocasionado cuando las cargas en general están desbalanceadas. En la figura 6 se muestra los armónicos múltiplos de 3 de secuencia cero sumados en el neutro y pasando por el sistema de la red de distribución hasta el transformador triángulo-estrella, cuando las corrientes llegan al transformador es reflejada en el devanado primario en triángulo donde circula y genera fallas y sobrecalentamiento. (Schonek, 2001)

Corrientes fundamentales balanceadas suman 0, pero coinciden corrientes de terceras armónicas balanceadas

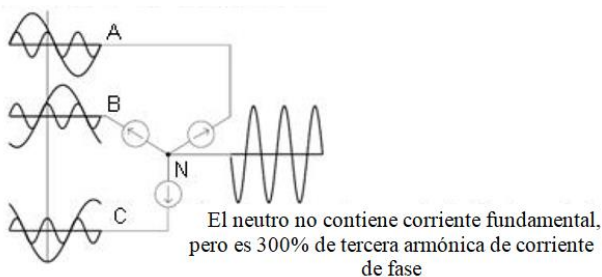


Figura 6. Corrientes en el neutro resultante de cargas no lineales monofásicas. Fuente: Cuaderno técnico N° 202 “Peculiaridades del 3er armónico”, Schneider Electric

Con las cargas lineales, las corrientes generan un sistema equilibrado trifásico. Por tal motivo, la suma de las corrientes de fase y neutro son nulas. $I_n = \sum I_f = 0$

Por otro lado con las cargas no lineales, las corrientes son no senoides de fase, por tanto generan armónicos considerables de rango múltiplo de tres. Debido a que las corrientes de las tres fases son iguales, de igual amplitud y se escribe:

$$I_{r3} = I_3 * \text{sen}3(\omega t)$$

$$I_{s3} = I_3 * \text{sen}3(\omega t - 2\pi/3) = I_3 * \text{sen}(3\omega t - 2\pi)$$

$$I_{t3} = I_3 * \text{sen}3(\omega t - 4\pi/3) = I_3 * \text{sen}(3\omega t - 4\pi) \dots \text{(Ec. 10)}$$

Con cargas equilibradas, los armónicos múltiplo de 3 están en fase y se suman en el neutro y se anulan las armónicas no múltiplo de tres y la fundamental.

Las armónicas de corriente de tercer orden son corrientes homopolares, las cuales circulan por las tres fases, se puede ver en la figura 7.

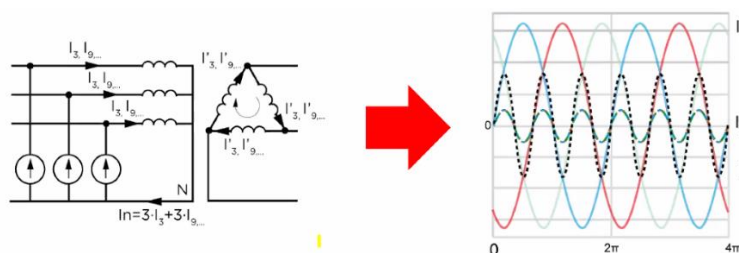


Figura 7. Los armónicos múltiplos de 3 circulan en fase por las tres líneas, la corriente en el neutro es idéntica a la suma de las corrientes en las líneas. Fuente: Cuaderno técnico N° 202 “Peculiaridades del 3er armónico”, Schneider Electric

En el conductor del neutro se suman las corrientes resultantes del desequilibrio de cargas, así como las corrientes resultantes de los armónicos triples, esto se puede resumir en la ecuación 11 y se entiende en la figura 8.

$$I_N = \sqrt{I_{desq}^2 + \sum_i I_{3k}^2} \dots \text{(Ec. 11)}$$

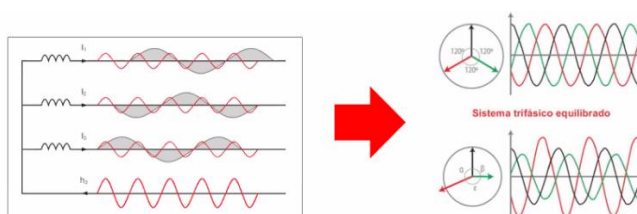


Figura 8. La imagen representa el resultado en el neutro de las corrientes desequilibradas.
Fuente: Cuaderno técnico N° 202 “Peculiaridades del 3er armónico”, Schneider Electric

3.4.2.19 Efectos De La Distorsión Armónica. Pueden ser diversos y se manifiesta con una gran cantidad de fusibles fundidos en los bancos de capacitancias, calentamiento excesivo y vibraciones en transformadores y motores, accionamiento de interruptores, daño en contactores y relés, así como crecimiento de las corrientes en el conductor del neutro e interferencia en los sistemas de comunicación.

Los armónicos pueden originarse en la red de suministro o en la industria misma por contaminación de las redes de otros usuarios. Si se aumenta el orden de las armónicas y su magnitud generalmente disminuyen, por tal los armónicos de orden menor, como el 5° y el 7°, generan mayores efectos, se muestra la figura 9.

Es bueno saber que la operación permanente con corrientes armónica altas lleva a incrementos de la tensión y eleva considerablemente la temperatura, lo que genera la disminución de la vida útil de las maquinas eléctricas. (Jaco & Gonzáles, 2016)

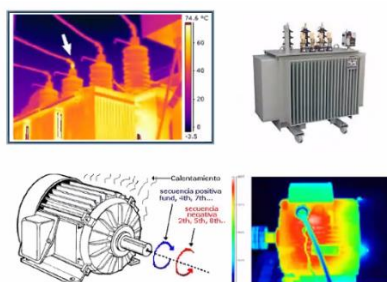


Figura 9. Efecto de sobrecalentamiento en motores y transformadores por armónicos
Fuente: Presentación - Diseño e implementación de banco automático de capacitores con reactancias antiresonantes” - Jhames Jaco Torrejon, - Julio Gonzales Advíncula.

3.4.2.20 Efectos En Los Capacitores. Considerando que la impedancia de los capacitores se reduce al elevar la frecuencia. Por los capacitores que se usan en la corrección del FP circulan corrientes armónicas considerablemente importantes. Y la presencia de inductancias en las instalaciones genera el riesgo de que se produzca una resonancia con los capacitores, lo cual puede aumentar considerablemente la amplitud de un armónico. No se debe recomendar usar condensadores cuando el THD > 8%. (Bettega & Fiorina, 2000)

3.4.2.21 Efectos En Los Transformadores. Los armónicos producen pérdidas adicionales en los transformadores, aumentan las pérdidas por efecto Joule en los bobinados (pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault). (Bettega & Fiorina, 2000)

3.4.2.22 Efectos En Los Motores. La distorsión fluye dentro del motor la cual perjudica al par motor ya que esta rota a una frecuencia distinta. Los valores que indican la existencia de distorsión armónica es la reducción de la eficiencia, el sobrecalentamiento, ruidos, entre otros. Prácticamente, si la distorsión no supera el 5% para cualquier tipo de armónico, los motores pueden seguir operando, si el porcentaje de distorsión aumenta, se debe atenuar para garantizar el correcto trabajo del motor. (Bettega & Fiorina, 2000)

3.4.2.23 Efectos En Los Cables, Conductor Neutro. Provocan pérdidas en los conductores. Las cargas monofásicas absorben corrientes del 3er armónico y sus múltiplos, las corrientes de fase se agregan en el conductor de neutro. Como ejemplo, con 75% de armónicos de orden 3, la corriente en el neutro es 2,25 veces el valor de la fundamental. Por otro lado, la corriente en cada una de las fases es 1.25 veces el valor de la fundamental, es decir, con cargas no lineales, el dimensionamiento del conductor del neutro es importante. (Bettega & Fiorina, 2000)

3.4.2.24 Resonancia Armónica. Se produce cuando en los sistemas de distribución de energía eléctrica, las reactancias inductivas son iguales a las reactancias capacitivas, esto amplifica en el sistema la respuesta a una excitación constante cuando la frecuencia de la fuente de excitación es equivalente a la frecuencia natural del sistema; se pueden generar dos tipos de resonancia, en este evento al ser iguales las reactancias inductivas y capacitivas del circuito equivalente del sistema termina siendo puramente resistivo durante el tiempo que dure este evento. (Carvajal, 2007)

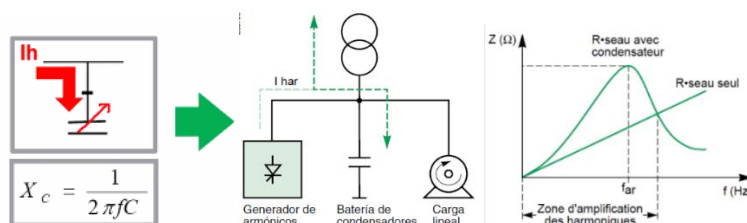


Figura 10. Fenómeno de resonancia en un circuito capacitivo (banco de condensadores), aumento o pico de corriente en frecuencia de resonancia

Fuente: Cuaderno técnico N° 199 “Calidad de la energía eléctrica”, Schneider Electric

(a) **Resonancia en serie**, puede ocurrir cuando un condensador equivalente está en serie con la reactancia equivalente del transformador o sistema, se crea un camino de baja impedancia donde circulan corrientes armónicas para una frecuencia determinada que se nombra frecuencia de resonancia. La impedancia insignificante del circuito en serie resonante es considerada para absorber las armónicas de corriente deseadas, principio del diseño del filtro como se ve en la figura 11. (Carvajal, 2007)

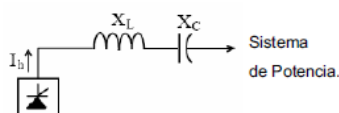


Figura 11. Circuito equivalente con reactancia en serie al condensador equivalente.
Fuente: Carlos E. Carvajal J. “Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos”.

(b) **Resonancia en paralelo**, se da si la capacitancia resultante que se ubica en paralelo a la reactancia resultante del sistema es igual a una determinada frecuencia de resonancia, esto genera que la fuente detecte una impedancia alta y tenga el efecto de generar una anomalía de tensión y un aumento en la corriente, se puede apreciar en la figura 12. La corriente resonante oscila entre la energía almacenada en las

inductancias y capacitores, esto da como resultado una corriente amplificada. Esta clase de resonancia es la más común en plantas industriales.

El sistema eléctrico presenta casos de resonancia para diversas frecuencias armónicas, este evento de resonancia altera la calidad de señal de tensión y corriente, a causa de la presencia de cargas no lineales genera una respuesta de onda de corriente y tensión, presenta perturbaciones en la señal pura. (Carvajal, 2007)

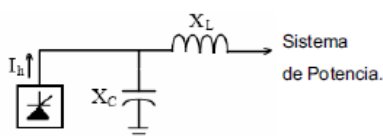


Figura 12. Circuito equivalente con reactancia en paralelo al condensador equivalente
Fuente: Carlos E. Carvajal J. “Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos”

3.4.2.25 Potencia No Senoidal En Régimen Estacionario. Esta potencia aparente contiene componentes reactiva y activa, a alta frecuencia se generan potencia real y potencia imaginaria lo cual genera una elevación de la potencia aparente logrando que el FP empeore. En la imagen 13, se puede ver el nuevo concepto del triángulo de potencia tras la presencia de armónicos ahora en tres dimensiones. (Calderón & Gonzáles, s.f.)

$S = V_1 \cdot I$, potencia aparente total.

$S_1 = V_1 \cdot I_1$, potencia aparente fundamental.

$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \Phi$, potencia activa fundamental.

$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \Phi$, potencia reactiva fundamental.

$D = V_1 \cdot I_h$, potencia de distorsión.

En un esquema estacionario senoidal el valor de potencia de distorsión es $D=0$.

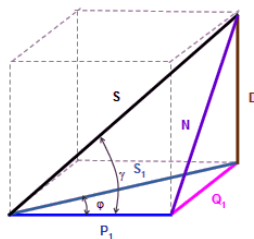


Figura 13. Triángulo de potencias no senoidal para régimen estacionario

Fuente: “Efecto de los armónicos en el factor de potencia y en las pérdidas de energía en un sistema eléctrico industrial” - Luis Amado González Vargas, - Gustavo Calderón Alonso.

En estado estacionario las perturbaciones están presentes, las corrientes y tensiones se representan por la serie de Fourier, se aprecia en la ecuación 12:

$$I(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \alpha_h)$$

$$V(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \beta_h) \quad \dots \text{(Ec. 12)}$$

Dados los valores eficaces se representan como se detalla en la ec. 13:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \dots \text{(Ec. 13)}$$

Una medida para mostrar la magnitud de los armónicos es la distorsion armónica total THD y corresponde a la proporción entre el valor RMS de las armónicas y la magnitud eficaz de la fundamental como muestra la ecuación 14.

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \dots \text{(Ec. 14)}$$

Reemplazando despejan ecuaciones que representen corriente y tensión RMS en función de sus valores fundamentales y distorsión como muestra la ecuación 15:

$$I_{rms} = I_{1rms} \sqrt{1 + THDI^2}$$

$$V_{rms} = V_{1rms} \sqrt{1 + THDV^2} \quad \dots \text{(Ec. 15)}$$

Cuando las consecuencias de las armónicas se muestran, el factor de distorsión de potencia se representa por la ecuación 16:

$$D = \sqrt{(S^2 - P_1^2 - Q^2)} \quad \dots \text{(Ec. 16)}$$

3.4.2.26 Reducción De Las Perdidas. Tras seleccionar las armónicas de corriente en un sistema que no tiene necesidad de reactivos, pero si un alto valor de THDi se corrige el uso de la energía tras disminuir las pérdidas en diversas áreas. (Calderón & Gonzáles, s.f.)

La disminución de las pérdidas, tras la corrección, se da por la ec. 17:

$$\Delta P = P_1 \left[1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \right] \quad \dots \text{(Ec. 17)}$$

P1 son las pérdidas antes de la corrección

$\cos\phi_1$ es el factor de potencia antes de la corrección

$\cos\phi_2$ es el factor de potencia tras la corrección

La caída de voltaje concatenada en una línea trifásica se expresa con la ec. 18:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \phi + X \sin \phi) = \frac{P}{V_n} (R + X \tan \phi) \quad \dots \text{(Ec. 18)}$$

X y R son la reactancia y la resistencia de la línea

P es la potencia activa

I es la corriente

V_n es la tensión nominal

Con igual "P" transmitida, la baja de tensión reducirá cuanto aumente el FP.

3.4.2.27 Evaluación De Parámetros Eléctricos Bajo La Presencia De Armónicos. Cálculo de la corriente armónica en cada orden: (Jaco & Gonzáles, 2016)

$$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 19)}$$

El análisis del sistema de compensación de reactiva industrial se debe conocer el FP, dato importante para analizar la eficiencia adecuada de un sistema eléctrico, definido por la ecuación 20:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_h}{S} \quad \dots \text{(Ec. 20)}$$

El factor de desplazamiento FPD, relación de la potencia fundamental activa P_1 y la potencia fundamental aparente, coseno del ángulo (ϕ_1) formado por los fasores de tensión y corriente, expresado con la ecuación 21:

$$FPD = \frac{P_1}{S_1} = \cos \phi_1 \quad \dots \text{(Ec. 21)}$$

En un sistema con distorsión armónica se tendrán que el FP real o verdadera está definida por la ecuación 22:

$$FP_{\text{real}} \leq \frac{P_1}{V_{1 \text{ rms}} I_{1 \text{ rms}}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2} \sqrt{1 + THD_v^2}} \quad \dots \text{(Ec. 22)}$$

Se puede asumir que en sistemas industriales las aportaciones de corrientes armónicas a la potencia promedio activa es menor, por lo cual, $P = P_1$.

El THDv es normalmente menor a 10%, por tal motivo, $V_{\text{rms}} = V_{1 \text{ rms}}$.

$$FP_{\text{real}} \leq \frac{P_1}{V_{1 \text{ rms}} I_{1 \text{ rms}}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} \dots \text{(Ec. 23)}$$

Obteniendo:

El FP real en consideraciones no sinusoidales se puede relacionar con el factor de potencia de desplazamiento, obteniendo un límite superior:

$$FP_{\text{real}} \leq FPD \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} \dots \text{(Ec. 24)}$$

La ecuación 23 da información de la naturaleza del FP real en cargas no lineales con valores considerables de anomalías armónica, aunque su FP de desplazamiento sea aproximado a uno, el FP real se muestra inferior a dicha magnitud.

En la implementación del banco de capacitancias para corregir el FP se produce una frecuencia resonante. Aquellas armónicas producidas por las cargas no lineales cuya frecuencia sea cercana a esta frecuencia de resonancia se verán amplificadas, lo cual se traduce en una mayor distorsión armónica interfiriendo con la correcta operación de equipos del sistema. Y hasta la destrucción mediante la explosión de los capacitores dañando los equipos involucrados en el sistema.

La amplificación de la corriente armónica en el condensador (sin reactancia antiresonantes), se puede definir con la ecuación 26:

$$I_{\text{ch}} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + jhX_{ST} - j\frac{X_c}{h}} \right] \dots \text{(Ec. 26)}$$

La amplificación de la corriente armónica en el condensador (con reactancia antiresonantes), se puede definir con la ecuación 27:

$$I_{\text{ch}} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + jh(X_{ST} + X_L) - j\frac{X_c}{h}} \right] \dots \text{(Ec. 27)}$$

Para el análisis de resonancia se tendrá en cuenta la potencia de cortocircuito (MVAsc) en el punto de instalación del banco de capacitores. La frecuencia de resonancia (f_r) se puede calcular a partir de la ecuación 28:

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sc}C}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVAsc}{MVA_r}} \\ &= \sqrt{\frac{100 * kVA_{tx}}{kVA_r * Z_{tx}\%}} \dots \text{(Ec. 28)} \end{aligned}$$

3.4.2.28 Análisis De La Respuesta A La Frecuencia Para El Caso Particular.

El mejoramiento del FP tras la implementación del banco de capacitancias es aceptable bajo la presencia de cargas lineales. En esta sección se evaluará la respuesta a la frecuencia de la planta en su estado original, capacitores y con reactancias.

En este análisis se verá la importancia que tiene la instalación de reactancias antiresonantes, así como su adecuada desintonización al armónico predominante de la planta industrial, estas alternativas se aprecian en la figura 14, figura 15 y la figura 16.

El circuito simplificado permite visualizar las posibles configuraciones y de esta manera evaluar la distorsión de tensión en las terminales de la carga para cada uno de los tres casos. La no linealidad de la carga se muestra mediante una señal fuente de corriente cuya magnitud está dada por una sumatoria de las principales componentes de la serie de Fourier correspondiente a la corriente demandada por la carga. (Jaco & Gonzáles, 2016)

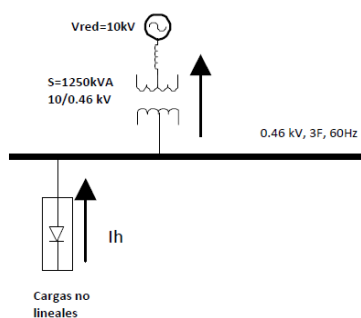


Figura 14. Configuración de circuito simplificado del sistema original
Fuente propia

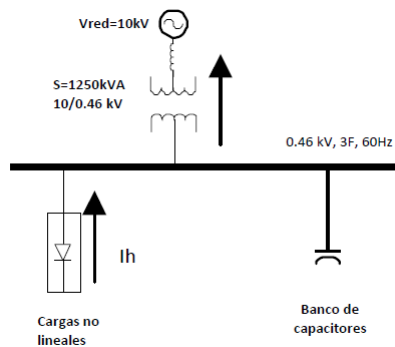


Figura 15. Configuración de circuito simplificado de sistema con banco de condensadores
Fuente propia

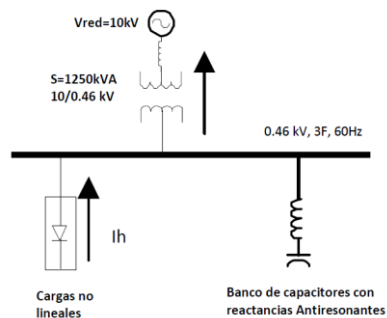


Figura 16. Configuración simplificada del sistema con BC y reactancia antiresonantes
Fuente propia

3.4.3 Formulación De La Hipotesis

3.4.3.1 Hipótesis General. La implementación de un banco de condensadores con reactancias antiresonantes para la planta Rinti S.A. permitirá la compensación reactiva y corrección del FP sin afectarse por los armónicos en la red o resonancia.

3.4.3.2 Hipótesis Específicas.

1. La compensación de energía reactiva instalando un banco de condensadores permitirá la reducción de la facturación mensual.

2. El diseño del banco de capacitancias que no se vea afectado por la presencia de armónicos y garantizar el tiempo de vida del banco.

3. El uso de reactancias antiresonantes como filtros pasivos de rechazo para proteger el banco de condensadores es una buena alternativa de solución donde se tiene presencia de anomalías armónicas en la red y evitando un posible evento resonante.

3.4.3.3 Variables.

a) *Variable independiente.* Distorsión armónica, consumo de energía reactiva.

b) *Variables dependientes.*

- V1: Tiempo de vida de condensadores y uso de filtros antiresonantes.
- V2: Presencia de elementos armónicos en la red.
- V3: Corrección de valores eléctricos de la red (V, FP y THD).
- V4: Reducción de consumo de energía y de pérdidas eléctricas.

3.5 Procedimiento A Ser Presentado

3.5.1 Método y Diseño Utilizado. El método de ingeniería utilizado en el diseño de investigación es descriptivo ya que la solución planteada se implementó, se detalla el procedimiento de análisis y diseño

3.5.2 Población y Muestra

- **Población:** La instalación de una solución de compensación capacitiva reactiva que pueda trabajar con normalidad y con un tiempo de vida adecuado en un sistema que tiene presencia de armónicos en su red de baja tensión es una solución requerida hoy en día en una gran cantidad de industrias de todo tipo (textil, plásticos, alimentos, metalurgia, minería, etc.) donde su mayor carga es inductiva (motores) y hacen uso de electrónica de potencia en su automatización y control (arrancadores electrónicos, variadores de velocidad, etc.), ya que todas tienen en común la necesidad de compensar energía reactiva y una elevada presencia de armónicos en su red.

- **Muestra:** Este trabajo de investigación está enfocado en la planta de elaboración de alimentos para perros y gatos Rinti S.A. que muestra una potencia contratada de 2MW a un valor de tensión de 10kV, cuenta con una subestación de cinco transformadores de 250, 1250, 500, 1250 y 2000kVA los cuales alimentan diferentes zonas de la planta a través de su tablero general en cada caso.

3.5.3 Instrumentos Y Técnicas Para Recolección De Datos.

1. **Técnicas para la recolección de datos.** La técnica utilizada en este trabajo de investigación es aplicativa experimental, medición de parámetros, evaluación de datos tomados, registro de fallas reportadas y cálculos matemáticos:

- **Medición y registro de parámetros eléctricos:** La técnica principalmente utilizada en este trabajo de investigación está basada en la medición de los parámetros eléctricos que permite ver el estado real de la red de la planta.

- **Análisis documental:** En esta técnica se evaluarán los recibos de consumo eléctricos de los últimos meses para determinar la necesidad de eliminar el elevado pago de consumo de energía reactiva.

- **Observación experimental:** La planta Rinti S.A. con casi 50 años de fundación tiene cinco transformadores y tableros generales, en los cuales a través del

tiempo por necesidad se implementaron bancos de condensadores. En la actualidad estos bancos están deteriorados y no trabajan a toda capacidad.

2. Descripción de los instrumentos utilizados.

El instrumento utilizado normalmente es un analizador de redes que se instala por un periodo de 7 días continuos y permite registrar el comportamiento de la red de baja tensión de la planta, guarda la medición de todos los parámetros eléctricos relevantes para el análisis. Este equipo está calibrado por una institución certificada que cuente con los patrones adecuados de calibración.

3.5.4 Método Para Análisis De Los Datos.

El análisis de los parámetros eléctricos y metodología de solución y diseño del banco de condensadores con reactancias antiresonantes está basado en la recomendación de la NTCSE así como las recomendaciones dadas por las principales marcas líderes del mercado eléctricos en fabricación de condensadores y sistema de protección ante presencia de armónicos, el cálculo, diseño y selección de un sistema de compensación automático de reactivos, por otro lado se tiene que tener en cuenta que la implementación de un banco de condensadores le permite a la planta una reducción considerable en su facturación mensual de consumo eléctrico, así también el uso de reactancias antiresonantes le permite al banco de condensadores cumplir su función durante un tiempo de vida adecuado de 10 años a pesar de la presencia de armónicos que normalmente reducen rápidamente el tiempo de vida de los condensadores dañándolos y elevando considerablemente los costos de mantenimientos correctivos. En esta parte se analizará cada procedimiento de toma de datos, calculo y selección de equipamientos adecuados en la construcción de un banco de capacitancias con reactancias antiresonantes para un sistema inductivo con presencia de armónicos.

3.5.5 Recopilación De Datos E Identificación De Planta.

La primera actividad a realizar es el registro de datos de la planta que se muestra en la figura 17 así como los datos relevantes de su consumo energético e instalaciones eléctricas como:

- Nombre detallado de la empresa: Rinti S.A.
- Antigüedad de la planta: 48 años
- Localización de la planta: Carretera Central Km. 17.5 – Ate – Lima

- Tipo de industria: Elaboración de alimentos para mascotas.
- Horario de operación: lunes a sábado de 8:00 a 17:00 horas.
- Facturación eléctrica de los últimos meses.
- Diagrama unifilar de los alimentadores principales.
- Inspección visual del estado de equipos existentes.



Figura 17. Vista exterior de la subestación y planta Rinti S.A.
Fuente propia

3.5.5.1 Toma De Mediciones En Campo. Se ejecutó un análisis de calidad de la energía con el objeto de evaluar la oportunidad de ahorro de energía en el sistema eléctrico que se muestra en el unifilar de la figura 18 correspondiente a la planta Rinti S.A., en esta ocasión solo se evaluara al sistema del transformador número 2, cuyas cargas están compuestas en su mayoría por motores y secadores según se detalla en el cuadro. Los valores obtenidos con el analizador de redes en calidad de la energía y otros, Hioki 3196 como se muestran en las figuras más abajo.

La subestación como se aprecia en la figura 18 tienen una alimentación en 10kV y el sistema de media tensión está compuesto por una celda de llegada: seccionador de 400A/24kV más un interruptor de potencia de 630A/24kV, así también se tiene un sistema de distribución en media tensión con cinco salidas las cuales son:

- Celda de salida 1: Secc. fusible 25A/24kV + Transfor. 250kVA, 10/0.23kV.
- Celda de salida 2: Secc. fusible 100A/24kV + Transfor. 1250kVA, 22.9-10/0.46kV.
- Celda de salida 3: Secc. fusible 50A/24kV + Transfor. 500kVA, 10/0.46kV.
- Celda de salida 4: Secc. fusible 125A/24kV + Transfor. 1250kVA, 22.9-10/0.46kV
- Celda de salida 5: Secc. fusible 125A/24kV + Transfor. 2000kVA, 22.9-10/0.46kV

Las salidas de cada transformador alimentan sus tableros generales de baja tensión TG-1, TG-2, TG-3, TG-4 y TG-5. Esta subestación está a la intemperie y todos los transformadores son en aceite, como se puede apreciar actualmente la alimentación es en 10kV, por lo que paulatinamente estos transformadores deberán cambiarse para poder estar adecuados cuando el nivel de tensión del suministro aumente, así también se puede apreciar que la protección de cada transformador es básica, solo con fusibles.

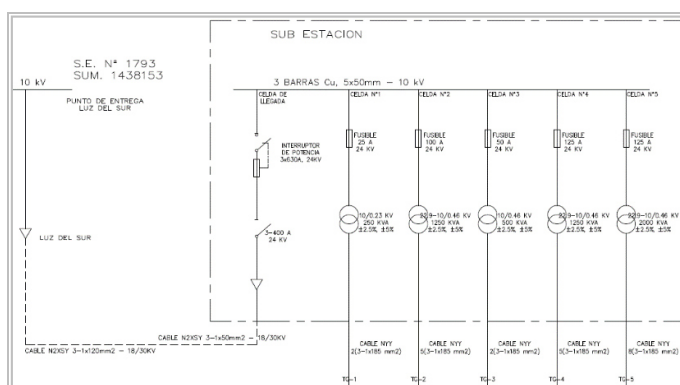


Figura 18. Diagrama unifilar de la subestación de la planta Rinti S.A
Fuente: Planta Rinti SA



Figura 19. Transformador T2 y su placa de características
Fuente propia

Para este caso ante el elevado pago mensual en consumo eléctrico se evaluó la necesidad de implementar un banco de condensadores, en las instalaciones actuales del cliente los sistemas de los tableros TG-1, TG-3, TG-4 y TG-5 ya cuentan con bancos de condensadores, aunque tienen ligera antigüedad y no están operando al 100% el cliente pidió se evalúe la implementación de un nuevo banco de capacitancias en el sistema del tablero TG-2 y T2 que se muestra en la figura 20, este tablero tiene un interruptor principal de 2000A y 12 circuitos derivados como se muestra en la figura

20, el tablero cuenta con un sistema de medición compuesto por un amperímetro y un voltímetro, los cuales solo permiten la visualización de los parámetros de tensión y corriente, ese sistema de medición básico no permite evaluar las características o parámetros reales de las cargas, por lo que se instalará un analizador de redes para un correcto estudio del comportamiento de la carga y su respuesta a la frecuencia y poder determinar la correcta configuración que se tomará para el banco de condensadores.

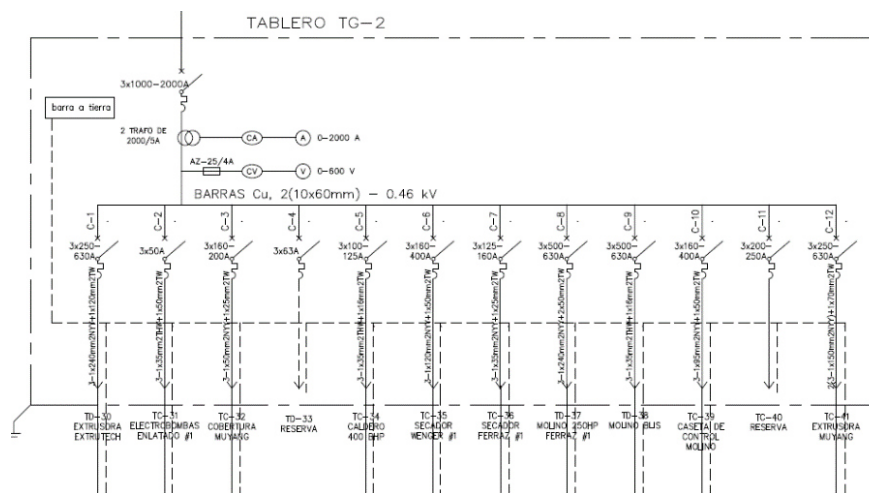


Figura 20. Diagrama unifilar del tablero TG-2
Fuente Planta Rinti SA

Así también, en la Tabla 6 se muestra el cuadro de cargas del tablero TG-2, se puede apreciar los 12 circuitos de salida del tablero TG-2, estas salidas alimentan sub tableros que en su mayoría son arranques de motores con presencia de variadores y tarjetas electrónicas, esto ya da una idea de las características de la carga de TG-2.

Tabla 3 - Cuadro de cargas del tablero TG-2

TABLERO TG-2			
codigo	zona de ubicacion	potencia nominal	porcentaje de trabajo
TD-30	EXTRUSORA EXTRUTECH	342HP	90%
TD-31	ELECTROBOMBAS ENLATADO #1	52HP	80%
TD-32	COBERTURA MUYANG	64HP	90%
TD-33	RESERVA		90%
TD-34	CALDERO 400BHP	11KW	85%
TD-35	SECADOR WENGER #1	122.5KW	90%
TD-36	SECADOR FERRAZ #1	85.35KW	90%
TD-37	MOLINO 250HP FERRAZ #1	186.5KW	85%
TD-38	MOLINO BLISS	218KW	85%
TD-39	CASETA DE CONTROL MOLINO	107.4KW	80%
TD-40	RESERVA		90%
TD-41	EXTRUSORA MUYANG	254.2KW	90%

Para dar solución a la necesidad del cliente y poder determinar cuál de las configuraciones se utilizarán para implementar la compensación reactiva en el tablero TG-2, se tiene que instalar un analizador de redes, en la figura 21 se visualiza el principio de instalación del analizador de redes, la conexión debe considerar la toma de medida de tensión y corrientes en todas las fases.

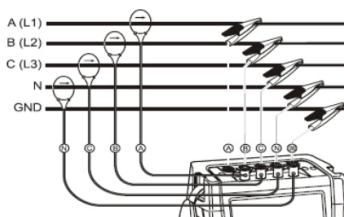


Figura 21. Principio de conexión de analizador de redes en el punto de la red.
Fuente: Gustavo Calderón A. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, México

Como ya se mencionó se hizo uso de un analizador de redes marca Hioki, se instaló en el TG-2 y se dejó registrando por cuatro días, tiempo suficiente para tener una muestra del comportamiento de la red, esto se muestra en la imagen 22 y 23.



Figura 22. Conexión de analizador de redes Hioki en tablero TG-2
Fuente propia



Figura 23. Programación y registro de parámetro eléctrico relevantes para análisis
Fuente propia

Para poder realizar un mejor análisis de datos, se muestran los registros obtenidos en la tabla del Anexo 04, como se puede apreciar se tiene el registro desde el día 09/07/2019 hasta el 12/07/2019, en esta tabla se muestra la fecha y hora del registro, así como las magnitudes de frecuencia, tensión, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y FP, el registro fue realizado con toma de muestras cada 15 minutos, para reducir el tamaño del registro se muestra mostrando solo los momentos donde se registraron los valores más altos de potencia reactiva.

El valor promedio registrado por el analizador de redes para la potencia reactiva fue de 680kVAR y como se aprecia en el cuadro hay valores registrados que superan el doble del promedio de la potencia reactiva, se consultó con el jefe de mantenimiento de planta e indicaron que en ocasiones el consumo tiene picos altos debido a la sobrecarga que le dan a sus molinos en producción, pero son momentáneos.

Por otro lado, según la tabla 4 y la buena práctica recomendada por la empresa Schneider Electric, una de las empresas líderes en soluciones de calidad de energía, se recomienda que la distorsión armónica de tensión no supere el 3%, como se puede ver en la tabla 8, en diferentes periodos se registran valores que se aproximan al 3% y en un punto lo superan, esto quiere decir que el sistema se encuentra al límite permisible.

Dado lo indicado en la tabla del Anexo 05, se conversó con el jefe de mantenimiento de la planta y este manifestó que tienen una planificación de automatizar algunos sectores más y seguir implementando variadores de velocidad, esto es un indicativo que la distorsión armónica seguirá elevándose con el tiempo, por lo que no sería recomendable instalar un banco de capacitores convencional, dicho esto, desde este punto ya se define que la configuración para la solución más optima es la de un banco de capacitores con reactancias antiresonantes

3.5.5.2 Registro De Facturación Mensual. Culminada la medición con el analizador de redes, ahora se tiene que realizar el registro de las ultimas facturaciones mensuales para evaluar la realidad económica de la empresa Rinti S.A. respecto a sus gastos o pagos por consumo eléctrico.

Como ejemplo se tiene el recibo de facturación mensual del mes de noviembre y diciembre del 2019, estos son los meses anteriores a la instalación del banco de capacitancias con reactancias antiresonantes, donde se puede mostrar los siguientes detalles:

- Energía activa consumida en hora punta

- Pago por energía activa consumida en hora punta
- Energía activa consumida fuera de hora punta
- Pago por energía activa consumida fuera de hora punta
- Energía reactiva consumida
- Pago por energía reactiva consumida
- Cargos adicionales por potencia contratada y consumida
- Pago total del mes en facturación eléctrica

Como se puede ver en la figura del Anexo 06, la facturación del mes de noviembre muestra que la planta paga un total de 221,740.61 soles en su facturación total, de este total se paga 7,915.76 soles por concepto de consumo de energía reactiva. Según lo conversado con la empresa Rinti S.A., ellos tienen un contrato de cliente libre con la empresa Statkraft quien es ahora su concesionario eléctrico, como comentario ellos ya tienen instalado su sistema de rechazo de carga y siendo clientes libres tienen costos preferenciales en pago de consumo de energía, aun así el pago de casi ocho mil soles mensuales es considerable y representaría un ahorro en los costos variables mensuales de operación de la planta.

De similar manera como se puede apreciar en el detalle de la facturación mensual del mes de diciembre que se puede ver en la figura del Anexo 06, la planta Rinti S.A. pagó un total de 229,651.77 soles en su facturación total, de este total pagó 7,950.72 soles por concepto de consumo de energía reactiva, esto muestra que su consumo mensual es casi constante, aunque en estos meses baja ligeramente la carga de producción de la planta

3.5.5.3 Procedimiento De Cálculo Y Diseño. En esta parte del estudio se evaluará la información recopilada hasta el momento para poder dar inicio al diseño de la solución requerida. Los resultados obtenidos en las mediciones armónicas fueron comparados con los niveles de referencia existentes en la normativa internacional (IEEE 519 -2014) así como lo indicado en la NTCSE, con el propósito de determinar su cumplimiento con el estándar establecido.

Como ya se mencionó debido al nivel de distorsión armónica identificado y a la manifestación de Rinti S.A. indicando que seguirán implementando equipos con electrónica de potencia, de acuerdo al análisis previo y tras una conversación con el

responsable técnico de la planta se ha concluido que la mejor solución a implementar es un banco de condensadores con reactancias antiresonantes, de esta manera se creará una desintonización variando la impedancia puramente capacitiva que es afectada por las altas frecuencias, a una impedancia dependiente de la frecuencia en forma inductiva a altas frecuencias y capacitiva a frecuencia fundamental.

3.5.5.4 Análisis De Mediciones. Después de los valores mostrados líneas arriba correspondiente a las medidas realizadas en planta, se puede definir la potencia reactiva que se requiere para el banco a implementar es la siguiente:

Potencia reactiva media registrada es 680kVAR - Factor de diseño del 25%

Potencia reactiva (Q), para diseño es 850kVAR a una tensión de 460V.

$$Q_{BC} = 850kVAR$$

Luego de definida la potencia reactiva requerida para el banco de capacitancias se tiene que empezar con los cálculos. Para proceder con el cálculo para la elección de las reactancias antiresonantes y capacitores con las fórmulas adecuadas, se muestra en la tabla 9 un resumen de los parámetros registrados en la planta Rinti S.A., estos se tendrán en cuenta en los cálculos:

Factor de potencia de desplazamiento: FPD

Tabla 4 – Valores iniciales registrados en la red de BT del tablero TG-2

	Sistema Inicial
Tensión (Vrms)	456
THDv (%)	2.5
THDi (%)	4.8
Corriente (Irms)	1250
FPD	0.77

3.5.5.5 Cálculos, Selección De Equipos Y Diseño. El diseño optimo del banco de capacitancias que involucra una variación de la impedancia serie R-C-L con el objetivo de proteger a los capacitores frente a un sistema contaminado de armónicas y evitar los fenómenos de resonancia, para ello el factor de sintonía juega un papel de importancia refleja la relación de la reactancia del reactor y del capacitor a la frecuencia fundamental, esto se muestra en la ec. 29.

Factor de sintonía: ρ / Frecuencia de resonancia: Fr

$$\rho = \left(\frac{f}{f_R}\right)^2 \dots \text{(Ec. 29)}$$

Así también la nueva tensión a soportar por los capacitores está definida en la ecuación 30, la cual está en función del factor de sintonía y la tensión de red:

Tensión de soporte del capacitor: V_{sc}

Tensión de la red: V_{red}

$$V_{sc} = \frac{V_{red}}{1 - \rho} \dots \text{(Ec. 30)}$$

Esta es la razón por la cual los capacitores de bancos de condensadores existentes no pueden ser usados para ser implementados con filtros desintonizados y tienen que ser reemplazados en su totalidad por otros capacitores con mayor tensión nominal de servicio, esto de resumen en una regla practica de niveles de tensión en la ecuación 31.

Tensión nominal del capacitor: V_n

$$V_{red} < V_{sc} \leq V_n \dots \text{(Ec. 31)}$$

De esta manera, para el cálculo de la potencia efectiva brindada por el condensador, se tendrá en cuenta la potencia electiva reactiva inicial y también la potencia nominal del capacitor, ecuación 32:

Potencia reactiva efectiva: Q_{ef}

Potencia nominal del capacitor: Q_n

$$Q_{ef} = \left(\frac{V_{red}}{V_n}\right)^2 \frac{Q_n}{(1 - \rho)} \dots \text{(Ec. 32)}$$

Realizando un proceso de despeje se obtiene la capacitancia del condensador:

Capacitancia del condensador: C

$$C = \frac{Q_{ef} (1 - \rho)}{2\pi f V_{red}^2} \text{ (\mu F)} \dots \text{(Ec. 33)}$$

Hasta el momento se ha definido los parámetros del capacitor en la ecuación 33, de manera similar se tiene el cálculo de la inductancia del reactor en función de la capacitancia del condensador, esta ecuación 34 es muy importante para el diseño o selección de la reactancia:

Inductancia del reactor: L

$$L = \frac{\rho}{(2\pi f)^2 C} \text{ (mH)} \dots \text{(Ec. 34)}$$

Así también, se definirá el factor de potencia real (FP real) con la fórmula 35:

$$FP_{\text{real}} \leq FPD \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \dots \text{(Ec. 35)}$$

Se inicia con el cálculo del factor de potencia real (FP real), reemplazando los valores iniciales de la tabla 9 se tiene como resultado la ecuación 36,

$$FP_{\text{real}} = 0.77 \times \frac{1}{\sqrt{1 + 0.048^2}} = 0.769 \dots \text{(Ec. 36)}$$

Se puede observar que el FP real, difiere ligeramente del medido.

Para continuar con los cálculos se tiene que definir el valor del factor de desintonización, este factor es muy importante en el diseño de la reactancia por lo que será fácil su cálculo, para esto se tiene que definir primero que se trabajará en base a los parámetros técnicos de la marca Schneider Electric, teniendo esto en consideración se muestra en la figura del Anexo 07 los tres tipos de reactancias que tiene la marca Schneider.

Como se puede ver, la marca Schneider Electric como muchas otras marcas líderes en el mercado tiene una variedad mínima de soluciones estándar para las reactancias desintonizadas, por lo que será sencillo seleccionar la que se requiere para esta solución basándose simplemente en el nivel de tensión de la red donde se trabaja.

Es válido mencionar algunas de las características técnicas de estas reactancias según el fabricante como se muestra en el Anexo 07, entre las cuales se tiene:

- Son de tipo seco con circuito magnético impregnado en resina epóxica.
- Su grado de protección es IP00
- Están fabricadas bajo normativa IEC 60289 y EN 60289
- El orden de sintonización en relación a la impedancia es 4.2 (5.7%), 3.8 (7%), 2.7 (14%).
- Nivel de aislamiento máximo es de 1.1kV
- Requiere ventilación forzada con protección por sobre temperatura.

En este caso se tiene una red de 460V nominal, si se ve los tres tipos de reactancias desintonizadas que se muestran en la figura 24, fácilmente se puede seleccionar por el nivel de tensión y se tendría la reactancia para redes de 480V.

Redes de 480V, 60Hz

Factor de desintonización (%)	Potencia (kVar)	Inductancia (mH)	I_{ur} (A)	W (mm)	W1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	H (mm)	Peso (kg)
5.7 %	12.5	2.76	20.9	240	200	160	125	220	13
	25	1.42	40.6	240	200	160	125	220	18
	50	0.71	81.3	280	200	200	125	270	25
	100	0.35	162.6	350	200	220	125	350	40

Figura 24. Reactancia para redes de 480V, 60Hz
Fuente: Lista de Precios Schneider Electric

Seleccionada el tipo de reactancia desintonizada con la que se trabajará se puede ver en la figura 24, ya se tiene el factor de desintonización, entonces:

$$\rho = 5.7\%$$

Ahora que ya se tiene el valor del factor de desintonización se inicia con el cálculo de la tensión de soporte de los capacitores (V_{sc}), según la ecuación 37:

$$V_{sc} = \frac{V_{red}}{1 - \rho} \dots \text{(Ec. 37)}$$

Reemplazando los valores que ya se tienen:

$$V_{sc} = \frac{456}{1 - 0.057} = 483.56$$

Este resultado indica que los capacitores a elegir deben tener una tensión de operación mayor a 483.6V, con esta nueva información se tiene que mostrar ahora los valores estándar que manejan los capacitores, entonces nuevamente se recurrirá a los valores que se manejan en la fabricación de condensadores trifásicos de la marca Schneider, los cuales de manera similar tienen ya definido sus parámetros de diseño.

Las características más relevantes de los condensadores se muestran en el Anexo 08, se tiene:

- Expectativa de vida mayor a 130,000 horas, equivalente entre 14 a 15 años.
- Temperatura de operación de 55°C
- Sensibles a los armónicos acortando considerablemente su vida útil.

De manera similar a la reactancia y habiendo calculado la tensión de soporte de los condensadores (V_{sc}) con un valor de 483.6V, es fácil seleccionar el correcto tipo de condensador a utilizar basándose en los niveles de operación nominal de los condensadores en la figura 25:

Condensadores de 525V

Pot. (kVar) según las tensiones de operación										IN (A)	Tipo de envase	Ø (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
230	240	260	380	400	415	440	480	525						
2.3	2.5	2.9	6.3	7.0	7.5	8.4	10.0	12.0	13.2	LC	70	245	1.1	
2.9	3.1	3.7	7.9	8.7	9.4	10.5	12.5	15.0	16.5	RC	90	242	1.6	
4	4.3	5.1	10.8	12	12.9	14.5	17.3	20.6	22.7	RC	90	242	1.6	
5.8	6.3	7.4	15.7	17.4	18.7	21.1	25.1	30.0	33	TC	116	242	2.5	
7.9	8.6	10.1	21.6	24	25.8	29	34.5	41.3	45.4	VC	136	242	3.2	

Figura 25. Condensadores marca Schneider Electric de 525V máximo de operación
Fuente: Lista de Precios Schneider Electric

Teniendo en consideración lo calculado en el punto 6.1.1, la potencia reactiva necesaria para el banco de condensadores es de 850kVAR a 456V.

$$Q_{BC} = 850\text{kVAR}$$

Se puede considerar que la potencia efectiva (Q_{ef}) del banco deseado es 850kVAR, entonces realizando un cálculo inverso se puede calcular la potencia nominal del banco a 525V (V_n) en la ecuación 38, de esta manera se consigue la adecuada configuración de condensadores, entonces:

$$Q_{ef} = \left(\frac{V_{red}}{V_n} \right)^2 \frac{Q_n}{(1 - \rho)} \dots \text{(Ec. 38)}$$

Reemplazando

$$\text{Calculando se tiene } Q_{ni} = 1062.48 \text{ kVAR}$$

Ahora lo que procede es seleccionar un correcto juego de condensadores que a operación de 525V de un total de 1062.48kVAR, antes se aclara que para la selección adecuada de condensadores se debe tener en consideración que el controlador automático que factor de potencia debe tener una configuración de pasos de condensadores optima que le permita compensar finamente la potencia requerida.

Ahora se realiza un cálculo rápido de condensadores que permitan llegar a la potencia requerida y a la vez, en este caso puntual se aclara que esta configuración optima a la que se hace referencia es una proporción adecuada en la potencia de cada paso que permite una configuración fácil y asegure la correcta operatividad del controlador automático de FP.

En la tabla del Anexo 09 se muestra la configuración obtenida conocida como 1:2:4, esto quiere decir que el paso uno es el más pequeño y su tamaño es como 1, seguido del segundo paso con un tamaño como 2 (proporcional al primer paso) y

seguidos los siguientes pasos que tienen un tamaño como 4 (proporcional al primer paso), obteniendo lo mostrado.

En la tabla del Anexo 09, la numeración de C1 hasta C10 representan los pasos propuestos, es decir el banco que se está diseñando tiene un total de 10 pasos, por otro lado, se puede ver que la cantidad indica el número de condensadores que se está considerando en cada paso, por ejemplo, el paso 10 está compuesto por 1 condensador de 41.3kVAR, 2 condensadores de 30kVAR y 2 condensadores de 12kVAR, haciendo un total de 125.3kVAR en ese paso.

De esta forma habiendo explicado la configuración lograda y la cantidad de condensadores y pasos considerados se ha obtenido una potencia total de 1095.0 kVAR que será la nueva potencia real del banco (Q_n) a 525V, como inicialmente se había indicado que lo que se quería lograr era 1062.48 kVAR se ha obtenido un valor muy próximo al requerido.

Potencia total en kVAR a 525V:	1095.0
--------------------------------	--------

Ahora corresponde realizar nuevamente un cálculo inverso de la potencia efectiva total a la tensión de red real (456V) teniendo ya el nueva Q_n , se reemplaza nuevamente en la ecuación 38 obteniendo el nuevo Q_{ef} (total):

$$Q_{ef} = \left(\frac{456}{525}\right)^2 * \frac{1095}{(1 - 0.057)} = 876.02 \text{ kVAR}$$

Como se puede ver la nueva potencia efectiva que entregará el banco que se está diseñando será de 876.02 kVAR a una tensión de red de 456V. A partir de los valores obtenidos corresponde seleccionar las reactancias y verificar su correcta operación.

Entonces, del valor real obtenido de la potencia efectiva total a la tensión de red, se tiene que calcular la potencia efectiva para cada valor de capacitancia en cada paso, esto permitirá evaluar las reactancias adecuadas para cada paso. Se debe tener en cuenta que como se puede ver en cada paso se tiene varios condensadores, pero solo se podrá tener una reactancia, es decir en total el banco de condensadores tiene 10 pasos, es decir tendrá 10 reactancias desintonizadas.

Se realiza el cálculo de la Potencia reactiva efectiva (Q_{ef}) a la tensión de red (456V) para cada paso diferente, siendo específicos se tiene tres pasos diferentes, los

pasos de orden 1, los de orden 2 y los de orden 4, se comenzará con el cálculo para el paso 1:

$$Q_{ef1} = \left(\frac{456}{525}\right)^2 * \frac{30}{(1 - 0.057)} = 24 \text{ kVAR}$$

De manera similar se calcula la potencia efectiva (Q_{ef}) para el paso 2, que en este caso corresponde también al paso de tamaño 2:

$$Q_{ef2} = \left(\frac{456}{525}\right)^2 * \frac{62.6}{(1 - 0.057)} = 50.08 \text{ kVAR}$$

Finalmente, de manera similar se calcula la potencia efectiva (Q_{ef}) para el tamaño 4, es decir para el tamaño que es cuatro veces el valor del paso 1, en este caso corresponde a los pasos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

$$Q_{ef3} = \left(\frac{456}{525}\right)^2 * \frac{125.3}{(1 - 0.057)} = 100.24 \text{ kVAR}$$

Ahora se tienen los valores de la potencia efectiva (Q_{ef}) de cada tamaño diferente de los pasos del banco de condensadores, como se puede ver y ya se comentó solo se tiene tres tamaños diferentes y con esto se realizarán los cálculos y análisis necesario para seleccionar las reactancias desintonizadas para cada caso.

En la tabla del Anexo 10 se muestra el resumen de las magnitudes de potencia efectiva obtenida en el cálculo para cada paso del banco de condensadores, con estos valores se realizarán los próximos cálculos para el diseño de las reactancias.

Se procede a calcular la capacitancia para cada uno de los tres tamaños de condensadores que se tiene con la fórmula planteada anteriormente, una vez calculado el valor de las capacitancias para cada uno de los casos diferentes se podrá empezar a evaluar las reactancias adecuadas para cada caso con la ecuación 39.

$$C = \frac{Q_{ef} (1 - \rho)}{2\pi f V_{red}^2} \quad (\mu F) \quad \dots \text{ (Ec. 39)}$$

Se inicia con el cálculo de la capacitancia del menor paso, o paso 1, se obtiene un valor de 288.72 μF de capacitancia final para el paso 1(tamaño1):

$$C_1 = \frac{24 * 1000 * (1 - 0.0057)}{2 * \pi * 60 * 456^2} = 288.72 \mu F$$

De manera similar se realiza el cálculo para el segundo tamaño de capacitancia que corresponde al paso 2, obteniendo una capacitancia equivalente de 602.45 μF :

$$C_2 = \frac{50.08 * 1000 * (1 - 0.0057)}{2 * \pi * 60 * 456^2} = 602.45 \mu F$$

Finalmente, para los pasos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 que tienen el mismo tamaño 4 veces el paso 1, se calcula igualmente la capacitancia equivalente:

$$C_3 = \frac{100.24 * 1000 * (1 - 0.0057)}{2 * \pi * 60 * 456^2} = 1205.87 \mu\text{F}$$

Ahora se tiene el valor de las capacitancias de los tres tamaños de pasos de condensadores del banco que se está diseñando, a continuación, se muestra la tabla del Anexo 11 con el resumen de los valores obtenidos que ayudara con los cálculos posteriores que se realizaran para completar el diseño del banco con reactancias antiresonantes.

Al tener calculado la potencia y capacitancia para cada paso del banco se puede proceder al cálculo de la inductancia para cada uno de los pasos del banco, se hará uso de la ecuación 40.

$$L = \frac{\rho}{(2\pi f)^2 C} \quad (\text{mH}) \quad \dots \text{ (Ec. 40)}$$

Se inicia con el cálculo de inductancia del reactor para el primer paso del banco de acuerdo a los valores obtenidos previamente de capacitancias, obteniendo

$$L_1 = \frac{0.0057}{(2 * \pi * 60)^2 * 288.72 * 10^{-6}} = 1.389 \text{ mH}$$

De manera similar se calcula la inductancia para el paso de tamaño dos:

Finalmente se calcula la inductancia para el paso de tamaño 4 correspondientes a los pasos 3,4,5,6,7,8,9 y 10 del banco:

$$L_3 = \frac{0.0057}{(2 * \pi * 60)^2 * 1205.87 * 10^{-6}} = 0.333 \text{ mH}$$

Ahora se tiene el valor de la inductancia para cada uno de los pasos de condensadores del banco, los cuales se muestran en la tabla del Anexo 12.

Con la inductancia ya calculada y con la capacidad reactiva en cada paso se podrá ya seleccionar la adecuada reactancia para cada paso, esto se hará regresando nuevamente al tipo de reactancia ya preseleccionada de la marca Schneider Electric.

Regresando a la figura 26, se puede ver que la elección de la reactancia depende no solo del nivel de tensión de la red sino también de la potencia a compensar en el paso y a la inductancia requerida, en ese caso se tiene ambos valores, lo que permitirá seleccionar rápida y fácilmente las reactancias adecuadas para cada paso

Redes de 480V, 60Hz

Factor de desintonizacion (%)	Potencia (kVar)	Inductancia (mH)	I _{MP} (A)	W (mm)	W1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	H (mm)	Peso (kg)
5.7 %	12.5	2.76	20.9	240	200	160	125	220	13
	25	1.42	40.6	240	200	160	125	220	18
	50	0.71	81.3	260	200	200	125	270	25
	100	0.35	162.6	350	200	220	125	350	40

Figura 26. Reactancia para redes de 480V, 60Hz

Fuente: Lista de Precios Schneider Electric

Iniciando con la selección de la reactancia para el paso uno, se tiene de los cálculos ya realizados una potencia requerida de 24kVAR y una inductancia calculada de 1.389mH, por lo que se puede apreciar que la reactancia que se acomoda será la reactancia de la segunda fila con una capacidad de hasta 25kVAR con 1.42mH y con una corriente máxima de 40.6A.

De manera similar se selecciona la reactancia para el paso de tamaño dos de 50.08kVAR y 0.66mH, se ve en la figura 26 que la reactancia que se acomoda a lo requerido es una con capacidad de hasta 50kVAR con 0.71mH y con una corriente máxima de 81.3A.

Finalmente se selecciona la reactancia para el paso de tamaño cuatro, el mayor paso, de 100.24kVAR y 0.33mH de inductancia, analizando la figura 26 se ve que la reactancia adecuada es la de 100kVAR con 0.35mH y una corriente máxima permanente de 162.6A.

Como se puede ver las reactancias obtenidas tienen un factor de desintonización de 5.7%, esto mediante calculo simple y como se describió en los detalles técnicos las reactancias tienen un orden de desintonización del 4.2 armónico, esto quiere decir que desintonizará los armónicos mayores a 4.2, es decir, mayores al quinto armónico.

Ahora de manera estratégica se muestra en el Anexo 13 el detalle de espectros de los armónicos registrados por el analizador de redes, como se puede ver en los picos más altos se tiene el THDi en el armónico de orden 5 el cual como se ve es el predominante y el que aporta en casi la totalidad de la distorsión de corriente. Por otro lado, en la tabla 9 se indicó que el promedio THDi registrado fue de 4.8% este coincide con la gráfica que se aprecia en la figura del Anexo 13 donde como ya se mencionó el

quinto armónico es el predominante y las reactancias a utilizar seleccionadas hasta el momento cumplen con el objeto de desintonización.

$$\rho = 1 / h^2, h = \text{orden de armónico... (Ec. 41)}$$

Siguiendo con los cálculos para terminar de confirmar la selección adecuada de las reactancias, se tiene que calcular la corriente a la que será sometida, esta corriente es una resultante entre las corrientes generadas por los armónicos y la corriente fundamental del banco, para esto se consideraran las siguientes formulas:

$$I_{ef} = I_1 * \sqrt{1 + THDi^2} \dots \text{(Ec. 42)}$$

Donde, I_{ef} = Corriente efectiva que circulará por la reactancia

I_1 = Corriente fundamental del banco de condensador

El objeto de calcular la I_{ef} es que esta corriente no puede ser superior a la corriente máxima permanente que soporta la reactancia.

Entonces, al tener tres reactancias diferentes se tiene que calcular la corriente efectiva (I_{ef}) para cada caso, por otro lado, se tiene que calcular el factor de desintonización con los valores reales obtenidos en cada caso también y con esto la nueva y real tensión de soporte del capacitor, con esto se podrá calcular la corriente fundamental del banco de capacitancias definida con la siguiente formula, la cual se tendrá que calcular para cada caso:

$$I_1 = \frac{Q_{ef}}{\sqrt{3} * V_{sc} * (1 - \rho)} \dots \text{(Ec. 43)}$$

Calculando para cada caso:

$$I_{1-P1} = \frac{24 * 10^3}{\sqrt{3} * 483.56 * (1 - 0.057)} = 30.39 \text{ A}$$

$$I_{1-P2} = \frac{50.08 * 10^3}{\sqrt{3} * 483.56 * (1 - 0.057)} = 63.41 \text{ A}$$

$$I_{1-P4} = \frac{100.24 * 10^3}{\sqrt{3} * 483.56 * (1 - 0.057)} = 126.92 \text{ A}$$

Ahora que se tiene la potencia fundamental para cada paso, se calcula entonces la corriente efectiva para los pasos de tamaños 1, 2 y 4:

$$I_{ef-1} = 30.39 * \sqrt{1 + 0.048^2} = 30.42 \text{ A}$$

$$I_{ef-2} = 63.41 * \sqrt{1 + 0.048^2} = 63.48 \text{ A}$$

$$I_{ef-3} = 126.92 * \sqrt{1 + 0.048^2} = 127.06 \text{ A}$$

Finalmente se tiene la corriente efectiva para cada paso y se comprueba que no supera la corriente máxima permanente del reactor según la tabla 14, por ende, se satisface la solución.

Tabla 5 – Validación de corriente máxima permanente de los reactores

	I ef (A) (calculada)	I max (A) (reactancia)
R1	127.06	162.60
R2	63.48	81.30
R4	30.42	40.60

Finalmente, en la tabla del Anexo 14 se muestra la configuración obtenida para el banco de condensadores resultante que se ha diseñado:

3.5.6 Análisis económico de la implementación.

En esta parte del estudio se evaluará la rentabilidad de la inversión de capital para la implementación del sistema planteado en los capítulos anteriores.

3.5.6.1 Costo De Implementación. Se iniciará mostrando una relación de equipamientos en la tabla del Anexo 15 que se requieren para la instalación del banco de capacitancias con reactancias.

Así también se muestra el costo de la fabricación del banco de capacitancias con reactancias antiresonantes en la tabla del Anexo 16 y se detalla también los costos de implementación, montaje y puesta en marcha correspondientes:

Dadas las tablas de los Anexos 15 y 16, se tiene ya la relación de equipos que se requieren para implementar el banco, así como el costo total para su implementación e instalación, este valor final es lo que en adelante se llamará “valor de adquisición”.

Monto de Inversión, se da compuesto por el costo de la posesión y el costo de la operación, donde:

Costos de Posesión, para tener este costo se necesita evaluar el valor de adquisición, vida útil económica, valor de rescate, depreciación e inversión media anual:

- Valor de adquisición (V_a), está dado por el costo de fabricación, Anexo 16.

$$V_a = S/ 111,165.73$$

- Vida económica útil (V_{eu}), el tiempo de vida asegurado por el fabricante es de 10 años.

$$V_{eu} = 30,000 \text{ horas, aproximadamente } 10 \text{ años}$$

- Valor de rescate (V_r), es el valor de reventa que se logrará del equipo al termianr su vida útil, equivalente al 20% del valor de adquisición (V_a).

$$V_r = 20\%. V_a = S/ 22,233.15 \dots (\text{Ec. } 44)$$

- Depreciación (D), es la devaluación contable del equipo, con el fin de evaluar fondos para una nueva adquisición.

$$D = (V_a - V_r) / V_{eu} = S/ 8,893.26 / \text{año} \dots (\text{Ec. } 45)$$

- Inversión anual media (IMA), Valor considerado sobre el cual se generaran los intereses de costo del capital, cuando cambia el rendimiento de la maquina en su vida útil.

$$IMA = V_a (V_{eu} + 1) / 2V_{eu} = S/ 61,141.15 \dots (\text{Ec. } 46)$$

Costo de operación (C_o), está compuesto por los gastos de mantenimiento preventivo y correctivo (materiales).

Costo de mantenimiento (CM), equivalente al 70% del valor de adquisición, considerando una inflación ligera del 3% sobre los presupuestos de mantenimiento:

$$CM = 70\%. V_a * 1.03 = 0.7 * 111,165.73 * 1.03 = S/ 80,150.49 \dots (\text{Ec. } 47)$$

Costo de materiales (C_m), equivalente al 75% del costo de mantenimiento (CM), esto representa a los repuestos para los correctivos que se realizan en su tiempo de vida.

$$C_m = 75\% * CM = 0.75 * 80,150.49 = S/ 60,112.87 \dots (\text{Ec. } 48)$$

Con lo indicado se calcula el costo de operación:

$$C_o = CM + C_m = S/ 80,150.49 + 60,112.87 = S/107,941.92 \dots (\text{Ec. } 49)$$

- Costo Total de inversión (C_t), se calcula como la suma del valor de adquisición y el costo de operación, siendo este:

$$C_t = V_a + C_o = 111,165.73 + 107,941.92 = S/219,107.65 \dots (\text{Ec. } 50)$$

3.5.6.2 Evaluación De La Factibilidad De Implementación. En esta etapa se evalúa el posible ahorro que se obtendría al implementar el banco de condensadores con reactancias

Beneficio por compensación, se evalúa el ahorro actual anual de la potencia reactiva pagada, según las facturas que se ha podido registrar de Rinti S.A., se tiene un pago promedio mensual de S/ 8,000.00, lo que se interpreta como:

$$\text{Ahorro} = \text{S/ } 96,000.00 \text{ (anual)}$$

Ahora se comprobará si es viable la adquisición del banco de condensadores con reactancias.

$$\text{Dónde: } \text{Ahorro} * \text{Ve} > (1 + \text{Ve} * \text{Int}) * \text{Ct}, \text{ Int} = \text{Interés del capital ... (Ec. 51)}$$

$$\text{Entonces: } 96,000 * 10 > (1 + 10 * 0.04) * 219,107.65$$

$$960,000.00 > 306,750.72$$

Ahora, se calcula el retorno de la inversión (Roi), definida como:

$$\text{Roi} = \text{Inversión} / \text{Beneficio} = 219,107.65 / 96,000 = 2.28 \text{ años ... (Ec. 52)}$$

Se observa que el tiempo proyectado del retorno de la inversión por la implementación del banco de condensadores con reactancia antiresonantes es de 2.28 años, un valor óptimo para poder ver con buenos ojos la inversión, más aún teniendo en cuenta que se está considerando un tiempo de vida de 10 años cuando en buenas condiciones el banco puede llegar a trabajar 15 años antes de requerir alguna rehabilitación considerable.

Análisis del valor neto actual (VAN), representa al valor neto presente, es la variación entre el valor actual de los costos de cobro y la cancelación generada por lo invertido, para este cálculo se empleará la ecuación 53, una formula conocida como flujos constantes, donde:

$$n = 10 \text{ años} \quad / \quad i = \text{Tasa capital} = 4\%$$

$$\text{VAN} = \text{Ahorro} * \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} - \text{Ct} \quad \dots \text{ (Ec. 53)}$$

$$\text{VAN} = 96,000.00 * (((1 + 0.04)^{10} - 1) / (0.04 * (1 + 0.04)^{10})) - 219,107.65 = \text{S/} 559,538.34$$

Se observa que el VAN resultante es elevado y positivo, esto es un indicador que el proyecto es económicamente viable.

Evaluación del TIR, representa la equidad del valor actual de los flujos de ingreso de efectivo esperado, con el valor presente de sus costos estimados, conocido también como la tasa de retorno, donde: $P = \text{Ct}$

$$P = \text{Ahorro} * \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} \dots (\text{Ec. 54})$$

$$219,107.65 = 96,000.00 * (((1+0.4254)^{10} - 1) / (0.4254*(1+0.4254)^{10}))$$

$$219,107.65 = 219,152.08$$

De acuerdo al resultado obtenido, la inversión es rentable con un TIR de 42.54%, lo cual supera el costo de capital considerado de 4%.

3.5.7 Diseño previo para fabricación.

Como ya se mostró en la evaluación de costos de inversión previa, si bien la importancia de este proyecto es el análisis y la evaluación de la instalación de un banco de capacitancias haciendo uso de reactancias antiresonantes para asegurar el tiempo de vida del banco de compensación reactiva, para la implementación del banco de condensadores no solo se hace uso de condensadores y reactancias, sino también se considera una serie de equipamientos como contactores de línea para el control de los pasos, fusibles de línea para la protección de las capacitancias, interruptor termomagnético para la protección general del banco de condensadores, sistema de ventilación forzada, controlador automático de factor de potencia, gabinete metálico, entre otros suministros más, se muestra el unifilar en la figura del Anexo 17.

Para la implementación se realiza previamente planos eléctricos y mecánicos contemplando los dispositivos necesarios para la protección, control y automatización del banco de condensadores con reactancias antiresonantes, así como planos mecánicos teniendo en consideración la instalación actual de la planta y los espacios con los que se cuenta para la implementación, estos planos serán previamente expuestos, revisados y aprobados por el área técnica de la planta.

Cabe resaltar que como se mencionó previamente en la descripción de las características técnicas de los condensadores y las reactancias, la reactancia viene de fábrica con un sensor de temperatura, este debe ser cableado a un relé auxiliar que mediante una lógica de control permita aperturar el paso en caso de un sobrecalentamiento, dicho esto cabe mencionar que la reactancia antiresonante por su naturaleza es un equipo que libera una gran cantidad de calor en su funcionamiento normal, por lo que se deben tener dos consideraciones muy importantes en el diseño del banco, la primera es el uso de una adecuada ventilación forzada en el gabinete y la

segunda es evitar en lo posible que el calor que liberan las reactancias no perjudique a los condensadores, por lo indicado se debe considerar en el diseño que el montaje de las reactancias sean en vertical y que el calor al subir no afecte tanto a los condensadores, esto resulta en un diseño convencional y compacto para esta clase de soluciones.

3.5.8 Implementación del banco con reactancias antiresonantes.

Al resultar aprobado el diseño planteado por la planta Rinti S.A., se procedió a la fabricación, este proceso tiene un tiempo aproximado de 6 a 8 semanas, posterior a esto se instaló y puso en funcionamiento, en la figura 27 se puede apreciar el resultado final de la implementación del banco de condensadores con reactancias antiresonantes.



Figura 27. Banco de condensadores con reactancias antiresonantes implementado
Fuente propia

Para efectos de análisis se debe tener en cuenta que el banco se instaló y se puso en funcionamiento los últimos días del mes de diciembre del 2019 y este entró en funcionamiento y operó con normalidad todo el mes de enero, se informa esto para poder evaluar el resultado obtenido en la red después de la implementación del banco.

En una evaluación rápida como se puede ver en la figura del Anexo 18 donde se muestra el recibo por la facturación mensual de enero de la planta Rinti S.A., el pago por energía reactiva se redujo de un promedio de 8000 soles mensuales a un promedio de 900 soles mensuales, obteniendo un ahorro de casi el 90%, se debe tener en cuenta que según la distribución eléctrica de la planta, cuentan con cinco transformadores principales de los cuales solo se implementó el banco de

condensadores con reactancias aguas abajo del transformador T2, al ver en la facturación de enero que aún persiste un pequeño monto por consumo de energía reactiva, esto quiere decir que algunos de los otros cuatro transformadores siguen consumiendo reactiva pero en menor cantidad, como se mencionó inicialmente los BCA actuales no están operando a su 100%.

Finalmente, después de realizar una inspección al banco de condensadores con reactancias implementado se pudo obtener los resultados mostrados en la tabla 18, los cuales están comparados con los valores iniciales y se puede ver algunos detalles relevantes en el resultado.

Tabla 6 – Valores iniciales y finales registrados en la red de BT del tablero TG-2

	Sistema Inicial	Sistema Final
Tensión (Vrms)	456	463.1
THDv (%)	2.5	1.2
THDi (%)	4.8	2.3
Corriente (Irms)	1250	840
FPD	0.77	0.99

Como se aprecia en la tabla 18, para el caso de la tensión y como era de esperarse esta se elevó ligeramente, esto es un efecto normal que genera el banco de condensadores elevando ligeramente la tensión debido a la reducción de pérdidas o caída en el sistema de alimentación transformador – tablero TG-2, así como el comportamiento natural de los condensadores, esto ayuda en la reducción de corriente y por ende reduce la carga a la que estaba sometida el transformador T2.

Por otro lado, como se puede ver también las distorsiones de tensión y corriente han reducido poco más del 50%, esto es un efecto del comportamiento natural de los condensadores con reactancias antiresonantes que hacen una función de filtro pasivo, como consecuencia esto no solo ayuda a la descarga del transformador sino también a mejorar la calidad de la red y con esto se reducirán los daños, fallas o sobrecargas generada por los armónicos.

Finalmente se puede ver que el factor de potencia como era de esperarse se ha corregido en su totalidad teniendo el banco de condensadores con reactancias antiresonantes trabajando a menos del 80% de su capacidad máxima con una reserva que podrá permitir el aumento de carga proyectado por la planta.

3.6 Resultado De Las Actividades

3.6.1 Presentación De Los Resultados.

Los resultados obtenidos después de la instalación del banco de capacitancias con reactancias antiresonantes son mejores aún de lo esperado.

La operación del banco no solo logró la disminución de la facturación mensual por la reducción de consumo de energía reactiva, sino que adicionalmente redujo en la facturación mensual costos como potencia en hora punta, consumo de energía activa (al reducir pérdidas), y diversos cargos por impuestos a la energía que en su mayoría son proporcionales al consumo total y al reducir la reactiva todos se reducen, logrando así una reducción de poco más del 10% de la facturación total con lo que indirectamente permitirá reducir el tiempo de retorno de inversión de lo calculado inicialmente.

El uso de las reactancias antiresonantes a pesar que los niveles de armónicos no eran tan altos ayuda a que la reducción de la distorsión llegue a un nivel mejor de lo aceptable y con esto se garantiza tanto un mayor tiempo de vida del banco instalado como como alargar el tiempo de vida de los otros bancos de condensadores existentes que no tienen instalados reactancias, de manera similar al reducir la distorsión armónica de la red también alivia los diversos equipos eléctricos del sistema partiendo desde el transformador hasta las diversas cargas como motores y sistemas de control y fuerza de la planta.

Al ser el banco de condensadores con reactancias un sistema automático de compensación de energía reactiva permite al personal de mantenimiento poder monitorear el estado de la red sin intervenir en la operación del banco dando una mayor confiabilidad de operación del sistema.

3.6.2 Contratación De Hipótesis

Después de la culminación del proyecto de implementación del nuevo banco de condensadores con reactancias antiresonantes, el área de mantenimiento de la planta Rinti S.A. ha logrado la reducción en costos de operatividad y mantenimiento deseado, reduciendo así la carga del personal ante eventos debido a presencia de distorsión

armónica en su red y permitiendo de esta manera aumentar la productividad del área. Con la implementación del banco se logró el objetivo de reducción de facturación mensual, corrección del FP y con el uso de las reactancias se elimina la probabilidad de un evento de resonancia que puede llegar a ser muy destructivo

3.6.3 Discusión De Resultados

Toda planta industrial de cualquier sector productivo busca tener una red estable con parámetros óptimos que les permitan tener una adecuada eficiencia en los gastos por consumo de energía, así como en la calidad de su red que no le generen problemas de funcionamiento en los diversos equipos y más importante aún tener un adecuado control de sus costos de mantenimiento preventivo y correctivos. Los parámetros eléctricos como el FP, nivel de tensión y nivel de distorsión armónica en valores adecuados garantizar una adecuada confiabilidad y disponibilidad de la red, así como operatividad de los diversos equipos de la planta Rinti S.A..

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Después de la implementación del banco de condensadores con reactancias antiresonantes se pudo lograr una reducción de poco más del 10% de lo facturado mensual por el consumo de energía eléctrica, esto confirmó la viabilidad del proyecto ejecutado.

- El banco de condensadores con reactancias queda operando a menos del 80% de su capacidad total lo que le permitirá al cliente poder aumentar sus cargas sin peligro de aumento de pago de energía reactiva.

- El uso de reactancias antiresonantes ayudó indirectamente a reducir el nivel de distorsión armónica lo que permitirá a la planta poder seguir en su proceso de automatización y modernización de sus diversos procesos.

- El evento más crítico y destructivo que se puede presentar en una planta que tiene banco de condensadores es una resonancia, esto es evitado con el uso atinado de reactancias antiresonantes garantizando a su vez un adecuado tiempo de vida de operación útil del banco de condensadores con reactancias antiresonantes.

- La planta está evaluando el cambio progresivo de los bancos de condensadores de sus otros transformadores debido a los elevados costos de mantenimiento que estos están generando por el constante y rápido deterioro de los diversos dispositivos del banco convencional.

- Para la automatización del banco de hace uso de dispositivos especiales como condensadores con resistencia de inserción, esto asegura también el adecuado tiempo de vida de los dispositivos internos del banco evitando que estos se deterioren por los picos de tensión que por naturaleza generan los condensadores al entrar en funcionamiento.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis de energía después de algún cambio considerable realizado en la planta como aumento de cargas y modernización de equipos, para poder evaluar el aumento de la distorsión armónica, de ser el caso se debe cerciorar que el tercer armónico no aumente su predominancia pues la reactancia instalada está diseñada para la desintonización del quinto armónico en adelante.

- Las reactancias independientemente en cada paso hacen una función de amortiguación de los picos transitorios que se generan en la inserción de los condensadores, ayudando de esta manera a alargar el tiempo de vida de los dispositivos internos y aldaños del banco.

- Programar un plan de mantenimiento preventivo anual que permita confirmar el adecuado funcionamiento del banco y asegurar de esta forma el cumplimiento de la vida útil del sistema de compensación reactiva, estos costos han sido considerados en la evaluación económica de implementación de BCA.

- En cada mantenimiento se debe verificar que las capacitancias de los condensadores no caigan por menos del 90 a 85% de su valor de fabricación, para poder garantizar la adecuada compensación del banco, caso contrario deberá programarse una intervención correctiva para realizar el cambio de los condensadores dañados.

- La solución de compensación reactiva con reactancias antiresonantes es una solución particular para las características de cada planta, por lo que debe ser evaluado específicamente en la implementación en cualquier industria para asegurar la necesidad de esta solución en su defecto la no recomendación.

CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA

- Bettega, E. & Fiorina, J. (2000). Armónicos: rectificadores y compensadores activos. J. M. Giró (Ed). *Cuaderno Técnico n° 183*. (pp. 31-34). Schneider Electric.
- Carvajal Jiménez, C. (2007). *Análisis de resonancia armónica en sistemas eléctricos*. [Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira] Repositorio UTP. <https://hdl.handle.net/11059/494>
- Calderón, G. & Gonzáles, L. (s.f.). *Efecto de los armónicos en el factor de potencia y en las pérdidas de energía en un sistema eléctrico industrial*. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
- Collombet, C., Marc, J. & Schonek, J. (2000). Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento. E. De Castro & J.M. Giró (Eds). *Cuaderno Técnico n° 152*. (pp. 6-7). Schneider Electric.
- Ferraci, P. (2004). La calidad de la energía eléctrica. J. M. Giró (Ed). *Cuaderno Técnico n° 199*. (pp. 10). Schneider Electric.
- Fiorina, J. (1993). Ondulatorios y armónicos (caso cargas no lineales). E. De Castro (Ed). *Cuaderno Técnico n° 159*. (pp. 6). Schneider Electric.
- Gómez Morales, E. (2009). *Compensación de potencia reactiva* [Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Dspace. <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/7201>
- Jaco, J., & Gonzáles, J. (2016). *Diseño e implementación de banco automático de capacitores con reactancias antiresonantes en redes industriales con*

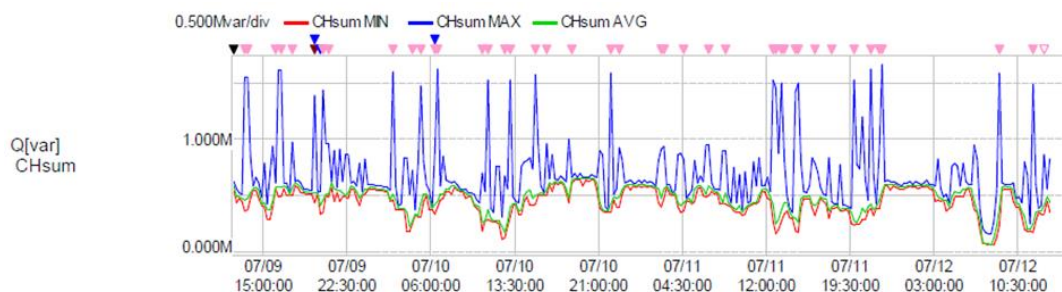
distorsión armónica [Tesis de grado inédito]. Universidad Nacional del Callao y Universidad Nacional de Ingeniería.

López Paiz, G. (2011). *Corrección del factor de potencia y diseño e instalación óptima de banco de capacitores bajo el efecto de distorsión armónica en la industria de producción de cloro* [Tesis de grado inédito]. Universidad de San Carlos de Guatemala.

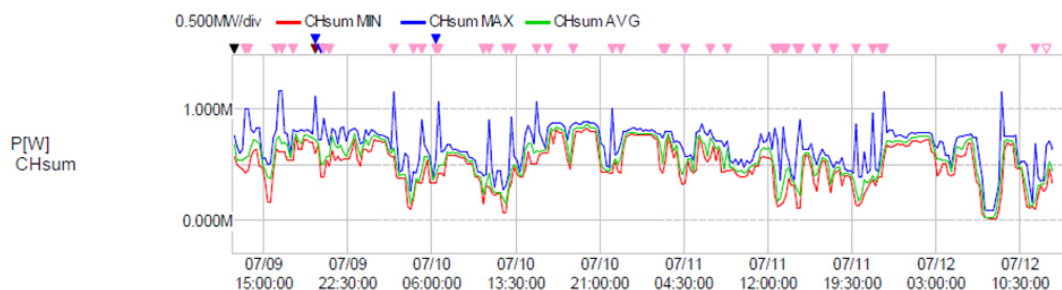
Schonek, J. (2001). *Las peculiaridades del 3^{er} armónico*. J. M. Giró (Ed). Cuaderno Técnico n° 202. (pp. 8). Schneider Electric.

CAPÍTULO VI: ANEXOS

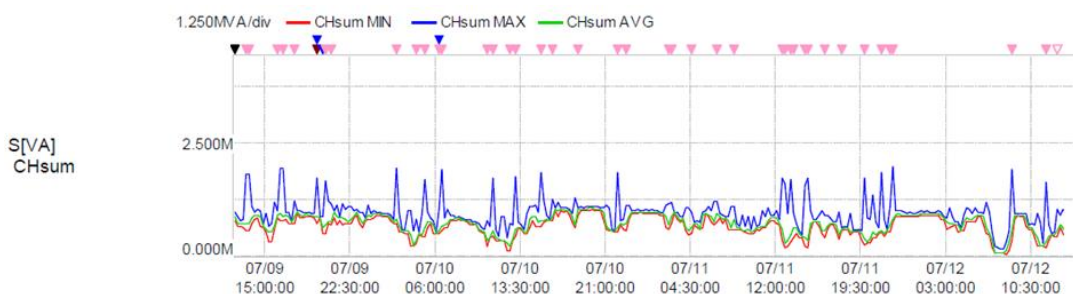
ANEXO 1: Registros de potencias obtenidos después de 4 días de medición. Fuente propia.



Registro del comportamiento de la potencia reactiva en los días de medición

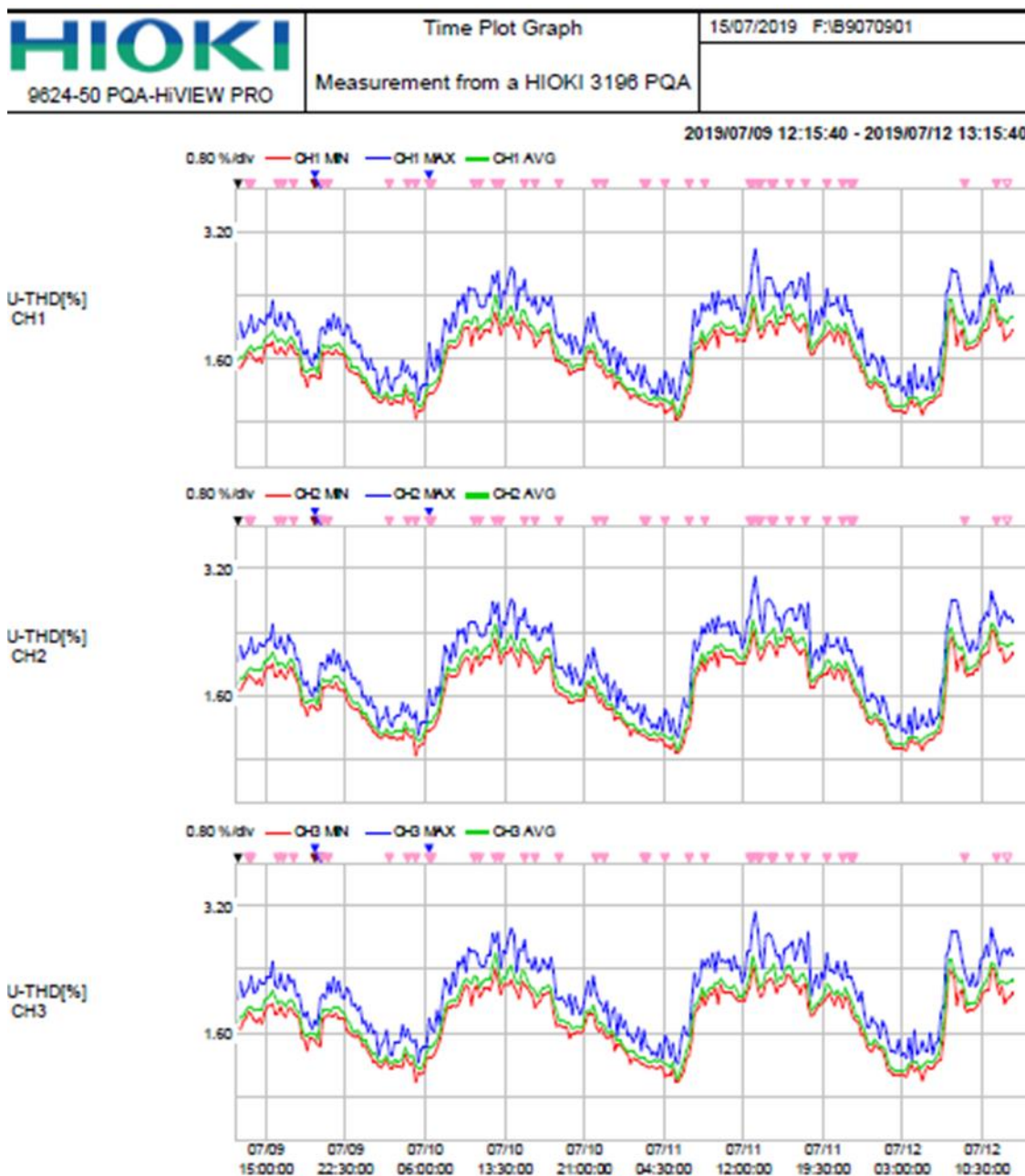


Registro del comportamiento de la potencia activa en los días de medición



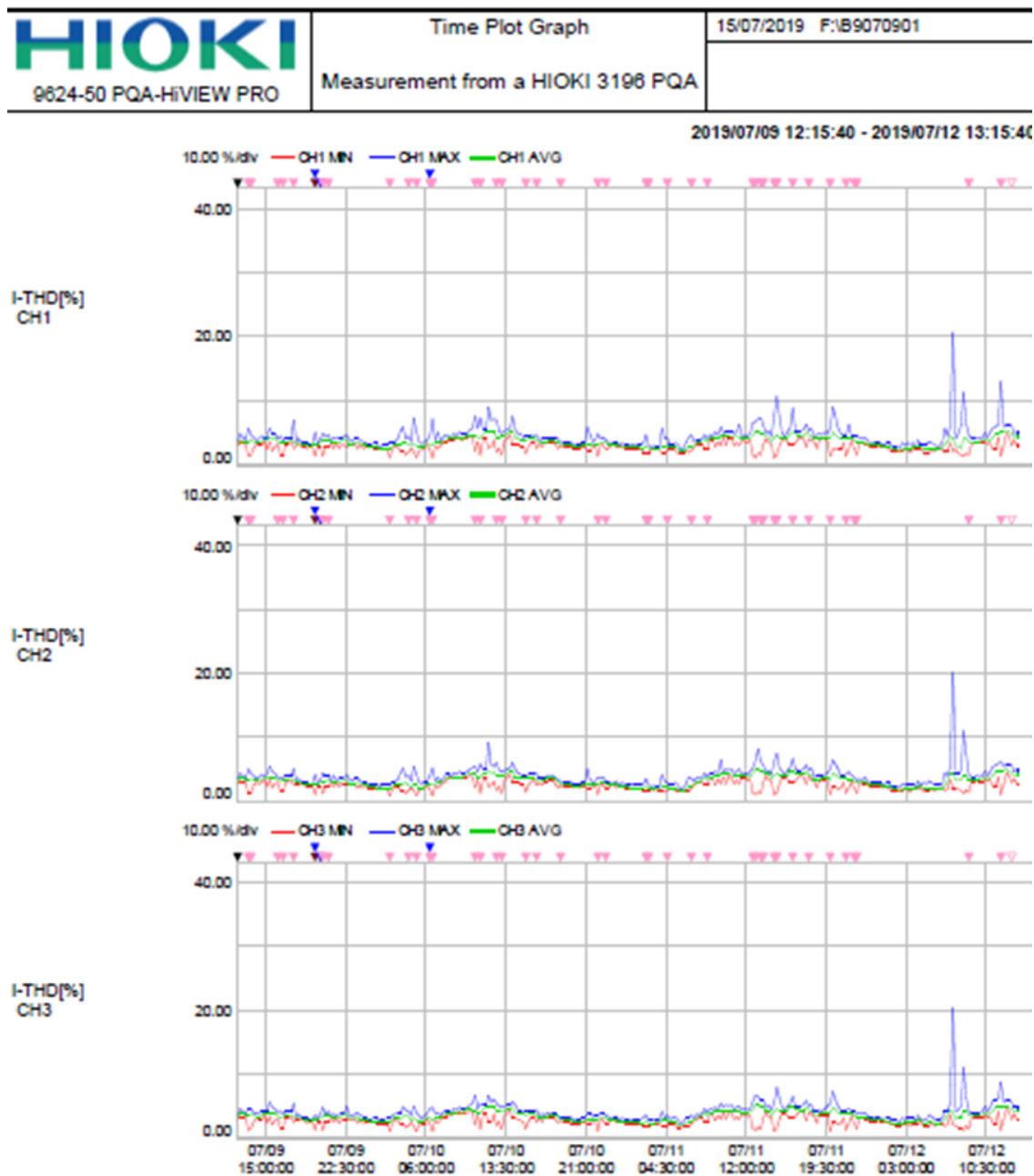
Registro del comportamiento de la potencia aparente en los días de medición

ANEXO 2: Mediciones de la distorsión armónica registradas en los cuatro días que estuvo instalado el analizador. Registro de distorsión armónica de tensión (THDv). Fuente propia.



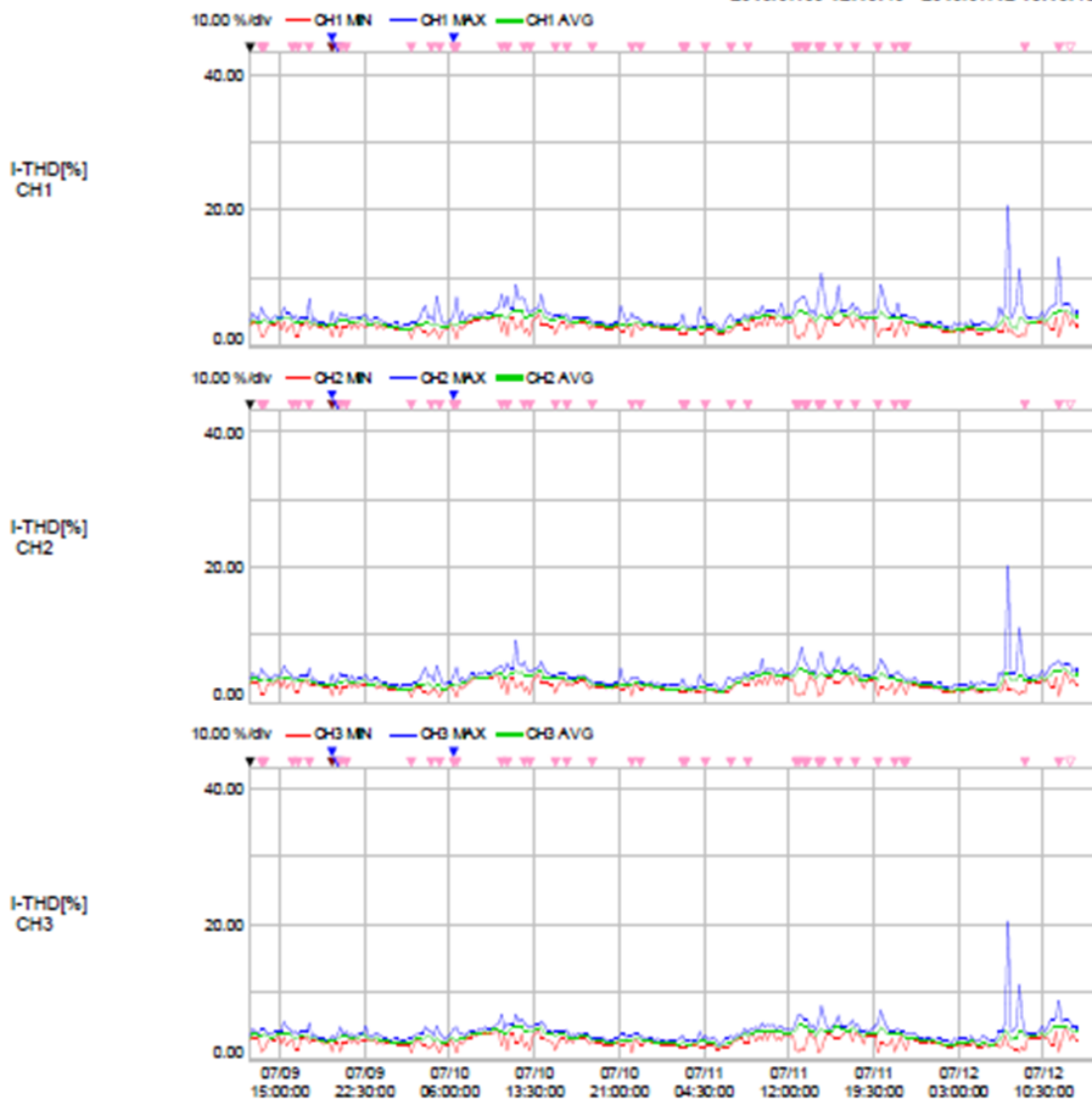
Registro de distorsión armónica de tensión (THDv) en los días de medición

ANEXO 3: Mediciones de la distorsión armónica registradas en los cuatro días que estuvo instalado el analizador. Registro de la anomalía armónica de corriente (THDi). Fuente propia.



HIOKI 9624-50 PQA-HiVIEW PRO	Time Plot Graph	15/07/2019 F:\B9070901
	Measurement from a HIOKI 3196 PQA	

2019/07/09 12:15:40 - 2019/07/12 13:15:46



ANEXO 4: Parámetros registrados por el analizador de redes cuando se registró un elevado Q. Fuente propia.

Fecha	Hora	F (Hz)	Vrms (V)	P (W)	S (VA)	Q max (VAR)	FP
9/07/2019	13:15:40	60.16	457.96	1,005,000.00	1,831,000.00	1,554,000.00	0.80
9/07/2019	13:30:40	60.14	457.10	999,000.00	1,818,000.00	1,543,000.00	0.81
9/07/2019	13:45:40	60.14	453.57	808,000.00	1,112,000.00	855,000.00	0.81
9/07/2019	15:45:40	60.17	454.12	740,000.00	1,192,000.00	935,000.00	0.76
9/07/2019	16:15:40	60.17	450.39	1,160,000.00	1,962,000.00	1,616,000.00	0.81
9/07/2019	16:30:40	60.13	449.78	1,163,000.00	1,952,000.00	1,606,000.00	0.80
9/07/2019	17:30:40	60.17	455.14	806,000.00	1,232,000.00	968,000.00	0.79
9/07/2019	19:30:40	60.06	433.32	1,109,000.00	1,737,000.00	1,388,000.00	0.82
9/07/2019	20:15:40	60.07	457.88	914,000.00	1,682,000.00	1,436,000.00	0.78
9/07/2019	20:30:40	60.07	458.09	769,000.00	1,232,000.00	967,000.00	0.76
9/07/2019	20:45:40	60.07	458.68	671,000.00	1,174,000.00	964,000.00	0.77
9/07/2019	21:15:40	60.07	462.68	803,000.00	1,154,000.00	897,000.00	0.79
9/07/2019	21:45:40	60.17	461.72	819,000.00	1,175,000.00	916,000.00	0.80
9/07/2019	22:15:40	60.14	461.23	709,000.00	1,107,000.00	864,000.00	0.77
9/07/2019	22:30:40	60.16	462.07	794,000.00	1,099,000.00	856,000.00	0.80
10/07/2019	02:30:40	60.07	450.83	1,145,000.00	1,935,000.00	1,596,000.00	0.79
10/07/2019	05:00:40	60.16	450.22	895,000.00	1,707,000.00	1,480,000.00	0.77
10/07/2019	06:15:40	60.16	461.59	544,000.00	1,048,000.00	898,000.00	0.81
10/07/2019	06:30:40	60.13	461.92	1,067,000.00	1,913,000.00	1,622,000.00	0.75
10/07/2019	07:00:40	60.18	460.60	621,000.00	1,038,000.00	856,000.00	0.74
10/07/2019	11:00:40	60.14	464.22	903,000.00	1,741,000.00	1,518,000.00	0.78
10/07/2019	13:00:40	60.15	463.80	919,000.00	1,765,000.00	1,530,000.00	0.78
10/07/2019	15:15:40	60.07	450.78	1,059,000.00	1,866,000.00	1,570,000.00	0.81
10/07/2019	15:30:40	60.06	451.57	789,000.00	1,235,000.00	951,000.00	0.78
10/07/2019	16:15:40	60.06	449.64	835,000.00	1,273,000.00	966,000.00	0.81
10/07/2019	16:45:40	60.06	448.61	879,000.00	1,209,000.00	862,000.00	0.81
10/07/2019	18:15:40	60.05	465.18	833,000.00	1,304,000.00	1,003,000.00	0.76
10/07/2019	21:00:40	60.09	470.85	693,000.00	1,139,000.00	904,000.00	0.77
10/07/2019	21:15:40	60.08	470.78	660,000.00	1,088,000.00	868,000.00	0.79
10/07/2019	22:00:40	60.08	463.50	1,005,000.00	1,847,000.00	1,582,000.00	0.79
10/07/2019	22:45:40	60.08	464.39	691,000.00	1,145,000.00	924,000.00	0.78
11/07/2019	02:30:40	60.17	453.74	734,000.00	1,175,000.00	918,000.00	0.76
11/07/2019	02:45:40	60.20	452.35	797,000.00	1,206,000.00	943,000.00	0.80
11/07/2019	04:00:40	60.17	450.57	702,000.00	1,080,000.00	866,000.00	0.80
11/07/2019	04:15:40	60.16	452.75	646,000.00	1,085,000.00	872,000.00	0.75
11/07/2019	06:30:40	60.15	456.20	762,000.00	1,222,000.00	955,000.00	0.77
11/07/2019	06:45:40	60.18	455.39	815,000.00	1,218,000.00	954,000.00	0.80
11/07/2019	08:00:40	60.16	459.44	657,000.00	1,115,000.00	901,000.00	0.74
11/07/2019	08:15:40	60.15	458.07	708,000.00	1,122,000.00	904,000.00	0.79
11/07/2019	12:30:40	60.14	462.51	829,000.00	1,716,000.00	1,523,000.00	0.79
11/07/2019	12:45:40	60.14	464.39	719,000.00	1,606,000.00	1,461,000.00	0.66
11/07/2019	13:00:40	60.17	464.79	366,000.00	951,000.00	878,000.00	0.62

11/07/2019	13:15:40	60.13	462.90	840,000.00	1,689,000.00	1,499,000.00	0.69
11/07/2019	14:30:40	60.16	461.38	681,000.00	1,577,000.00	1,430,000.00	0.75
11/07/2019	14:45:40	60.14	462.44	896,000.00	1,733,000.00	1,498,000.00	0.76
11/07/2019	16:00:40	60.13	453.60	567,000.00	1,005,000.00	843,000.00	0.75
11/07/2019	19:45:40	60.05	475.01	865,000.00	1,727,000.00	1,527,000.00	0.73
11/07/2019	20:30:40	60.07	471.07	615,000.00	1,345,000.00	1,196,000.00	0.73
11/07/2019	21:15:40	60.05	468.89	958,000.00	1,866,000.00	1,624,000.00	0.72
11/07/2019	22:00:40	60.17	464.92	642,000.00	1,093,000.00	897,000.00	0.78
11/07/2019	22:15:40	60.19	463.28	1,149,000.00	1,992,000.00	1,663,000.00	0.78
12/07/2019	06:30:40	60.19	459.21	738,000.00	1,197,000.00	948,000.00	0.77
12/07/2019	08:45:40	60.14	458.53	1,145,000.00	1,929,000.00	1,589,000.00	0.80
12/07/2019	11:45:40	60.14	464.52	689,000.00	1,630,000.00	1,488,000.00	0.65
12/07/2019	12:45:40	60.13	462.02	679,000.00	1,056,000.00	857,000.00	0.77

ANEXO 5: Parámetros medidos por el analizador de redes con un elevado THDv. Fuente propia.

Fecha	Hora	Vrms (V)	Q (VAR)	FP	THDv (%)	THDi (%)
10/07/2019	12:15:40	469.60	309,000.00	0.72	2.86	7.11
10/07/2019	12:45:40	466.34	565,000.00	0.78	2.87	5.24
10/07/2019	13:45:40	457.41	431,000.00	0.76	2.79	5.79
10/07/2019	14:00:40	456.60	768,000.00	0.77	2.92	7.62
10/07/2019	14:15:40	452.73	804,000.00	0.80	2.85	5.58
11/07/2019	12:45:40	464.39	1,461,000.00	0.66	2.96	6.74
11/07/2019	13:00:40	464.79	878,000.00	0.62	3.13	7.08
11/07/2019	13:15:40	462.90	1,499,000.00	0.69	2.91	7.49
11/07/2019	14:00:40	457.08	384,000.00	0.75	2.82	5.22
11/07/2019	14:15:40	457.72	350,000.00	0.75	2.86	4.43
11/07/2019	14:30:40	461.38	1,430,000.00	0.75	2.82	7.71
11/07/2019	17:15:40	458.46	504,000.00	0.78	2.79	5.52
11/07/2019	18:00:40	459.74	429,000.00	0.78	2.88	5.76
12/07/2019	07:30:40	470.14	179,000.00	0.49	2.88	4.01
12/07/2019	07:45:40	472.64	158,000.00	0.47	2.88	4.83
12/07/2019	08:00:40	471.26	165,000.00	0.46	2.89	6.14
12/07/2019	11:15:40	465.38	690,000.00	0.57	2.93	5.98

ANEXO 6: Registro de facturación mensual detallada del mes de noviembre y diciembre del 2019. Fuente: Recibo de energía planta Rinti SA.

**FACTURACIÓN POR CONSUMO DE POTENCIA Y ENERGÍA - NOVIEMBRE 2019
RINTI S.A.**

Factura F001-00008711

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Valor Venta
Potencia en Hora Punta	1,862.18	20.67	38,491.36
Exceso Potencia Hora Punta	-	-	-
Energía Activa en Punta	124.07	83.10	10,310.42
Energía Activa Fuera Punta	494.02	83.10	41,052.79
Exceso de energía Activa en Punta	-	-	-
Exceso de energía Activa Fuera Punta	-	-	-
Exceso Energía Reactiva	179,089.60	4.420	7,915.76
Peaje Principal Transmisión (SPT)	1,862.18	15.789	29,402.04
Peaje Principal Transmisión (CSAD)	1,862.18	20.917	38,951.32
Peaje Principal Transmisión (CSAD-CASE)	1,862.18	-	-
Peaje Secundario del Area de Demanda 7 (MT)	603,543.79	3.2474	19,599.48
Peaje Secundario del Area de Demanda 15 (MT)	603,543.79	0.1486	896.87
Cargo Fijo Mensual			4.71
Mant. y Repos. Eq. de Medida			28.20
Alumbrado Público y otros			2,300.00
Peaje Distribución en Hora Punta	2,075.20	8.61	17,867.47
Peaje Distribución en Hora Fuera de Punta	193.20	9.32	1,800.62
Aporte de los usuarios de electricidad para la Electrificación Rural	618,089.20	0.0084	5,191.95
Aporte de los usuarios libres de electricidad para el FISE.	618,089.20	1.2826	7,927.61
SUB TOTAL (S./.)			221,740.61

**FACTURACIÓN POR CONSUMO DE POTENCIA Y ENERGÍA - DICIEMBRE 2019
RINTI S.A.**

Factura F001-00009061

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Valor Venta
Potencia en Hora Punta	1,858.04	20.67	38,405.75
Exceso Potencia Hora Punta	-	-	-
Energía Activa en Punta	136.70	83.10	11,359.54
Energía Activa Fuera Punta	541.65	83.10	45,011.16
Exceso de energía Activa en Punta	-	-	-
Exceso de energía Activa Fuera Punta	-	-	-
Exceso Energía Reactiva	179,842.82	4.421	7,950.72
Peaje Principal Transmisión (SPT)	1,858.04	15.789	29,336.64
Peaje Principal Transmisión (CSAD)	1,858.04	21.168	39,331.05
Peaje Principal Transmisión (CSAD-CASE)	1,858.04	-	-
Peaje Secundario del Area de Demanda 7 (MT)	662,384.35	3.2474	21,510.27
Peaje Secundario del Area de Demanda 15 (MT)	662,384.35	0.1478	979.00
Cargo Fijo Mensual			4.71
Mant. y Repos. Eq. de Medida			28.20
Alumbrado Público y otros			2,170.00
Peaje Distribución en Hora Punta	2,075.20	8.61	17,867.47
Peaje Distribución en Hora Fuera de Punta	193.20	9.32	1,800.62
Aporte de los usuarios de electricidad para la Electrificación Rural	678,347.81	0.0084	5,698.12
Aporte de los usuarios libres de electricidad para el FISE.	678,347.81	1.2086	8,198.51
SUB TOTAL (S./.)			229,651.77

ANEXO 7: Tipos de reactancias desintonizadas trifásicas marca Schneider Electric. Fuente Lista de precios Schneider Electric.



LVR05500B40T

Redes de 240V, 60Hz

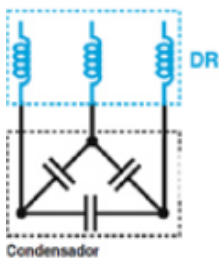
Factor de desintonización (%)	Potencia (kVar)	Inductancia (mH)	I_{LSP} (A)	W (mm)	W1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	H (mm)	Peso (kg)
5.7 %	12.5	0.61	42.8	240	200	160	125	220	13
	25	0.31	85.6	240	200	160	125	220	18

NOVO

Redes de 400V, 60Hz

Factor de desintonización (%)	Potencia (kVar)	Inductancia (mH)	I_{LSP} (A)	W (mm)	W1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	H (mm)	Peso (kg)
5.7 %	25	1	48.1	240	200	160	125	220	17
	50	0.51	96.3	260	200	200	125	270	22
7 %	25	1.2	43.8	240	200	160	125	220	15
	50	0.6	87.6	260	200	200	125	270	22
14 %	25	2.7	39.9	240	200	160	125	220	18
	50	1.3	79.8	260	200	200	125	270	33

NOVO



Redes de 480V, 60Hz

Factor de desintonización (%)	Potencia (kVar)	Inductancia (mH)	I_{LSP} (A)	W (mm)	W1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	H (mm)	Peso (kg)
5.7 %	12.5	2.76	20.9	240	200	160	125	220	13
	25	1.42	40.6	240	200	160	125	220	18
	50	0.71	81.3	260	200	200	125	270	25
	100	0.35	162.6	350	200	220	125	350	40

ANEXO 8: Tipos de condensadores trifásicos marca Schneider Electric. Fuente Lista de precios Schneider Electric.

Condensadores de 240V



BLRCH042A050B40

Pot. (kVar) según las tensiones de operación								IN (A)	Tipo de envase	Ø (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
230	240	260										
4.6	5.0	5.9						13.1	HC	63	245	0.9
9.2	10.0	11.7						26.1	RC	90	242	1.6
14.4	15.7	18.4						40.9	TC	116	242	2.5

Condensadores de 400V

Pot. (kVar) según las tensiones de operación								IN (A)	Tipo de envase	Ø (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
230	240	260	380	400	415							
3.3	3.6	4.2	9	10.0	10.7			14.4	LC	70	245	1.1
5	5.4	6.3	13.5	15.0	16.1			21.7	RC	90	242	1.6
6.6	7.2	8.5	18.1	20.0	21.6			26.9	TC	116	242	2.5
8.3	9	10.5	22.5	25.0	26.9			36	TC	116	242	2.5
9.9	10.8	12.7	27.1	30.0	32.3			43.3	TC	116	242	2.5
13.2	14.4	16.9	36.1	40.0	43			57.7	VC	136	242	3.2

Condensadores de 480V

Pot. (kVar) según las tensiones de operación									IN (A)	Tipo de envase	Ø (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
230	240	260	380	400	415	440	480						
2.4	2.6	3.1	6.6	7.3	7.9	8.9	10.6		12.7	LC	70	245	1.1
3.4	3.8	4.4	9.4	10.4	11.2	12.6	15.0		18	RC	90	242	1.6
4.7	5.1	6	12.8	14.2	15.2	17.1	20.4		24.5	RC	90	242	1.6
5.7	6.2	7.3	15.6	17.3	18.7	21	25.0		30	TC	116	242	2.5
7.1	7.7	9.1	19.4	21.5	23.1	26	31.0		37.2	TC	116	242	2.5
7.9	8.6	10.1	21.7	24	25.8	29	34.6		41.6	VC	136	242	3.2
9.3	10.2	11.9	25.5	28.3	30.4	34.2	40.7		48.9	XC	116	321	4.1

Condensadores de 525V



VarPlus Can

Pot. (kVar) según las tensiones de operación										IN (A)	Tipo de envase	Ø (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
230	240	260	380	400	415	440	480	525						
2.3	2.5	2.9	6.3	7.0	7.5	8.4	10.0	12.0		13.2	LC	70	245	1.1
2.9	3.1	3.7	7.9	8.7	9.4	10.5	12.5	15.0		16.5	RC	90	242	1.6
4	4.3	5.1	10.8	12	12.9	14.5	17.3	20.8		22.7	RC	90	242	1.6
5.8	6.3	7.4	15.7	17.4	18.7	21.1	25.1	30.0		33	TC	116	242	2.5
7.9	8.6	10.1	21.6	24	25.8	29	34.5	41.3		45.4	VC	136	242	3.2

ANEXO 9: Tabla de cálculo para la Potencia Total del banco de condensadores, calculado a 525V. Fuente propia.

Tensión Cond.	Cant. Cond.	Pot. c/ Cond.	Total
C10.1	1	41.3	125.3
C10.2	2	30	
C10.3	2	12	
C9.1	1	41.3	125.3
C9.2	2	30	
C9.3	2	12	
C8.1	1	41.3	125.3
C8.2	2	30	
C8.3	2	12	
C7.1	1	41.3	125.3
C7.2	2	30	
C7.3	2	12	
C6.1	1	41.3	125.3
C6.2	2	30	
C6.3	2	12	
C5.1	1	41.3	125.3
C5.2	2	30	
C5.3	2	12	
C4.1	1	41.3	125.3
C4.2	2	30	
C4.3	2	12	
C3.1	1	41.3	125.3
C3.2	2	30	
C3.3	2	12	
C2.1	1	12	62.6
C2.2	1	30	
C2.3	1	20.6	
C1	1	30	30
Potencia total en kVAR a 525V:			1095.0

ANEXO 10: Tabla para cálculo de la Potencia Total para un banco de condensadores, calculado de 525V para condensadores de 456V. Fuente propia.

Pasos	Cant. Cond.	Pot. c/ Cond. (kVAR) (525V)	Pot. c/ Cond. (kVAR) (456V)	Qn (kVAR) (525V)	Qef (kVAR) (456V)
C10.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C10.2	2	30	24.00		
C10.3	2	12	9.60		
C9.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C9.2	2	30	24.00		
C9.3	2	12	9.60		
C8.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C8.2	2	30	24.00		
C8.3	2	12	9.60		
C7.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C7.2	2	30	24.00		
C7.3	2	12	9.60		
C6.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C6.2	2	30	24.00		
C6.3	2	12	9.60		
C5.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C5.2	2	30	24.00		
C5.3	2	12	9.60		
C4.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C4.2	2	30	24.00		
C4.3	2	12	9.60		
C3.1	1	41.3	33.04	125.3	100.24
C3.2	2	30	24.00		
C3.3	2	12	9.60		
C2.1	1	12	9.60	62.6	50.08
C2.2	1	30	24.00		
C2.3	1	20.6	16.48		
C1	1	30	24.00	30	24.00
Potencia total en kVAR a 525V y 456V				1095.0	876.02

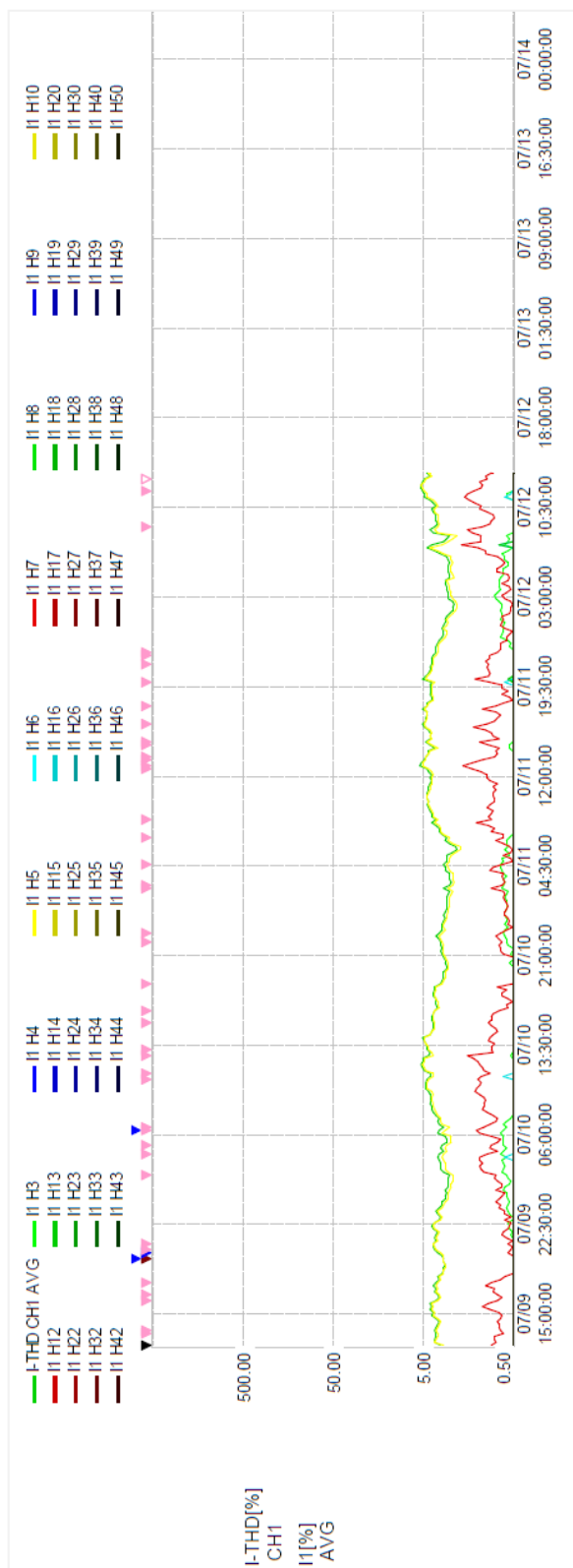
ANEXO 11: Tabla de Capacitancia calculada para cada condensador. Fuente propia.

Pasos	Cant. Cond. (unid)	Pot. c/ Cond. (kVAR) (456V)	Qef (kVAR) (456V)	C (μF)
C10.1	1	33.04	100.24	1205.87
C10.2	2	24.00		
C10.3	2	9.60		
C9.1	1	33.04	100.24	1205.87
C9.2	2	24.00		
C9.3	2	9.60		
C8.1	1	33.04	100.24	1205.87
C8.2	2	24.00		
C8.3	2	9.60		
C7.1	1	33.04	100.24	1205.87
C7.2	2	24.00		
C7.3	2	9.60		
C6.1	1	33.04	100.24	1205.87
C6.2	2	24.00		
C6.3	2	9.60		
C5.1	1	33.04	100.24	1205.87
C5.2	2	24.00		
C5.3	2	9.60		
C4.1	1	33.04	100.24	1205.87
C4.2	2	24.00		
C4.3	2	9.60		
C3.1	1	33.04	100.24	1205.87
C3.2	2	24.00		
C3.3	2	9.60		
C2.1	1	9.60	50.08	602.45
C2.2	1	24.00		
C2.3	1	16.48		
C1	1	24.00	24.00	288.72
Potencia total en kVAR a 456V (Qef)			876.02	

ANEXO 12: Tabla de Inductancias calculadas para cada paso del banco de condensadores. Fuente propia.

Pasos	Cant. Cond. (unid)	Pot. c/ Cond. (kVAR) (456V)	Qef (kVAR) (456V)	C (μF)	L (mH)
C10.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C10.2	2	24.00			
C10.3	2	9.60			
C9.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C9.2	2	24.00			
C9.3	2	9.60			
C8.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C8.2	2	24.00			
C8.3	2	9.60			
C7.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C7.2	2	24.00			
C7.3	2	9.60			
C6.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C6.2	2	24.00			
C6.3	2	9.60			
C5.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C5.2	2	24.00			
C5.3	2	9.60			
C4.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C4.2	2	24.00			
C4.3	2	9.60			
C3.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.333
C3.2	2	24.00			
C3.3	2	9.60			
C2.1	1	9.60	50.08	602.45	0.666
C2.2	1	24.00			
C2.3	1	16.48			
C1	1	24.00	24.00	288.72	1.389
Potencia total en kVAR a 456V (Qef)			876.02		

**ANEXO 13: Espectro de armónicos registrados por el analizador de redes.
Fuente propia.**



ANEXO 14: Tabla de configuración final del banco de condensadores con reactancias antiresonantes. Fuente propia.

Pasos	Cant.	Pot. c/	Qef (kVAR)	C (μF)	L (mH)	Imax.p
C10.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C10.2	2	24.00				
C10.3	2	9.60				
C9.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C9.2	2	24.00				
C9.3	2	9.60				
C8.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C8.2	2	24.00				
C8.3	2	9.60				
C7.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C7.2	2	24.00				
C7.3	2	9.60				
C6.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C6.2	2	24.00				
C6.3	2	9.60				
C5.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C5.2	2	24.00				
C5.3	2	9.60				
C4.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C4.2	2	24.00				
C4.3	2	9.60				
C3.1	1	33.04	100.24	1205.87	0.35	162.6
C3.2	2	24.00				
C3.3	2	9.60				
C2.1	1	9.60	50.08	602.45	0.71	81.3
C2.2	1	24.00				
C2.3	1	16.48				
C1	1	24.00	24.00	288.72	1.42	40.6
Potencia total en kVAR a			876.02			

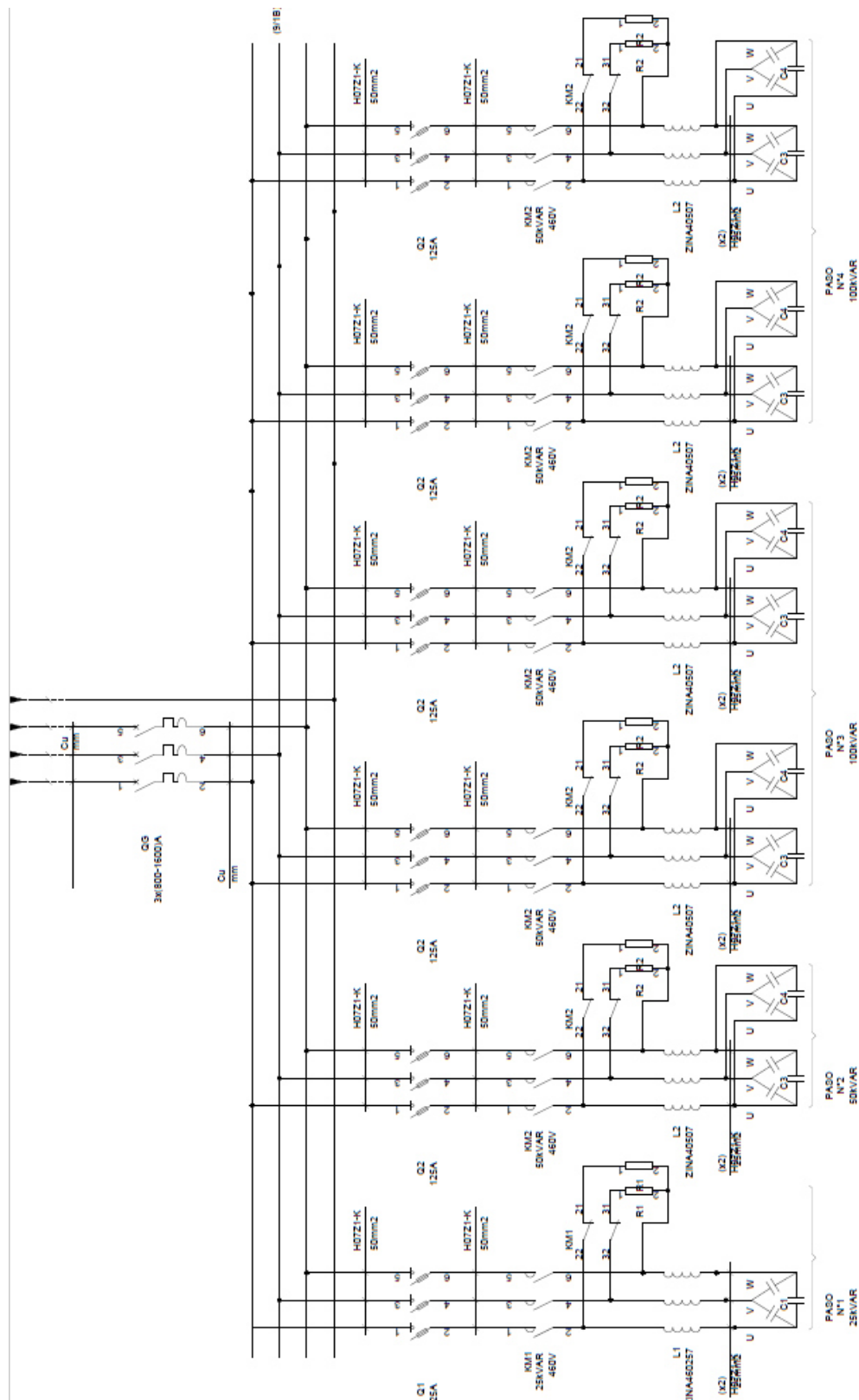
ANEXO 15: Tabla de relación de equipos para banco de condensadores con reactancia antiresonantes. Fuente propia.

CANT	DESCRIPCIÓN	MODELO
1	INTERR.TERMO.REG.3X640-1600A(690V) 100/65KA 230/440V	T7H 1600 PR231/P LS/
18	PORTALAMPARA ROJO C/LED 240VAC PLASTICO	RCB7-IVL-74
1	TRANSF.D/CTE.NUCL.PARTIDO 1600/5A 45VA CL.1	RISHXMER155/80SC(40
	***PARA LOS 10 PASOS ***	
1	REGULADOR DE FACTOR DE POTENCIA 12 PASOS 480V	MASTER12
18	SECCIONADOR FUSI.TRIP.HORZ.160A-690VAC NH00 D/TERMOP	LTL00-3/9
54	FUSIBLE NH-00 125AX500VAC ICC:120KA C/I FALLA GL-GG	381070
8	CONDENSADOR POTENCIA TUBULAR 41.3KVAR 525V	VarplusCan
18	CONDENSADOR POTENCIA TUBULAR 30KVAR 525V	VarplusCan
1	CONDENSADOR POTENCIA TUBULAR 20.6KVAR 525V	VarplusCan
17	CONDENSADOR POTENCIA TUBULAR 12KVAR 525V	VarplusCan
8	REACTANCIA TRIFASICA 100KVAR 480V 5.7%, 0.35mH	DR
1	REACTANCIA TRIFASICA 50KVAR 480V 5.7%, 0.71mH	DR
1	REACTANCIA TRIFASICA 25KVAR 480V 5.7%, 1.42mH	DR
1	CONTACTOR P/CONDENSADOR 25KVAR 460V 230V	KML25
17	CONTACTOR P/CONDENSADOR 50KVAR 460V 230V	KML50
18	RESISTENCIA DE DESCARGA RAPIDA RD-100	J02102180
3	KIT FLUORESCENTE 8W 220V LONG.345MM	SM0001
3	MICROINTERR.C/BOTON PARA PANEL TERMI.P/ATORNILLAR	M3C
	*****VENTILACIÓN FORZADA*****	
6	VENTILADOR 204X204MM 120M3/HR 230V C/FILT	FK5523.230
3	TERMOSTATO P/VENTILADOR 0 a +60C 250VAC NA	KTS 011
1	PORTA PLANO PLASTICO A4	EV1075K
3	TABLERO AUTOSOPORT.2100X800X800MM C/2	GA8080XP

ANEXO 16: Tabla de costo total de implementación de banco de condensadores con reactancia. Fuente propia.

Ítem	Descripción	Cant.	V. Unit. S/	Valor Total S/
1	BANCO DE CONDENSADORES CON FILTROS 1 PASO DE 24kVAR, 456VAC, 3F+T, 60HZ. 1 PASO DE 50.08kVAR 460VAC, 3F+T, 60HZ. 8 PASOS DE 100.24kVAR 460VAC, 3F+T, 60HZ.	01	90,772.06	90,772.06
2	Servicio de montaje, conexión, configuración, <ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de expediente de seguridad. • Transporte de personal técnico a la zona de trabajo. • Movilización del banco de condensadores a las • Desconexión y retiro de banco de condensadores Excavación de zanja, rotura de vereda donde se ubica el <ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de desmonte. • Instalación de banco de condensadores de Configuración de regulador de controlador de energía <ul style="list-style-type: none"> • Puesta en marcha de banco de condensadores Elaboración de informe técnico y protocolo de pruebas firmadas por un Ingeniero Electricista Colegiado.	1	13,061.67	13,061.67
3	Suministro de cable N2XOH unipolar 1kV libre de <ul style="list-style-type: none"> • Distancia lineal: 10 metros • 3 - 4x150mm² 	120m	61.1	7,332.00
Total en S/				111,165.73

ANEXO 17: Plano eléctrico del diseño previo para el banco de condensadores con reactancias. Fuente propia.



ANEXO 18: Registro de facturación mensual detallada del mes de enero del 2020. Fuente: Recibo de energía planta Rinti SA.

Factura F001-00009488

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Valor Venta
Potencia en Hora Punta	1,427.29	20.67	29,502.05
Exceso Potencia Hora Punta	-	-	-
Energía Activa en Punta	143.06	84.48	12,086.00
Energía Activa Fuera Punta	556.97	84.48	47,052.69
Exceso de energía Activa en Punta	-	-	-
Exceso de energía Activa Fuera Punta	-	-	-
Exceso Energía Reactiva	20,257.40	4.428	896.97
Peaje Principal Transmisión (SPT)	1,427.29	15.824	22,585.41
Peaje Principal Transmisión (CSAD)	1,427.29	21.168	30,212.84
Peaje Principal Transmisión (CSAD-CASE)	1,427.29	-	-
Peaje Secundario del Area de Demanda 7 (MT)	683,558.20	3.2474	22,197.87
Peaje Secundario del Area de Demanda 15 (MT)	683,558.20	0.1478	1,010.30
Cargo Fijo Mensual			4.71
Mant. y Repos. Eq. de Medida			28.20
Alumbrado Público y otros			1,920.00
Peaje Distribución en Hora Punta	2,075.20	8.61	17,867.47
Peaje Distribución en Hora Fuera de Punta	193.20	9.32	1,800.62
Aporte de los usuarios de electricidad para la Electrificación Rural	700,031.95	0.0086	6,020.27
Aporte de los usuarios libres de electricidad para el FISE.	700,031.95	1.0160	7,112.32
SUB TOTAL (\$.)			200,297.73

ANEXO 19: NTCSE – Orden de Armónicos y su % de tolerancia. Se considera es de mala calidad, si la tensión se encuentra fuera de tolerancia por un período superior al cinco por ciento (5%) del período de medición

ORDEN (n) DE LA ARMONICA O THD	TOLERANCIA [Vi] o [THD] (% con respecto a la tensión nominal del punto de medición)	
	Para tensiones mayores a 60kV	Para tensiones menores o iguales a 60kV
Armónicas impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1+2.5/n	0.2+12.5/n
Armónicas impares no múltiplos de 3		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

ANEXO 20: Tabla del límite de distorsión armónica de corriente (IEEE 519-2014). En el punto de acoplamiento común de otras cargas, con tensiones desde 120 hasta 69,000 V

LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE PARA SISTEMAS ENTRE 120V Y 69kV						
Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de IL						
Orden de armónicas individuales (armónicas impares) a,b						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5.00
20<50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8.00
50<100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12.00
100<1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15.00
>1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20.00

Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente

* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I_{sc}/I_L que presente

Donde:

- ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común
- IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.
- TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.

ANEXO 21: Características técnicas del controlador de factor de potencia automático. Fuente: Ficha técnica Lifasa.

Características técnicas

Circuito de tensión	Tensión alimentación	100...520 Vca
	Tolerancia	10%
	Consumo	10 ... 18 VA (según modelo)
	Frecuencia	50...60 Hz
Circuito medida	Tensión de medida	35...520 Vca F-F 20...300 Vca F-N
	Medida de corriente	x1 ó x3 transf. .../5 A ó .../1 A
Corriente de fugas	Rango de medida	$I_{Aprim} = 10 \text{ mA} \dots 1,5 \text{ Aca}$
	Transformadores de corriente	Serie WGS
Precisión	Tensión y Corriente	0,5% ±1 dígito
	Potencia Activa	0,5% ±2 dígitos
Medida de temperatura	Margen configurable	0...80 °C
Relés de salida	Nº de relés	6 ó 14 según tipo
	I_{max} de maniobra	1 A
	U_{max} contactos abiertos	1 kV
	Potencia max. de conmutación	2500 VA
	Nº salidas	2
Salidas digitales	Tipo	Transistor NPN
	U_{max} y I_{max} de maniobra	24 Vcc / 50 mA
	Nº Entradas	2
Alarmas	Nº de alarmas	17, totalmente configurables
Comunicaciones	Puerto	RS-485
	Protocolo	Modbus/RTU
Condiciones ambientales	Temperatura de trabajo	-10...+55 °C
	Humedad relativa	5...95% sin condensación
	Altitud máxima	2000 m
Sistema de control	PFC (Programa que minimiza el número de maniobras)	
Seguridad	Aislamiento	Categoría III Clase II EN 61010-1
	Grado de protección	IP 31 IP 51 frontal
Normas	IEC 62053-23 (2003-01), IEC 61326-1, EN 61010-1, UL 508	

ANEXO 22 Descripción del controlador de FP automático utilizado.

Fuente: Ficha técnica Circutor.

Computer SMART III



Regulador inteligente de energía reactiva

Descripción

La medida con tres transformadores de corriente asegura una lectura análoga a la del contador de compañía. El regulador de energía reactiva computer SMART III es el único del mercado que añade a la tradicional medida con un solo transformador de corriente, la posibilidad de medir con 3, incorporando, además, las funciones de un completo analizador de redes, y el control de corrientes residuales de fuga.

El computer SMART III es un regulador que asegura un excelente mantenimiento preventivo, mediante la programación de sus alarmas y las opciones de test de estado de los condensadores, ofreciendo máxima supervisión y seguridad en su equipo de compensación.

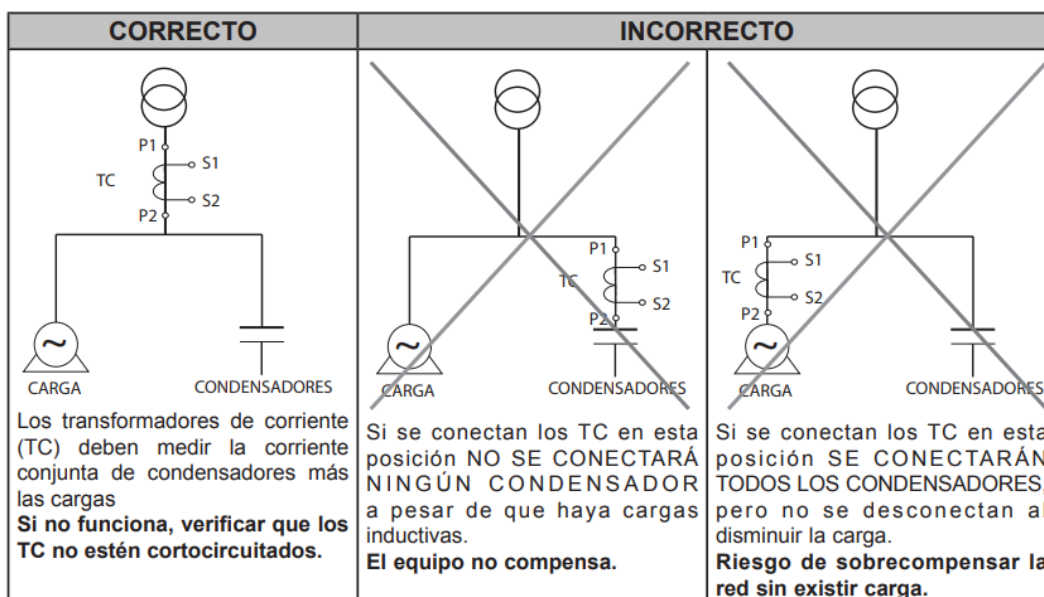
Aplicación

La conexión con 1 o 3 transformadores que permite el computer SMART III lo convierten en el regulador ideal en cualquier instalación, siendo posible:

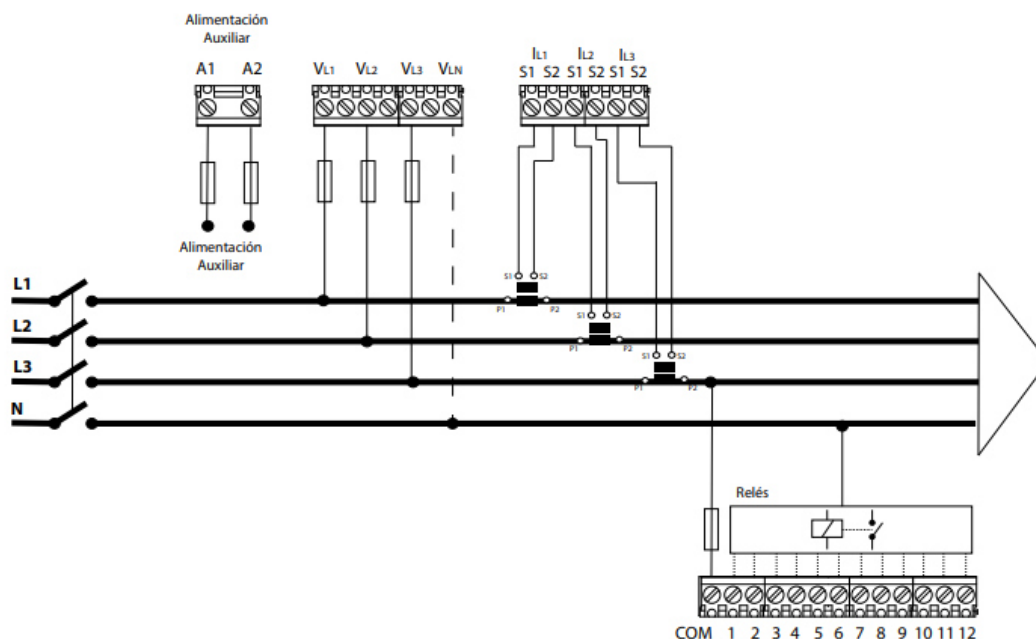
- Cambiar de 1 a 3 transformadores en caso de:
 - Cambios en la penalización de reactiva
 - Cambios en los hábitos de consumo
 - Importantes desequilibrios en el sistema
- Intercambiar el regulador en cualquier batería
- Ideal en instalaciones con hasta 4 $\cos \phi$ objetivos, para adaptarse a cualquier necesidad de compensación (diferentes franjas horarias).
Permite su uso en equipos de compensación de Media Tensión.

ANEXO 23: Conexión adecuada del transformador de corriente para la

señal del banco. Fuente: Manual controlador Circutor.



ANEXO 24: Esquema de conexionado 3F+N, con tres señales de corriente para el controlador automático. Fuente: Manual controlador Circuitor.



ANEXO 25: Características técnicas de la reactancia instalada. Fuente: Manual ficha técnica reactancia Lifasa..

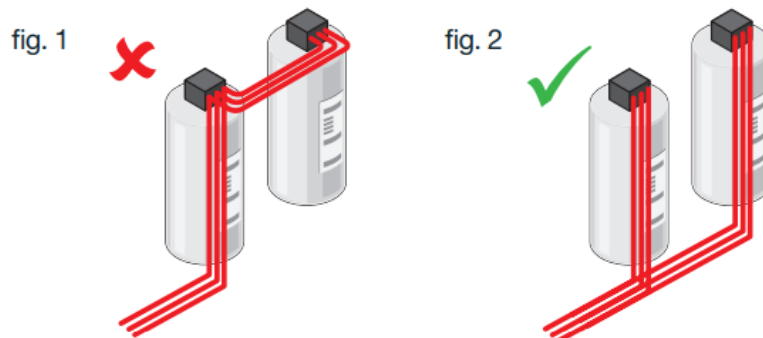
Características técnicas

Características eléctricas	Tensión	400 V / 480 V, bajo demanda: hasta 1000 V	
	Frecuencia de la red	50 / 60 Hz	
	Potencia nominal	Según tabla de selección	
	Valor de p %		7 % (189 Hz)
			5,67 % (210 / 252 Hz)
			14 % (134 / 160 Hz)
	Tipo de conductor	Banda de aluminio / cable de cobre	
	Tolerancia L	± 5 %	
	Linealidad (5% L)	1,8 x I_n	
	Tensión de aislamiento	4 kV	
	Temperatura ambiente máxima	-10 ... +45 °C	
	Aislamiento interno		Clase F (155 °C)
			Bajo demanda: Clase H (180 °C)
Sobrecarga máxima	Permanente	1,17 x I_n	
	Transitoria (1 min)	2 x I_n	
Seguridad	Protección	Sobretensión a 90 °C	
	Grado de protección	IP 00	
	Instalación	Interior	
Normas	EN-60289, IEC 60076		

ANEXO 26: Conexión adecuada de los condensadores en paralelo (recomendado por el fabricante). Fuente: Manual condensadores Lifasa.

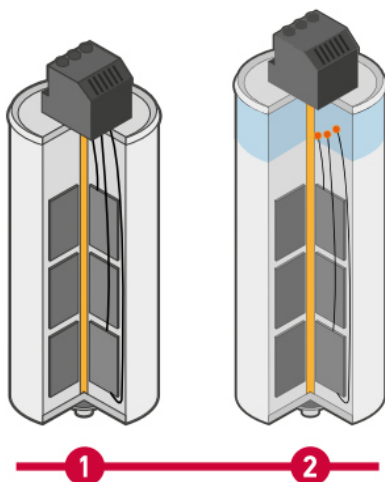
CONEXIÓN ELÉCTRICA

- › Usar cables flexibles, los cuales soporten una temperatura mínima de 70 °C y de sección según norma.
- › La conexión en paralelo de los condensadores no debe hacerse entre sus terminales, tal como se muestra en la *fig. 1*. Asegúrese de que la conexión en paralelo se realiza en la *fig. 2*.



ANEXO 27: Sistema de protección interno del condensador ante sobre presión. Fuente: Manual condensadores Lifasa.

Garantía de seguridad



- › **Nuevo sistema de desconexión integral** con cierre bajo presión controlada y corte de las 3 fases mediante válvula de seguridad.
- › **Rellenos con gas inerte (nitrógeno):** ausencia total de aceites, eliminando riesgo de fugas y posibilidad de incendio.
- › **Uso de polipropileno autorregenerable, de origen europeo, y con altas prestaciones:** Menores pérdidas de su clase, sólo 0,4 W/kvar.
- › **Aislado de partes activas y carcasa** mediante composite multilamina de altas prestaciones aislantes y térmicas.

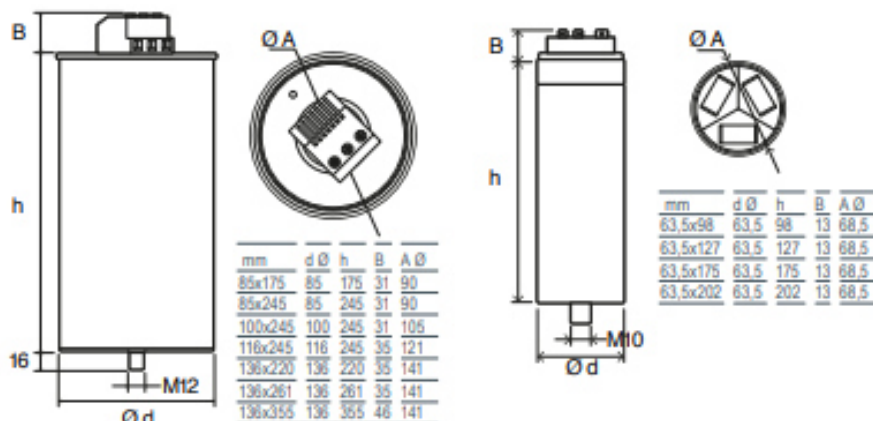
ANEXO 28: Características técnicas de los condensadores utilizados.

Fuente: Ficha técnica condensadores Lifasa.

Características técnicas

Características eléctricas	Sobrecorriente	1,8 veces la corriente nominal de forma permanente
	Corriente máxima	400 veces la corriente nominal I_n
	Sobretensión	10 %, 8 horas diarias
		15 %, hasta 30 minutos en 24 horas
		20 %, hasta 5 minutos en 24 horas
		30 %, hasta 1 minuto en 24 horas
	Nivel de aislamiento	3/8 kV (CLZ-FP-HD) - 3/12 kV (CLZ-FPT-HD)
	Frecuencia	50 / 60 Hz
	Tolerancia	-5...+10%
	Resistencia de descarga	50 V / 1 minuto (0,5 - 30 kvar) 75 V / 3 minutos (33 - 50 kvar)
Pérdidas	Dieléctrico: < 0,2 W / kvar Total: < 0,4 W / kvar	
Protecciones	Regeneración dieléctrica Sistema de expansión	
Características mecánicas	Envolvente	Aluminio
	Bornes de potencia	M10
	Tornillos de sujeción	M12
	Vida útil	≥ 150.000 horas
	Grado de protección	IP 20
		IP 54 con tapa cubrebornes (opcional) (para modelos Ø 85, 100, 116 mm)
Condiciones ambientales	Temperatura Clase D:	Medida diaria: 45 °C
		Media anual: 35 °C
		Máxima: 65 °C
		Mínima: -50 °C
Humedad relativa	95% sin condensación	
Altitud máxima	4,000 m	
Condiciones de montaje	Tipo de montaje	Vertical / Horizontal
	Ventilación	Natural o forzada según diseño de armario
	Distancia entre condensadores	Mínimo 2 cm
	Normas	IEC 60831:2014

Dimensiones



ANEXO 29: Características técnicas de los contactores utilizados. Fuente: Ficha técnica contactor Lifasa.

**KML CONTACTOR PARA CONDENSADOR
CONTACTOR FOR CAPACITOR**

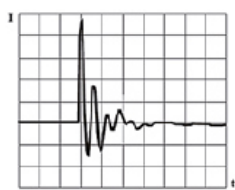
DESCRIPCIÓN/ DESCRIPTION

Los nuevos contactores KML están diseñados conforme a la norma IEC 60947-1 y son adecuados para la maniobra de conexión de condensadores trifásicos de potencia. Gracias a su bloque de precarga montado en el mismo contactor, se reducen las fuertes puntas de corriente producidas en el momento de conexión de los condensadores y se protege a la vez el propio contactor.

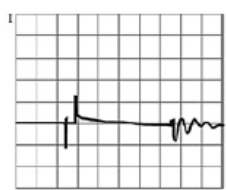
El bloque de precarga consiste en tres contactos auxiliares de precierre y resistencias de amortiguamiento (2 por fase) a través de las cuales los capacitores son preconnectados a la red. Una vez las resistencias han amortiguado los picos de corriente se produce la abertura automática de los contactos auxiliares con el objetivo de no tener pérdidas innecesarias.

The new KML contactors are designed in compliance with IEC 60947-1 standard and are suitable for operating three-phase power capacitors. Thanks to the block of preload built-in the same contactor, high currents peaks are reduced when connecting the capacitors and protecting as well the contactor.

The block of preload consists of three auxiliary contacts of pre-closing, along with resistance (two by phase) through which the capacitors are preconnected to the network, cushioning therefore the peaks of connection current. Once the preload resistances have reduced the current peaks that take place in the connection of the capacitor, automatic opening of the auxiliary contacts occurs with the objective of not having unnecessary losses.



Sin bloque de precarga
Without block of preload



Con bloque de precarga
With block of preload

