

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Análisis técnico y económico de alternativas de
mitigación de distorsión armónica en la Planta
Tintorería y Acabados de Mitchell S. A.**

Arturo Alatriza Corrales

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Arequipa, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR:

Ing. Ronald Alex Gaona Gallegos

AGRADECIMIENTO

A mi familia.

A mi asesor de tesis Ing. Ronal Gaona Gallegos.

A mis profesores.

A mis compañeros de estudio.

DEDICATORIA

A Dios.

A Pilar.

A todas las personas que en edad adulta emprenden la difícil tarea de estudiar y superarse a sí mismos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	2
1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1.1 Problema General	2
1.1.2 Problemas Específicos.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.3.1 Justificación Técnica	3
1.3.2 Justificación Económica.....	4
1.3.3 Importancia.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.4.1 Hipótesis general.....	4
1.4.2 Hipótesis específica	5
1.5 VARIABLES.....	5
1.5.1 Variable independiente	5
1.5.2 Variables dependientes.....	5
1.5.3 Operacionalización de las variables	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	7
2.2 BASES TEÓRICAS	9
2.2.1 Introducción.....	9
2.2.2 La distorsión armónica: Generalidades	11
2.2.3 Características de los armónicos en sistemas de potencia	13
2.2.4 Medición de distorsión armónica	17
2.2.5 Resonancia.....	19

2.2.6	Banco de condensadores e inyección de potencia reactiva	22
2.2.7	Efectos de la distorsión armónica en sistemas de potencia	23
2.2.8	Mitigación de armónicos en sistemas de potencia.....	25
2.2.8.1	Límites de distorsión armónica.....	25
2.2.8.2	Filtros de armónicos.....	29
2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	32
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....		35
3.1	MÉTODOS, TIPO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1.1	Metodología.....	35
3.1.2	Tipo.....	35
3.1.3	Alcance.....	36
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA	39
3.3.1	Población.....	39
3.3.2	Muestra.....	39
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	39
3.4.1	Instrumentos.....	39
3.4.2	Técnicas de procesamiento	39
3.4.3	Técnicas de análisis de datos.....	39
CAPÍTULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		40
4.1	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	40
4.1.1	Determinación de límites máximos de distorsión armónica.....	40
4.1.1.1	Determinación de límites máximos de distorsión armónica de voltaje	40
4.1.1.2	Determinación de límites máximos de distorsión armónica de corriente	41
4.1.2	Resultados del análisis de distorsión armónica	41
4.1.3	Determinación de los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta.....	42
4.1.4	Simulación del sistema con software computacional.....	46
4.1.4.1	Análisis de flujo de potencia en EASYPOWER	47
4.1.4.2	Análisis de flujo de corriente en EASYPOWER	49
4.1.4.3	Análisis de armónicos en EASYPOWER	51
4.1.5	Propuestas de corrección de armónicos y resultados	53
4.1.5.1	Descripción de los tratamientos utilizados en cada simulación.....	53

4.1.5.2	Resultados de los tratamientos utilizados	54
4.1.5.3	Evaluación del desempeño de los tratamientos	55
4.2	PRUEBA DE HIPÓTESIS - ANOVA	58
4.2.1	Hipótesis específica 1	58
4.2.2	Hipótesis específica 2	59
4.3	ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO DE LAS PROPUESTAS DE CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS	61
4.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	63
CAPÍTULO V CONCLUSIONES		65
CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES		68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		69
ANEXOS.....		72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	La onda fundamental y algunas formas de honda con distorsión armónica... 14
Figura 2.	Impedancia inductiva y capacitiva..... 20
Figura 3.	Pico de impedancia a la frecuencia de resonancia. 20
Figura 4.	Resonancia en serie..... 21
Figura 5.	Resonancia en paralelo..... 22
Figura 6.	Filtros armónicos típicos: (i) sintonizados en serie (ii) paso de banda doble (iii) 1ro, 2do y 3er orden amortiguado..... 29
Figura 7.	Conexiones de un filtro sintonizado en serie, fuente de armónicos en un sistema de distribución. 30
Figura 8.	Circuito equivalente que mira desde la inyección armónica como fuente. 30
Figura 9.	Variables de investigación..... 37
Figura 10.	Armónicos de voltaje (%) - TG1 43
Figura 11.	Armónicos de corriente (%) - TG1..... 43
Figura 12.	Armónicos de voltaje (%) - TG2 44
Figura 13.	Armónicos de corriente (%) - TG2..... 44
Figura 14.	Armónicos de voltaje (%) - TG3 45
Figura 15.	Armónicos de corriente (%) - TG3..... 45
Figura 16.	Diagrama básico del sistema eléctrico objeto de estudio: TG2 46
Figura 17.	Análisis de flujo de potencia de estado de línea de base del estudio 47
Figura 18.	Análisis de flujo de corriente de estado de línea de base del estudio 49
Figura 19.	Análisis de contaminación armónica de estado de línea de base del estudio 51
Figura 20.	Desempeño global de cada uno de los tratamientos..... 57
Figura 21.	Resultados análisis de varianza factorial 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Secuencia de fase armónica en un sistema trifásico equilibrado.....	17
Tabla 2.	Espectro de corriente armónica VSD de 6 pulsos	19
Tabla 3.	Límites distorsión armónica de voltaje (IEEE-2014)	26
Tabla 4.	Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV.	27
Tabla 5.	Límites de Distorsión Armónica de Voltaje - Norma Técnica Peruana Calidad de Energía	28
Tabla 6.	Diseño experimental: descripción de tratamientos	38
Tabla 7.	Resumen de valores de distorsión de armónicos medios y máximos de los tableros generales	42
Tabla 8.	Corriente, FP, y THD - TG1.....	42
Tabla 9.	Corriente, FP, y THD - TG2.....	44
Tabla 10.	Corriente, FP, y THD - TG3.....	45
Tabla 11.	Principales fuentes de contaminación armónica para este estudio	46
Tabla 12.	Cuadro de potencia de todos los buses.....	48
Tabla 13.	Cuadro de corrientes de todos los buses	50
Tabla 14.	Tabla armónicos de corriente (%) en todos los buses.....	52
Tabla 15.	Tabla armónicos de voltaje (%) en todos los buses	52
Tabla 16.	Descripción de los tratamientos utilizados en cada simulación	53
Tabla 17.	Resultados de los tratamientos utilizados.....	54
Tabla 18.	Matriz de ponderación para interpretación de resultados	55
Tabla 19.	Valores de ponderación para cada uno de los tratamientos	56
Tabla 20.	Desempeño ponderado y descripción de los mejores tratamientos.....	61
Tabla 21.	Opciones tecnológicas para los mejores tratamientos	62
Tabla 22.	Evaluación técnica-económica de mejores tratamientos	63
Tabla 23.	Matriz objetivos y conclusiones.....	72
Tabla 24.	Matriz de título	74
Tabla 25.	Matriz de correspondencia	75
Tabla 26.	Detalle de resultados de simulaciones realizadas.....	90

RESUMEN

La distorsión armónica genera problemas tangibles que afectan negativamente la productividad industrial. Aunque las soluciones de filtros activos se han difundido más ampliamente, la aplicación de filtros pasivos, podrían permitir alcanzar menores costos y por ende mayores índices de costo beneficio.

Michell S.A. es una de las principales empresas de textiles de alpaca. Los procesos de su planta industrial incluyen una serie de operaciones que requieren del uso de variadores de velocidad. Esto ha llevado al incremento de la contaminación armónica por encima de los valores recomendados.

El objetivo general del presente trabajo, es analizar técnica y económicamente las alternativas de mitigación de distorsión armónica en la planta tintorería y acabados de Michell S.A.

Para desarrollar el trabajo, se levantó data de calidad de energía, con un analizador de redes clase A. Además, se realizaron simulaciones con el programa demo EASYPOWER, lográndose completar 10 escenarios. Luego se realizó un análisis de costo beneficio entre las mejores alternativas.

Los resultados muestran que el tipo de filtro, la cantidad y su ubicación, son factores significativos en función de la capacidad para reducir la distorsión armónica. Se identificaron tres mejores soluciones: (1) Un filtro pasivo en serie tipo notch, sintonizado en armónico 5 y colocado en bus 4 (cerca de PCC); (2) Un filtro pasivo en serie tipo notch, sintonizado en armónico 5 y colocado en bus 6 (cerca de contaminación mayoritaria); (3) Dos filtros pasivos en serie tipo notch, sintonizados en armónico 5 y 7 respectivamente, colocados en bus 6 (cerca de contaminación mayoritaria).

Palabras Clave: Calidad de energía, armónicos de corriente, armónicos de voltaje, simulación, filtro de armónicos.

ABSTRACT

Harmonic distortion creates tangible problems that negatively affect industrial productivity. Although active filter solutions have spread more widely, the application of passive filters could achieve lower costs and therefore higher cost-benefit ratios.

Michell S.A. is one of the leading textile companies of Peru. The productive processes of its industrial plant include a series of operations that require the use of variable speed drives. This, has led to an increase in harmonic distortion above the recommended values.

The general objective of this work is to technically and economically analyze the harmonic distortion mitigation alternatives in the dyeing and finishing plant of Michell S.A.

For this objective, power quality data was collected with a class A network analyzer. In addition, simulations were carried out with the EASYPOWER demo program, completing 10 scenarios. Then a cost benefit analysis was carried out among the best alternatives. The results show that the type of filter, the quantity and its location are significant factors in terms of the ability to reduce harmonic distortion.

Three best solutions were identified: (1) A passive series notch filter, tuned to harmonic 5 and placed on bus 4 (near PCC); (2) A passive notch-type series filter, tuned to harmonic 5 and placed on bus 6 (near majority contamination); (3) Two passive notch type series filters, tuned to harmonic 5 and 7 respectively, placed on bus 6 (close to majority contamination).

Keywords: Power quality, current harmonics, voltage harmonics, simulation, harmonic filter.

INTRODUCCIÓN

La contaminación armónica es un problema de calidad de energía que ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, debido al uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos domésticos e industriales. Cuando la distorsión armónica supera los límites recomendados, puede convertirse en un serio problema, ya que no solo afecta la fiabilidad del sistema eléctrico, sino que incluso puede ser causal de avería de dispositivos electrónicos sensibles. Esto último genera una gran preocupación, ya que muchos equipamientos utilizados a nivel industrial, son gobernados por sistemas electrónicos de alta sensibilidad.

La planta de tintorería y acabados de Michell S.A., utiliza una serie de variadores de velocidad y otro tipo de cargas no lineales que generan un impacto en la distorsión armónica. El objetivo principal de este trabajo es analizar técnica y económicamente las alternativas de mitigación de distorsión armónica en la planta tintorería y acabados de Michell S.A.

Los resultados de la presente tesis van a contribuir a generar conocimiento sobre la técnica de uso de filtros pasivos, para configurar soluciones que puedan ser puestas al servicio de la industria nacional de manera costo-efectiva.

En el capítulo 1, se muestra el planteamiento del estudio, destacándose los objetivos e hipótesis. En el capítulo 2, se hace un análisis del estado del arte. para contextualizar las soluciones presentadas en el trabajo. En el capítulo 3. se muestra la metodología utilizada para alcanzar la consecución de los objetivos. En el capítulo 4, se realiza el análisis e interpretación de los resultados, mostrando data relevante, así como los resultados de 10 escenarios de simulación, como también el análisis de costo beneficio. En el capítulo 5 y 6, se muestran las conclusiones y recomendaciones respectivamente. Finalmente, se adjuntan anexos donde se puede visualizar el detalle de la data levantada.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Michell S.A., es una de las principales empresas de textiles de alpaca en nuestra región y el país, es fuente de trabajo para muchos profesionales, técnicos y trabajadores de la ciudad de Arequipa.

Los procesos de Michel incluyen una serie de operaciones, tales como cardado, retorcido, etc. que requieren de elementos rotatorios de velocidad variable para la producción de conos de hilo en las distintas presentaciones. Antiguamente, la variación de velocidad se realizaba mecánicamente, pero en los últimos 8 años, la planta ha ido incorporando una serie de variadores de velocidad.

Por otro lado, se han venido presentando problemas de calidad de energía, que por ejemplo ya han impactado económicamente a la empresa, con la avería de tarjetas electrónicas de equipos altamente especializados. Mediciones iniciales dentro de planta han llevado a sospechar de una contaminación de distorsión de armónicos que podría estar afectando la instalación.

1.1.1 Problema General

¿Cuál es la mejor alternativa técnica y económica para la mitigación de distorsión armónica en la planta tintorería y acabados de Michell S.A.?

1.1.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente en la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.?
- ¿Cuáles son los órdenes armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta?

- ¿Qué tipo de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica?
- ¿Qué cantidad de filtros puede ponerse en funcionamiento para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica?
- ¿Qué ubicaciones pueden utilizarse para la utilización de filtros?
- ¿Cuál es el costo beneficio de la mitigación de distorsión armónica?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Analizar técnica y económicamente las alternativas de mitigación de distorsión armónica en la planta tintorería y acabados de Michell S.A.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar una línea de base de calidad de energía que evalúe principalmente la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente.
- Determinar los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta.
- A partir de simulaciones computacionales, determinar qué tipo de filtros pueden implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica.
- A partir simulaciones computacionales, determinar qué cantidad de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica.
- A partir de simulaciones computacionales, determinar qué ubicaciones pueden utilizarse para la utilización de filtros.
- Realizar un análisis de costo beneficio para todas las alternativas propuestas y elegir la de mayor costo beneficio.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación Técnica

El presente trabajo busca analizar alternativas que permitan contribuir a la resolución de un problema técnico, relacionado a una deficiencia en la calidad de energía que está impactando negativamente la instalación y poniendo en riesgo la vida útil de los equipos en planta.

En el Perú el conocimiento especializado de soluciones de mitigación de armónicos es limitado, principalmente, porque recién en los últimos años el tema de contaminación armónica, ha cobrado niveles relevantes que afectan la operatividad industrial en diferentes rubros.

1.3.2 Justificación Económica

La distorsión armónica genera problemas tangibles que afectan negativamente la productividad industrial. Por ejemplo, a primera vista la avería de tarjetas electrónicas de equipos altamente especializados, genera un alto sobre costo de reposición, ya que normalmente estos equipos deben ser importados. Esto a la vez genera costos de parada de máquina, es decir, la empresa deja de producir durante el tiempo de avería. Finalmente, la avería de tarjetas es uno de los síntomas, pues en presencia de una alta contaminación armónica, se acelera el proceso de reducción de vida útil de los equipos y pone en riesgo la operación.

Las casas comerciales de empresas eléctricas, se centran en proveer soluciones de filtrado activo en acometidas principales de tableros, lo cual conlleva a proyectos de altos costos de inversión. Paralelamente la aplicación de filtros pasivos no se encuentra muy difundida en el mercado, al parecer por el escaso conocimiento técnico.

La aplicación de filtros pasivos podría permitirían alcanzar menores costos y por ende mayores índices de costo beneficio para proyectos de mitigación.

1.3.3 Importancia

Este trabajo pretende contribuir con el análisis de alternativas de solución que puedan alcanzar un mejor costo beneficio para mitigación de contaminación armónica en la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.

Esto permitirá no solo corregir los sobre costos ocasionados por la mala calidad de energía, sino también reducir los costos de inversión de la solución propuesta.

Este trabajo servirá como un marco de referencia para llevar a cabo soluciones de mitigación de contaminación armónica que buscan maximizar el costo beneficio a nivel industrial.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

Probando diferentes configuraciones respecto a la ubicación de filtros de armónicos, el tipo de filtros a utilizar, la cantidad de filtros y el análisis de costo beneficio se podrán

analizar alternativas para la mitigación de la distorsión armónica en la planta tintorería y acabados de Michell S.A. que permitan identificar la mejor posible.

1.4.2 Hipótesis específica

La distorsión armónica de Michell S.A. planta de Tintorería y Acabados, sobrepasa los valores límite de distorsión armónica, tanto en voltaje como en corriente. Es posible identificar el tipo de armónico que afecta esencialmente la red.

La distorsión armónica genera resonancia con banco de capacitores agudizando de esta manera el problema de contaminación armónica

Es posible desarrollar técnicamente un proyecto de mitigación de distorsión armónica, considerando variables como el costo de inversión y tasa de mitigación de armónicos. Es posible finalmente encontrar una solución de mayor costo beneficio (mejor alternativa).

1.5 VARIABLES

1.5.1 Variable independiente

- Filtros
 - Dimensiones
 - Tipo de filtros para corregir la distorsión armónica y el factor de potencia.
 - Cantidad de filtros a colocar.
 - Ubicación de filtros a colocar en la distribución eléctrica de la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.

1.5.2 Variables dependientes

- Distorsión armónica
 - Dimensiones
 - Las distorsiones armónicas producidas por las cargas no lineales presentes en la Planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.
 - El factor de potencia presente en la Planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.
 - Costo Beneficio de la solución propuesta.

1.5.3 Operacionalización de las variables

Variables	Tipo de variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Filtros: Configuración de una solución basada en filtros para corregir la distorsión armónica	Independiente	Tipología o configuración física del filtro a usarse para efectuar la corrección de armónicos. Cantidad de filtros a colocar. Ubicación de filtros a colocar en la distribución eléctrica de la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.	Tipo Cantidad Ubicación	Tipo de filtro Numero de filtros Ubicación de filtro	Simulación computacional
Corrección de la distorsión armónica producida por las cargas no lineales presentes en la Planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.	Dependiente	La distorsión armónica es una medida de la distorsión de la onda sinusoidal eléctrica. Es la relación de contenido armónico con el armónico fundamental.	Distorsión armónica total (THD) Factor de potencia Costo beneficio.	% Porcentaje de distorsión con respecto a la fundamental Factor de potencia (Cos φ) Costo beneficio (valor monetario-desempeño).	Registro de datos automatizado. Analizador de calidad de energía Fluke 432.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Ali, Alenezi, Kandil y Aleem (2018). (Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems, 2018). Artículo publicado en *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, UK. En este artículo, los autores analizaron ocho enfoques de evaluación de filtros pasivos de múltiples brazos, con un enfoque industrial. Entre ellos se evaluó: eficiencia del filtro, niveles de distorsión armónica, falla del filtro, interacción con el sistema y costo del filtro, para determinar la técnica de diseño más eficiente. A la vez, se desarrolló un método de diseño de filtros pasivos de brazos múltiples basado en un algoritmo especial para minimizar la distorsión de corriente armónica total (THDI) como una función objetivo para una planta industrial. Las simulaciones se realizan en entornos ETAP y Matlab. Los resultados de la simulación obtenidos, muestran las desventajas de los métodos de diseño tradicionales y la ventaja de la solución propuesta entre los otros métodos. Los filtros pasivos de derivación, se consideran la herramienta más confiable y económica para la mejora del factor de potencia y la supresión de armónicos. Los análisis técnico económicos son de gran utilidad para la selección de soluciones de corrección de distorsión armónica.

Liani-Moghaddam, Shivaie y Weinsier (2019). (A techno-economic multi-objective model for hybrid harmonic filter planning considering uncertainty in non-linear loads, 2019). Artículo publicado en *Electrical Power and Energy Systems*, UK. En este artículo, se desarrolló una técnica probabilística de flujo de potencia armónica desacoplada, para analizar las características probabilísticas de un nuevo modelo técnico-económico multiobjetivo para la planificación de filtros armónicos híbridos, teniendo en cuenta la incertidumbre en la demanda y la cantidad de corrientes armónicas inyectadas por cargas no lineales, utilizando un método de estimación que evaluó factores técnicos y económicos.

En este estudio, los autores analizaron cuatro objetivos del problema: el costo total asociado con los filtros de armónicos asignados; la distorsión armónica total relacionada con el voltaje, la corriente; y la pérdida de la línea de transmisión que surgen de los armónicos en la optimización.

Pacis, Martinez Jaypee y Tecson (2010). Modelling and Simulation of Active Power Filters for Harmonic Compensation, Voltage Sags and Swells Mitigation and Power Factor Correction. Artículo presentado en congreso (Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science), San Francisco, USA. En este artículo, se estudiaron tres modelos de filtros activos de potencia activa que compensen los armónicos, mitiguen las caídas y las subidas de tensión, y también corrijan el factor de potencia. Los modelos se simularon para saber cuál de los tres modelos de filtro de potencia activo ofrece el mejor rendimiento. Las herramientas de simulación que se utilizaron en este estudio fueron MATLAB / Simulink y TINA PRO. En base a los resultados, los autores concluyen que los modelos de filtro de potencia activa compensan los armónicos, mitigan las caídas y las subidas de tensión y corrigen el factor de potencia del sistema, logrando atenuar la distorsión armónica entre un 88 y 98%.

Molano y Tique (2013). Diseño y Construcción de un Kit de Filtros Pasivos para la Mitigación de Corrientes Armónicas. En esta tesis los autores diseñaron y construyeron un filtro pasivo teniendo en cuenta el orden de los armónicos, tensión nominal, magnitud de cada armónico, potencias y tipo de conexión. Este filtro fue construido para corregir distorsión del 5to y 7mo armónico. Ellos lograron una solución de bajo costo comparativo, y una eficiencia aceptable, alcanzando una reducción cercana a 50% en la corrección de distorsión armónica. (Molano, y otros, 2013).

Díaz y Parada (2009). Técnicas Para la Mitigación de Armónicas y de Compensación del Factor de Potencia en Sistemas de Potencia, Caso Práctico Corinca. En esta tesis, los autores analizaron el caso de una empresa industrial que tuvo como proyecto la conexión a la red interconectada de una carga de gran potencia (Horno de Arco Eléctrico-HAE), generadora de corrientes armónicas importantes, considerando el factor de potencia, su compensación, las corrientes armónicas y su mitigación. Los autores buscaron la selección de un sistema que simultáneamente realice la compensación del factor de potencia y la mitigación de las armónicas dentro de límites fijados por norma. Ellos encontraron que el uso de Filtros pasivos en lugar de los Bancos de Capacitores en

circuitos con altas probabilidades de resonancia, puede evitar la resonancia serie y en paralelo, limitan la corriente de energización de los capacitores y atenúan los disturbios en voltaje ocasionados por la conexión de capacitores. Además, identificaron que el uso de Inductancias en serie con el banco de capacitores, reduce las corrientes y los sobrevoltajes de conexión y desconexión del banco, alargando la vida de los capacitores. Esto mostró que existe un efecto de resonancia entre la presencia de bancos de condensadores (correctores de factor de potencia) y los armónicos, hecho que puede agudizar los efectos producidos por estas distorsiones. (Díaz, y otros, 2009).

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Introducción

Los armónicos han existido en los sistemas de energía durante muchos años. Sin embargo, el problema ha recibido recientemente una importancia adicional por el establecimiento simultáneo de dos tendencias: el mayor uso de los bancos de condensadores por parte de las empresas de servicios eléctricos para mejorar su factor de potencia, y la aplicación generalizada de convertidores electrónicos de potencia en la industria que buscan una mayor confiabilidad y eficiencia del sistema. (Wakileh, 2001) En los últimos años, muchas industrias en Perú han implementado estos tipos de sistemas, que ha llevado a generar problemas de armónicos que no estaban inicialmente previstos.

Por otro lado, las empresas eléctricas siempre se preocupan por tener un factor de potencia alto, que tiene la ventaja de reducir las pérdidas de línea y las caídas de voltaje, disminuyendo así la necesidad de equipos de regulación de voltaje; sin embargo, esto va acompañado del uso cada vez mayor por parte de la industria de variadores de velocidad y equipos electrónicos que, como fuentes de fenómenos indeseables, pueden interactuar con los bancos de capacitores de corrección del factor de potencia para producir amplificación de voltaje y corriente. (Wakileh, 2001).

El fuerte desarrollo que ha experimentado últimamente la industria de la electrónica de estado sólido, ha dado lugar a la introducción de electrodomésticos "delicados", más sensibles a la calidad de la energía suministrada por las empresas eléctricas, en comparación con los dispositivos "robustos" utilizados en el pasado. Al mismo tiempo, estos aparatos eléctricos dan como resultado la distorsión de las formas de onda de voltaje y corriente CA en estado estable. Los sistemas de suministro de energía convencionales están diseñados para operar con formas de onda sinusoidales. Las empresas eléctricas se esfuerzan además por suministrar a los consumidores energía eléctrica sinusoidal de

frecuencia fundamental confiable y "limpia" que no represente una amenaza dañina para sus equipos. (Wakileh, 2001).

Estas situaciones han sentado las bases para prestar una atención considerable a la calidad de la energía eléctrica y abordar seriamente el problema de la distorsión de corriente y voltaje, uno de las cuales es la distorsión armónica.

Los armónicos, son componentes de una forma de onda periódica distorsionada, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. A fin de inspeccionar los impactos de dispositivos no lineales y analizar determinadas situaciones de armónicos, se realizan estudios de armónicos. Estos, están destinados a detectar resonancias y calcular factores de distorsión.

Un estudio de flujo de potencia armónica, calcula las corrientes de línea armónicas y fundamentales y los voltajes de bus. El resultado de diferentes soluciones finalmente se puede examinar mediante la simulación de varias alternativas de filtrado.

En sistemas simples, los problemas de armónicos se pueden analizar usando una hoja de cálculo. Los programas de análisis de armónicos, están disponibles comercialmente para analizar grandes sistemas y permitir el modelado detallado de los diferentes tipos de dispositivos que producen armónicos.

Los armónicos son causados usualmente por dispositivos o cargas no lineales (Wakileh, 2001), entre ellos: Sistemas ASD, Ciclo convertidores, Hornos de arco, Laminadores, fuentes de alimentación conmutadas, computadoras, fotocopiadoras, televisores y electrodomésticos, modulación de ráfagas de pulsos, reactores controlados por tiristores (TCR), transmisión HVDC, (los armónicos se originan en convertidores), tracción eléctrica, circuitos chopper, generación de energía eólica y solar, carga de baterías y pilas de combustible, esquemas de recuperación de frecuencia de deslizamiento de motores de inducción, iluminación fluorescente y balastos electrónicos, sistemas de carga de vehículos eléctricos, calentamiento por rectificador controlado por silicio (SCR), calentamiento por inducción y soldadura por arco. (Das, 2015).

Los efectos armónicos en los sistemas eléctricos se pueden resumir como mayores pérdidas, calentamiento y pérdida de vida de los equipos e interferencia con los circuitos de protección, control y comunicación.

Las soluciones destinadas a evitar o superar los armónicos, incluyen por nombrar algunas, la cancelación de fase, el uso de filtros y la desactivación del circuito. Los estándares se han desarrollado aún más y tienen como objetivo mantener los armónicos a un nivel bajo "libre de daños". Los límites de distorsión armónica de voltaje y corriente permitidos se han establecido por normas tales como: IEEE, IEC, EN y NORSOK.

Los estudios de armónicos, tienen como objetivo calcular los voltajes armónicos del bus, las corrientes armónicas derivadas y la distorsión armónica total (THD) de voltaje y corriente, así como detectar condiciones de resonancia.

2.2.2 La distorsión armónica: Generalidades

El porcentaje de cargas no lineales en edificios de oficinas e instalaciones industriales, ha aumentado en la última década a medida que la iluminación incandescente se reemplaza por iluminación fluorescente, a medida que se conectan más computadoras y controladores programables al sistema eléctrico, y a medida que más motores eléctricos usan unidades de frecuencia variable (VFD). Las perturbaciones armónicas también se pueden transmitir desde la red si se tiene un banco de condensadores de corrección del factor de potencia sin filtrar en su potencia entrante.

De acuerdo con Das (2015), muchos países han promulgado sus estándares para las limitaciones armónicas. La serie de estándares IEC – 61000, proporciona información internacionalmente aceptada para el control de armónicos. También existen varios modelos de normalización europea tales como CEN, Comité Europeo de Normalization, CENLEC, Comité Europeo de Normalization Electro-technique, ETSI, European Telecommunication Standard Institute. Para Estados Unidos, la norma que prevalece es la IEEE – 519, así como en otros países a nivel internacional.

Según la norma internacional IEEE 519-2014, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de IEEE para Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”, (IEEE, 2014), para sistemas baja tensión con $V < 1000$ v, el THD v máximo es de 8%. La Distorsión total por armónico máxima es 5%. Para sistemas de índice I_{sc}/I_L entre 50y 100, el límite de THD i es 12%. El límite para la distorsión por armónico es de 10%. (Nótese que se calcula que el 90% de las instalaciones normales se encuentran en el rango de 50-100 para el ratio I_{sc}/I_L). (Corriente de corto circuito / corriente de la carga).

Mazorra (2012), hace referencia a impactos técnicos y económicos causados por el exceso sobre los límites permitidos de la distorsión armónica. Dichos impactos los relaciona a:

- Reducción de la eficiencia energética (pérdida de energía).
- El envejecimiento acelerado del equipamiento con énfasis en los sistemas de distribución y conductores.
- Disparos no deseados de equipos de protección.
- Aumento de costos por necesitar disminuir las capacidades nominales y/o sobredimensionar sus capacidades.

- Reducción del ritmo de producción o servicio, de la calidad, o a pérdidas de materiales.
- Reducción de la productividad por la mala operación del equipamiento. Esto ocurre normalmente cuando la distorsión total armónica (THD) de tensión es > 8%. Entre 5 y 8% se pueden presentar operaciones indebidas.

Wakileh (2001), nombre del artículo científico. Qué tipo de investigación, si hubiera en nombre de la institución para la cual se realizó el artículo y el lugar de origen de la investigación. indica que las soluciones a los problemas armónicos se clasifican en preventivas y correctivas.

Las soluciones preventivas, son aquellas políticas que se ponen en marcha para evitar los armónicos y sus consecuencias. Estos incluyen:

- Cancelación de fase o control de armónicos en convertidores de potencia.
- Desarrollar procedimientos y métodos para controlar, reducir o eliminar armónicos en los equipos del sistema de energía; principalmente condensadores, transformadores y generadores.
- Intentando mantener los armónicos en un nivel bajo "libre de daños".

Las soluciones correctivas, son aquellas técnicas requeridas para superar los problemas de distorsiones armónicas existentes. Incluyen:

- El uso de filtros.
- Desintonización del circuito que implica la reconfiguración de alimentadores o reubicación de bancos de condensadores para superar la resonancia.

Los armónicos se pueden reducir de manera eficiente, mediante el uso de un filtro pasivo que consiste en una combinación en serie de un condensador y un reactor sintonizado a una frecuencia armónica específica. Los filtros proporcionan una "trampa" de baja impedancia a un armónico al que se sintoniza el filtro. Teóricamente, el filtro tiene una impedancia cero en la frecuencia de sintonización, lo que absorbe el armónico de interés.

- Filtros ajustados en serie.
- Filtros de doble paso de banda.
- Filtros amortiguados.
- Filtros desafinados (antirresonantes).

Si bien los filtros pasivos tienen un menor costo comparativo, existen ciertas desventajas convencionales, tales como:

- Las características de filtrado dependen de la impedancia de la fuente.
- Estresan la impedancia por debajo del armónico sintonizado más bajo.

- Puede ser inadecuado para filtrar armónicos no característicos (diferentes de la frecuencia sintonizada del filtro).

Según MTE (2018) los filtros de armónicos activos, son filtros paralelos (lo que significa que la corriente no pasa por el filtro) que se utilizan para reducir o mitigar los armónicos a niveles tolerables. según lo definido por IEEE-519. Los filtros activos utilizan un conjunto de transistores y condensadores para filtrar (o limpiar) la onda de corriente, inyectando corrientes inversas para cancelar los componentes armónicos no deseados.

Los filtros activos son significativamente más caros que los pasivos y ocupan más espacio. detendrá el motor (ya que la corriente no pasa por el filtro); simplemente no filtrará la ola actual.

2.2.3 Características de los armónicos en sistemas de potencia

Los siguientes gráficos muestran ejemplos de ondas que sufren distorsión por armónicos:

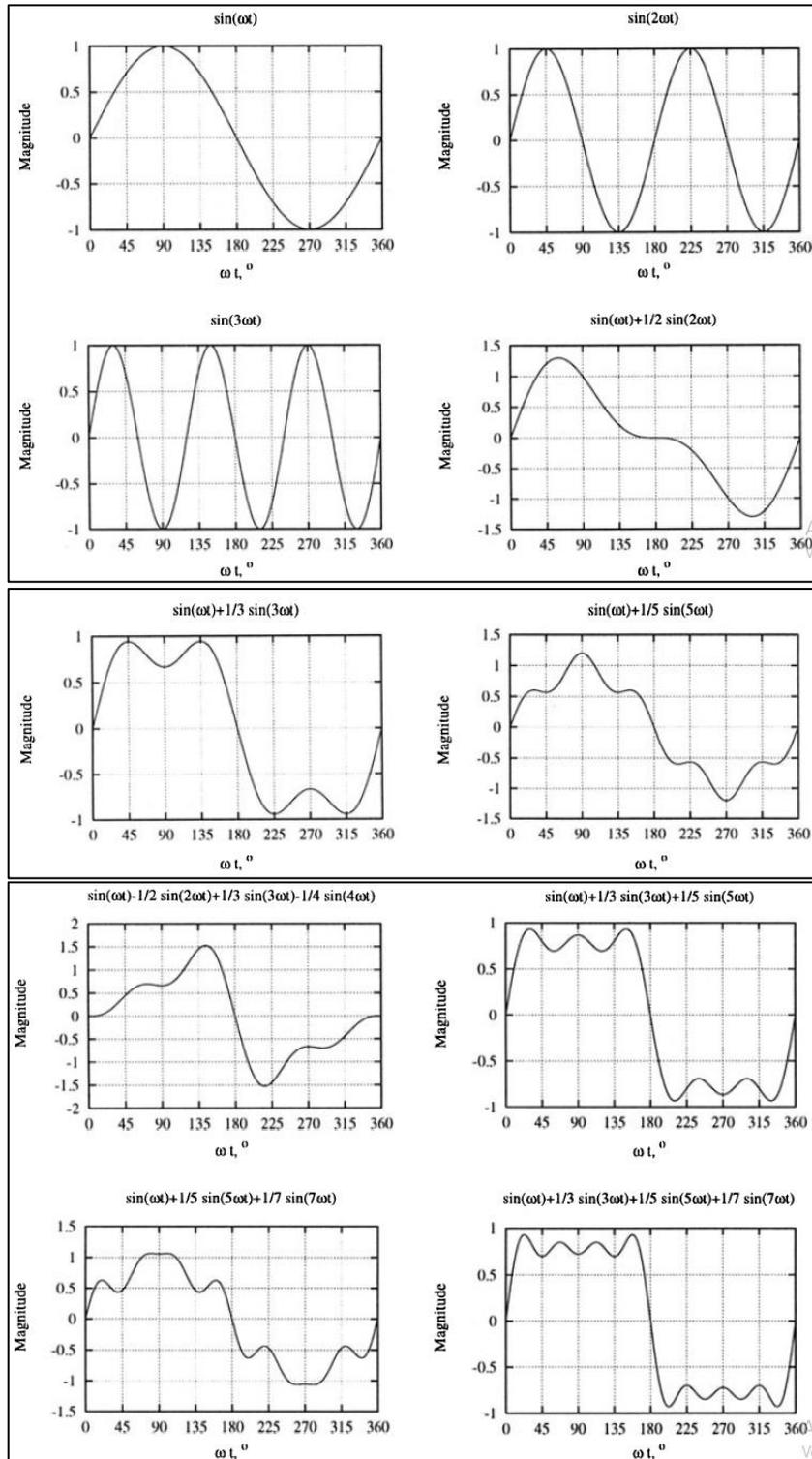


Figura 1. La onda fundamental y algunas formas de onda con distorsión armónica.

Fuente: "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", por Wakileh, 2001, p. 6.

La serie de Fourier representa una forma eficaz de estudiar y analizar la distorsión armónica. Permite inspeccionar los diversos componentes de una forma de onda distorsionada a través de la descomposición.

Generalmente, cualquier forma de onda periódica se puede expandir en forma de una serie de Fourier.

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(hw_0t) + B_h \text{sen}(hw_0t)]$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \text{sen}(hw_0t + \psi_h)]$$

Donde:

$f(t)$: es una función periódica de la frecuencia f_0 , frecuencia angular $w_0 = 2\pi f_0$ y periodo $t = 1/f_0 = 2\pi/w_0$.

$C_1 \text{sen}(w_0t + \psi_1)$ representa el componente fundamental.

$C_h \text{sen}(hw_0t + \psi_h)$ representa el armónico número h , de amplitud C_h , frecuencia hf_0 y fase ψ_h .

Los coeficientes de la serie de Fourier están dados por

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx, \text{ donde } x = w_0t$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hx) dx$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(hw_0t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \text{sen}(hx) dx$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2}$$

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{A_h}{B_h} \right)$$

Los armónicos tienen las siguientes características:

a) Simetría

- La simetría impar se caracteriza por $f(-t) = -f(t)$ y da como resultado términos sin coseno en la forma de onda de expansión de la serie de Fourier.

- La simetría par, se caracteriza por $f(-t) = f(t)$ y da como resultado la expansión de la serie de Fourier de la forma de onda sin tener términos de seno, es decir, solo términos coseno.
- Las formas de onda con simetría de media onda, $f(t \pm T/2) = -f(t)$, tienen componentes de cero y dan como resultado la cancelación de los armónicos de orden par (2, 4, 6, ...). Esta característica nos lleva a ignorar los armónicos pares en los sistemas de potencia, ya que consisten en componentes bilaterales que producen tensiones y corrientes simétricas de media onda (Arrillaga, y otros, 2003).

b) Secuencia de fase

En un sistema trifásico balanceado, los componentes armónicos de frecuencia individuales son de secuencia completamente positiva, negativa o cero, como puede verse a través de la representación en serie de Fourier de los voltajes de fase.

Esto revela que:

- Los armónicos fundamentales, así como cuarto, séptimo, ... tienen secuencia positiva.
- Los armónicos segundo, quinto, octavo, ... tienen secuencia negativa.
- Los armónicos triples (tercero, sexto, noveno, ...) tienen secuencia cero.

Tabla 1.*Secuencia de fase armónica en un sistema trifásico equilibrado.*

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fuente: "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", por Wakileh, 2001, p. 15.

La tabla anterior, presenta la configuración de secuencia de fase armónica en un sistema trifásico balanceado basado en la expansión de la serie Fourier. Vale la pena mencionar dos puntos aquí (Arrillaga, y otros, 2003):

- Si hay armónicos presentes, entonces existen corrientes de secuencia cero e incluso negativa si el sistema está balanceado.
- Al ser de secuencia cero, las corrientes armónicas triples balanceadas (corrientes armónicas de órdenes divisibles por tres) no pueden fluir hacia un delta o en ausencia de una conexión a tierra.

c) Independencia

Las redes lineales en sistemas de potencia balanceados tienen la propiedad de que sus respuestas a diferentes armónicos de forma independiente. Esto nos permite tratar cada armónico por separado (Arrillaga, y otros, 2003); es decir, construir el circuito equivalente para cada armónico (en el dominio de la frecuencia) y resolver las corrientes y los voltajes. La respuesta total se obtiene sumando los componentes armónicos en el dominio del tiempo.

2.2.4 Medición de distorsión armónica

a) Forma de onda

Una forma de onda de corriente o voltaje periódica distorsionada expandida en una serie de Fourier se expresa de la siguiente manera:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(hw_0t + \phi_h)$$

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(hw_0t + \theta_h)$$

Donde:

I_h es el h-ésimo pico de corriente armónica.

V_h es el h-ésimo pico de voltaje armónico.

ϕ_h es la h-ésima fase de corriente armónica.

θ_h es la h-ésima fase de voltaje armónico.

w_0 es la frecuencia angular fundamental, $w_0 = 2\pi f_0$.

f_0 es la frecuencia fundamental, $f_0 = 50 / 60\text{Hz}$.

b) Voltaje y corriente RMS

Recordando que

$$F_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 = \sum_{h=1}^{\infty} F_{rms}^2$$

Se pueden proporcionar expresiones para el voltaje y la corriente RMS tal como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2}$$

y

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

c) Factores de distorsión de voltaje y corriente.

El factor de distorsión de voltaje V DF, también conocido como distorsión armónica total de voltaje THDv, se define como:

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{1rms}}\right)^2 - 1}$$

De manera análoga, el factor de distorsión de corriente CD F, también conocido como distorsión armónica total actual THD I, se define como:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1rms}}\right)^2 - 1}$$

donde V1 y I1, representan el voltaje y la corriente pico fundamentales, respectivamente. (Mazorra Soto, 2012).

Por ejemplo, la siguiente figura muestra el espectro de distorsión expresado en %, así como el THD para un VSD de 6 pulsos:

Tabla 2.

Espectro de corriente armónica VSD de 6 pulsos

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
I _h , %	100	26.7	7.8	5.4	3.4	1.8	1.7	0.9	0.8
h	29	31	35	37	41	43	47	49	% THD _I
I _h , %	0.7	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	28.696

Fuente: Tomado de Wakileh, 2001, p. 18

Nota: VSD= (rectificador de diodos + inversor PWM con tiristores GTO)

2.2.5 Resonancia

El fenómeno de resonancia ocurre cuando en los sistemas de distribución de energía eléctrica, las reactancias inductivas (que equivalentes de cargas eléctricas) son iguales a las reactancias capacitivas (bancos de condensadores).

Es decir:

$$X_{L_r} = \omega_r L = X_{C_r} = \frac{1}{\omega_r C}$$

Donde:

X_{Lr} = reactancia inductiva de resonancia.

X_{Cr} = reactancia capacitiva de resonancia.

Esto produce una amplificación en la respuesta del sistema a una excitación periódica (tensión o corriente) cuando la frecuencia de la fuente de excitación, es igual a la frecuencia natural del sistema.

La impedancia de una inductancia (X_L), es directamente proporcional a la frecuencia. Si se grafica la impedancia versus a la frecuencia, vemos se obtiene una recta. Por otro lado, la impedancia capacitiva (X_C), será inversamente proporcional a la frecuencia, entonces esta disminuye cuando la frecuencia aumenta.

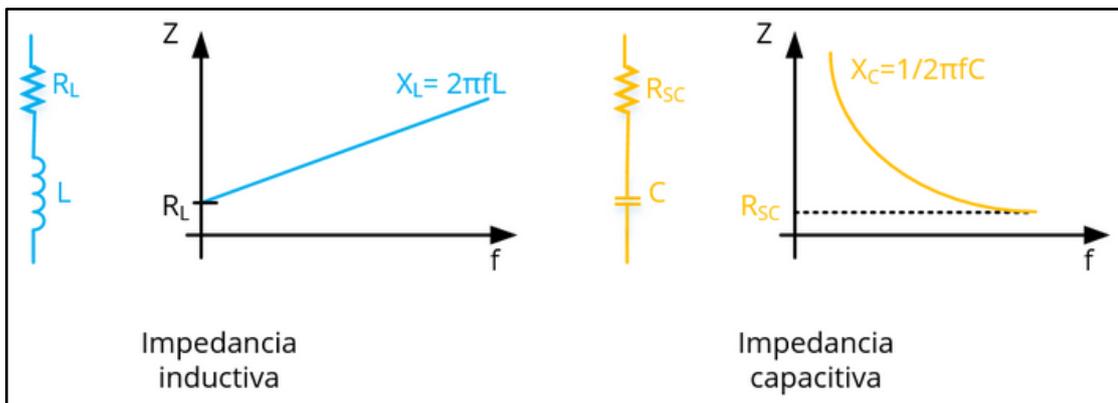


Figura 2. Impedancia inductiva y capacitiva.

Fuente: Resonancia eléctrica, batería de condensadores y armónicos, Fornieles, 2017. Consultado el: 31 de enero de 2021. Disponible en: <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/resonancia-electrica-bateria-condensadores-y-armonicos/>.

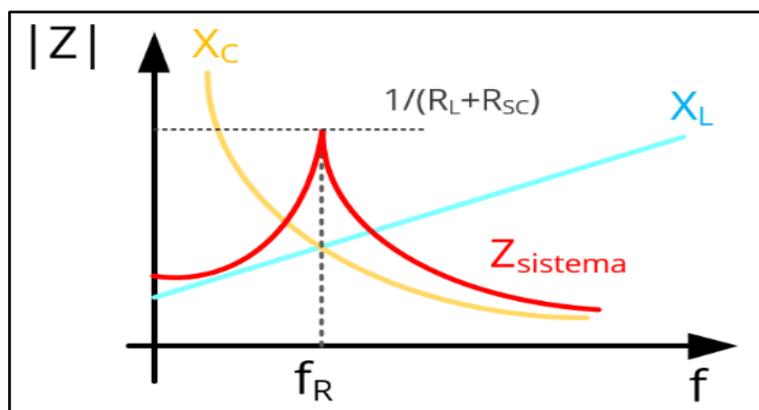


Figura 3. Pico de impedancia a la frecuencia de resonancia.

Fuente: Tomado de Resonancia eléctrica, batería de condensadores y armónicos, Fornieles, 2017. Consultado el: 31 de enero de 2021. Disponible en: <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/resonancia-electrica-bateria-condensadores-y-armonicos/>.

En un sistema eléctrico, se pueden presentar distintos tipos de resonancia para diferentes frecuencias armónicas.

Se pueden presentar dos tipos de resonancia:

a) Resonancia en serie.

Esta puede ocurrir cuando un condensador equivalente está en serie con la reactancia equivalente del sistema se crea un camino de baja impedancia para la circulación de corrientes armónicas. (Carvajal, 2007) En otras palabras, cuando las reactancias inductivas y capacitivas son iguales, la impedancia del circuito es baja y un pequeño voltaje de excitación da como resultado una gran corriente. (Wakileh, 2001)

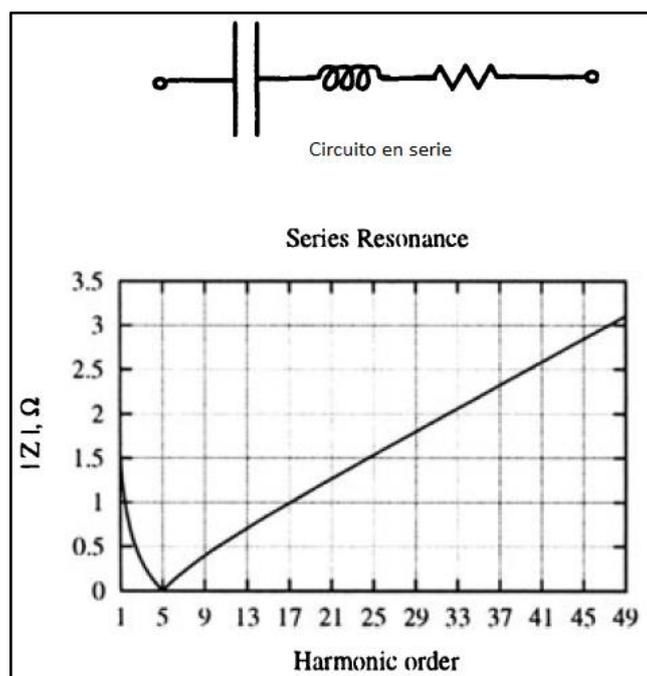


Figura 4. Resonancia en serie.

Fuente: "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", por Wakileh, 2001, p. 27.

b) Resonancia en paralelo.

Este tipo de resonancia toma lugar si el condensador equivalente está en paralelo con la reactancia equivalente del sistema, lo cual hace que la fuente vea una impedancia muy grande y tiene el efecto de producir una distorsión en la tensión y una amplificación en la corriente (Carvajal, 2007). Dicho de otra manera, la resonancia en paralelo se produce en un circuito RLC en paralelo con reactancias inductiva y capacitiva iguales, de modo que la admitancia del circuito es baja y una pequeña corriente de excitación desarrolla un gran voltaje (Wakileh, 2001).

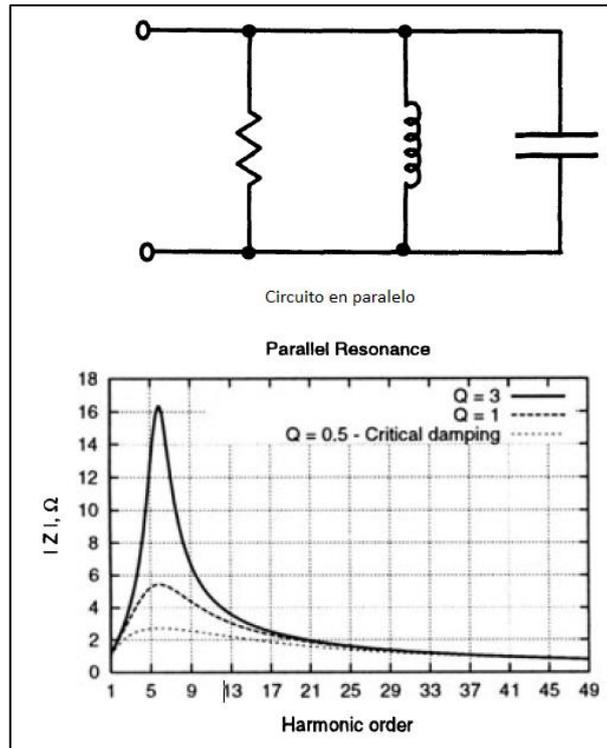


Figura 5. Resonancia en paralelo.
 Fuente: "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", por Wakileh, 2001, p. 28.

2.2.6 Banco de condensadores e inyección de potencia reactiva

Los bancos de condensadores en paralelo con una carga inductiva, suministran a esta carga potencia reactiva reduciendo así la potencia reactiva y aparente del sistema, aumentando así su factor de potencia. Además, la corriente del condensador provoca un aumento de voltaje que da como resultado pérdidas de línea más bajas y caídas de voltaje más bajas, que conducen a una mejor eficiencia y regulación de voltaje (Stevenson, 1955).

La presencia de banco de condensadores, tiene efectos específicos sobre el comportamiento del sistema eléctrico cuando existe una contaminación de armónicos. Estos efectos pueden ser:

- a) Amplificación de la distorsión en tensión:

A una frecuencia de resonancia, la impedancia del sistema aumenta, entonces la presencia de corriente armónica cercana a dicha frecuencia, producirá una mayor caída de tensión armónica. Esto hace que el valor de THDV% aumente para toda la instalación. (Fornieles, 2017).

b) Degradación del banco de condensadores:

Dado que, a la frecuencia de resonancia, la distorsión en tensión y la impedancia aumentan, el banco de condensadores absorberá más corriente armónica, produciendo un mayor calentamiento de los condensadores, con riesgo a causar daño con relativa celeridad en función de la severidad de la resonancia. (Fornieles, 2017)

2.2.7 Efectos de la distorsión armónica en sistemas de potencia

El uso cada vez mayor de dispositivos y cargas no lineales, está provocando un aumento de los problemas de distorsión armónica en los sistemas eléctricos.

De manera general, (Wakileh, 2001) divide los efectos de la distorsión armónica de voltaje en tres categorías generales:

- Tensión térmica.
- Tensión de aislamiento.
- Interrupción de carga.

Los armónicos tienen el efecto de aumentar las pérdidas del equipo y, por lo tanto, el estrés térmico. La tensión máxima también aumenta con los armónicos. Esto da como resultado un aumento de voltaje o tensión de aislamiento que a veces termina en una ruptura del aislamiento del cable. La interrupción de la carga se define ampliamente como cualquier falla del dispositivo o funcionamiento anormal causado por una distorsión de voltaje. (Wakileh, 2001).

Los armónicos, causan efectos directos en los equipos del sistema de potencia, tales como:

- Provocan un aumento de pérdidas, y reducción de la vida útil de equipos eléctricos.
- Los armónicos triples dan como resultado que el neutro lleve una corriente que podría igualar o superar las corrientes de fase, incluso si las cargas están equilibradas. Esto dicta la reducción o sobredimensionamiento de los cables neutros.
- La resonancia causada por armónicos podría dañar los equipos. Los armónicos también interfieren con los relés de protección, los dispositivos de medición, los circuitos de control y comunicación, y los equipos electrónicos. Los equipos sensibles experimentarían un mal funcionamiento o fallas de componentes.

Los armónicos afectan también a los bancos de condensadores de la siguiente manera:

- Los capacitores están sobrecargados por corrientes armónicas, ya que el hecho de que su reactancia disminuya con la frecuencia, los hace actuar como sumideros de armónicos.
- Además, los voltajes armónicos producen grandes corrientes que hacen que se fundan los fusibles de los condensadores.
- Los armónicos tienden a incrementar las pérdidas dieléctricas. El calentamiento adicional y la pérdida de vidas son consecuencias directas.
- Los condensadores se combinan con la inductancia de la fuente para formar un circuito resonante paralelo. En presencia de resonancia, los armónicos se amplifican. Los voltajes resultantes superan en gran medida los umbrales permitidos de voltaje y la consecuencia son daños en el condensador o fusibles quemados (Wakileh, 2001).

Los transformadores que operan en un entorno armónico, sufren de aumento de las pérdidas de carga que comprenden pérdidas de cobre y pérdidas parásitas (corrientes parásitas del devanado) (IEEE, 1986).

En las máquinas rotativas, los efectos más importantes son:

- Aumento de las pérdidas de cobre y hierro, lo que resulta en calentamiento, tal como sucede en caso de los transformadores.
- Se producen pares pulsantes, debido a la interacción de los campos magnéticos generados por armónicos y ondas fundamentales. Estos resultan en un ruido audible más alto. (Wakileh, 2001).

En referencia a los equipos de protección y control, los dispositivos de medición, los circuitos de comunicación y las cargas electrónicas, la distorsión armónica causa los siguientes efectos:

- Los armónicos afectan la capacidad de interrupción de los disyuntores.
- Los relés cuyo funcionamiento se rige por el pico de tensión / corriente o tensión cero, se ven afectados por armónicos. Las características de retardo de tiempo de los relés electromecánicos, se alteran en presencia de armónicos. Los relés de tierra no pueden distinguir entre las corrientes de secuencia cero y de tercer armónico, lo que da como resultado un disparo erróneo. (Wakileh, 2001).
- Los dispositivos de medición e instrumentación, muestran una respuesta diferente a las señales no sinusoidales.
- Los armónicos provocan interferencias con los circuitos telefónicos a través del acoplamiento inductivo.

- Perjudican el funcionamiento de los equipos electrónicos y los circuitos de control.
- Los armónicos interfieren con las cargas del cliente. Esto es de especial preocupación en los sistemas informáticos.
- Los armónicos acortan la vida útil de las lámparas incandescentes. (Wakileh, 2001).

2.2.8 Mitigación de armónicos en sistemas de potencia

De acuerdo con varios autores, la mitigación de armónicos en sistemas de potencia puede clasificarse en preventivas y correctivas (Stevenson, 1955) y (Wakileh, 2001).

Las soluciones preventivas, son aquellas políticas que se buscan a discreción para evitar armónicos y sus consecuencias. Estos incluyen:

- Cancelación de fase o control de armónicos en convertidores de potencia.
- Desarrollar procedimientos y métodos para controlar, reducir o eliminar armónicos en los equipos del sistema de energía; principalmente condensadores, transformadores y generadores. Intentando mantener los armónicos a un nivel bajo "libre de daños". Para este fin, se desarrollan normas que establecen límites en el nivel de armónicos de frecuencia individuales y / o factores de distorsión armónica.

Las soluciones correctivas, son aquellas técnicas que se utilizan para tratar de superar los problemas armónicos existentes. Estas incluyen:

- El uso de filtros.
- Desafinación de circuitos que implica la reconfiguración de alimentadores o la reubicación de bancos de capacitores para superar la resonancia.

2.2.8.1 Límites de distorsión armónica

Después de haber realizado un estudio de armónicos, se calculan los voltajes armónicos de bus, las corrientes armónicas de línea y los factores de distorsión de tensión y corriente, se comparan con los límites establecidos por las normas. Si se exceden los límites, se simulan y examinan varias alternativas de filtrado para resolver problemas de resonancia y hacer que el sistema cumpla con los estándares conocidos.

Existen diferentes normas que fijan límites para la distorsión armónica permitida de voltaje y corriente tales como: IEEE, IEC, EN y NORSOK. Como muchos países tienen sus propios estándares, estas pueden tomarse de manera referencial. Para el presente documento, es de interés la norma IEEE.

Límites de distorsión armónica de voltaje

IEEE es el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc., Nueva Jersey, EE. UU. Los límites de distorsión de voltaje permitidos establecidos por IEEE 519, fueron publicados en 3 oportunidades: 1981, 1992 y 2014. (IEEE, 1993), (Schneider Electric, 2017) y (IEEE, 2014). Para las dos últimas versiones, los límites permitidos variaron, al agregarse un límite adicional para sistemas eléctricos menores a 1kV, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Límites distorsión armónica de voltaje (IEEE-2014)

Voltaje V en el punto de acople	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD (%)
V =< 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV =< V =< 69 kV	3.0	5.0
69 kV =< V =< 161 kV	1.5	2.5
161 kV =< V	1.0	1.5 *

Fuente: IEEE, 2014, p.7.

Límites de distorsión armónica de corriente para usuarios con tensión nominal en punto de acople (PCC) de 120 V a 69 kV

Estos límites aplican a los usuarios conectados a sistemas donde la tensión nominal en el PCC es de 120 V. a 69 kV. En el PCC, los usuarios deben limitar sus corrientes armónicas de la siguiente manera:

- Las corrientes armónicas diarias del percentil 99 de muy corto tiempo (3 s.), deben ser menos de 2.0 veces los valores dados en la tabla de límites.
- Las corrientes armónicas semanales del percentil 99 de corto tiempo (10 min.), deben ser menos de 1,5 veces los valores dados en la tabla de límites.
- Las corrientes armónicas semanales del percentil 95 de corto tiempo (10 min.), deben ser menores que los valores dados en la tabla de límites. (IEEE, 2014).

Todos los valores deben expresarse en porcentaje de la corriente de demanda máxima, IL. Este valor de corriente se establece en el PCC y debe tomarse como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada uno de los doce meses anteriores dividida por 12. La tabla de límites se aplica a las corrientes armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia industrial. (IEEE, 2014)

Otros conceptos para interpretar la tabla de límites (Schneider Electric, 2017):

- Relación de cortocircuito: Es la relación entre la corriente de cortocircuito disponible, en amperios, y la corriente de carga, en amperios.
- Distorsión de demanda total (TDD): La relación de la raíz cuadrada media del contenido de armónicos, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como un porcentaje de la corriente de demanda máxima. Se pueden incluir componentes armónicos de orden superior a 50 cuando sea necesario.
- Distorsión armónica total (THD): La relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como un porcentaje de la onda eléctrica fundamental. Se pueden incluir componentes armónicos de orden superior a 50 cuando sea necesario.

Tabla 4.

Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV.

Distorsión armónica máxima en porcentaje de la corriente de carga (I_L)						
Orden individual de armónico (armónicos impares) ^{a, b}						
I_{SC} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Nota:

- A Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares anteriores.
- No se permiten las distorsiones de corriente que den como resultado un desplazamiento de CC, por ejemplo, convertidores de media onda.
- Todos los equipos de generación de energía se limitan a estos valores de distorsión de corriente, independientemente de I_{SC} / I_L real. dónde
 - I_{SC} = corriente máxima de cortocircuito en PCC.
 - I_L = corriente de carga de demanda máxima (componente de frecuencia fundamental) en el PCC en condiciones normales de funcionamiento de carga.

Fuente: IEEE, 2014, p. 8

Una interpretación de estos valores, la hace la Guía de Diseño de Instalaciones eléctricas de Schneider Electric (en referencia a la norma IEEE-519):

THDi $< 10\%$: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.

THDi del 10 al 50%: Contaminación armónica importante con riesgo de aumento de temperatura y la necesidad consiguiente de sobredimensionar cables y fuentes.

THDi > 50%: contaminación armónica importante, es probable que se produzca algún funcionamiento incorrecto. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

Límites de distorsión armónica según la norma técnica peruana

Tabla 5.

Límites de Distorsión Armónica de Voltaje - Norma Técnica Peruana Calidad de Energía

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA ó THD (Armónicas Impares no múltiplos de 3)	TOLERANCIA (THD v) (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
	5	2.0
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 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	3.0	8.0

Fuente: "Norma técnica de calidad de servicios eléctricos", Minem-Perú, 1997, p. 23

De acuerdo con la norma técnica nacional (MINEM - Perú, 1997), la distorsión armónica de voltaje no deberá exceder de 8%, considerando el valor de distorsión armónica total de voltaje (THD).

2.2.8.2 Filtros de armónicos

Los armónicos pueden reducirse eficazmente mediante el uso de un filtro pasivo que consiste en una combinación en serie de un condensador y una reactancia sintonizados a una frecuencia armónica específica.

Los filtros proporcionan una "trampa" de impedancia baja a un armónico al que se sintoniza el filtro. En teoría, el filtro tiene una impedancia cero en la frecuencia de sintonización, absorbiendo así el armónico de interés. (Das, 2015) Como se muestra en la siguiente figura, los filtros de armónicos típicos se describen a continuación. (Wakileh, 2001).

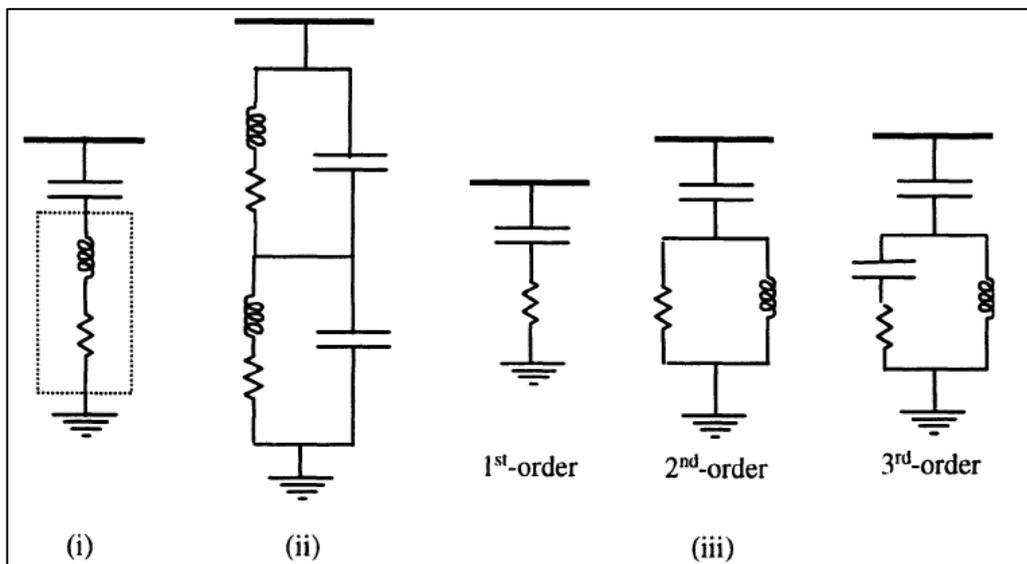


Figura 6. Filtros armónicos típicos: (i) sintonizados en serie (ii) paso de banda doble (iii) 1ro, 2do y 3er orden amortiguado.

Fuente: "Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", por Wakileh, 2001, p. 107

A. Descripción de filtros armónicos

Filtros ajustados en serie

Un filtro sintonizado en serie, consiste en una combinación en serie de un condensador y una reactancia y está sintonizado a frecuencias armónicas bajas. En el armónico sintonizado, el condensador y el reactor tienen reactancias iguales y el filtro tiene

una impedancia puramente resistiva. La impedancia del filtro es capacitiva para armónicos más bajos e inductiva para armónicos más altos. (Wakileh, 2001)

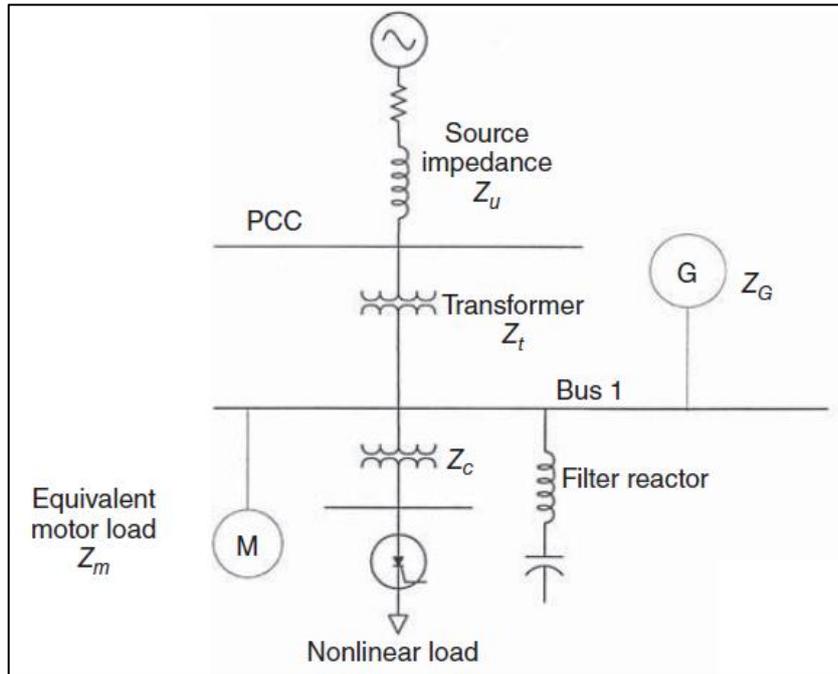


Figura 7. Conexiones de un filtro sintonizado en serie, fuente de armónicos en un sistema de distribución.

Fuente: "Power System Harmonics and Passive Filter Designs", por Das, 2015, p. 691.

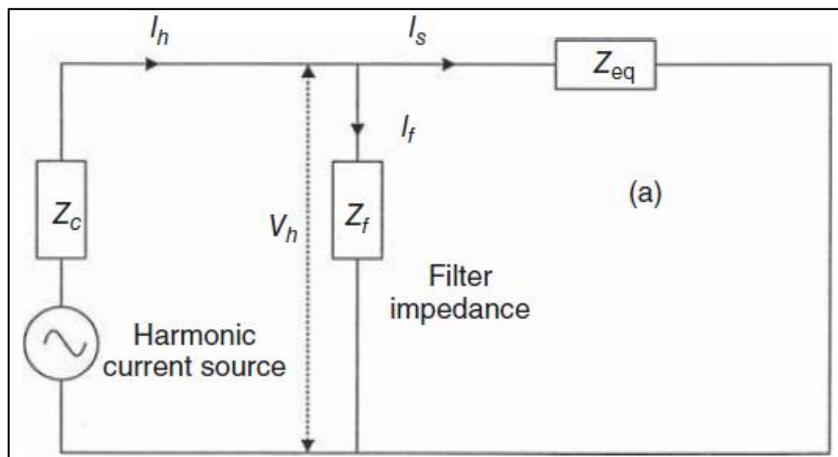


Figura 8. Circuito equivalente que mira desde la inyección armónica como fuente.

Fuente: "Power System Harmonics and Passive Filter Designs", por Das, 2015, p. 691.

El circuito equivalente de la figura anterior muestra que la impedancia del sistema desempeña un papel importante en la distribución armónica de corriente. Para una

impedancia de sistema infinita, es decir, un sistema con una potencia de cortocircuito muy baja, la filtración es perfecta, ya que no fluye corriente armónica a través de la impedancia del sistema. Por el contrario, para un sistema de impedancia armónica cero, es decir, una fuente de alta potencia de cortocircuito, toda la corriente armónica fluiría hacia el sistema y ninguna en el filtro. En el caso de que no haya filtración, toda la corriente armónica pasa al sistema. (Das, 2015)

Filtros de paso de banda doble

Un filtro de paso de banda doble, es una combinación en serie de un condensador principal, un reactor principal y un dispositivo de sintonización, que consta de un condensador de sintonización y un reactor de sintonización conectados en paralelo. La impedancia de dicho filtro es baja en dos frecuencias sintonizadas.

Filtros amortiguados

Los filtros amortiguados pueden ser de primer, segundo o tercer orden. Sin embargo, el más utilizado es el de segundo orden. Un filtro amortiguado de segundo orden consta de un condensador en serie con una combinación en paralelo [4, 6] de un reactor y una resistencia. Proporciona una baja impedancia para un rango de frecuencias moderadamente amplio.

Los filtros amortiguados tienen un factor de calidad bajo, $0.5 < Q < 5$, y generalmente están sintonizados a $h_n < h_r$, es decir, 10.7, 16.5, ... (n: frecuencia de sintonía, r: frecuencia de resonancia).

Filtros desafinados (antirresonantes)

Un filtro desafinado se sintoniza por debajo de un armónico característico (normalmente sintonizado en el cuarto armónico), absorbiendo así parte del armónico, pero no tanto como uno más afinado.

Filtros activos

Los filtros activos se han desarrollado para paliar las desventajas de los filtros pasivos convencionales. Estas desventajas pueden ser:

- Las características de filtrado dependen de la impedancia de la fuente.
- Empeora la impedancia por debajo del armónico sintonizado más bajo.
- Ser inadecuado para filtrar armónicos no característicos (distintos de la frecuencia sintonizada del filtro), como los producidos por ciclo convertidores.

Una discusión sobre filtros activos está más allá del alcance de este texto. (Wakileh, 2001).

B. Ubicación de los filtros de armónicos

Se pueden instalar filtros pasivos en ubicaciones adecuadas, de preferencia cerca de la fuente de generación de armónicos, para que gran parte de las corrientes armónicas queden atrapadas en la fuente y los armónicos que se propagan al punto de acoplamiento común (PCC) sean reducidos.

Mediante la reducción de armónicos en la fuente, no es necesario sobredimensionar el equipo eléctrico, se minimizan las pérdidas y se reducen las distorsiones de voltaje se reducen. Los filtros se pueden dimensionar específicamente para las cargas y se pueden proporcionar controles de conmutación dependientes de la carga.

Por el contrario, cuando los filtros se ubican lejos de las cargas que producen armónicos, los armónicos deben fluir hacia el filtro a través de las impedancias del sistema con la reducción de potencia resultante del equipo eléctrico. Sin embargo, puede que no sea práctico ni económico proporcionar filtros en cada fuente de emisión de armónicos. Las consideraciones clave son las siguientes:

- Las limitaciones de armónicos en PCC deben cumplir con los requisitos de IEEE 519, pero es deseable limitar las distorsiones armónicas en todos los sistemas de energía.
- Es posible que se requiera simultáneamente una compensación de potencia reactiva.
- Se deben considerar las condiciones normales y de contingencia de la operación de la planta, junto con los armónicos ambientales.
- Deben considerarse las condiciones normales y de contingencia del filtro.
- La emisión de armónicos debe estimarse correctamente bajo diversas condiciones de operación. (Das, 2015).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Tensión Eléctrica: También conocido como voltaje, es la diferencia de potencial entre dos puntos en un circuito o dispositivo. La tensión activa (componente activa; componente en fase de la tensión), es el componente de la tensión alterna que está en fase con la corriente alterna. Tanto la corriente alterna y la tensión se consideran cantidades vectoriales. (Oxford University, 2018).

Corriente o Intensidad Eléctrica: Un flujo de carga eléctrica o tasa de flujo de carga eléctrica. Una corriente de conducción es una corriente que fluye en un conductor debido al movimiento de electrones o iones a través del material, generalmente bajo la influencia de un campo aplicado. La corriente neta es la suma algebraica de las cargas. (Oxford University, 2018).

Corriente Continua (C.C.): Una corriente unidireccional de valor sustancialmente constante. (Oxford University, 2018)

Corriente Alterna: Es una corriente eléctrica cuya dirección en el circuito se invierte periódicamente con una frecuencia f , independiente de las constantes del circuito. En la forma más simple, la corriente instantánea varía con el tiempo. (Oxford University, 2018).

Frecuencia: En electricidad, es el número de veces que se repite la misma forma de onda en el periodo de un segundo. La unidad de medida de esta magnitud física es el Hertz que se simboliza como Hz. La frecuencia nominal de la energía eléctrica que se produce o distribuye en el Perú es de 60Hz.

Transitorios: Es un fenómeno, tal como oscilaciones amortiguadas o un aumento de voltaje o corriente que ocurre en un sistema eléctrico luego de un cambio repentino en las condiciones dinámicas del sistema, y que generalmente es de duración relativamente corta. Un transitorio puede ser causado por la aplicación de una tensión o corriente de impulso al sistema o por la aplicación o eliminación de una fuerza impulsora. La naturaleza del transitorio es una función del propio sistema, pero la magnitud depende de la magnitud del impulso o de la fuerza impulsora. La respuesta transitoria de un dispositivo electrónico, como un amplificador, es el cambio en la salida que ocurre como resultado de un cambio repentino específico en la entrada. (Oxford University, 2018).

Armónicos: Oscilación de una cantidad periódica presente en una vibración compleja, que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental; la frecuencia fundamental también se conoce como el primer armónico. Una oscilación que tiene una frecuencia que es un submúltiplo entero de la fundamental se denomina subarmónico. En la práctica, no tiene por qué estar presente necesariamente. (Oxford University, 2018).

Distorsión Armónica: La distorsión de una forma de onda causada por el efecto no lineal de un sistema o componente que crea frecuencias armónicas, que de otro modo no estarían presentes en la salida. La medida en que un componente armónico particular distorsiona una señal, viene dada por la relación entre su amplitud A_n y la amplitud del componente fundamental A_f , expresada como porcentaje. (Oxford University, 2018).

Interarmónicos: Se llaman interarmónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema. Los interarmónicos se pueden encontrar en redes de todas las clases de tensiones. Las principales fuentes de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclos convertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de arco. Efectos de calentamientos similares a los producidos por los armónicos, son causados por los interarmónicos. Debido a que los interarmónicos que son fuentes de las fluctuaciones de tensión, se presenta alto riesgo de generación de flicker. La mitigación de los efectos de los interarmónicos se realiza con base en filtros pasivos. (Ccalla, 2017).

Relación de cortocircuito: En una ubicación particular, la relación entre la corriente de cortocircuito disponible, en amperios, y la corriente de carga, en amperios. (Schneider Electric, 2017) y (IEEE, 2014).

Distorsión de demanda total (TDD): La relación de la raíz cuadrada media del contenido de armónicos, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como un porcentaje de la corriente de demanda máxima. Se pueden incluir componentes armónicos de orden superior a 50 cuando sea necesario. (Schneider Electric, 2017) y (IEEE, 2014).

Distorsión armónica total (THD): La relación de la raíz cuadrada media del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los interarmónicos, expresada como un porcentaje de la fundamental. Se pueden incluir componentes armónicos de orden superior a 50 cuando sea necesario. (Schneider Electric, 2017) y (IEEE, 2014).

IEEE: Instituto de ingenieros electricistas y electrónicos. Es el organismo internacional encargado de normar los asuntos concernientes a la electricidad, electrónica, telecomunicaciones y otros.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 MÉTODOS, TIPO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Metodología

La presente investigación es un estudio cuantitativo, ya que tiene como base la medición de fenómenos eléctricos (distorsiones armónicas). Al mismo tiempo, se realiza un análisis causa efecto (armónicos vs. condiciones de calidad de servicio eléctrico a planta), a partir de analizar un proceso probatorio (medición de magnitudes físicas) que toma en cuenta estándares internacionales tales como la norma IEEE 519-2014.

De esta manera, procederemos a realizar una medición de calidad de energía (línea de base), haciendo hincapié en la distorsión armónica de voltaje y frecuencia en la Planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A. Esta medición se realizará utilizando un equipo analizador de redes de alta precisión capaz de medir y grabar data detallada de distorsión armónica.

Luego, analizaremos los resultados utilizando un simulador computacional, a través del cual se probarán algunas estrategias de instalación de filtros de armónicos. A partir de estas simulaciones se desarrollará un proyecto de mitigación de distorsión armónica que tiene como base las variables: tipo de filtro, número de filtros a utilizar, y ubicación de los mismos en el sistema de distribución eléctrica.

Finalmente, se realizará una evaluación técnica y económica, que permita identificar una solución de mayor costo beneficio, considerando la tasa de mitigación de armónicos y el costo de la inversión proyectada.

3.1.2 Tipo

La investigación es de tipo aplicada, ya que pretende resolver una necesidad específica surgida en la industria utilizando conocimiento técnico y científico. La misma

utilizará como método el análisis cuantitativo de la data obtenida, utilizando instrumentos de medición de precisión.

Según la intervención del investigador, la presente investigación es experimental, ya que el investigador realizará cambios en eventos generados por la manipulación de variables tales como el tipo, cantidad y ubicación de filtros, y su evaluación sobre la mitigación armónica

Según la planificación de toma de datos, la presente investigación es prospectiva, ya que los datos necesarios para este estudio fueron recogidos a propósito de la presente investigación.

Según el número de veces en que se midieron las variables, la presente investigación es transversal, ya que todas las variables fueron medidas en una sola ocasión para el presente estudio.

Según el número de variables de estudio, la presente investigación es descriptiva, ya que el análisis estadístico realizado es univariado, porque que solo se evalúan los efectos directos del tipo, número y ubicación de filtros, mas no la interacción de estos factores.

3.1.3 Alcance

La presente investigación tiene un alcance o nivel explicativo, conocido también como estudio causal. Esto debido a que la investigación busca responder las causas de una mejor o menor mitigación de distorsión armónica, a fin de identificar la solución que mejor se adapta de forma técnica y económica.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la presente investigación es experimental, explicativo - cuantitativo, ya que se manipulan variables para medir sus efectos. En este caso se manipulan el tipo de filtro, la cantidad y ubicación sobre la tasa de mitigación de distorsión armónica. Así mismo se buscan las causas de los eventos y se trata de dar una explicación porque dichas variables pueden mejorar o empeorar la mitigación de distorsión armónica.

Así mismo, existe una bibliografía suficiente para poder sustentar los estudios realizados.

Se usan simulaciones utilizando software computacional.

Finalmente, se utiliza análisis cuantitativo y estadística.

La siguiente figura muestra un diagrama de las variables dependientes e independientes que se trabajarán utilizando el software EASYPOWER.

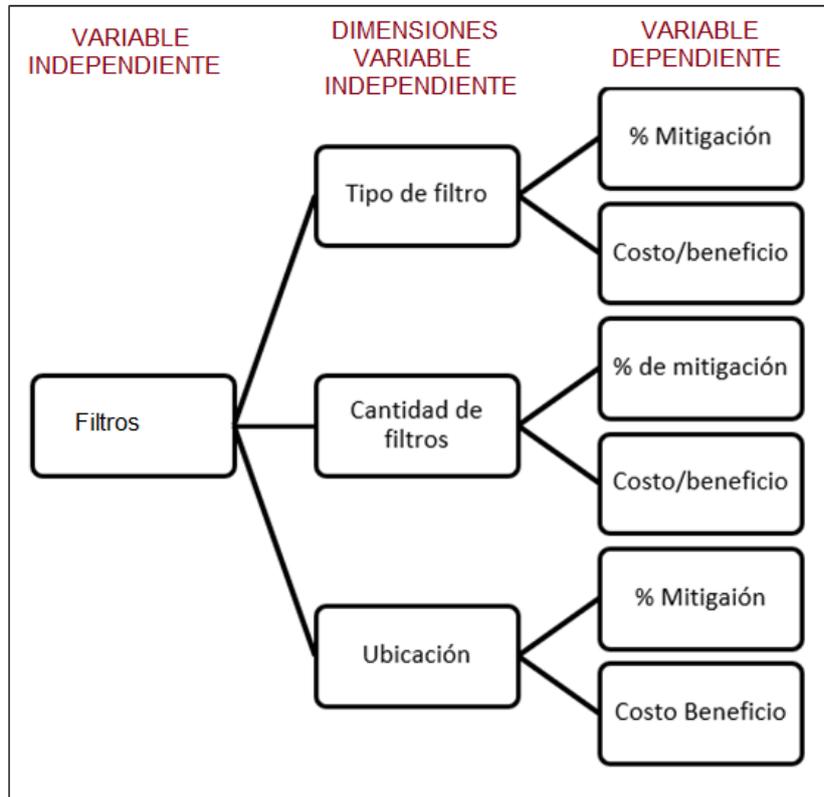


Figura 9. Variables de investigación

De acuerdo con las variables utilizadas, se ha planteado un diseño experimental que consta de 10 tratamientos. Estos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.*Diseño experimental: descripción de tratamientos*

Trat.	Objetivo	N° de filtros	Posición de filtro	Tipo de filtro	Código	Descripción
1	base	0	-	-	sB-sF	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
2	Evaluar resonancia	0	-	-	cB-sin Filtro	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
3	Evaluar resonancia	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	cB-filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
4	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	Sb- filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
5	Reducir armónicos	2	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	filtro notch h=5 h=7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y armónico 7.
6	Reducir armónicos	1	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB - f. notch h5 bus6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 conectado en 2do nivel.
7	Reducir armónicos	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
8	Reducir armónicos-correr factor de potencia	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	cB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
9	Reducir armónicos	2	3er nivel (bus 7)	Pasivo - notch	sB-f notch h5 h7 bus 7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 3er nivel.
10	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Highpass	sB- Highpass bus 4	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtro Highpass, sintonizado para reducir armónico 5 y 7, conectado en 1er nivel.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1 Población

El objeto de estudio en la presente investigación es la calidad de la energía eléctrica suministrada en la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.

3.3.2 Muestra

Debido a que la población es un solo objeto de estudio, se considera como muestra la adquisición de los valores de distorsión armónica del tablero de distribución principal TG2 de la planta Michell S.A. El registro de datos se programará para un tiempo mínimo de 2 días en cada tablero principal conocido como periodo de medición. Así mismo se planea levantar información detallada de la distorsión armónica en interruptores principales y secundarios con muestreos de periodo corto. Finalmente, se establecerán mediciones de otros parámetros de calidad de energía tales como voltaje, frecuencia, factor de potencia entre otros.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

3.4.1 Instrumentos

Se realizó el análisis utilizando un Analizador de Redes FLUKE 435 II, en diferentes puntos del sistema eléctrico con una frecuencia de 5 minutos. Para las lecturas de tableros principales, las lecturas corresponden a una medición de 3 días. Algunas lecturas en interruptores secundarios, corresponden a un periodo de media hora. En los anexos de la presente tesis se muestra la ficha técnica del analizador de redes utilizado.

NOTA: Para la determinación de este sistema de medición, se tomo como referencia la norma IEEE 519-2014, que sugiere tiempos de medición que pueden ser muy cortos (1 día) o cortos (7días). Para estos últimos, el 99% de los datos medidos cada 10 minutos, deberán estar por debajo de los límites máximos durante el tiempo de medición. En este caso, limitaciones de costo obligaron a reducir los tiempos de medición, hecho que fue aprobado por especialistas de Michell S.A.

3.4.2 Técnicas de procesamiento

Los datos fueron procesados utilizando hoja de cálculo.

3.4.3 Técnicas de análisis de datos

Los datos fueron analizados utilizando las siguientes herramientas:

- Software computacional EASYPOWER.
- Software estadístico SPSS.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el presente trabajo se realizó un análisis de calidad de energía, con la finalidad de diagnosticar posibles problemas, con especial énfasis en la problemática de armónicos, que ha originado problemas críticos de avería de ciertos equipos electrónicos en la planta de Michel S.A., además de otros problemas asociados a corrientes armónicas.

4.1.1 Determinación de límites máximos de distorsión armónica

Para el presente análisis, se toma como referencia la internacional IEEE 519-2014 “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de IEEE para Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”.

4.1.1.1 Determinación de límites máximos de distorsión armónica de voltaje

Considerando la norma IEEE

De acuerdo con esta norma, para fijar los límites máximos de distorsión armónica de voltaje, primero se debe establecer el voltaje nominal en el punto de acople (PCC). En este caso, el voltaje nominal es de 400 V. (transformador lado de bajo voltaje). Por tanto, los límites máximos serían de 5% para la distorsión armónica individual, y de 8% para la distorsión armónica total de voltaje. Ver Tabla 3: Límites distorsión armónica de voltaje (IEEE-2014).

NOTA: Los problemas de avería de circuitos electrónicos, funcionamiento inestable de sistemas de protección y otros eventos similares, son producidos por la distorsión armónica de voltaje, más que la distorsión armónica de corriente. Para el caso particular de Michel S.A., esto debe tenerse como referencia para el planteamiento de soluciones.

Considerando la norma técnica peruana de calidad de energía

De acuerdo con la norma técnica nacional, la distorsión armónica de voltaje no deberá exceder de 8%, considerando el valor de distorsión armónica total de voltaje (THD). Considerando este hecho, se concluye que ambas normativas concuerdan en un valor máximo de THD de 8%.

Si bien de acuerdo con este análisis el THD no debería superar 8%, para este análisis se toma como objetivo que el sistema no supere los 5% de THD, como medida para evitar problemas del sistema eléctrico.

4.1.1.2 Determinación de límites máximos de distorsión armónica de corriente

Para determinar los límites máximos de distorsión armónica de corriente, deben fijarse algunos parámetros tales como:

- **Isc:** Corriente de corto-circuito máxima en el PCC. En este caso, la potencia de corto-circuito del sistema eléctrico de distribución SEAL, se considera como 100 MVA. Si el voltaje en PCC es de 400V., la corriente de corto circuito es: 250 kA.
- **IL:** Máxima demanda de la corriente de carga en el PCC. En este caso, la demanda máxima es de 750 kW. Si el voltaje en PCC es 400V., la corriente de demanda máxima es de: 1.875 kA.
- De acuerdo con estos valores, la relación I_{sc}/I_L es de 133.33. Según la **Tabla 7**, para sistemas de índice I_{sc}/I_L mayores a 100 y menores a 1000, el límite de THDi es 15%. El límite para la distorsión por armónico es de 12%.
- Sin embargo, se calcula que el 90% de las instalaciones normales, se encuentran en el rango de 50-100 para la relación I_{sc}/I_L . De acuerdo con esto, fijaremos como límite para esta investigación un TDD máximo de 12%, adoptando la relación I_{sc}/I_L para rangos entre 50 y 100. Ver Tabla 4: Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV.

4.1.2 Resultados del análisis de distorsión armónica

A continuación, se presentan 2 cuadros resumen que indican los valores de distorsión armónica THD obtenidos durante la medición.

Tabla 7.

Resumen de valores de distorsión de armónicos medios y máximos de los tableros generales

		THDi Med	THDi Max	THDv Med	THDv Max
	TG 01	16.94%	26.24%	5.08%	6.79%
Planta	TG 02	39.70%	47.01%	5.28%	7.11%
	TG 03	13.78%	22.97%	2.69%	4.23%

La tabla anterior muestra los valores medios y máximos de la distorsión de armónicos de corriente y voltaje respectivamente.

En cuanto a la distorsión de armónicos de corriente, según la internacional IEEE 519-2014 el valor máximo permitido es 12% y como se observa los 3 tableros sobrepasan dicho valor. Se requiere tomar acciones de mejora especialmente en TG 2.

En cuanto a la distorsión de armónicos de voltaje, según la internacional IEEE 519-2014 el valor máximo permitido es 5% y como es TG1 y TG2 exceden el límite.

4.1.3 Determinación de los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta

TABLERO GENERAL 1 – TG1

Tabla 8.

Corriente, FP, y THD - TG1

Corriente promedio por fase	131.14
Factor potencia promedio	0.97
THD corriente promedio (%)	16.94
THD voltaje promedio (%)	5.08

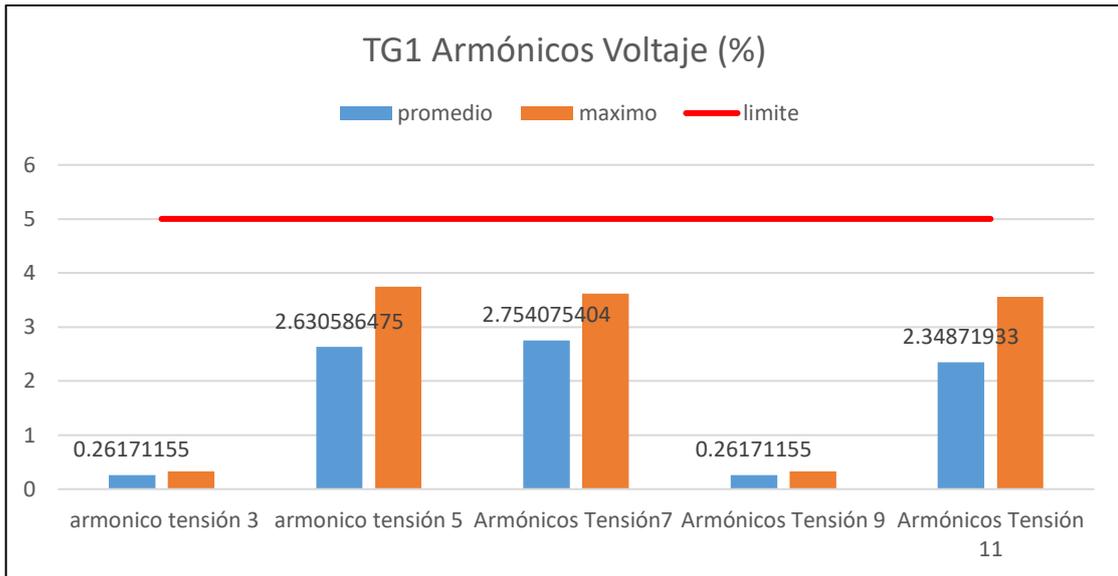


Figura 10. Armónicos de voltaje (%) - TG1

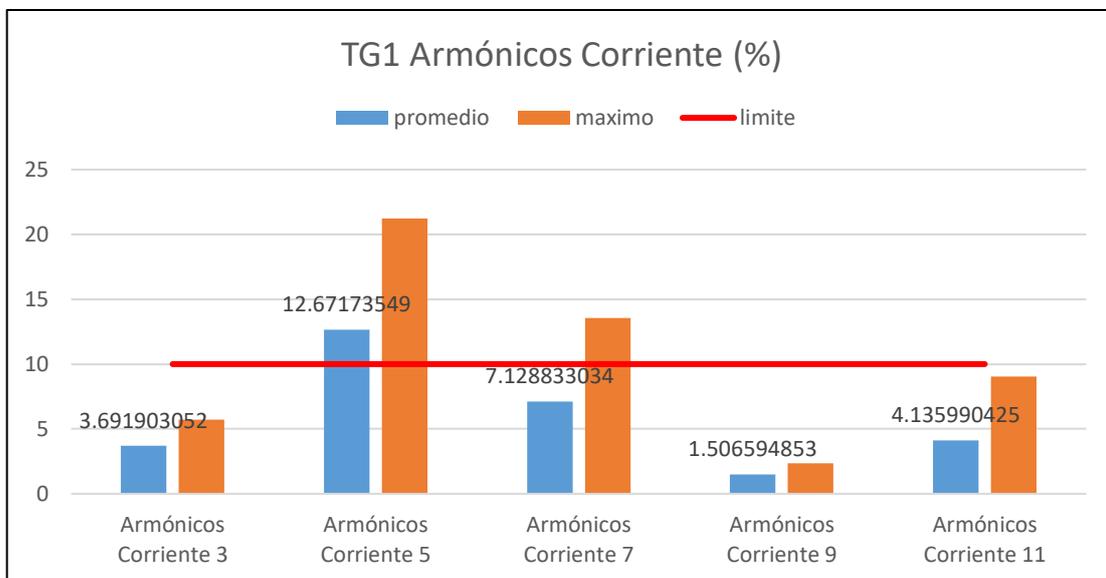


Figura 11. Armónicos de corriente (%) - TG1

TABLERO GENERAL 2 – TG2

Tabla 9.

Corriente, FP, y THD - TG2

Corriente promedio fase (A)	299.1
Factor potencia promedio	0.9
THD A(%) promedio	39.7
THD V(%) promedio	5.28

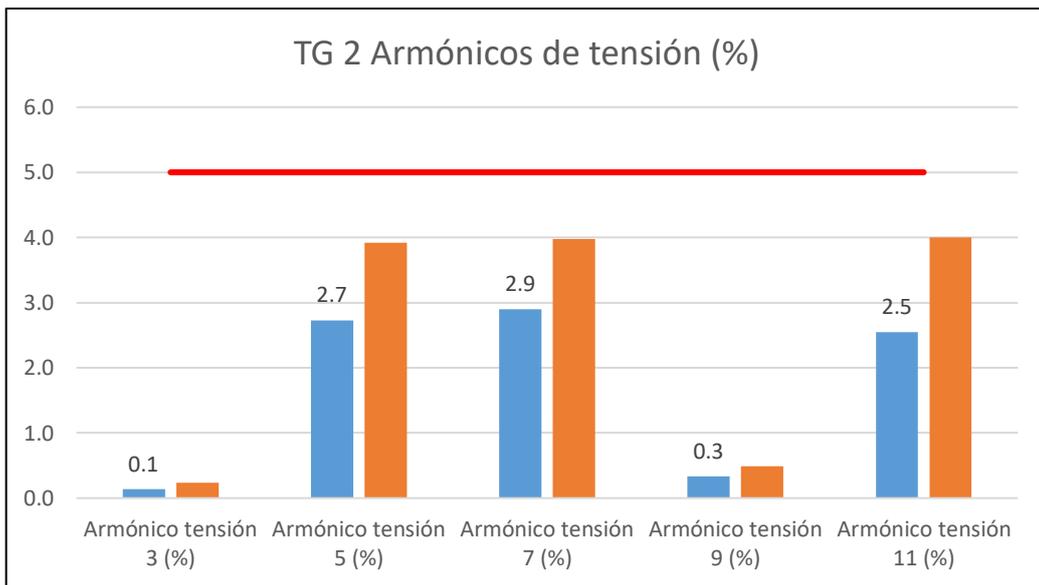


Figura 12. Armónicos de voltaje (%) - TG2

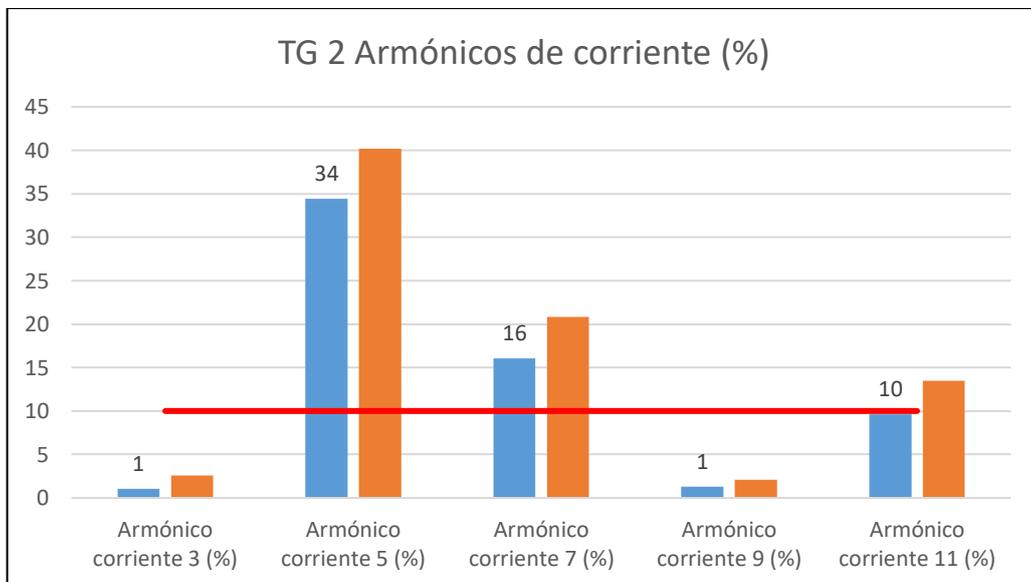


Figura 13. Armónicos de corriente (%) - TG2

TABLERO GENERAL 3 – TG3

Tabla 10.

Corriente, FP, y THD - TG3

Corriente promedio por fase	374.99
factor de potencia promedio	0.97
THD A (%)	13.78
THD V (%)	2.69

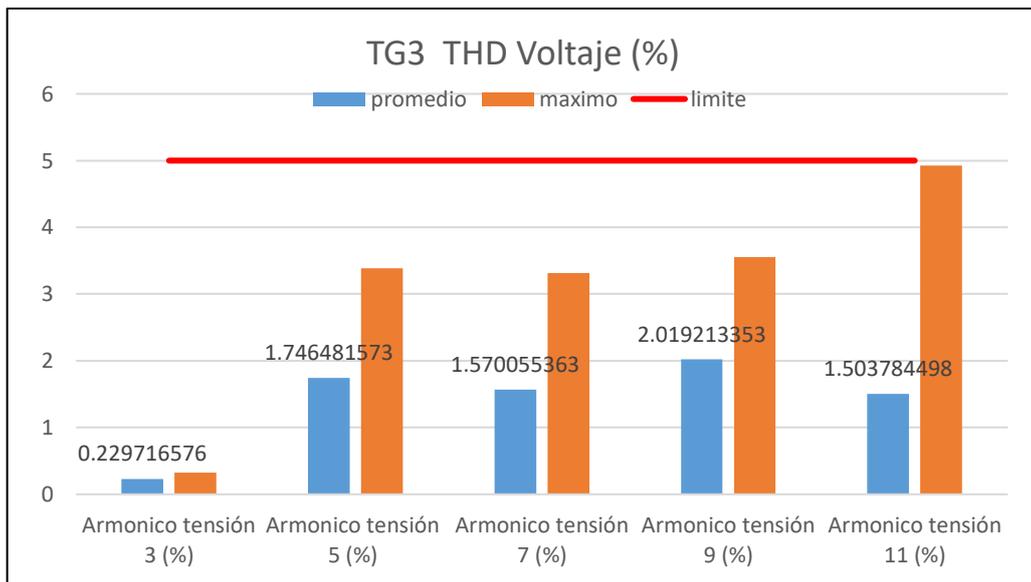


Figura 14. Armónicos de voltaje (%) - TG3

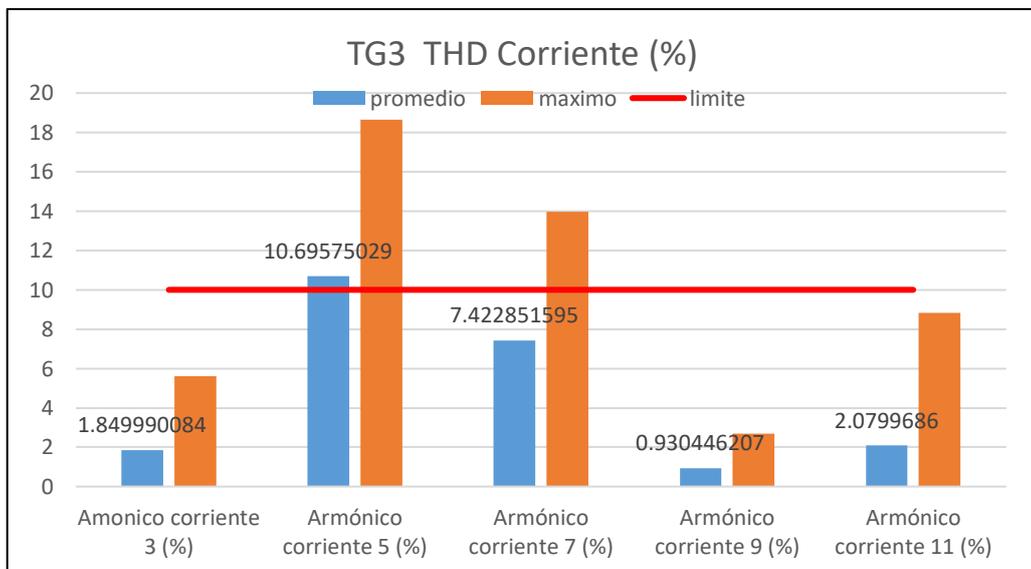


Figura 15. Armónicos de corriente (%) - TG3

Las figuras anteriores presentan que el tablero principal TG2, presenta una carga armónica más elevada que los demás, por lo que se realizarán las simulaciones y propuestas de mejora basadas en este tablero.

Los armónicos que causan la distorsión armónica principal, son los armónicos 5 y 7. El armónico 5 es el de mayor contaminación, por lo que se presume que la contaminación principal es producto de la presencia de convertidores de 6 pulsos utilizados en los variadores de velocidad de las diferentes máquinas de la planta.

En la siguiente tabla se observan las cargas no lineales que ocasionan las mayores contaminaciones de armónicos para este estudio:

Tabla 11.

Principales fuentes de contaminación armónica para este estudio

Carga no lineal	Aplicación	Armónicos generados
Convertidores de 6 pulsos	Variadores de velocidad	Armónico 5, 7 y 11
Convertidores de 12 pulsos	Variadores de velocidad	Armónico 5, 7 y 11
Balastos de fluorescentes	Iluminación	Armónico 3

4.1.4 Simulación del sistema con software computacional

Para la realización de las simulaciones, se tomarán en cuenta el tablero general TG2, ya que es el que tiene mayores problemas de contaminación armónica.

Para la simulación se utilizó el software EASYPOWER 10, en su versión demo. La siguiente figura muestra un diagrama básico del sistema eléctrico objeto de estudio: TG2.

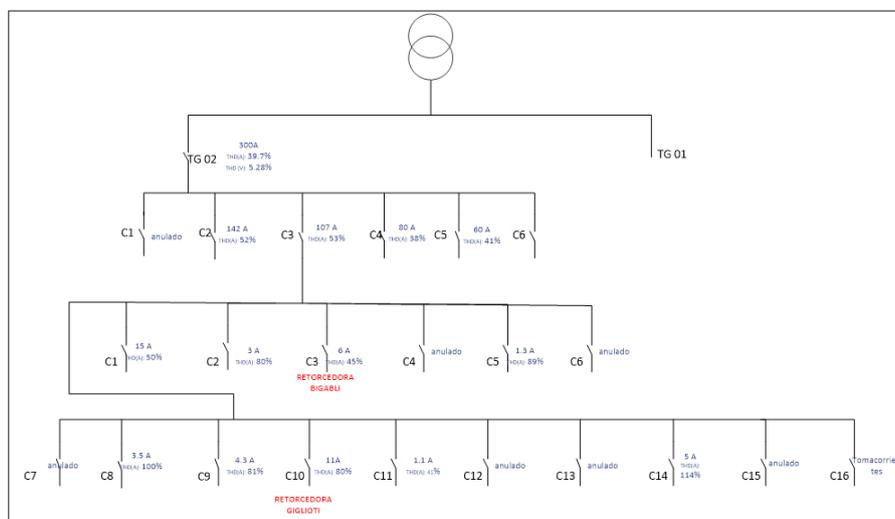


Figura 16. Diagrama básico del sistema eléctrico objeto de estudio: TG2

4.1.4.1 Análisis de flujo de potencia en EASYPOWER

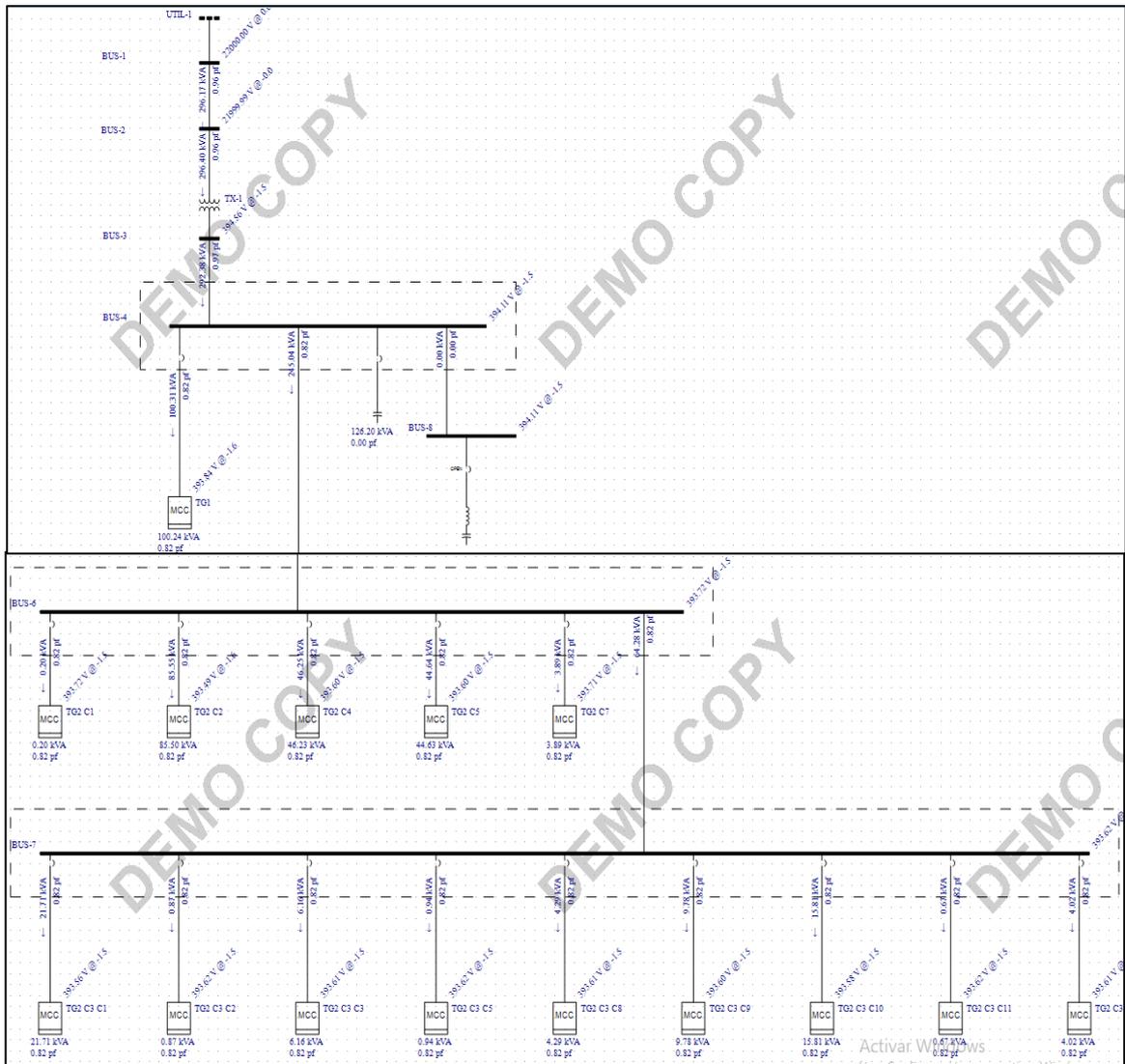


Figura 17. Análisis de flujo de potencia de estado de línea de base del estudio

Tabla 12.*Cuadro de potencia de todos los buses*

BUS	BUS NAME	BRANCH NAME	FLOW FROM AMPS	FLOW TO KW	FLOW TO KVAR	LOSSES KW	LOSSES KVAR
BUS 1	BUS-2	C-1	8	-285.3	-80.3	0	-0.9
BUS 2	BUS-3	TX-1	8	-283.4	-71.7	1.9	8.6
	BUS-1	C-1	8	285.3	79.4	0	-0.9
BUS 3	BUS-2	TX-1	428	285.3	80.3	1.9	8.6
	BUS-4	BWY-1	428	-283.1	-71.5	0.3	0.2
BUS-4	TG1	C-2	147	-82.2	-57.4	0	0.1
	BUS-3	BWY-1	428	283.4	71.7	0.3	0.2
	BUS-6	BWY-2	359	-200.7	-140.2	0.2	0.1
	BUS-8	BWY-4	0	0	0	0	0
BUS-6	TG2 C1	C-3	0	-0.2	-0.1	0	0
	TG2 C2	C-4	125	-70.1	-48.9	0	0.1
	TG2 C4	C-5	68	-37.9	-26.5	0	0
	TG2 C5	C-6	65	-36.6	-25.5	0	0
	TG2 C7	C-7	6	-3.2	-2.2	0	0
	BUS-4	BWY-2	359	200.9	140.3	0.2	0.1
	BUS-7	BWY-3	94	-52.7	-36.8	0	0
	BUS-7	BWY-3	94	-52.7	-36.8	0	0
BUS-7	TG2 C3 C1	C-8	32	-17.8	-12.4	0	0
	TG2 C3 C2	C-9	1	-0.7	-0.5	0	-0.8
	TG2 C3 C3	C-10	9	-5.1	-3.5	0	0
	TG2 C3 C5	C-11	1	-0.8	-0.5	0	0
	TG2 C3 C8	C-12	6	-3.5	-2.5	0	0
	TG2 C3 C9	C-13	14	-8	-5.6	0	0
	TG2 C3 C10	C-14	23	-13	-9.1	0	0
	TG2 C3 C11	C-15	1	-0.5	-0.4	0	0
	TG2 C3 C14	C-16	6	-3.3	-2.3	0	0
	BUS-6	BWY-3	94	52.7	36.8	0	0
BUS-8	BUS-4	BWY-4	0	0	0	0	0

Como se observa el BUS3, es el punto de acople PCC, el cual presenta los siguientes datos:

V: 395 V.
 A: 428 A.
 Fp: 0.97.
 P: 285.3 kW.
 Q: 80.3 kVAR.

Debe tenerse en cuenta que un banco de condensadores de 130 kVAR se encuentra conectado en el bus 4.

4.1.4.2 Análisis de flujo de corriente en EASYPower

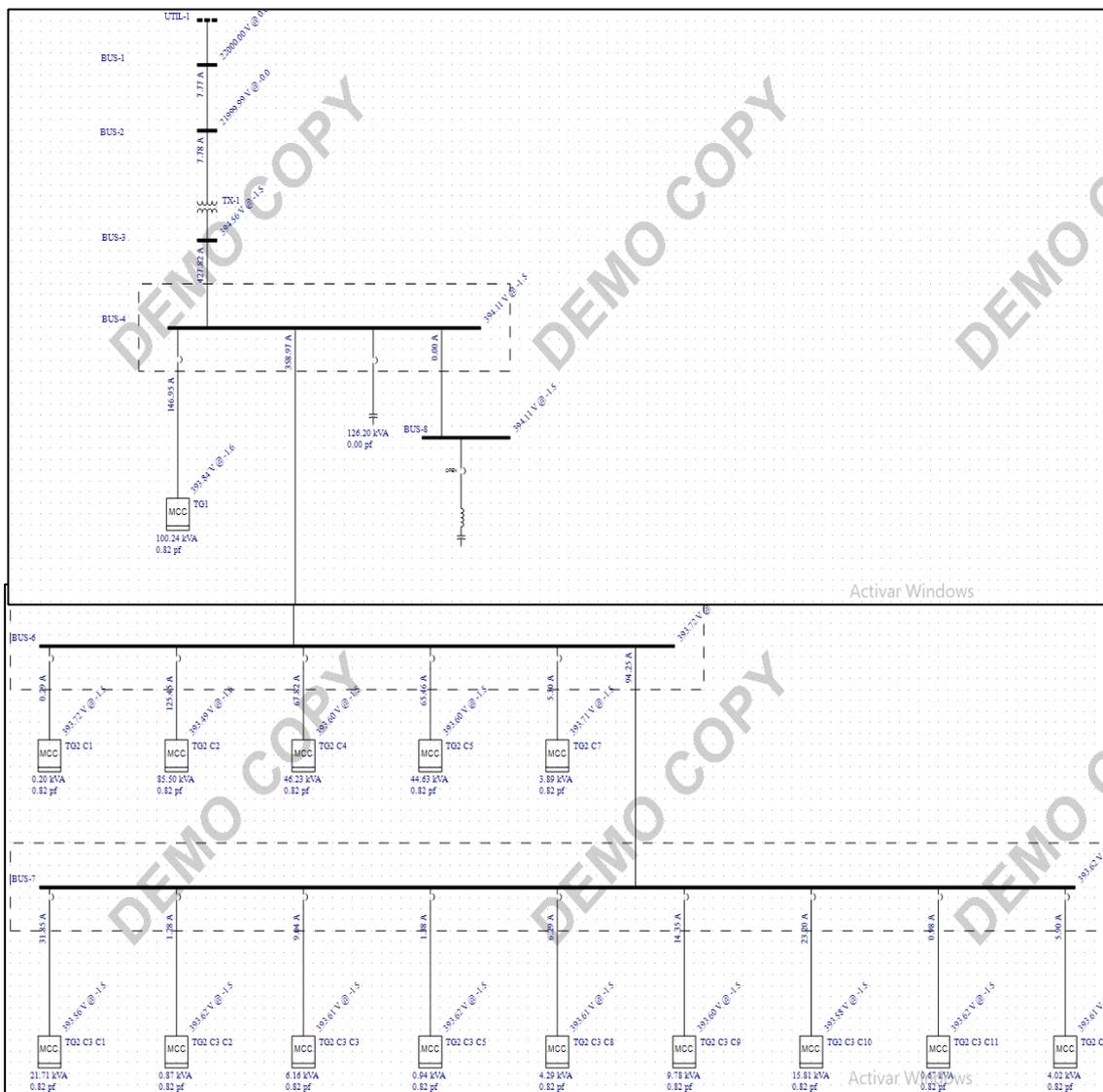


Figura 18. Análisis de flujo de corriente de estado de línea de base del estudio
Fuente: Easypower

Tabla 13.*Cuadro de corrientes de todos los buses*

BUS	BUS NAME	BRANCH NAME	FLOW FROM AMPS
BUS 1	BUS-2	C-1	8
BUS 2	BUS-3	TX-1	8
	BUS-1	C-1	8
BUS 3	BUS-2	TX-1	421
	BUS-4	BWY-1	421
BUS-4	TG1	C-2	145
	BUS-3	BWY-1	421
	BUS-6	BWY-2	354
	BUS-8	BWY-4	197
BUS-6	TG2 C1	C-3	0
	TG2 C2	C-4	124
	TG2 C4	C-5	67
	TG2 C5	C-6	65
	TG2 C7	C-7	6
	BUS-4	BWY-2	354
	BUS-7	BWY-3	93
	BUS-7	BUS-4	BWY-4
BUS-7	TG2 C3 C1	C-8	31
	TG2 C3 C2	C-9	1
	TG2 C3 C3	C-10	9
	TG2 C3 C5	C-11	1
	TG2 C3 C8	C-12	6
	TG2 C3 C9	C-13	14
	TG2 C3 C10	C-14	23
	TG2 C3 C11	C-15	1
	TG2 C3 C14	C-16	6
	BUS-6	BWY-3	93
BUS-8	BUS-4	BWY-4	197

4.1.4.3 Análisis de armónicos en EASYPower

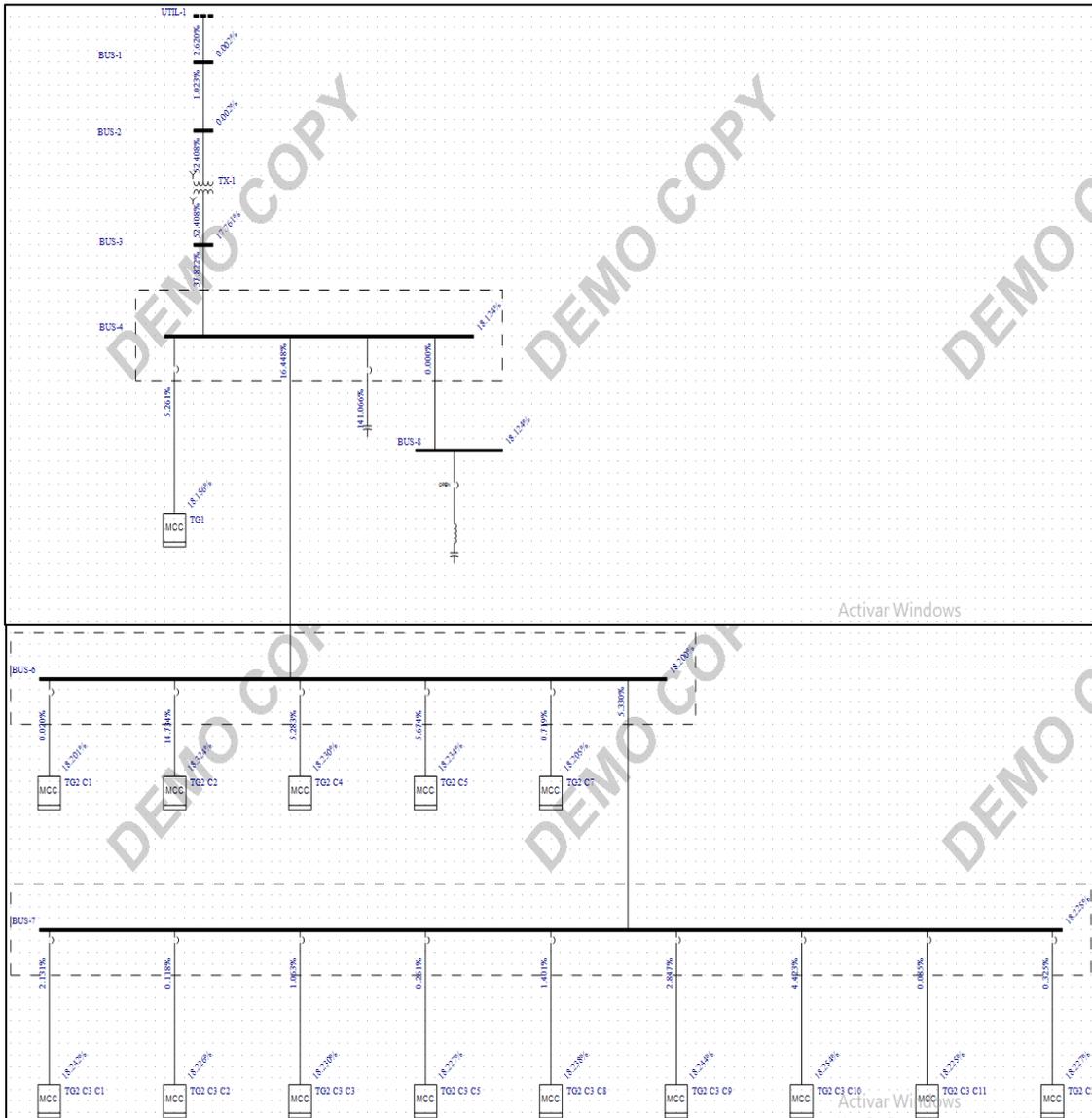


Figura 19. Análisis de contaminación armónica de estado de línea de base del estudio
Fuente: Easypower

Tabla 14.*Tabla armónicos de corriente (%) en todos los buses*

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	37.8%	1.069	1.0000	0.0530	0.2291	0.2486	0.1478	0.0794
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0069	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Winding	52.4%	1.129	1.0000	0.0351	0.3174	0.3444	0.2048	0.1100
Utility Nam	2.6%	1.000	1.0000	0.0018	0.0159	0.0172	0.0102	0.0055

Tabla 15.*Tabla armónicos de voltaje (%) en todos los buses*

				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	17.8%	1.016	1.350	1.0000	0.0052	0.7760	0.1178	0.0901	0.0591
BUS-4	18.1%	1.016	1.357	1.0000	0.0053	0.0792	0.1203	0.0919	0.0603
BUS-6	18.2%	1.016	1.358	1.0000	0.0053	0.0802	0.1211	0.0919	0.0597
BUS-7	18.2%	1.016	1.359	1.0000	0.0054	0.0805	0.1214	0.0980	0.0595
BUS-8	18.1%	1.016	1.357	1.0000	0.0053	0.0792	0.1203	0.0919	0.0603

Como se observa en la figura y tablas, en la línea de base, cuando el banco de condensadores está conectado, el THDi llega a 37.8% en el punto de acople PCC. En caso de THDv, aunque el software muestra un valor de 17.8% en PCC, en la realidad el valor obtenido es de 5.3%.

4.1.5 Propuestas de corrección de armónicos y resultados

4.1.5.1 Descripción de los tratamientos utilizados en cada simulación

Tabla 16.

Descripción de los tratamientos utilizados en cada simulación

Trat.	Objetivo	N° de filtros	Posición de filtro	Tipo de filtro	Código	Descripción
1	base	0	-	-	sB-sF	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
2	Evaluar resonancia	0	-	-	cB-sin Filtro	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
3	Evaluar resonancia	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	cB-filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
4	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	Sb- filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
5	Reducir armónicos	2	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	filtro notch h=5 h=7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y armónico 7.
6	Reducir armónicos	1	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB - f. notch h5 bus6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 conectado en 2do nivel.
7	Reducir armónicos	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
8	Reducir armónicos- corregir factor de potencia	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	cB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
9	Reducir armónicos	2	3er nivel (bus 7)	Pasivo - notch	sB-f notch h5 h7 bus 7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 3er nivel.
10	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Highpass	sB- Highpass bus 4	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtro Highpass, sintonizado para reducir armónico 5 y 7, conectado en 1er nivel.

4.1.5.2 Resultados de los tratamientos utilizados

Tabla 17.

Resultados de los tratamientos utilizados

Tratamiento	Límite máximo	THD I	THD V	FP
		12.00%	8.00%	0.97
sB-sF	BUS 4	18.70%	7.80%	0.82
	BUS 6	16.50%	7.90%	0.82
	BUS 7	5.30%	8.00%	0.82
cB-sin Filtro	BUS 4	37.80%	18.10%	0.97
	BUS 6	16.50%	18.20%	0.82
	BUS 7	5.30%	18.20%	0.82
cB-filtro notch h=5	BUS 4	22.80%	15.00%	0.97
	BUS 6	16.50%	15.00%	0.82
	BUS 7	5.30%	15.00%	0.82
Sb- filtro notch h=5	BUS 4	7.10%	3.70%	0.97
	BUS 6	16.40%	3.80%	0.82
	BUS 7	5.30%	3.90%	0.82
filtro notch h=5 h=7	BUS 4	4.10%	2.20%	0.97
	BUS 6	16.40%	2.30%	0.82
	BUS 7	5.30%	2.30%	0.82
sB - f. notch h5 bus6	BUS 4	8.70%	4.20%	0.94
	BUS 6	9.00%	4.30%	0.98
	BUS 7	5.30%	4.30%	0.82
sB-f.notch h5 h7 bus 6	BUS 4	4.90%	2.60%	0.94
	BUS 6	3.30%	2.70%	0.98
	BUS 7	5.30%	2.70%	0.82
cB-f.notch h5 h7 bus 6	BUS 4	5.60%	3.30%	0.97
	BUS 6	2.90%	3.30%	0.98
	BUS 7	5.30%	3.40%	0.82
sB-f notch h5 h7 bus 7	BUS 4	11.60%	5.00%	0.86
	BUS 6	9.30%	5.10%	0.87
	BUS 7	3.00%	5.10%	0.98
sB-Highpass bus 4	BUS 4	7.00%	2.90%	0.86
	BUS 6	16.40%	3.10%	0.87
	BUS 7	5.30%	3.10%	0.98

4.1.5.3 Evaluación del desempeño de los tratamientos

Para poder comparar el desempeño de los tratamientos, se ha desarrollado un sistema de valoración basado en un valor de ponderación.

Este valor de ponderación, evalúa el desempeño de la solución, considerando la reducción de THDI, THDV y mejora de FP, tanto a nivel de BUS4, BUS6 Y BUS7.

Sin embargo, debido a que reducir la contaminación armónica a nivel del BUS4 es más importante que en el BUS6 o BUS7, se ha considerado una matriz de ponderación para asignar un mayor peso a la corrección del BUS4, un peso medio al BUS6 y un peso menor al BUS7.

Tabla 18.

Matriz de ponderación para interpretación de resultados

Posición	Peso THDI	Peso THDV	Peso FP
BUS 4	10	10	20
BUS 6	6	6	6
BUS 7	3	3	3

Valor de ponderación= (Límite máximo – resultado) * valor de ponderación

NOTA: procedimiento de ponderación validado por Ing. Victor Enriquez, jefe de mantenimiento eléctrico de Michell. S.A.

Ejemplo

Valor de ponderación para THD I en el bus 4 del tratamiento sB-sF:

Entonces, el límite máximo de THDI es igual a 12%. El valor resultado para el bus 4 del tratamiento sB-sF es 18.7% y el peso de la matriz para el bus 4 es 10. Por tanto:

$$\text{Valor de ponderación} = (12\% - 18.7\%) * 10 = -66.9\%$$

A continuación, se representan los valores de ponderación para cada uno de los tratamientos

Tabla 19.*Valores de ponderación para cada uno de los tratamientos*

Tratamiento	THD I	THD V	FP	Promedio total
sB-sF	-66.90%	2.30%	-300.00%	-56.20%
	-26.70%	0.50%	-90.00%	
	20.00%	0.10%	-45.00%	
cB-sin Filtro	-258.20%	-101.20%	0.00%	-65.90%
	-26.70%	-61.20%	-90.00%	
	20.00%	-30.70%	-45.00%	
cB-filtro notch h=5	-107.50%	-69.70%	0.00%	-42.40%
	-26.70%	-41.80%	-90.00%	
	20.00%	-20.90%	-45.00%	
Sb- filtro notch h=5	49.00%	42.70%	0.00%	-1.40%
	-26.70%	25.00%	-90.00%	
	20.00%	12.40%	-45.00%	
filtro notch h=5 h=7	78.80%	58.40%	0.00%	5.20%
	-26.70%	34.50%	-90.00%	
	20.00%	17.10%	-45.00%	
sB - f. notch h5 bus6	32.70%	38.00%	-60.00%	4.80%
	18.10%	22.30%	6.00%	
	20.00%	11.10%	-45.00%	
sB-f.notch h5 h7 bus 6	71.00%	53.70%	-60.00%	16.20%
	52.10%	32.00%	6.00%	
	20.00%	15.80%	-45.00%	
cB-f.notch h5 h7 bus 6	64.00%	47.20%	0.00%	21.00%
	54.50%	28.10%	6.00%	
	20.00%	13.90%	-45.00%	
sB-f notch h5 h7 bus 7	4.50%	29.80%	-220.00%	-19.30%
	16.20%	17.40%	-60.00%	
	27.00%	8.70%	3.00%	
sB-Highpass bus 4	49.60%	50.90%	-220.00%	-15.40%
	-26.70%	29.60%	-60.00%	
	20.00%	14.60%	3.00%	

Utilizando el promedio global de los valores de ponderación, es posible realizar un análisis comparativo de los tratamientos, considerando los 3 factores de análisis:

- Cantidad de filtros.
- Posición de filtros.
- Tipo de filtro.

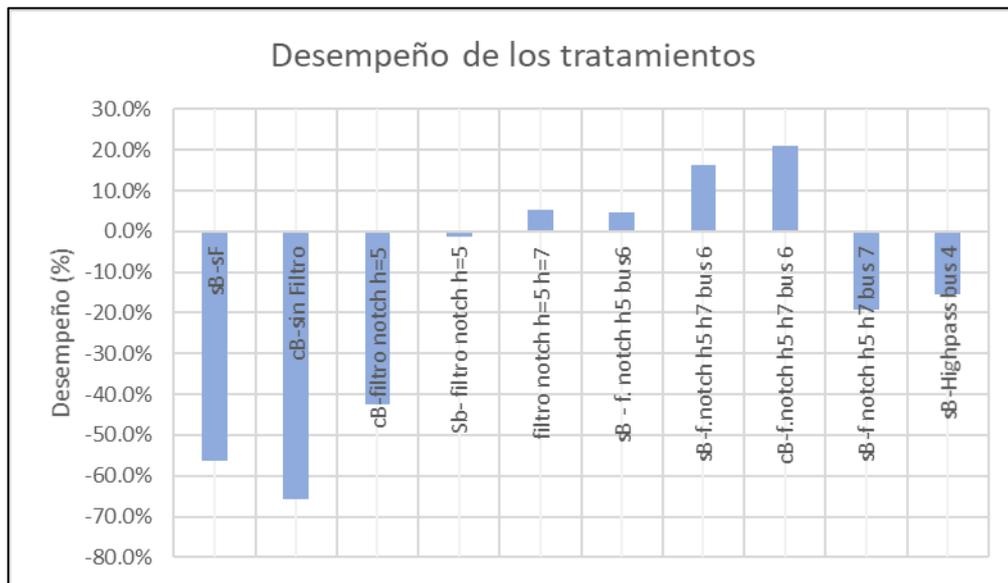


Figura 20. Desempeño global de cada uno de los tratamientos

De acuerdo con la figura, se puede concluir que los tratamientos que contribuyen a mejoras relevantes son aquellos que superan el 0%. Estos tratamientos son:

- filtro notch h=5 h=7: Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y armónico 7.
- sB - f. notch h5 bus6: Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 conectado en 2do nivel.
- sB-f.notch h5 h7 bus 6: Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
- cB-f.notch h5 h7 bus 6: Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.

- Sb- filtro notch h=5: Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.

Cabe indicar que si bien el tratamiento Sb- filtro notch h=5 no super 0%, es un valor bastante cercano por lo que se tomará como una alternativa viable, considerando el análisis de costo beneficio. Esto debido a que la colocación de filtro en el BUS4, se considera una solución bastante robusta.

4.2 PRUEBA DE HIPÓTESIS - ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba la hipótesis que consiste en evaluar si las medias de dos o más poblaciones son iguales. El ANOVA evalúa la importancia de uno o más factores que se comparan, a partir de las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula indica que las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales, La hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

Para realizar un ANOVA, se debe tener una variable de respuesta (en este caso la distorsión armónica resultante de los tratamientos utilizados) y al menos un factor categórico con dos o más niveles (En este caso, la cantidad, tipo y ubicación de filtros).

Para todos los tratamientos que agregan mejoras representativas, se ha elaborado un análisis de varianza (ANOVA) donde se evalúan 2 factores:

- Cantidad de filtros.
- Posición de filtros.

Como se indicó anteriormente, la variable de respuesta en la distorsión armónica del sistema.

Para la elaboración de esta prueba estadística se ha utilizado el software SPSS.

4.2.1 Hipótesis específica 1

Hipótesis nula (H0). La cantidad de filtros no ejerce una influencia significativa sobre la corrección de distorsión armónica. Quiere decir, que, ante una distorsión armónica determinada, diseñar mayor cantidad de filtros no causará una mejor significativa en la corrección de distorsión armónica.

$$\mu_{1 \text{ filtro}} = \mu_{2 \text{ o mas filtros}}$$

$$Sig \cdot \text{Cantidad de filtros} > 0.01$$

Hipótesis alternativa (H1). La cantidad de filtros si ejerce una influencia significativa sobre la corrección de distorsión armónica. Quiere decir, que ante una distorsión armónica determinada, diseñar mayor cantidad de filtros si causará una mejor significativa en la corrección de distorsión armónica.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{un filtro}} &\neq \mu_{\text{dos mas filtros}} \\ \text{Sig. Cantidad de filtros} &< 0.01\end{aligned}$$

4.2.2 Hipótesis específica 2

Hipótesis nula (H0). La posición de los filtros no ejerce una influencia significativa sobre la corrección de distorsión armónica. Quiere decir, que el cambiar de posición de aguas abajo a aguas arriba (o lo contrario), no causará una mejor significativa en la corrección de distorsión armónica.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{Posición aguas arriba}} &= \mu_{\text{Posición aguas abajo}} \\ \text{Sig. Ubicación de filtros} &> 0.01\end{aligned}$$

Hipótesis alternativa (H1). La cantidad de filtros si ejerce una influencia significativa sobre la corrección de distorsión armónica. Quiere decir, que ante una distorsión armónica determinada, diseñar mayor cantidad de filtros si causará una mejor significativa en la corrección de distorsión armónica.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{Posición aguas arriba}} &\neq \mu_{\text{Posición aguas abajo}} \\ \text{Sig. Ubicación de filtros} &< 0.01\end{aligned}$$

→ Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Cantidad_filtros	1,00	1	4
	2,00	2	4
Posición_filtros	1,00	1er nivel (bus 4)	4
	2,00	2do nivel (bus 6)	4

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Desempeño

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	425,174 ^a	3	141,725	49,146	,001
Intercept	368,561	1	368,561	127,806	,000
Cantidad_filtros	207,061	1	207,061	71,803	,001
Posición_filtros	191,101	1	191,101	66,268	,001
Cantidad_filtros * Posición_filtros	27,011	1	27,011	9,367	,038
Error	11,535	4	2,884		
Total	805,270	8			
Corrected Total	436,709	7			

a. R Squared = ,974 (Adjusted R Squared = ,954)

```
UNIANOVA Desempeño BY Cantidad_filtros Posición_filtros
/METHOD=SSTYPE(3)
/INTERCEPT=INCLUDE
/CRITERIA=ALPHA(0.05)
/DESIGN=Cantidad_filtros Posición_filtros Cantidad_filtros*Posición_filtros.
```

Figura 21. Resultados análisis de varianza factorial
Fuente: SPSS

De acuerdo con el resultado de análisis de varianza de 2 factores, se puede notar que todos los resultados de significancia son menores a 0.01, por lo que puede concluirse que los dos factores analizados (cantidad de filtros y posición de filtros).

Esto implica que aumentar la cantidad de filtros (sintonizados para diferentes armónicos) causa una mejora significativa. De manera análoga, la posición de filtros causa una diferencia significativa, por lo que se considera mejor corregir la contaminación armónica desde la fuente.

Así mismo, los resultados muestran que una solución que utilice filtros sintonizados para diferente armónico, utilizando diferentes posiciones en el sistema, mejorará significativamente la contaminación armónica.

4.3 ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO DE LAS PROPUESTAS DE CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS

Para el análisis de costo beneficio, se toma en cuenta los tratamientos que muestran un desempeño ponderado positivo. (se incluye el tratamiento Sb-filtro notch h=5)

Tabla 20.

Desempeño ponderado y descripción de los mejores tratamientos

Tratamiento	Desempeño ponderado	Descripción
Sb- filtro notch h=5	-1.40%	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
filtro notch h=5 h=7	5.20%	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y armónico 7.
sB - f. notch h5 bus6	4.80%	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 conectado en 2do nivel.
sB-f.notch h5 h7 bus 6	16.20%	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
cB-f.notch h5 h7 bus 6	21.00%	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.

Tabla 21.*Opciones tecnológicas para los mejores tratamientos*

Tratamiento	Desempeño ponderado	Opción tecnológica
Sb- filtro notch h=5	-1.40%	Filtro pasivo automatizado tipo "banco de compensación" para adaptarse a diferentes cargas. Sintonizado para filtro 5.
filtro notch h=5 h=7	5.20%	Filtro pasivo automatizado tipo "banco de compensación" para adaptarse a diferentes cargas. Sintonizado para filtro 5 y 7.
sB - f. notch h5 bus6	4.80%	Filtro pasivo automatizado tipo "banco de compensación" para adaptarse a diferentes cargas. Sintonizado para filtro 5.
sB-f.notch h5 h7 bus 6	16.20%	Filtro pasivo automatizado tipo "banco de compensación" para adaptarse a diferentes cargas. Sintonizado para filtro 5 y 7.
cB-f.notch h5 h7 bus 6	21.00%	Filtro pasivo automatizado tipo "banco de compensación" para adaptarse a diferentes cargas. Sintonizado para filtro 5 y 7.

A continuación, se consideran precios referenciales a los tratamientos desarrollados. Para tal fin, se ha añadido la solución de un filtro activo, ya que es una solución más tradicional cuyo desempeño se conoce muy bien, pero que es la más cara del mercado.

Para el análisis de costo beneficio, se determinó un factor de evaluación técnica económica que considera una puntuación igual a 1 por "desempeño ponderado" y una evaluación de 5 por costo.

La fórmula de este factor viene dado por:

$$FETC = \text{Eficiencia de desempeño} \times 1 + \text{Eficiencia de precio} \times 5$$

- Eficiencia de desempeño: $\text{Desempeño} / \text{Desempeño máximo}$.
 - Desempeño máximo= 20%.
- Eficiencia de precio: $(\text{Precio máximo} - \text{Precio de la solución}) / \text{precio máximo}$.
 - Precio máximo= US\$ 50,000.00.

NOTA: Las ponderaciones fueron validadas por le ing. Víctor Enriquez, Jefe de mantenimiento eléctrico de Michell S.A.

Tabla 22.*Evaluación técnica-económica de mejores tratamientos*

Tratamiento	Desempeño ponderado	Precio referencial	Factor evaluación técnica económica
Filtro ACTIVO 130 kVar (1 filtro)	mayor a 20%	US\$ 50,000.00	1
Sb- filtro notch h=5 (1 filtro)	-1.40%	US\$ 21,000.00	2.83
filtro notch h=5 h=7 (2 filtros)	5.20%	US\$ 30,000.00	2.26
sB - f. notch h5 bus6 (2 filtros)	4.80%	US\$ 21,000.00	3.14
sB-f.notch h5 h7 bus 6 (2 filtros)	16.20%	US\$ 28,000.00	3.01
cB-f.notch h5 h7 bus 6 (2 filtros)	21.00%	US\$ 35,000.00	2.55

De acuerdo con la tabla, se pueden identificar 2 soluciones que presentan comparativamente un alto valor según la evaluación técnica-económica, estos son los tratamientos sB - f. notch h5 bus6 y sB-f.notch h5 h7 bus 6, los cuales representan el uso de uno y dos filtros en el bus 6.

Adicional a esta solución, se ha decidido marcar también como alternativa relevante, el tratamiento Sb- filtro notch h=5, que considera la utilización de un filtro sintonizado en armónico 5, colocado en bus 4. Esta solución se ha incluido, debido a que puede representar la opción más versátil en cuanto a su instalación, considerando que los sistemas eléctricos en las plantas industriales suelen variar con el tiempo. Esta instalación sería la que se vería menos impactada si ocurren cambios del sistema.

4.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los hallazgos encontrados, aceptamos las hipótesis alternativas que establecen que tanto la cantidad de filtros como la posición de los mismos, son factores que influyen de manera significativa cuando se busca remediar la distorsión armónica.

Por otro lado, el análisis de costo beneficio, permite identificar la solución recomendada para la mitigación de armónicos de Michell S.A. En este caso, los tratamientos sB - f. notch h5 bus6 y sB-f.notch h5 h7 bus 6, los cuales representan el uso de uno y dos filtros en el bus 6 y el tratamiento Sb- filtro notch h=5, que representa el uso de un filtro en el bus 4.

Aunque una cantidad de filtros de 2 o 3, puede mejorar significativamente el desempeño de la solución, el criterio económico puede ser de mucha importancia para tomar la decisión final. También se considera, que la instalación de filtros pasivos representa una opción atractiva, en comparación con filtros activos, los cuales tienen un costo mayor.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen:

Ali y otros (2018), quienes indican que se puede alcanzar diseños eficientes de mitigación de distorsión armónica, considerando factores como la eficiencia, niveles de distorsión armónica, así como el costo del filtro. Ellos también indican que los filtros pasivos pueden ser considerados como la herramienta más confiable y económico para la mejora del factor de potencia y la supresión de armónicos. Los análisis tecno-económicos son de gran utilidad para la selección de soluciones de corrección de distorsión armónica.

Por otro lado, Liani-Moghaddam, Shivaie y Weinsier (2019), indicaron que se puede obtener resultados sobresalientes, cuando se diseñan filtros armónicos híbridos. Sin embargo, estos autores concuerdan que es necesario realizar el dimensionamiento de la solución de mitigación, considerando la evaluación de factores como la incertidumbre de la demanda y la cantidad de corrientes armónicas inyectadas por cargas no lineales. Así mismo, los autores indican que los criterios técnicos y económicos son necesarios para identificar la solución más óptima.

Adicionalmente Díaz y Parada (2009), mencionan que para la identificación de soluciones de mitigación de distorsión armónica, es necesario revisar el impacto que tienen los bancos de condensadores en el sistema eléctrico, por la posible existencia de resonancia. Hecho que se aborda en el presente trabajo.

Finalmente, es necesario mencionar que tal como Pacis, Martínez Jaypee y Tecson (2010), mencionan que la simulación computacional permite modelar distintas soluciones posibles para poder identificar aquellas con mejor desempeño

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La presente tesis tiene como objetivo analizar técnica y económicamente las alternativas de MITIGACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A. Para tal fin, se muestran las conclusiones del trabajo tomando en consideración los objetivos específicos presentados para alcanzar el objetivo general.

Se determinó una línea de base de calidad de energía, que evaluó principalmente la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente. Se mostró que la distorsión armónica alcanza valores de THDi, de hasta 40% y de THDv de 5.3% en el tablero general TG2.

Se determinó que los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta, son el armónico 5 y el armónico 7, en una proporción tal, que resulta muy similar al perfil de contaminación armónica por convertidores de 6 pulsos. Esto se corrobora con las observaciones de campo que muestran que se utilizan numerosos variadores de velocidad para los diferentes procesos. Estos armónicos son principalmente producidos por la presencia de variadores de velocidad de máquinas de hilado.

Se simuló el sistema eléctrico en el software computacional EASYPOWER. Previamente se compararon otros tipos de software como ETAP, y POWERFACTORY. El programa EASYPOWER, presenta mayor versatilidad para la simulación del sistema, ya que a diferencia de las otras herramientas, permite trabajar con perfiles de distorsión armónica colocados de forma manual, con lo que se alcanza modelar el sistema con mayor precisión.

A partir de las simulaciones realizadas, se determinó qué tipo de filtros pueden implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica. Para este trabajo se han realizado simulaciones, 1 de ellas para evaluar la línea de base, 2 para evaluar la resonancia con el banco de condensadores que trabaja actualmente, y 7 simulaciones con distintas alternativas para reducir la distorsión armónica y llegar a niveles

aceptables. Para este fin se han simulado soluciones con filtros pasivos en serie tipo notch, sintonizados al armónico 5 y al armónico 7, así como se ha simulado filtro pasivo amortiguado de 1er orden, tipo high-pass.

De acuerdo con el análisis estadístico, se determinó que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Los mejores resultados para reducir la contaminación armónica, resultaron ser los tratamientos sB - f. notch h5 bus6 y sB-f.notch h5 h7 bus 6, que representan la colocación de:

- Filtro pasivo en serie sintonizado al armónico 5, en bus 6 (cerca de la fuente de contaminación mayoritaria).
- 2 filtros pasivos en serie sintonizados al armónico 5 y 7, en bus 6 (cerca de la fuente de contaminación mayoritaria).

Así mismo, se destacó que la solución de colocación de filtro pasivo en serie sintonizado al armónico 5, en el bus 4 (cerca al punto de acople- PCC), debido a que también muestra buen desempeño y puede ser más versátil ante cambios del sistema eléctrico de la planta.

De acuerdo con el análisis estadístico, se determinó que la cantidad de filtros impactan de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Se muestra que existe evidencia de que la colocación de 2 filtros, uno sintonizado al armónico 5 y el otro sintonizado al armónico 7, permiten una mejora significativa de la reducción de contaminación armónica. Por ejemplo, cuando se colocó un solo filtro (h5), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 8.7%, mientras que cuando se colocaron dos filtros (h5 y h7), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7% a 4.9%. Aunque ambos cumplen con la norma (THDi <12%), el desempeño de 2 filtros es significativamente mejor.

De acuerdo con el análisis estadístico, se determinó que la posición de filtros impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Esto se explica debido a que cuando el filtro se coloca más cercano a la fuente principal de contaminación, habrá oportunidad de reducir la contaminación armónica en todos los sistemas aguas arriba del filtro. Esto ocurre mayormente con los armónicos de corriente. En caso de los armónicos de voltaje, las simulaciones arrojan que en cualquiera que sea el punto de conexión del filtro, el armónico de voltaje se corrige aguas arriba y aguas debajo de la colocación del filtro. Por ejemplo, cuando se colocó un solo filtro (h5) en el bus 4 (cerca al PCC), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 7.1%, mientras cuando se colocó un solo filtro (h5) en el bus 6 (cerca de la fuente de contaminación mayoritaria), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 8.7%. Si consideramos la reducción de contaminación armónica aguas abajo, por ejemplo, en conductores que llegan a bus 4, se observa que en el primer caso

el THDi reduce de 16.5% a 16.4 % (casi no reduce), en cambio, en el 2do caso, el THDi reduce de 16.5 % a 9.0%, lo que implica que si se coloca el filtro más aguas abajo, cerca de la contaminación mayoritaria, se corrige la distorsión en conductores y buses aguas abajo.

Finalmente, se realizó un análisis de costo beneficio para todas las alternativas propuestas, considerando un mecanismo de evaluación ponderada, que dio un peso igual a 1 al desempeño técnico y un peso de 5 al costo de la solución; es decir, para todas las soluciones que alcanzan cumplir con la norma, se buscó la más rentable. Este criterio, permitió alcanzar 3 propuestas finales, que son:

- Sb- filtro notch h=5: Un filtro pasivo en serie tipo notch, sintonizado en armónico 5 y colocado en bus 4 (cerca de PCC).
- sB - f. notch h5 bus6: Un filtro pasivo en serie tipo notch, sintonizado en armónico 5 y colocado en bus 6 (cerca de contaminación mayoritaria).
- sB-f.notch h5 h7 bus 6: Dos filtros pasivos en serie tipo notch, sintonizados en armónico 5 y 7 respectivamente, colocados en bus 6 (cerca de contaminación mayoritaria).

Luego de los análisis realizados, el autor recomienda la primera solución (Sb- filtro notch h=5), ya que se considera más versátil, debido a que la solución funcionaría incluso si ocurrieran posibles cambios del sistema eléctrico aguas abajo; aquí, es necesario recordar que una planta industrial sufre numerosos cambios a través del tiempo.

Finalmente, considerando el alto costo de “fallos lógicos” en circuitos digitales que la distorsión armónica puede generar en planta, se recomienda la aplicación de la solución ya que traerá un retorno de inversión en mediano plazo en beneficio de la compañía.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- En relación con los impactos negativos de armónicos, se debe recordar que los efectos de la contaminación armónica especialmente asociado al fallo de dispositivos electrónicos (tarjetas), pueden verse acrecentados por otras perturbaciones del sistema como son los fenómenos transitorios. Aunque su análisis no ha sido incluido en esta investigación, se sugiere considerar protecciones eléctricas de estabilización de voltaje.
- Con relación al uso de filtros pasivos, debe recordarse que estos filtros pueden ser de impedancia fija e impedancia variable. Si tenemos el caso de una carga cuya corriente de trabajo es variable, se sugerirá la aplicación de un filtro pasivo de impedancia variable.
- Realizar simulaciones utilizando reactancias en serie. Una solución que suele considerarse como apoyo para mejorar el desempeño de filtros pasivos, es el uso de reactancias colocadas en serie en la fuente de contaminación, normalmente dimensionadas considerando el 3% de la impedancia de la carga.
- Realizar simulaciones dinámicas considerando variables como variación de perfil de carga a través del tiempo. Esto para interpretar el comportamiento del sistema en periodos de trabajo a carga parcial.
- Se recomienda analizar el desempeño de otras herramientas de simulación que puedan brindar mayores alternativas de análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ZIAD, M. et al. Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Diciembre, 2018, 103 (1), 660-675. ISSN: 0142-0615.
- ARRILLAGA, J. y WATSON, N. *Power System Harmonics*. New York: John Wiley & Sons, 2003. 400 pp. ISBN: 0-470-85129-5.
- CCALLA, J. Estudio de las Distorsiones Armónicas Producidas por Variadores de Frecuencia, que Afectan la Calidad de Energía Eléctrica del Pabellón H de la Universidad Continental. Tesis (Título de Ingeniero Eléctrico). Huancayo: Universidad Continental, 2017. 141 pp. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/3999>
- CARVAJAL, C. Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos. Tesis (Título de ingeniero electricista). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. 232 pp. [fecha de consulta: 10 de octubre 2021]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ca0a604-72fc-412c-ae04-6cbe4f6c980e/content>
- DAS, J. *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 873 pp. ISBN 978-1-118-86162-2.
- DIAZ, C. y PARADA, J. Técnicas para la mitigación de armónicas y de compensación del factor de potencia en sistemas de potencia, caso práctico Corinca. Tesis (Título ingeniero electricista). El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2009. 130 pp. [Fecha de consulta: 10 de octubre 2021] Disponible en: <https://cupdf.com/document/mitigacion-armonicas-tesis-uca.html?page=99>
- Resonancia eléctrica, batería de condensadores y armónicos. [Mensaje de un blog]. Madrid: Fornieles, F. (21 de octubre de 2017) [Fecha de consulta: 31 de enero 2021]. Disponible en : <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/resonancia-electrica-bateria-condensadores-y-armonicos/>.

- IEEE. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. 101 pp. ISBN 978-0-7381-9005-1.
- IEEE. Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. Standard, IEEE 519. New York: IEEE Standards Office. 1993.
- IEEE. Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents. New York: ANSI/IEEE, 1986.
- KIANI, M., SHIVAIE, M. y WEINSIER, P. A techno-economic multi-objective model for hybrid harmonic filter planning considering uncertainty in non-linear loads. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Noviembre, 2019, 112(1), 339-352. ISSN: 0142-0615.
- MAZORRA, J. (2012). Calidad de la Energía Eléctrica. Cordova: CREATESPAC, 2012, 554 pp. ISBN-13: 978-1482543278.
- MINEM. Norma técnica de calidad de servicios eléctricos D.S N° 020-97-EM. Lima: Minem, 1997.
- MOLANO, J., y TIQUE, R. Diseño y construcción de filtros pasivos para la mitigación de corrientes armónicas. Tesis (Título de Ingeniero Electricista). Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle, 2013. 97 pp. [fecha de consulta 31 de octubre de 2021]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1020&context=ing_electrica
- TEM power quality. Active vs. Passive Harmonic Filters. 2019 [Fecha de consulta: 29 de diciembre de 2019.]. Disponible en: <https://www.mtec corp.com/blog/2018/04/13/active-vs-passive-harmonic-filters/>.

OXFORD UNIVERSITY. A Dictionary of Electronics and Electrical Engineering. New York: Oxford University Press. 2018. 720 pp. ISBN 978-0-19-872572-5.

PACIS, M., MARTINEZ, J., y TECSON, J. Modelling and Simulation of Active Power Filters for Harmonic Compensation, Voltage Sags and Swells Mitigation and Power Factor Correction. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science San Francisco, USA: WCECS, Octubre 2010, 2 (2), ISSN: 2078-0966.

SCHNEIDER ELECTRIC. IEEE Standard 519-2014, Compliances, Updates, Solutions and Case Studies. Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2017.

STEVENSON, W. Elements of Power System Analysis. London: McGraw-Hill, 1955. 380 pp. ASIN: B009XHP700

WAKILEH, G. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design. New York: Springer, 2001. 514 pp. ISBN 978-3-642-07593-3.

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 23.

Matriz objetivos y conclusiones

Objetivo	Conclusión
<p>Objetivo general: Analizar técnica y económicamente las alternativas de MITIGACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A.</p>	<p>Se analizó técnica y económicamente las alternativas de mitigación de distorsión armónica utilizando software computacional.</p>
<p>OE1: Determinar una línea de base de calidad de energía que evalúe principalmente la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente.</p>	<p>Se determinó una línea de base de calidad de energía que evaluó principalmente la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente. Se mostró la distorsión armónica alcanza valores de THDi, de hasta 40% y de THDv de 5.3% en el tablero general TG2.</p>
<p>OE2: Determinar los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta</p>	<p>Se determinó que los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta son el armónico 5 y el armónico 7, en una proporción tal, que resulta muy similar al perfil de contaminación armónica por convertidores de 6 pulsos. Esto se corrobora con las observaciones de campo que muestran que se utilizan numerosos variadores de velocidad para los diferentes procesos.</p>
<p>OE6: Realizar un análisis de costo beneficio para todas las alternativas propuestas y elegir la de mayor costo beneficio</p>	<p>Se determinó que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Los mejores resultados para reducir la contaminación armónica resultaron ser los tratamientos sB - f. notch h5 bus6 y sB-f.notch h5 h7 bus 6, que representan la colocación de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filtro pasivo en serie sintonizado al armónico 5, en bus 6 (cerca a la fuente de contaminación mayoritaria). • 2 filtros pasivos en serie sintonizados al armónico 5 y 7, en bus 6 (cerca a la fuente de contaminación mayoritaria). <p>Así mismo, se destacó que la solución de colocación de filtro pasivo en serie sintonizado al armónico 5, en el bus 4 (cerca al punto de acople-PCC) debido a que también muestra buen desempeño y puede ser más versátil ante cambios del sistema eléctrico de la planta.</p>

OE4: A partir de simulaciones computacionales, determinar qué cantidad de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica

De acuerdo al análisis estadístico, se determinó que la cantidad de filtros impactan de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Se muestra que existe evidencia de que la colocación de 2 filtros, uno sintonizado al armónico 5 y el otro sintonizado al armónico 7, permiten una mejora significativa de la reducción de contaminación armónica. Por ejemplo, cuando se colocó un solo filtro (h5), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 8.7%, mientras que cuando se colocaron dos filtros (h5 y h7), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7% a 4.9%. Aunque ambos cumplen con la norma (THDi <12%), el desempeño de 2 filtros es significativamente mejor.

OE5: A partir de simulaciones computacionales, determinar qué ubicaciones pueden utilizarse para la utilización de filtros

De acuerdo al análisis estadístico, se determinó que la posición de filtros impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica. Esto se explica debido a que cuando el filtro se coloca más cercano a la fuente principal de contaminación, habrá oportunidad de reducir la contaminación armónica en todos los sistemas aguas arriba del filtro. Esto ocurre mayormente con los armónicos de corriente. En caso de los armónicos de voltaje, las simulaciones arrojan que en cualquiera que sea el punto de conexión del filtro, el armónico de voltaje se corrige aguas arriba y aguas abajo de la colocación del filtro. Por ejemplo, cuando se colocó un solo filtro (h5) en el bus 4 (cerca al PCC), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 7.1%, mientras cuando se colocó un solo filtro (h5) en el bus 6 (cerca de la fuente de contaminación mayoritaria), el THDi en PCC bajo de un valor de 18.7 % a 8.7%. Si consideramos la reducción de contaminación armónica aguas abajo, por ejemplo en conductores que llegan a bus 4, se observa que en el primer caso el THDi reduce de 16.5% a 16.4 % (casi no reduce), en cambio, en el 2do caso, el THDi reduce de 16.5 % a 9.0%, lo que implica que si se coloca el filtro más aguas abajo, cerca de la contaminación mayoritaria, se corrige la distorsión en conductores y buses aguas abajo.

OE6: Realizar un análisis de costo beneficio para todas las alternativas propuestas y elegir la de mayor costo beneficio

Finalmente, luego de los análisis realizados, el autor recomienda la primera solución (Sb- filtro notch h=5) ya que se considera más versátil, en cuenta a posibles cambios del sistema eléctrico que puedan ocurrir aguas abajo, recordando que una planta industrial sufre numerosos cambios a través del tiempo.

ANEXO 2: Matriz de título y matriz de correspondencia

Tabla 24.

Matriz de título

TÍTULO DE PROYECTOS (PRE)	REVISION TITULO DEL PROYECTO (PRE) EVALUACION DE LOS CINCO ELEMENTOS DEL TITULO Original	
ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A.	Propósito	Análisis técnico y económico
	Variables	Causa ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Efecto Efectividad y costo
	Unidad de estudio	Distorsión armónica
	Lugar	Planta Michell S.A.
	Tiempo	

Tabla 25.

Matriz de correspondencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
			Variable independiente: "Filtros"	Método:
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Dimensiones: • Tipo de filtros	Cuantitativo (medición de fenómenos y análisis de causa efecto) Tipo de investigación:
¿Cuál es la mejor alternativa técnica y económica para la MITIGACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A.?	Analizar técnica y económicamente las alternativas de MITIGACIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A.	Probando diferentes configuraciones respecto a la ubicación de filtros de armónicos, el tipo de filtros a utilizar, la cantidad de filtros y el análisis de costo beneficio se podrán analizar alternativas para la MITIGACIÓN de la DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A. que permitan identificar la mejor posible.	• Cantidad de filtros	Aplicada
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	• Ubicación de filtros	Nivel:
¿Cuál es la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente en la planta de Tintorería y Acabados de Michell S.A.?	Determinar una línea de base de calidad de energía que evalúe principalmente la tasa de distorsión armónica de voltaje y corriente.	La distorsión armónica de Michell S.A. planta de Tintorería y Acabados, sobrepasa los valores límite de distorsión armónica, tanto en voltaje como en corriente.		Descriptiva

¿Cuáles son los órdenes armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta?	Determinar los armónicos que más afectan la distorsión armónica en planta	En planta tintorería y acabados existen numerosos variadores de velocidad. Por tanto se estima el armónico 5 como fuente de distorsión	Variable dependiente: “Distorsión armónica”	Alcance de medición:
¿Qué tipo de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica?	A partir de simulaciones, determinar qué tipo de filtros pueden implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica	Es posible desarrollar técnicamente un proyecto de mitigación de distorsión armónica, considerando tipos de filtro tales como pasivos sintonizados y filtros activos.		Planta de Michell S.A.
¿Qué cantidad de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica?	A partir de simulaciones, determinar qué cantidad de filtros puede implementarse para mitigar de manera importante la tasa de distorsión armónica	Es posible desarrollar técnicamente un proyecto de mitigación de distorsión armónica, considerando la implementación de 1 o más filtros		Instrumentos:
¿Qué ubicaciones pueden utilizarse para la utilización de filtros?	A partir de simulaciones determinar qué ubicaciones pueden utilizarse para la utilización de filtros	Es posible desarrollar técnicamente un proyecto de mitigación de distorsión armónica, considerando la ubicación de filtros en el sistema eléctrico, como aguas arriba o cercano a las cargas		Analizadores de redes de alta precisión
¿Cuál es el costo beneficio de la mitigación de distorsión armónica?	Realizar un análisis de costo beneficio para todas las alternativas propuestas y elegir la de mayor costo beneficio	Es posible desarrollar técnicamente un proyecto de mitigación de distorsión armónica, considerando el costo y beneficio de cada opción		Simulador computacional especializado

ANEXO 3: Autorización uso software Easypower



Arturo Alatriza Corrales <40566116@continental.edu.pe>

Licencia de EASYPOWER

1 mensaje

ENRESI <informes@enresi.com>
Para: 40566116@continental.edu.pe

10 de enero de 2021, 6:51

Buen día Arturo,
Te enviamos la información para que puedas utilizar EASYPOWER.

- * Name: ARTURO ALATRISTA
- * Company: Universidad Continental
- * Telephone Number: 51958954749
- * Email: 40566116@continental.edu.pe
- * Country Code: PE

We have created the following authorization code for this person:

- * Authorization code: NYV9F ASJJ5 9SD99 8VYFH DR998
- * Expiration date: 30 days from activation

ANEXO 4: Autorización Michell S.A.

AUTORIZACION DE USO DE INFORMACIÓN

Por medio de la presente, se autoriza al sr. Arturo Alatriza Corrales, a realizar la tesis titulada:
ANALISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DE DISTORCION ARMÓNICA
EN LA PLANTA TINTORERÍA Y ACABADOS DE MICHELL S.A.

Así mismo se le autoriza a utilizar data y 2 fotografías, que están estrictamente relacionadas a la investigación.

No se autoriza el uso de información no relacionada estrictamente con la investigación.

Atentamente,


MICHELL Y CIA S.A.
Eduardo Bustamante Calderón
SUPERINTENDENTE DE MANTENIMIENTO

ANEXO 5: Certificado calibración y ficha técnica analizador de redes FLUKE

432

	LABORATORIO DE CALIBRACIÓN CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP-ISO/IEC 17025	 EMPRESA HOMOLOGADA
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
EXPEDIENTE : EXP - 4552ET1 - 2021	SOLICITANTE : CEEP S.A.C	N° DE CERTIFICADO MT - 5623 - 2021
Dirección : Cal. José Santos Chocano Nro. 249 Dpto. 802 Urb. Umacollo Arequipa – Arequipa – Arequipa.	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : ANALIZADOR DE REDES	
Marca : HIOKI Modelo : 3169-20 N° Serie : 100424011 Identificación : 22608095 Tipo : Digital Procedencia : Japón Ubicación : No Indica	FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN	
MÉTODO DE CALIBRACIÓN -Procedimiento EL-005 para la calibración de medidores de energía eléctrica. Edición Digital 1. -Siguiendo los procedimientos de calibración Ref. PC-021* Procedimiento para la calibración de multimetros digitales*. Segunda edición - 2016 INACAL - DM.	METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones en metrología según procedimientos de calibración validados o normalizados. Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados. METRINDUST S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.	
	 Gamarra Rodríguez Dennis Gerente Técnico	Página 1 de 4
www.metrindust.com.pe Calle Los Jazmines Mz. G Lt. 13 El Agustino, Lima.	informes@metrindust.com.pe 915972598 917607794 998699562 925033922 945111762	CCL ASOCIADO CÁMARA DE COMERCIO - LIMA

Measurement modes

Scope	Vrms, Arms, Vcursor, Acursor, Vfund, Afund, Hz, V phase angles, A phase angles
Volts/Amps/Hertz	Vrms, Vpk, V Crest Factor, Arms, Apk, A Crest Factor, Hz
Dips and swells	Vrms ½, Arms ½ Captures up to 1000 events with date, time, duration, magnitude and phase identification with programmable thresholds
Harmonics dc, 1 to 50	Harmonic Volts, THD Volt, Harmonic Amps, THD Amps, K Amps, Harmonic Watts, THD Watts, K Watts, Interharmonic Volts ⁴ , Interharmonic Amps ⁴ (relative to fundamental or to total rms)
Power and energy	Watts, VA, VAR, Power factor, Cos φ/DPF, Arms, Vrms, kWh, kVAh, kVARh, peak demand interval using trend, KYZ revenue meter verification via optional input.
Flicker	Pst _(1min) , Pst, Plt, PFS, Vrms ½, Arms ½, Dc, Dmax, TDEX
Unbalance	Vneg, Vzero, Aneg, Azero, Vfund, Afund, Hz, V phase angles, A phase angles
Transients	Vrms, Arms, Vcursor, Acursor
Inrush currents	Inrush Current, inrush duration, Arms ½, Vrms ½
Mains signaling ⁴	Relative signaling voltage and absolute signaling voltage averaged over three seconds for two selectable frequencies
Logger ⁴	Measures and records up to 100 parameters on all 4 phases simultaneously with selectable averaging time Captures up to 10000 events with date, time, duration, magnitude and phase identification with programmable thresholds
System monitor	Vrms, Arms, Harmonic Volts, THD Volts, Plt, Vrms ½, Arms ½, Vneg, Hz, dips and swells, unbalance All parameters are measured simultaneously in accordance with ENS0160 Using Flagging to indicate unreliable readings according IEC61000-4-30

Accuracy, resolution and range

		Measurement range	Resolution	Accuracy
Volt/Amps/Hertz				
Vrms (ac+dc)	Fluke 435	1 Vrms to 600 Vrms	0.01 Vrms	± 0.1 % of nominal voltage
	Fluke 434	600 Vrms to 1000 Vrms 1 Vrms to 1000 Vrms	0.01 Vrms 0.1 Vrms	± 0.1 % ± 0.5 % of nominal voltage
Vpk		1 Vpk to 1400 Vpk	1 V	5 % of nominal voltage
Voltage Crest Factor (CF)		1.0 to > 2.8	0.01	± 5 %
Arms (ac+dc)	Fluke 435	0 kArms to 20.00 kArms ¹	0.001 Arms to 10 Arms ¹	± 0.5 % ± 5 counts ³
	Fluke 434	0 kArms to 20.00 kArms ¹	0.001 Arms to 10 Arms ¹	± 1 % ± 5 counts ³
	Fluke 434 with i400s Fluke 435 with i430Flex	0 Arms to 40/400 Arms 30 Arms to 3000 Arms	0.1 and 1 Arms 1 Arms	± 1 % ± 5 counts ³ ± 0.5 % ± 20 counts ³
Apk using 1 mV/A scaling		0 Apk to 5500 Apk	1 A	± 5 %
A Crest Factor (CF)		1 to 10	0.01	± 5 %
Hz ⁵	Fluke 435 @ 50 Hz nominal	42.500 Hz to 57.500 Hz	0.001 Hz	± 0.01 Hz
	Fluke 435 @ 60 Hz nominal	51.000 Hz to 69.000 Hz	0.001 Hz	± 0.01 Hz
	Fluke 434 @ 50 Hz nominal	42.50 Hz to 57.50 Hz	0.01 Hz	± 0.01 Hz
	Fluke 434 @ 60 Hz nominal	51.00 Hz to 69.00 Hz	0.01 Hz	± 0.01 Hz
Dips and swells				
Vrms ½ (ac+dc)	Fluke 435	0.0 % to 200 % of nominal voltage	0.1 Vrms	± 0.2% of nominal voltage ± 1% of
	Fluke 434	0.0 % to 200 % of nominal voltage	0.1 Vrms	
Arms ½ (ac+dc)	Fluke 435	0 Arms to 20,000 Arms ¹	0.001 Arms to 10 Arms	± 1 % ± 10 counts ³
	Fluke 434	0 Arms to 20,000 Arms ¹	0.001 Arms to 10 Arms	± 2 % ± 10 counts ³
	Fluke 434 with i400s Fluke 435 with i430Flex	0 Arms to 400 Arms 30 Arms to 3000 Arms	0.1 Arms and 1 Arms 1 Arms	± 2 % ± 10 counts ³ ± 1 % ± 20 counts ³
Threshold levels		Programmable thresholds in percent of nominal voltage Event detection based upon ½ cycle rms voltages Captures dips, swells, interruptions and rapid voltage changes		
Duration		hhh,mm,ss,mmm	Half cycle	One cycle

Accuracy, resolution and range cont.

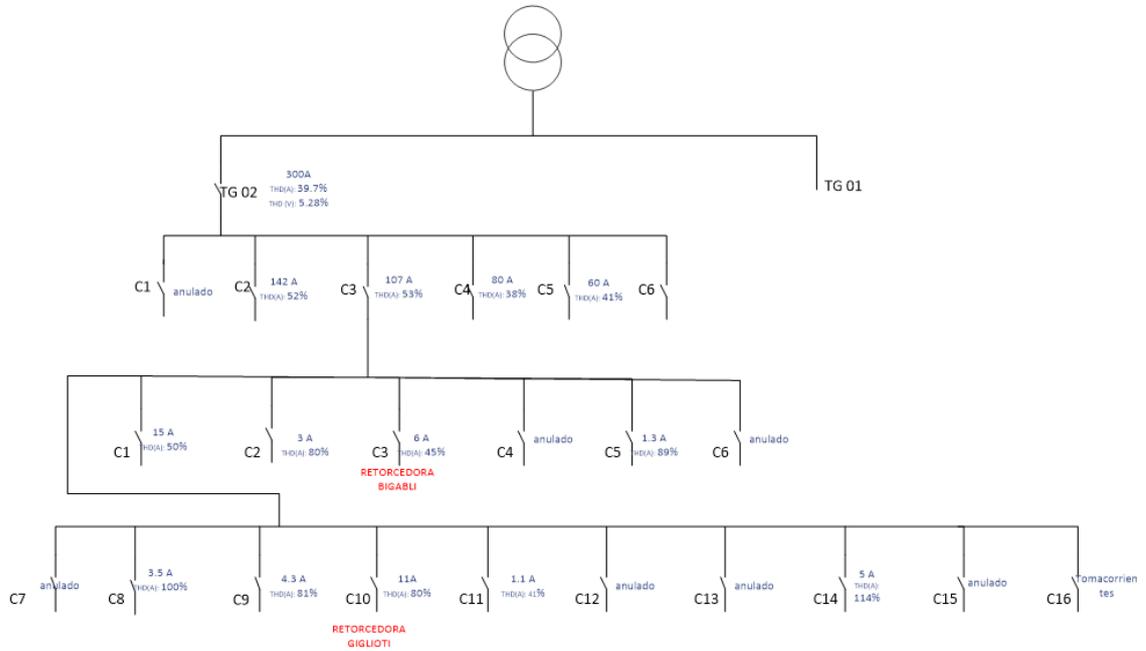
	Measurement range	Resolution	Accuracy
Harmonics			
Harmonic order (n)	DC, 1 to 50 grouping: harmonic groups according to IEC 61000-4-7		
Inter-Harmonic order	Off, 1 to 49 grouping: harmonic and interharmonic subgroups according to IEC 61000-4-7		
Vrms	Relative (%f): 0.0 % to 100.0 % Fluke 435 Absolute: 0.0 Vrms to 1000 Vrms Fluke 434 Absolute: 0.0 Vrms to 1000 Vrms	0.1 % 0.1 Vrms 0.1 Vrms	$\pm 0.1 \% \pm n \times 0.1 \% (\pm 0.4 \% \text{ for } \%r)$ $\pm 0.05 \% \text{ of nominal voltage if } < 1 \% \text{ of nominal voltage}$ $\pm 5 \% \text{ if } \geq 1 \% \text{ of nominal voltage}$ $\pm 5 \% \pm 2 \text{ counts}$
Arms	Relative (%f): 0.0 % to 100.0 % Absolute: 0.0 mV to 4000 mV x clamp scaling	0.1 % 1 mVrms x clamp scaling	$\pm 0.1 \% \pm n \times 0.1 \% (\pm 0.4 \% \text{ for } \%r)$ $\pm 5 \% \pm 5 \text{ counts}$
Watts (Harmonics only)	Relative: 0.0 % to 100.0 % Absolute: depends on clamp and voltage scaling	0.1 %	$\pm n \times 2 \%$ $\pm 5 \% \pm n \times 2 \% \pm 10 \text{ counts}$
DC	Relative: 0.0 % to 100.0 % Fluke 435 Absolute V: 0.0 V to 1000 V Fluke 434 Absolute V: 0.0 V to 1000 V Absolute A: 0.0 mV to 4000 mV x clamp scaling Absolute W: depends on clamp and voltage scaling	0.1 % 0.1 V 0.1 V 1 mVrms x clamp scaling 0.1 V depends on scaling	$\pm 0.1 \% \text{ V and A } (\pm 2 \% \text{ Watt})$ $\pm 0.2 \% \text{ of nominal voltage}$ $\pm 5 \% \pm 10 \text{ counts}$ $\pm 5 \% \pm 10 \text{ counts}$ $\pm 5 \% \pm 10 \text{ counts}$
THD ₍₅₋₄₀₎ (relative %f or %r)	0.0 % to 100.0 %	0.1 %	$\pm 2.5 \% \text{ V and A } (\pm 5 \% \text{ Watt})$
Hz	0 Hz to 3500 Hz	1 Hz	$\pm 1 \text{ Hz}$
Phase angle	Fluke 435 Fluke 434 -360 ° to +0 ° -360 ° to +0 °	1 ° 1 °	$\pm n \times 1 ^\circ (\%)$ $\pm n \times 1.5 ^\circ (\%)$
Power and energy			
Watt (VA, VAR)	Fluke 435 Fluke 434 1.0 MW to 20.00 MW ¹ 1.0 MW to 20.00 MW ¹	0.1 kW to 1 kW ¹ 0.1 kW to 1 kW ¹	$\pm 1 \% \pm 10 \text{ counts}^3$ $\pm 1.5 \% \pm 10 \text{ counts}^3$
kWh ⁶ (kVA ⁶ , kVAR ⁶)	00.00 kWhr to 200.0 GWhr ¹ 00.00 kWhr to 200.0 GWhr ¹	0.01 Xhr to 100 Whr ¹ 0.01 Whr to 100 Whr ¹	$\pm 1 \% \pm 10 \text{ counts}^3$ $\pm 1.5 \% \pm 10 \text{ counts}^3$
Power Factor	0 to 1	0.01	http://www.testequipmenthq.com
Cos φ/DPF	0 to 1	0.01	± 0.033
Flicker			
Pst (1 min), Pst, Plt, PFS instantaneous Flicker	0.00 to 20.00	0.01	Within $\pm 5 \%$ of tabulated values according IEC61000-4-15
Dc%, Dmax% and Time d(t) exceeds limits as described per IEC 61000-3-3	0.0 % to $\pm 100.0 \%$ for Dc% and Dmax% and 0.000 s to 9.999s for Time	0.1 % for Dc% and Dmax% and 10 ms for Time	$\pm 1 \% \text{ for Dc\% and Dmax\% and 20 ms for Time}$
Unbalance			
Volts	Fluke 435 (neg. and zero seq.) Fluke 434 (neg. and zero seq.) 0.0 % to 5.0 % 0.0 % to 5.0 %	0.1 % 0.1 %	$\pm 0.15 \%$ $\pm 0.5 \%$
Current (neg. and zero seq.)	0.0 % to 20 %	0.1 %	$\pm 1 \%$
Transient capture			
Volts	cursor reading $\pm 6000 \text{ Vpk}$ rms reading 10 Vrms to 1000 Vrms	1 V 1 V	$\pm 15 \% \text{ of cursor reading}$ $\pm 2.5 \% \text{ of Vnominal}$
Minimum detect duration	5 μs		
Sampling rate	200 kS/s		
Inrush mode			
Arms (ac+dc)	0.000 kArms to 20.00 kArms ¹	0.001 Arms to 10 Arms ¹	$\pm 1 \% \text{ of meas } \pm 5 \text{ counts}$
Inrush Duration	mm:ss:mmm between 7.5 s to 30 minutes selectable	10 ms	$\pm 20 \text{ ms (Fnominal} = 50 \text{ Hz)}$
Mains Signaling⁴			
Threshold levels	Thresholds, limits and signaling duration is programable for two independent signaling frequencies		
Signaling frequency	60 Hz to 3000 Hz	0.1 Hz	
Relative V%	0 % to 100 % of	0.1 %	$\pm 0.4 \%$
Absolute V3s (3 second average)	0.0 V to 1000 V	0.1 V	$\pm 5 \% \text{ of nominal voltage}$

ANEXO 6: Fotos de medición realizada



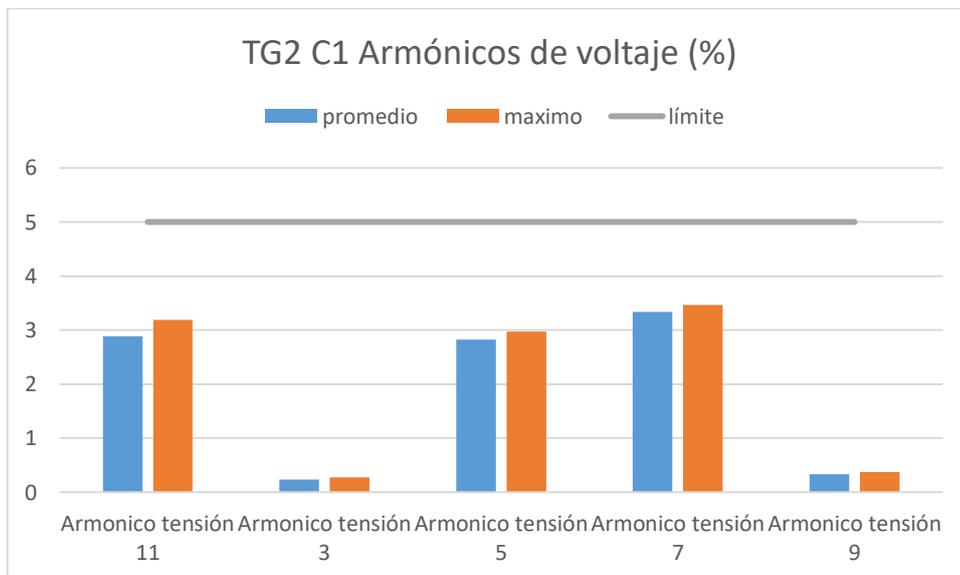
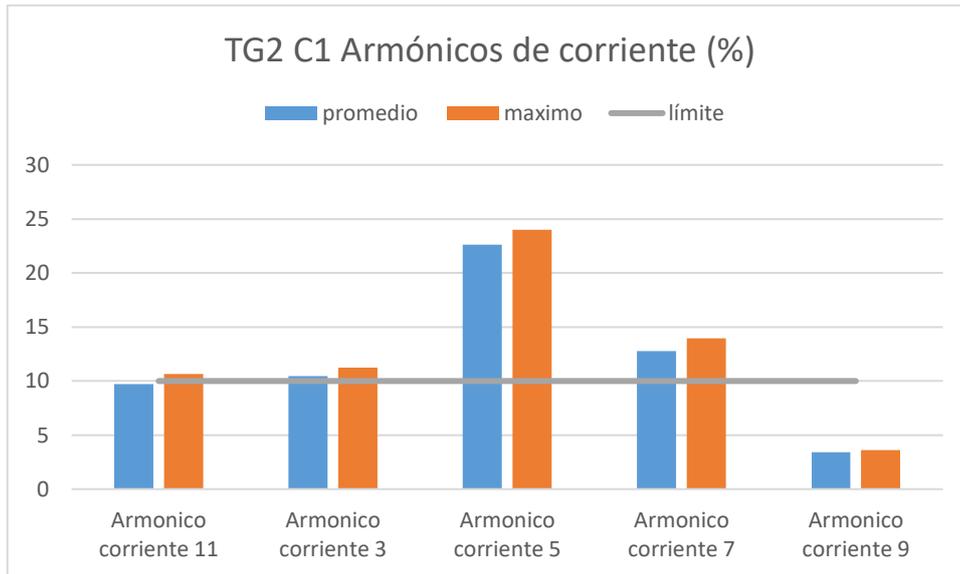
ANEXO 7: Resumen de resultados para cada interruptor del sistema TG2

TABLERO GENERAL 2 TG2



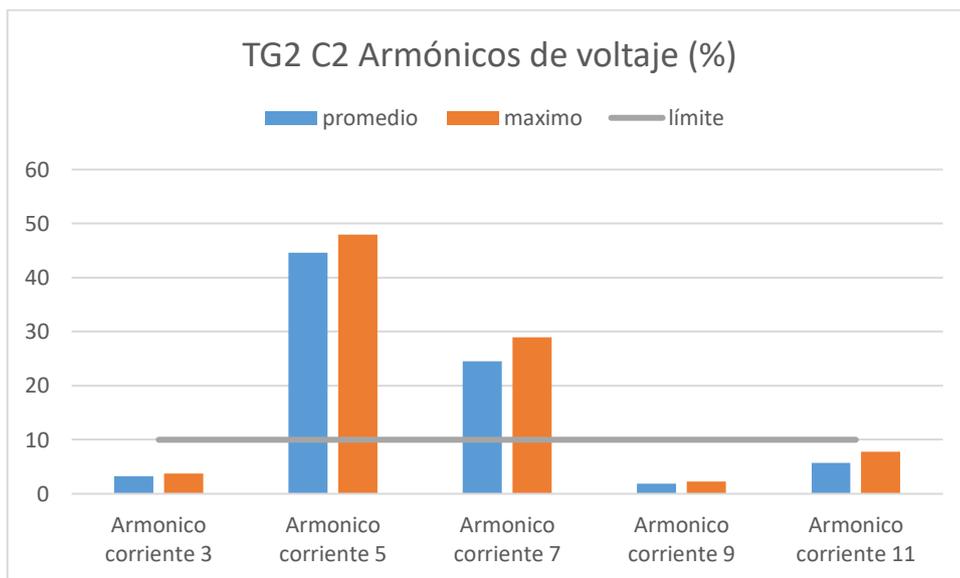
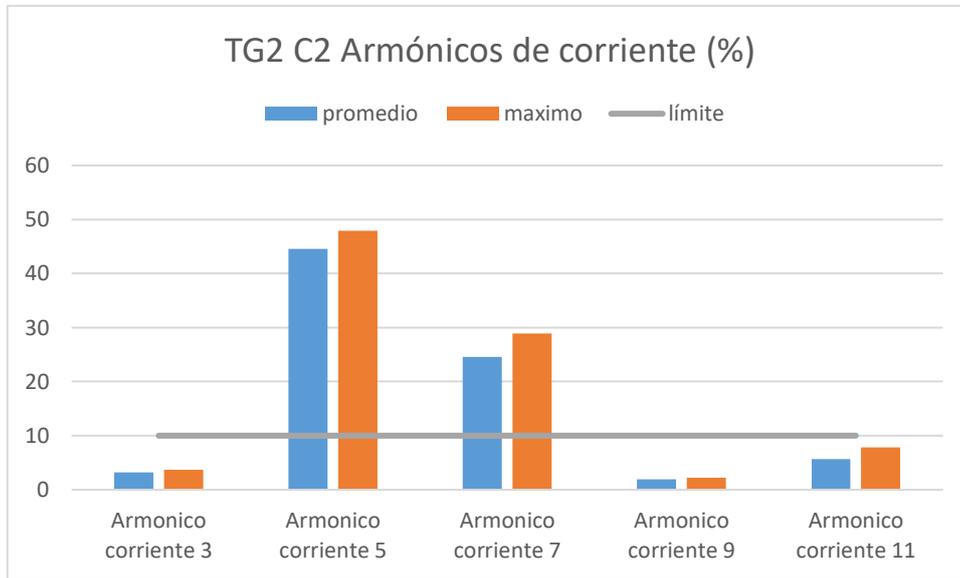
TG 2 C1

Corriente promedio (A)	0.37936508	0.43333333
factor de potencia promedio	0.19984127	0.23
THD A prom. (%)	36.825291	39.4
THD V prom. (%)	5.88449735	6.23333333



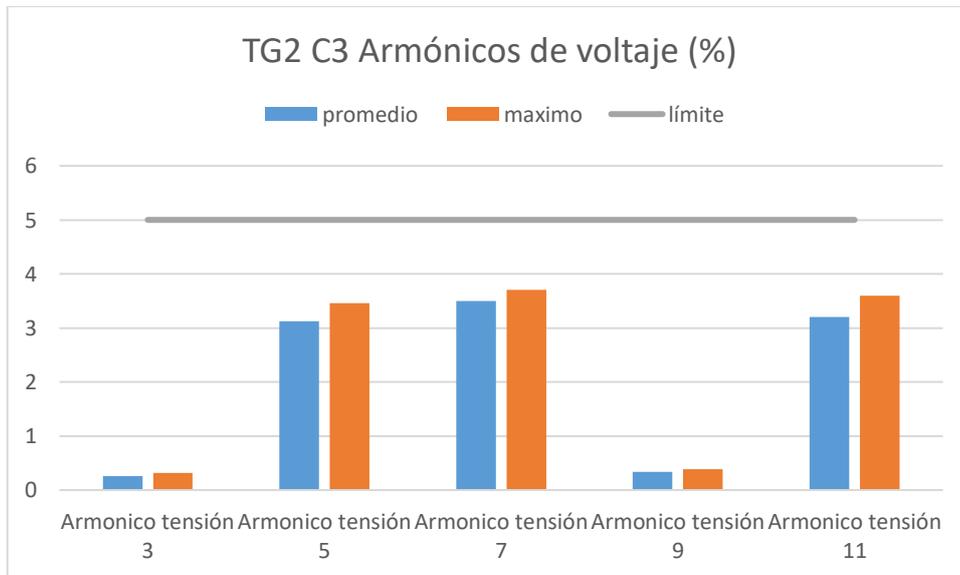
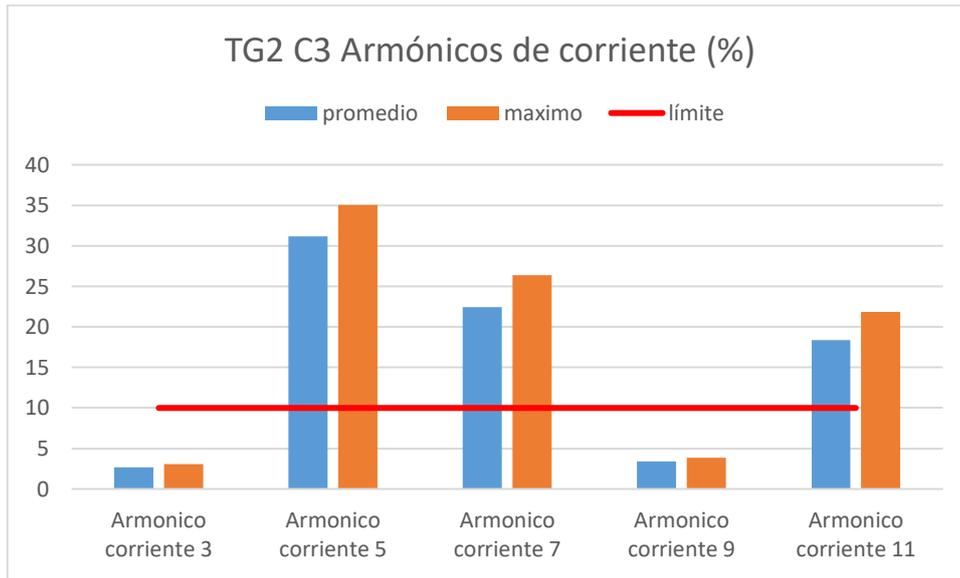
TG 2 C2

Corriente promedio (A)	122.093122	142.133333
factor de potencia promedio	0.87698413	0.89
THD A prom. (%)	51.627672	56.5866667
THD V prom. (%)	6.52518519	7.04



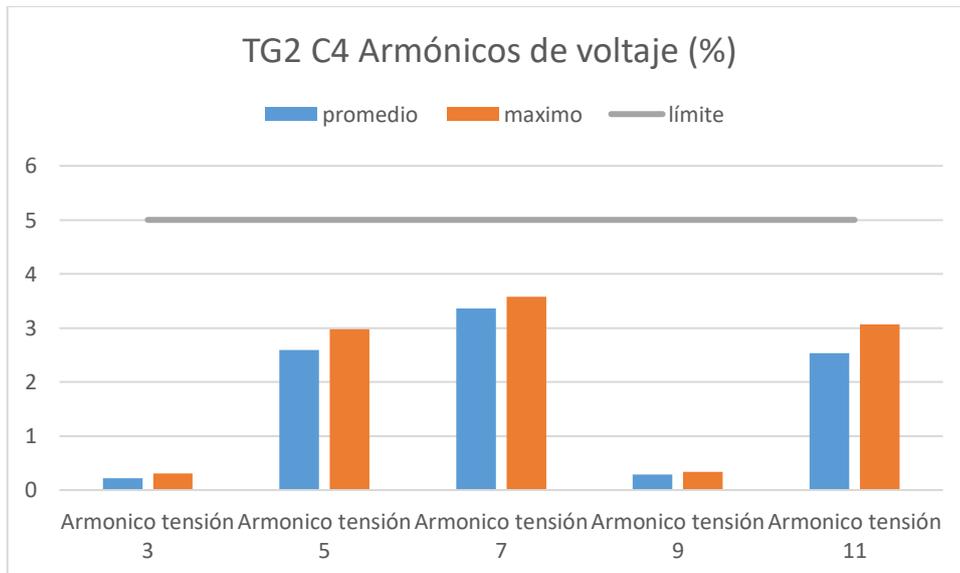
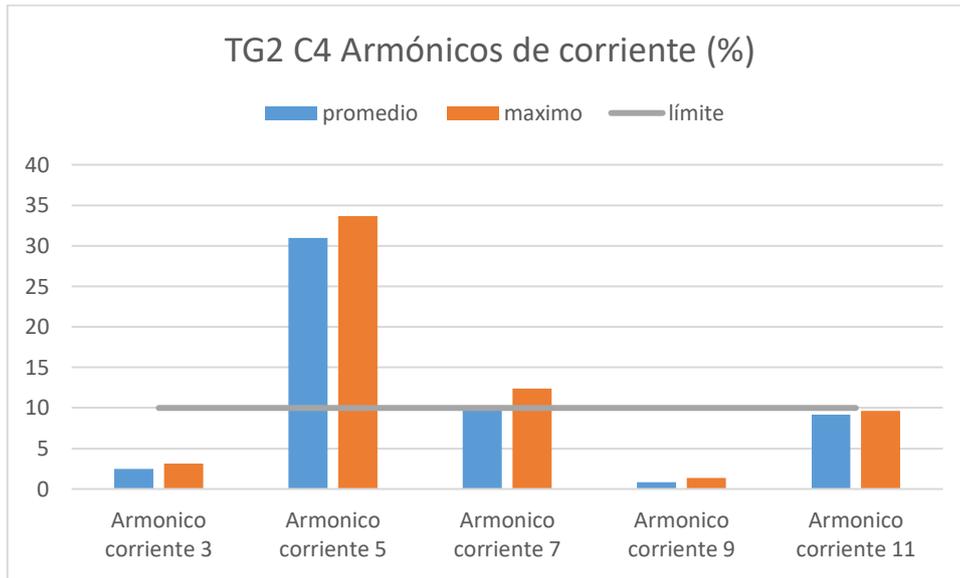
TG 2 C3

	promedio	maximo
Corriente promedio	96.3758454	107.533333
Factor de potencia promedio	0.93072464	0.96
THD V prom.	6.2915942	6.74
Armónicos de corriente	46.1309179	53.3666667



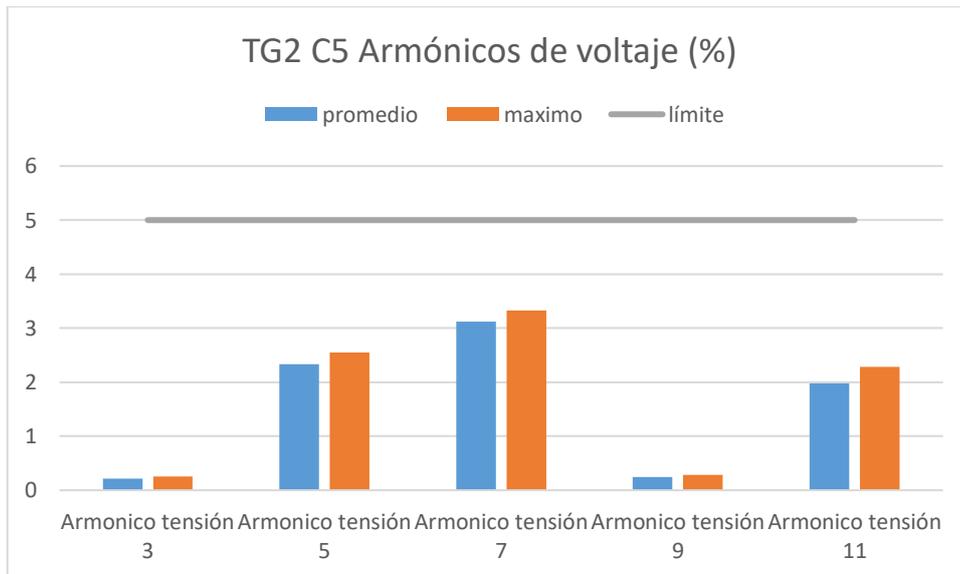
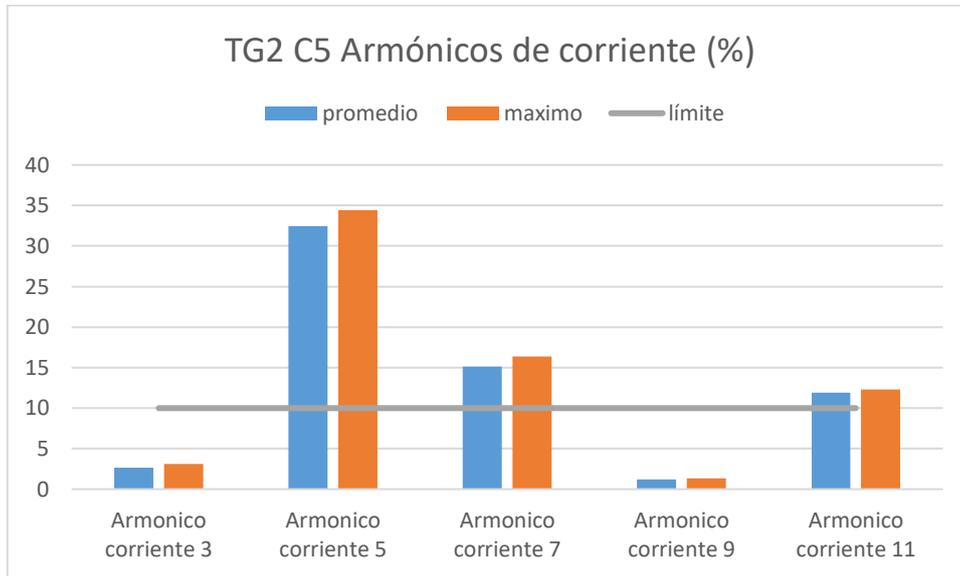
TG 2 C4

	promedio	maximo
Corriente promedio	61.7855721	80.3666667
Factor de potencia promedio	0.94552239	0.95
THD V prom.	5.42701493	6.10333333
THD A prom.	35.4524378	38.5933333



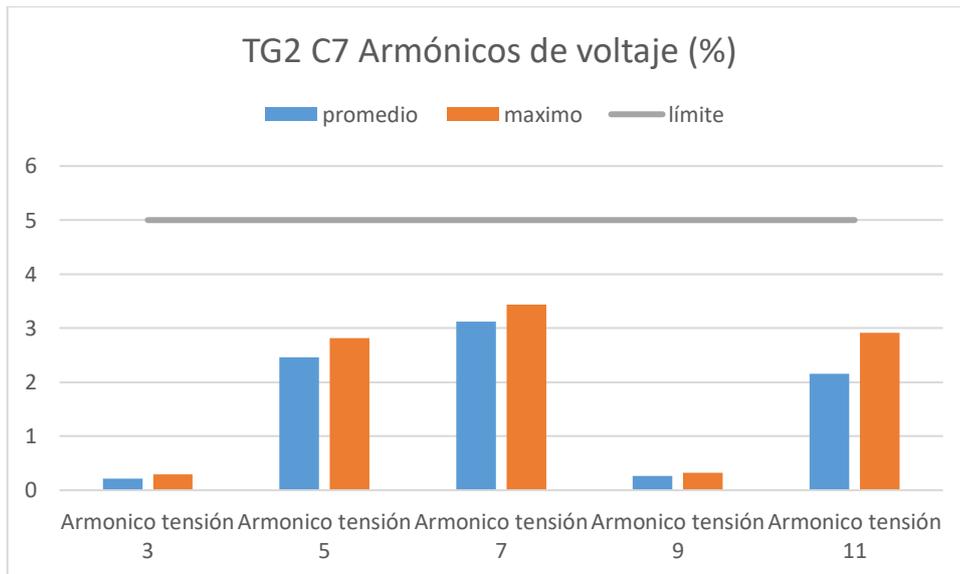
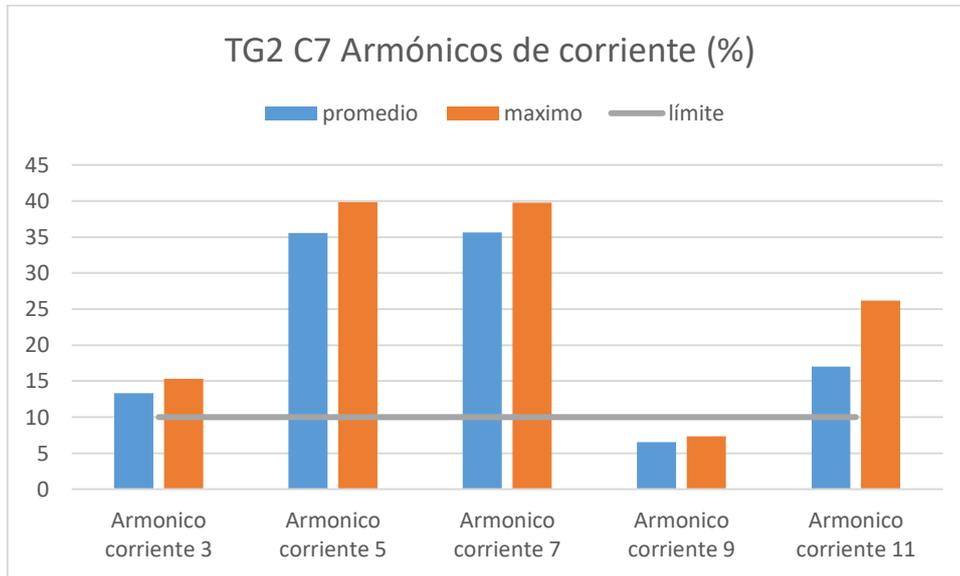
TG 2 C5

Corriente promedio (A)	59.094709	60.6333333
Factor de potencia promedio	0.94984127	0.96
THD A prom. (%)	38.9608995	41.0933333
THD V prom. (%)	4.75550265	5.14666667



TG 2 C7

Corriente promedio (A)	4.11691542	4.5
Factor de potencia promedio	0.97402985	1.03
THD A prom. (%)	65.6345771	74.2733333
THD V prom. (%)	4.98462687	5.95333333



ANEXO 8: Detalle de resultados de simulaciones realizadas

Tabla 26.

Detalle de resultados de simulaciones realizadas

Trat.	Objetivo	Nro de filtros	Posición de filtro	Tipo de filtro	Código	Descripción
1	base	0	-	-	sB-sF	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
2	Evaluar resonancia	0	-	-	cB-sin Filtro	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y sin ningún tipo de filtro armónico.
3	Evaluar resonancia	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	cB-filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
4	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	Sb- filtro notch h=5	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con filtro notch sintonizado para reducir armónico 5.
5	Reducir armónicos	2	1er nivel (bus 4)	Pasivo - notch	filtro notch h=5 h=7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y armónico 7.
6	Reducir armónicos	1	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB - f. notch h5 bus6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 conectado en 2do nivel.
7	Reducir armónicos	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	sB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
8	Reducir armónicos- corregir factor de potencia	2	2do nivel (bus 6)	Pasivo - notch	cB-f.notch h5 h7 bus 6	Sistema eléctrico con banco de condensadores conectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 2do nivel.
9	Reducir armónicos	2	3er nivel (bus 7)	Pasivo - notch	sB-f notch h5 h7 bus 7	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 2 filtros notch, sintonizados para reducir armónico 5 y 7, conectados en 3er nivel.
10	Reducir armónicos	1	1er nivel (bus 4)	Highpass	sB- Highpass bus 4	Sistema eléctrico con banco de condensadores desconectado y con 1 filtro Highpass, sintonizado para reducir armónico 5 y 7, conectado en 1er nivel.

Tratamiento 1: sB-sF

Flujo de corriente y potencia para todos los buses tratamiento 1

BUS	BUS NAME	BRANCH NAME	FLOW FROM AMPS	FLOW TO KW	FLOW TO KVAR	LOSSES KW	LOSSES KVAR
BUS 1	BUS-2	C-1	9	-286.3	-210.3	0	-0.9
BUS 2	BUS-3	TX-1	9	-283.6	-198	2.7	12.3
	BUS-1	C-1	9	286.3	209.4	0	-0.9
BUS 3	BUS-2	TX-1	513	286.3	210.3	2.7	12.3
	BUS-4	BWY-1	513	-283.2	-197.7	0.4	0.2
BUS-4	TG1	C-2	149	-82.2	-57.4	0	0.1
	BUS-3	BWY-1	513	283.6	198	0.4	0.2
	BUS-6	BWY-2	364	-200.7	-140.2	0.2	0.1
	BUS-8	BWY-4	0	0	0	0	0
BUS-6	TG2 C1	C-3	0	-0.2	-0.1	0	0
	TG2 C2	C-4	127	-70.1	-48.9	0	0.1
	TG2 C4	C-5	69	-37.9	-26.5	0	0
	TG2 C5	C-6	66	-36.6	-25.5	0	0
	TG2 C7	C-7	6	-3.2	-2.2	0	0
	BUS-4	BWY-2	364	200.9	140.3	0.2	0.1
	BUS-7	BWY-3	96	-52.7	-36.8	0	0
BUS-7	TG2 C3 C1	C-8	32	-17.8	-12.4	0	0
	TG2 C3 C2	C-9	1	-0.7	-0.5	0	0
	TG2 C3 C3	C-10	9	-5.1	-3.5	0	0
	TG2 C3 C5	C-11	1	-0.8	-0.5	0	0
	TG2 C3 C8	C-12	6	-3.5	-2.5	0	0
	TG2 C3 C9	C-13	15	-0.8	-5.6	0	0
	TG2 C3 C10	C-14	24	-13	-9.1	0	0
	TG2 C3 C11	C-15	1	-0.5	-0.4	0	0
	TG2 C3 C14	C-16	6	-3.3	-2.3	0	0
	BUS-6	BWY-3	96	52.7	36.8	0	0
BUS-8	BUS-4	BWY-4	0	0	0	0	

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 1

				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	7.6%	1.003	1.139	1.0000	0.0046	0.0525	0.0432	0.0056	0.0337
BUS-4	7.8%	1.003	1.142	1.0000	0.0047	0.0536	0.0440	0.0057	0.0344
BUS-6	7.9%	1.003	1.145	1.0000	0.0047	0.0545	0.0448	0.0058	0.0350
BUS-7	8.0%	1.003	1.146	1.0000	0.0048	0.0548	0.0451	0.0058	0.0352
BUS-8	7.8%	1.003	1.142	1.0000	0.0047	0.0536	0.0440	0.0057	0.0344

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 1

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
ISWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	18.7%	1.017	1.0000	0.0224	0.1549	0.0910	0.0091	0.0452
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Winding	25.9%	1.033	1.0000	0.0310	0.2147	0.1261	0.0127	0.0627
Utility Nam	1.3%	1.000	1.0000	0.0016	0.0107	0.0063	0.0006	0.0031

Tratamiento 2: cB-sin Filtro

Flujo de corriente y potencia para todos los buses tratamiento 2

BUS	BUS NAME	BRANCH NAME	FLOW FROM AMPS	FLOW TO KW	FLOW TO KVAR	LOSSES KW	LOSSES KVAR
BUS 1	BUS-2	C-1	8	-285.3	-80.3	0	-0.9
BUS 2	BUS-3	TX-1	8	-283.4	-71.7	1.9	8.6
	BUS-1	C-1	8	285.3	79.4	0	-0.9
BUS 3	BUS-2	TX-1	428	285.3	80.3	1.9	8.6
	BUS-4	BWY-1	428	-283.1	-71.5	0.3	0.2
BUS-4	TG1	C-2	147	-82.2	-57.4	0	0.1
	BUS-3	BWY-1	428	283.4	71.7	0.3	0.2
	BUS-6	BWY-2	359	-200.7	-140.2	0.2	0.1
	BUS-8	BWY-4	0	0	0	0	0
	TG2 C1	C-3	0	-0.2	-0.1	0	0
	TG2 C2	C-4	125	-70.1	-48.9	0	0.1
	TG2 C4	C-5	68	-37.9	-26.5	0	0
BUS-6	TG2 C5	C-6	65	-36.6	-25.5	0	0
	TG2 C7	C-7	6	-3.2	-2.2	0	0
BUS-7	BUS-4	BWY-2	359	200.9	140.3	0.2	0.1
	BUS-7	BWY-3	94	-52.7	-36.8	0	0
	TG2 C3 C1	C-8	32	-17.8	-12.4	0	0
	TG2 C3 C2	C-9	1	-0.7	-0.5	0	-0.8
	TG2 C3 C3	C-10	9	-5.1	-3.5	0	0
	TG2 C3 C5	C-11	1	-0.8	-0.5	0	0
	TG2 C3 C8	C-12	6	-3.5	-2.5	0	0
	TG2 C3 C9	C-13	14	-8	-5.6	0	0
	TG2 C3 C10	C-14	23	-13	-9.1	0	0
	TG2 C3 C11	C-15	1	-0.5	-0.4	0	0
BUS-8	TG2 C3 C14	C-16	6	-3.3	-2.3	0	0
	BUS-6	BWY-3	94	52.7	36.8	0	0
BUS-8	BUS-4	BWY-4	0	0	0	0	

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 2

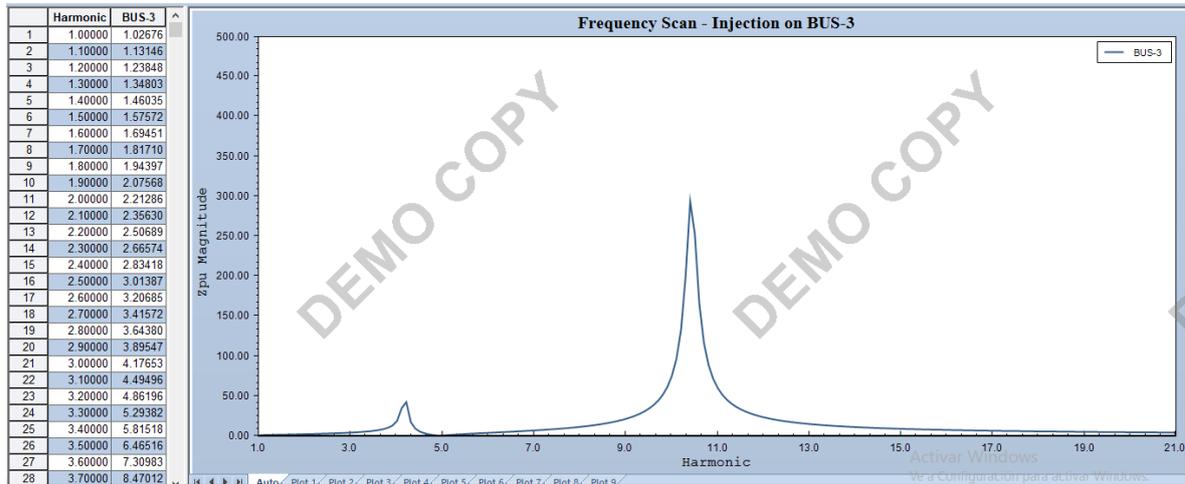
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	17.8%	1.016	1.350	1.0000	0.0052	0.7760	0.1178	0.0901	0.0591
BUS-4	18.1%	1.016	1.357	1.0000	0.0053	0.0792	0.1203	0.0919	0.0603
BUS-6	18.2%	1.016	1.358	1.0000	0.0053	0.0802	0.1211	0.0919	0.0597
BUS-7	18.2%	1.016	1.359	1.0000	0.0054	0.0805	0.1214	0.0980	0.0595
BUS-8	18.1%	1.016	1.357	1.0000	0.0053	0.0792	0.1203	0.0919	0.0603

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 2

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
ISWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	37.8%	1.069	1.0000	0.0530	0.2291	0.2486	0.1478	0.0794
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0069	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Winding	52.4%	1.129	1.0000	0.0351	0.3174	0.3444	0.2048	0.1100
Utility Nam	2.6%	1.000	1.0000	0.0018	0.0159	0.0172	0.0102	0.0055

Tratamiento 3: cB-filtro notch h=5

Diagrama de impedancia tratamiento 3



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 3

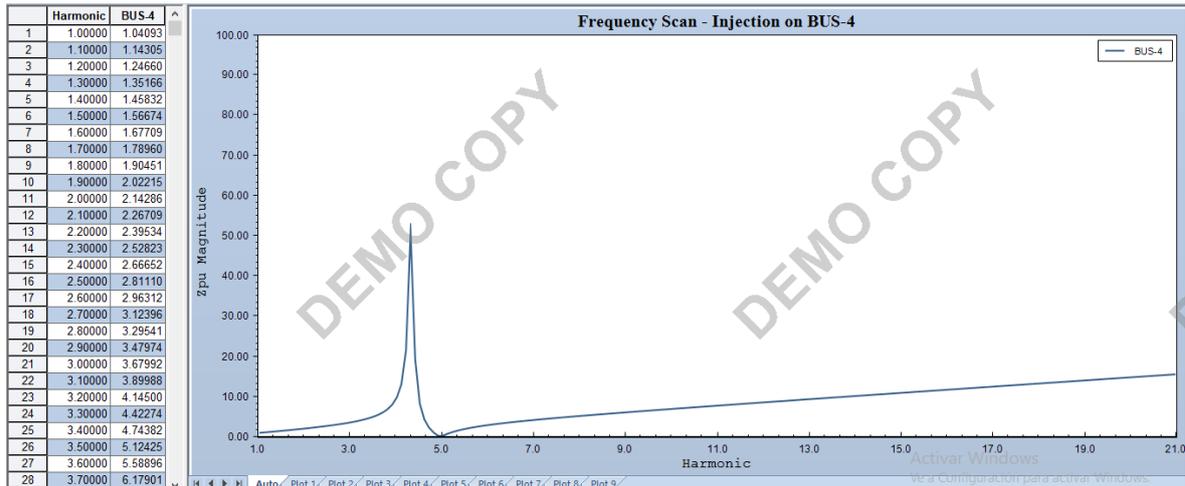
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	14.7%	1.011	1.236	1.0000	0.0067	0.0248	0.0527	0.0182	0.1333
BUS-4	15.0%	1.011	1.241	1.0000	0.0069	0.0253	0.0538	0.0186	0.1360
BUS-6	15.0%	1.011	1.242	1.0000	0.0070	0.0263	0.0546	0.0187	0.1355
BUS-7	15.0%	1.011	1.242	1.0000	0.0070	0.0265	0.0549	0.0187	0.1352
BUS-8	14.9%	1.011	1.238	1.0000	0.0069	0.0246	0.0533	0.0185	0.1351

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 3

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	22.8%	1.026	1.0000	0.0331	0.0732	0.1112	0.0299	0.1790
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0174
BWY-4	13.1%	1.009	1.0000	0.0069	0.1055	0.0504	0.0106	0.0569
2 Winding T	31.5%	1.049	1.0000	0.0459	0.1014	0.1541	0.0415	0.2480
Utility Name	1.6%	1.000	1.0000	0.0023	0.0051	0.0077	0.0021	0.0124

Tratamiento 4: Sb- filtro notch h=5

Diagrama de impedancia tratamiento 4



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 4

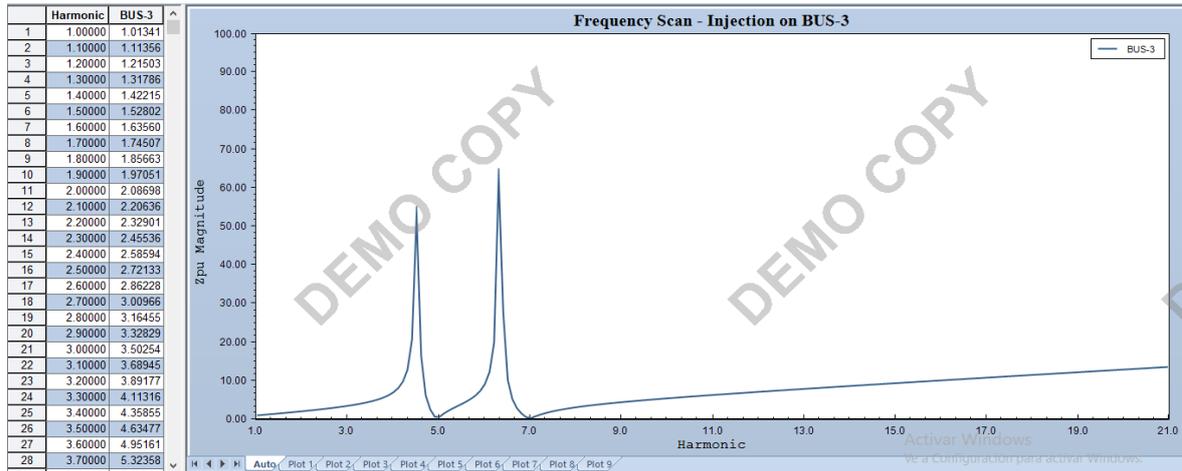
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	4.5%	1.001	1.087	1.0000	0.0058	0.0215	0.2970	0.0041	0.0256
BUS-4	4.6%	1.001	1.088	1.0000	0.0059	0.0220	0.0303	0.0042	0.0261
BUS-6	4.7%	1.001	1.091	1.0000	0.0060	0.0229	0.0311	0.0043	0.0267
BUS-7	4.8%	1.001	1.092	1.0000	0.0060	0.0232	0.0314	0.0043	0.0269
BUS-8	4.6%	1.001	1.087	1.0000	0.0059	0.0213	0.0300	0.0042	0.0259

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 4

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	10.0%	1.005	1.0000	0.0283	0.0635	0.0626	0.0067	0.0343
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	9.7%	1.005	1.0000	0.0059	0.0915	0.0284	0.0024	0.0109
2 Winding Tr	13.8%	1.010	1.0000	0.0392	0.0880	0.0868	0.0093	0.0475
Utility Name	0.7%	1.000	1.0000	0.0020	0.0044	0.0043	0.0005	0.0024

Tratamiento 5: filtro notch h=5 h=7

Diagrama de impedancia tratamiento 5



Fuente: EasyPower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 5

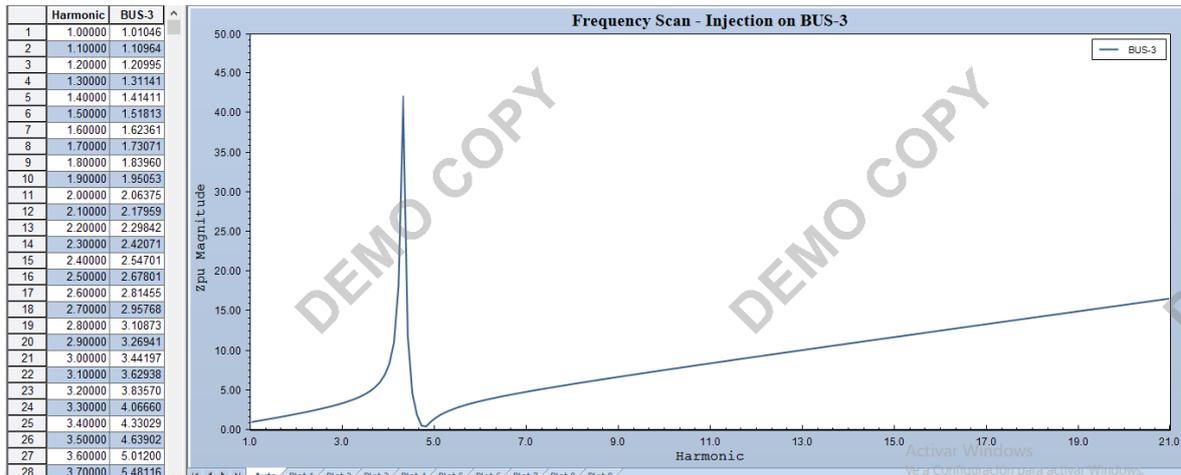
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	2.1%	1.000	1.034	1.0000	0.0054	0.0056	0.0006	0.0028	0.0195
BUS-4	2.2%	1.000	1.035	1.0000	0.0056	0.0057	0.0006	0.0028	0.0199
BUS-6	2.3%	1.000	1.037	1.0000	0.0056	0.0068	0.0015	0.0029	0.0205
BUS-7	2.3%	1.000	1.038	1.0000	0.0057	0.0071	0.0018	0.0029	0.0207
BUS-8	2.1%	1.000	1.033	1.0000	0.0056	0.0048	0.0006	0.0028	0.0196

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 5

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	4.1%	1.001	1.0000	0.0268	0.0166	0.0013	0.0045	0.0262
BWY-2	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	16.7%	1.014	1.0000	0.0044	0.1384	0.0905	0.0046	0.0190
2 Winding Tr	5.7%	1.002	1.0000	0.0371	0.0230	0.0018	0.0063	0.0363
Utility Name	0.3%	1.000	1.0000	0.0019	0.0012	0.0001	0.0003	0.0018

Tratamiento 6: sB - f. notch h5 bus6

Diagrama de impedancia tratamiento 6



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 6

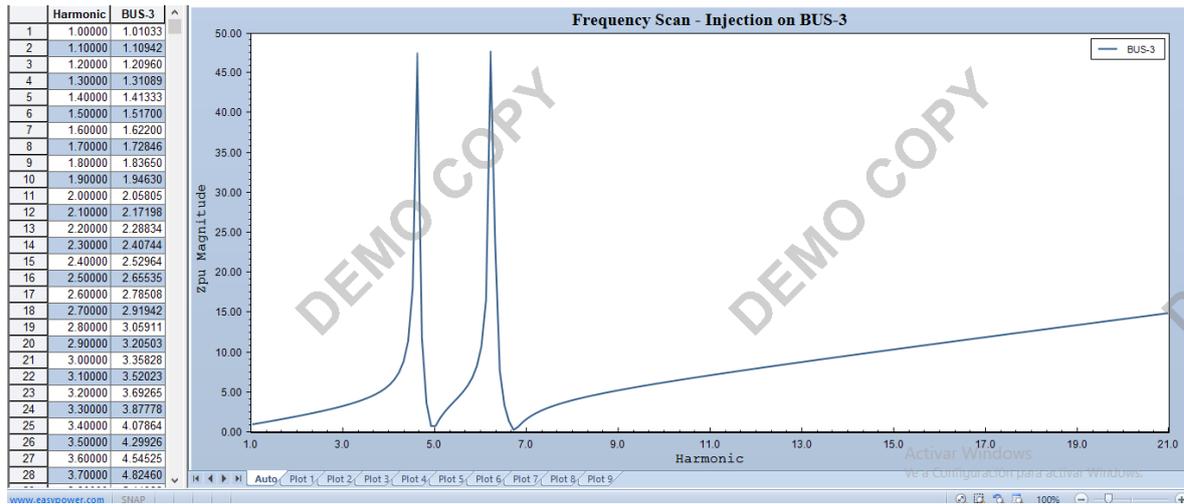
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	4.1%	1.001	1.078	1.0000	0.0053	0.0170	0.0271	0.0040	0.0250
BUS-4	4.2%	1.001	1.080	1.0000	0.0054	0.0173	0.0277	0.0041	0.0256
BUS-6	4.3%	1.001	1.082	1.0000	0.0055	0.0178	0.0282	0.0041	0.0260
BUS-7	4.3%	1.001	1.082	1.0000	0.0055	0.0175	0.0285	0.0041	0.0262
BUS-8	4.2%	1.001	1.080	1.0000	0.0054	0.0173	0.0277	0.0041	0.0256
BUS-9	4.3%	1.001	1.082	1.0000	0.0055	0.0191	0.0278	0.0041	0.0258

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 6

			Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
USWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	8.7%	1.004	1.0000	0.0259	0.0501	0.0573	0.0065	0.0336
BWY-2	9.0%	1.004	1.0000	0.0206	0.0682	0.0470	0.0044	0.0277
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-4	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Winding Tr	12.1%	1.007	1.0000	0.0359	0.0694	0.0793	0.0090	0.0466
Utility Name	0.6%	1.000	1.0000	0.0018	0.0035	0.0040	0.0005	0.0023

Tratamiento 7: sB-f.notch h5 h7 bus 6

Diagrama de impedancia tratamiento 7



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 7

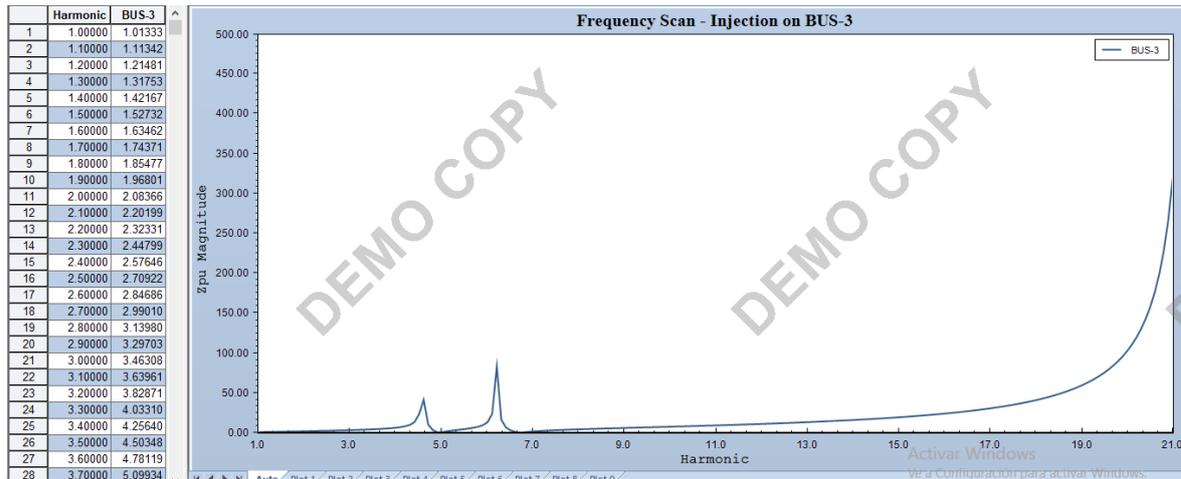
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
				Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	4.4%	1.001	1.076	1.0000	0.0052	0.0364	0.0096	0.0032	0.0219
BUS-4	4.5%	1.001	1.078	1.0000	0.0053	0.0372	0.0098	0.0033	0.0223
BUS-6	4.6%	1.001	1.079	1.0000	0.0054	0.0380	0.0099	0.0033	0.0227
BUS-7	4.6%	1.001	1.080	1.0000	0.0055	0.0378	0.0103	0.0034	0.0299
BUS-8	4.5%	1.001	1.078	1.0000	0.0053	0.0372	0.0098	0.0033	0.0223
BUS-9	4.7%	1.001	1.080	1.0000	0.0054	0.0398	0.0093	0.0033	0.0224

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 7

JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Frecuencia						
			60	180	300	420	540	660	
			I (pu-eq)						
				Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	11.6%	1.007	1.0000	0.0256	0.1074	0.0203	0.0053	0.0294	
BWY-2	13.0%	1.008	1.0000	0.0202	0.1255	0.0101	0.0031	0.0234	
BWY-3	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175	
BWY-4	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
BWY-5	27.1%	1.036	1.0000	0.0032	0.2612	0.0707	0.0038	0.0159	
2 Winding T	16.1%	1.013	1.0000	0.0355	0.1489	0.0282	0.0074	0.0407	
Utility Nam	0.8%	1.000	1.0000	0.0018	0.0074	0.0014	0.0004	0.0020	

Tratamiento 8: cB-f.notch h5 h7 bus 6

Diagrama de impedancia tratamiento 8



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 8

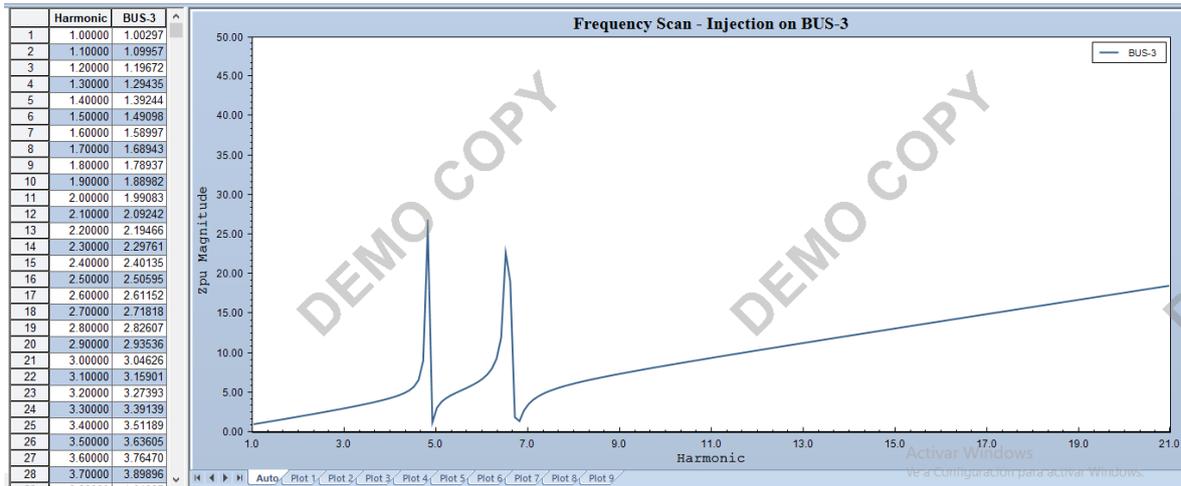
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
				Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	3.2%	1.001	1.055	1.0000	0.0054	0.0069	0.0101	0.0038	0.0291
BUS-4	3.3%	1.001	1.056	1.0000	0.0055	0.0071	0.0103	0.0039	0.0297
BUS-6	3.3%	1.001	1.057	1.0000	0.0056	0.0071	0.0104	0.0039	0.0300
BUS-7	3.4%	1.001	1.058	1.0000	0.0056	0.0073	0.0107	0.0040	0.0302
BUS-8	3.3%	1.001	1.056	1.0000	0.0055	0.0071	0.0103	0.0039	0.0297
BUS-9	3.3%	1.001	1.055	1.0000	0.0056	0.0061	0.0097	0.0039	0.0297

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 8

JSWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
			Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	5.6%	1.002	1.0000	0.0265	0.0204	0.0213	0.0063	0.0390
BWY-4	2.9%	1.000	1.0000	0.0204	0.0008	0.0079	0.0026	0.0190
BWY-5	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-8	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BWY-9	15.6%	1.012	1.0000	0.0034	0.1361	0.0729	0.0044	0.0203
2 Winding T	7.8%	1.003	1.0000	0.0367	0.0283	0.0295	0.0087	0.0541
Utility Name	0.4%	1.000	1.0000	0.0018	0.0014	0.0015	0.0004	0.0027

Tratamiento 9: sB-f notch h5 h7 bus 7

Diagrama de impedancia tratamiento 9



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 9

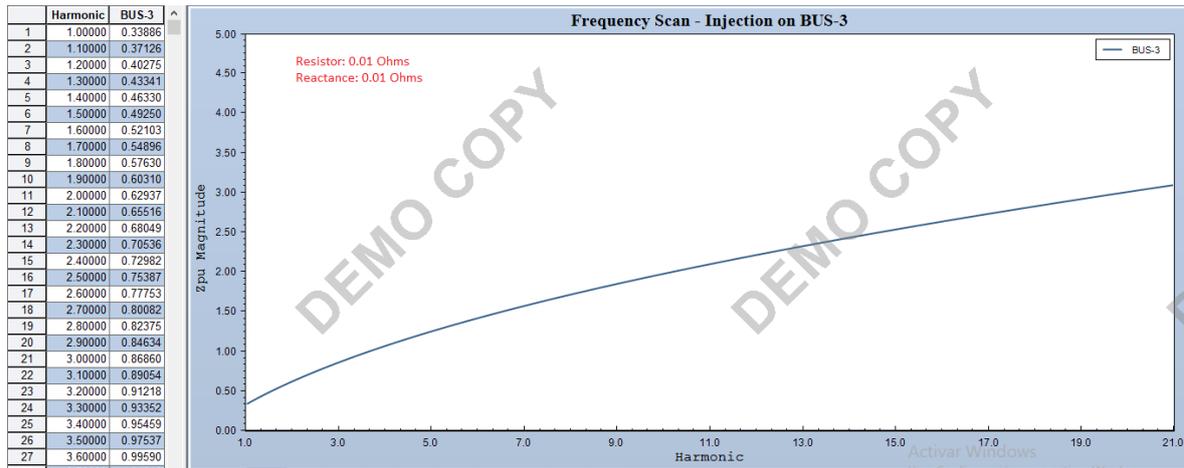
				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	7.6%	1.003	1.139	1.0000	0.0046	0.0525	0.0432	0.0056	0.0337
BUS-4	7.8%	1.003	1.142	1.0000	0.0047	0.0536	0.0440	0.0057	0.0344
BUS-6	7.9%	1.003	1.145	1.0000	0.0047	0.0545	0.0448	0.0058	0.0350
BUS-7	8.0%	1.003	1.146	1.0000	0.0048	0.0548	0.0451	0.0058	0.0352
BUS-8	7.8%	1.003	1.142	1.0000	0.0047	0.0536	0.0440	0.0057	0.0344
BUS-9	7.9%	1.003	1.145	1.0000	0.0047	0.0545	0.0448	0.0058	0.0350
BUS-11	8.0%	1.003	1.146	1.0000	0.0048	0.0548	0.0451	0.0058	0.0352

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 9

				Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				I (pu-eq)					
USWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11	
BWY-1	18.7%	1.017	1.0000	0.0224	0.1549	0.0910	0.0091	0.0452	
BWY-4	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393	
BWY-5	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175	
BWY-8	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
BWY-9	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
BWY-10	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
2 Winding Tra	25.9%	1.033	1.0000	0.0310	0.2147	0.1261	0.0127	0.0627	
Utility Name:	1.3%	1.000	1.0000	0.0016	0.0107	0.0063	0.0006	0.0031	

Tratamiento 10: sB-Highpass bus 4

Diagrama de impedancia tratamiento 10



Fuente: Easypower

Armónicos de voltaje (%) para todos los buses tratamiento 10

BUS NAME	VTHD (%)	VRSS (pu)	VSUM (pu)	Frecuencia					
				60	180	300	420	540	660
				V (pu)					
				Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BUS-1	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-2	0.0%	1.000	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BUS-3	2.9%	1.000	1.052	1.0000	0.0017	0.0199	0.0161	0.0021	0.0123
BUS-4	2.9%	1.000	1.053	1.0000	0.0018	0.0203	0.0165	0.0021	0.0125
BUS-6	3.1%	1.000	1.056	1.0000	0.0019	0.0214	0.0174	0.0022	0.0132
BUS-7	3.1%	1.000	1.057	1.0000	0.0019	0.0217	0.0177	0.0022	0.0135
BUS-8	2.8%	1.000	1.051	1.0000	0.0017	0.0194	0.0158	0.0020	0.0120
BUS-9	3.1%	1.000	1.056	1.0000	0.0019	0.0214	0.0174	0.0022	0.0132
BUS-11	3.1%	1.000	1.057	1.0000	0.0019	0.0217	0.0177	0.0022	0.0135

Armónicos de corriente (%) para todos los buses tratamiento 10

USWAY NAM	ITHD (%)	IRSS (pu)	Frecuencia					
			60	180	300	420	540	660
			I (pu-eq)					
			Harmonic 1	Harmonic 3	Harmonic 5	Harmonic 7	Harmonic 9	Harmonic 11
BWY-1	7.0%	1.002	1.0000	0.0085	0.0586	0.0340	0.0034	0.0165
BWY-4	16.4%	1.013	1.0000	0.0170	0.1366	0.0808	0.0070	0.0393
BWY-5	5.3%	1.001	1.0000	0.0089	0.0378	0.0319	0.0029	0.0175
BWY-8	12.0%	1.007	1.0000	0.0140	0.0989	0.0591	0.0060	0.0303
BWY-9	0.0%	1.000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Winding Tr	9.8%	1.005	1.0000	0.0118	0.0812	0.0472	0.0047	0.0229
Utility Name	0.5%	1.000	1.0000	0.0006	0.0041	0.0024	0.0002	0.0011

ANEXO 9: Cotizaciones de proveedores de filtros armónicos



Arturo Alatrística Corrales <arturo.alatrística@eficienciaenergetica.com.pe>

proyecto correccion armonicos Michell

FABRICIO RENATO MOSCOSO ALARCON <fabricio.moscoso@schneider-electric.com> 23 de febrero de 2018, 8:09
Para: Arturo Alatrística Corrales <arturo.alatrística@eficienciaenergetica.com.pe>
Cc: Cecilio Vilca Begazo <gerencia@mecatronic.com.pe>

Estimado Arturo

Un gusto saludarte, disculpa la demora en poderte contestar este correo, según la información enviada y las visitas realizadas a Michell se recomienda lo siguiente:

- Se verifica la existencia de corriente armónicas en su mayoría la 3ra y la 5ta, esto debido al uso de equipos electrónicos como pueden ser fluorescentes led, variadores, etc. Se presentan dos caminos.
- El primero es para la mitigación de armónicos y no afecten a los equipos sensibles como pueden ser el banco de condensadores, PLCs importantes del proceso, funcionamiento inadecuado de los tableros en baja tensión se recomienda:
 1. En los variadores grandes de la planta implementar reactancias de líneas.
 2. Banco de condensadores de la planta tanto en 380V como en 220V implementar reactancias de línea.
- El segundo con la información brindada se dimensiono la solución de utilizar un filtro activos de Potencia Accusine PCS+ de 300A, 380v-480vac de 60HZ (REF. PCSP300D5N12), este equipo mitiga todos los armónicos en la red, es decir las anula por completo y en planta se tendría un corriente limpia de armónico, precio de venta referencias es de USD 45000, adjunto información sobre los filtros.

Atte.

Fabricio Moscoso Alarcon
Responsable Comercial Sur
Partner Business
Schneider Electric

D (054) 250488
M (051) 959743277
E fabricio.moscoso@schneider-electric.com
Customer Care 0801-00-091

Av. Bolognesi 303, Yanahuara
Arequipa
Peru



[El texto citado está oculto]

This email has been scanned by the Symantec Email Security.cloud service.

AccuSine PCS+ Datasheets 160408.pdf
4049K



Arequipa, 21 de Febrero del 2020

Nº de Cotización: COV-200221_01

Señores:
CEEP S.A.C.
Atención: Sr. Ing. Arturo Altrista

Presente.-

De nuestra consideración:

Nos es grato dirigirnos a usted con la finalidad de hacerle llegar nuestra propuesta técnico-económica correspondiente a la implementación de un filtro de armónicas pasivo para el circuito TG-02 de acuerdo con el diagrama unifilar requerido por el usuario.

Incluye el suministro, ejecución, puesta en marcha e instalación.

Agradeciendo la atención a la presente y prestos a cualquier consulta sobre el particular, quedamos de ustedes.

Atentamente,



Ing. Andriá R. Márquez Huertas
Automation Specialist / CEO

- +51 946 330 481
- andres.marquez@sos-aut.com
- Urb. ADEPA D-7, J.L.B. y R.
Arequipa, Perú

+51 946 330 481

andres.marquez@sos-aut.com

Urb. ADEPA B-7, J.L.B. y R.
Arequipa, Perú

IMPLEMENTACION DE UN FILTRO PASIVO PARA EL CIRCUITO TG-02

La presente oferta ha sido elaborada tomando en consideración información brindada por el cliente vía correo electrónico.

El presente servicio comprende lo siguiente:

- Suministro de filtro pasivo para el circuito TG-02.

1. ANTECEDENTES:

El cliente Michell de la ciudad de Arequipa ha realizado mediciones de calidad de energía y armónicas en la que se ha podido determinar en uno de los circuitos denominado TG-02 niveles de armónicas de corriente alta por encima de lo habitual llegando a valores del 32%.

Es necesario bajo este comportamiento eléctrico crítico el poder mitigar el daño y para este caso vamos a recomendar un filtro pasivo de impedancia adaptativa que será instalado en el circuito donde se genera la mayor incidencia de armónicas de corriente controlando la perturbación y evitando que se propague a otras líneas que estén conectadas en el mismo PCC.

2. LA RELEVANCIA DE LAS ARMONICAS EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS.

En los últimos años, el crecimiento sustancial de los dispositivos electrónicos, destinados a equipar nuestras instalaciones, ha dado lugar a un cambio significativo de los tipos de cargas conectadas al sistema de distribución eléctrico.

No ha pasado mucho tiempo desde que la única preocupación que había para utilizar la energía eléctrica en nuestros hogares, establecimientos y centros productivos era simplemente tener tensión, sin importarnos otra cosa que los diferentes equipos y dispositivos que teníamos funcionaran.

Estos dispositivos, en la actualidad, están equipados con una electrónica que de algún modo u otro consigue proporcionarnos un mayor rendimiento de las tareas, procesos productivos o actividades que desarrollamos. Todo el mundo utiliza ordenadores para uso personal, o para el proceso y control de cualquier sistema de producción con variadores de velocidad, aires acondicionados, ascensores que se ajustan lentamente al aproximarse a su planta de destino, etc. Estos dispositivos que están equipados con rectificadores, moduladores, etc., distorsionan la forma de onda de la corriente para su correcto funcionamiento.

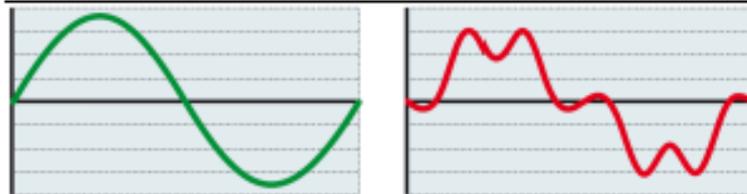


Fig. 1. Forma de onda ideal y forma de onda distorsionada

Estas perturbaciones se traducen en costes que difícilmente podemos apreciar o valorar a simple vista, pero es importante analizarlos. Estos costes podemos diferenciarlos como:

- Costos Técnicos
- Costos Económicos

2.1 COSTOS TÉCNICOS.

Los costos técnicos son todos aquellos que comportan una pérdida de rendimiento de nuestra instalación.

- Pérdida de capacidad en líneas de distribución de energía.
- Sobrecarga de transformadores.
- Sobrecarga de conductores.
- Caídas de Tensión.
- Desclasificación de los transformadores.
- Pérdidas por efecto Joule en líneas y máquinas.
- Pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas.

Normalmente, todos los costos técnicos derivan en costos económicos. Aquí se halla la importancia del control de nuestra instalación.

2.2 COSTOS ECONÓMICOS

Los costos económicos son aquellos que podemos cuantificar económicamente, aunque en algunos casos puede ser difícil. Estos costos los podemos dividir en costos visibles y costos ocultos.

Costos Visibles	Costos ocultos
➢ Mayor consumo eléctrico.	➢ Pérdidas de distribución.
➢ Puntas de consumo eléctrico.	➢ Pérdidas de potencia y energía (Por efecto joule y magnéticas)
➢ Recargo o pago de energía reactiva.	➢ Ampliación de instalaciones.
	➢ Paradas de procesos productivos.

Todos estos fenómenos pueden encontrarse en mayor o menor proporción en función de la propia instalación y de las cargas conectadas.

3. QUIEN GENERA LAS ARMONICAS.

Las armónicas son producidas por cargas no-líneas que absorben corriente no-sinusoidal. Las cargas más comunes, tanto en entornos industriales como domésticos, son las siguientes:

- Variadores de velocidad/frecuencia
- Lámparas de descarga (Vapor de mercurio, de sodio, bajo consumo, fluorescentes, etc.)
- Rectificadores
- Convertidores C.A. / C.C.
- Soldadura por arco
- Hornos de inducción
- UPS's.
- Ordenadores, etc.



+51 946 330 481



andres.marquez@sos-aut.com



Urb. ADEPA B-7, J.L.B. y R. Arequipa, Perú

La presente oferta considera e incluye:



4. SOLUCIONES

Tras el diagnóstico y la evaluación de las perturbaciones pasamos al tratamiento o solución. Hemos de buscar siempre un equilibrio entre la solución técnica y la económica. La solución técnica ideal sería la de filtrar directamente en las cargas distorsionantes (reactancias LR), evitando la propagación de las corrientes armónicas hacia otras cargas e instalación, y una mayor caída de tensión armónica que provocará la distorsión de la onda de tensión y corriente.

ESTRATEGIAS DE FILTRADO

Cuadro General	↔	<ul style="list-style-type: none"> Reducir el nivel de THD (% que se genera hacia la red (punto de acoplamiento común) Disminuir la desaturación del transformador
Cuadros Secundarios	↔	<ul style="list-style-type: none"> Reducir el valor eficaz de la corriente en las líneas de la instalación sin pérdida de potencia Reducción de pérdidas Circulación de corrientes distorsionantes hacia otros equipos Ligera atenuación de THD (%)
Filtrado Individual	↔	<ul style="list-style-type: none"> Reducir la corriente distorsionante y eficaz en el punto donde se genera Reducción de las pérdidas en todo el sistema Circulación de corrientes distorsionantes hacia otros equipos Mayor atenuación de THD (%)

- Suministro e instalación de un filtro de armónicas de impedancia adaptativa.

Item	Descripción	Cant.	Precio Unitario (S/)	Precio Total (S/)
01	Suministro de Filtro de Armónicas de impedancia adaptativa – Procedencia USA. <ul style="list-style-type: none"> • Suministro del Filtro 30BW1C0000 • Instalación, puesta en marcha. 	1	38,900.00	38,900.00
SON: CINCUENTA Y OCHO MIL NOVECIENTOS SOLES			TOTAL (S/)	38,900.00

*El monto señalado no incluye impuestos – IGV (18%)

Exclusiones

Las siguientes actividades no forman parte del alcance del servicio:

- Parada de planta y circuito involucrado.
- Adicionales no contemplado en la presente oferta. (Picado de concreto, instalación o suministro de bandejas para cable, entre otras)

Condiciones Comerciales

- Forma de pago: Factura 30% adelanto, 30% contra entrega e instalación del equipo en planta.
- Depósito en Cuenta: Cta. Cte. Soles BCP 213-2386433-0-03
- Validez de la Oferta: 10 días
- Lugar de Entrega: En campo, según solicitud de cliente.
- Moneda de Pago: SOLES



LISTA DE PRECIOS CIRCUTOR ANDINA

FILTRO ACTIVO PARALELO MULTIFUNCIÓN

AFQ-3W- 3 fases 400-440-480 V +- 15%

Filtro activo AFQ-3W-25A-480	25 A fase, 75 A neutro, pico 50A	R7H772	11,047.05
Filtro activo AFQ-3W-50A-480	50 A fase, 150A neutro, pico 100A	R7H774	12,566.91
Filtro activo AFQ-3W-100A-480	100 A fase,300 A neutro, pico 200A	R7H775	21,325.25
Filtro activo AFQ-3W-150A-480	150 A fase,450 A neutro, pico 300A	R7H776	26,417.79
Filtro activo AFQ-3W-200A-480	200 A fase,600 A neutro, pico 400A	R7H777	29,720.02

DESCRIPCION		CODIGO	P.LISTA (USD)
FILTRO DE ARMÓNICOS			
FILTRO PARA LA ABSORCIÓN DE ARMÓNICOS EN VARIADORES DE VELOCIDAD			
LCL 460-480 V / 60Hz			
Filtro LCL 36-9A-480,	2.73 Kvar,	73205007000	2,192.09
Filtro LCL 36-16A-480,	4.55 Kvar,	73207007000	2,858.90
Filtro LCL 36-22A-480,	6.21 Kvar,	73208007000	3,807.46
Filtro LCL 36-32A-480,	7.59 Kvar,	73209007000	4,318.98
Filtro LCL 36-40A-480,	11.38 Kvar,	73210007000	4,635.89
Filtro LCL 36-47A-480,	15.18 Kvar,	73211007000	5,280.83
Filtro LCL 36-54A-480,	15.18 Kvar,	73212007000	5,576.91
Filtro LCL 36-64A-480,	18.97 Kvar,	73213007000	6,002.41
Filtro LCL 36-76A-480,	22.77 Kvar,	73214007000	6,324.71
Filtro LCL 36-90A-480,	26.58 Kvar,	73215007000	6,792.36
Filtro LCL 36-110A-480,	30.36 Kvar,	73216007000	8,677.50
Filtro LCL 36-150A-480,	45.53 Kvar,	73217007000	8,677.50
Filtro LCL 36-180A-480,	53.12 Kvar,	73218007000	12,688.81
Filtro LCL 36-220A-480,	60.71 Kvar,	73219007000	15,608.84
Filtro LCL 36-260A-480,	68.30 Kvar,	73220007000	16,447.36
Filtro LCL 36-320A-480,	91.07 Kvar,	73221007000	17,755.95
Filtro LCL 36-400A-480,	121.42 Kvar,	73222007000	20,354.51