

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO DE FILTROS PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS ARMÓNICOS EN
REDES ELÉCTRICAS CON COMPENSACIÓN REACTIVA”**

Dr. Ing. FERNANDO JOSÉ OYANGUREN RAMÍREZ

PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01.04.19 al 31.03.20

Resolución de aprobación N° 418-2019-R del 25.04.19

Callao, 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo nuestro
Creador, quien está conmigo en
todos los momentos de mi vida, a
la memoria de mis padres y a mi
esposa e hijas por su apoyo y
comprensión.

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo agradezco al Creador por bendecirme, darme la vida y la creatividad necesaria para continuar haciendo investigación

A la Universidad Nacional del Callao por haberme dado la oportunidad de ser docente a nivel de Pregrado y Posgrado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

A mis colegas docentes, compañeros de trabajo y alumnos por el apoyo recibido para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
TABLAS DE GRÁFICOS.....	3
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN	7
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	9
1.2 Formulación del problema.....	10
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Limitantes de la investigación	11
II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Antecedentes	12
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	12
2.1.2 Antecedentes Nacionales	15
2.2 Bases Teóricas	16
2.2.1 Armónicos en un sistema eléctrico de potencia	16
2.2.2 Filtrado de armónicos en un sistema eléctrico de potencia	34
2.2.3 Diseño de un filtro de armónicos.....	41
2.3 Conceptual.....	44
2.4 Definición de términos básicos.....	44
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	46
3.1 Hipótesis	46
3.2 Definición conceptual de las variables	46
3.3 Definición conceptual de las variables	47
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	48

4.1	Tipo y diseño de investigación	48
4.2	Método de investigación	48
4.3	Población y muestra	48
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado	49
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	49
4.6	Análisis y procesamiento de datos	49
V.	RESULTADOS.....	50
4.1	Sistema eléctrico sin compensación del factor de potencia.....	50
4.2	Sistema eléctrico con compensación del factor de potencia a través de capacitores.....	57
4.3	Sistema eléctrico corregido con filtros de armónicos.....	63
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	70
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	72
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo a reglamentos vigentes	74
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	76
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXOS.....	80
	Anexo 1: Matriz de consistencia	80
	Anexo 2: Base de datos	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo 3: Encuesta	81
	Anexo 5: Fotografías	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites de Distorsión de Voltaje	24
Tabla 2 Límites de Distorsión de Corriente	25
Tabla 3 Resumen de resultados de los casos analizados	69

TABLAS DE GRÁFICOS

Figura 1. Ejemplo de carga lineal - Corriente sinusoidal.	17
Figura 2. Ejemplo de carga no lineal. Corriente no sinusoidal.....	17
Figura 3. Señal fundamental más tercera armónica.	18
Figura 4. Espectro de cargas típicas.....	19
Figura 5. Triángulo de potencias.....	21
Figura 6. Circuito resonante serie.	26
Figura 7. Circuito resonante paralelo.	27
Figura 8. Desintonización de capacitores.....	30
Figura 9. Circuito rectificador de 12 pulsos.	31
Figura 10. Banco de Capacitores en un sistema.....	33
Figura 11. Circuito equivalente	33
Figura 12. Gráfico de impedancias versus frecuencia.....	34
Figura 13. Configuraciones usuales de filtros shunt pasivos	37
Figura 14. Característica de impedancia de filtro sintonizado simple	38
Figura 15. Característica de impedancia de filtro pasa alto 2do orden	39
Figura 16. Red eléctrica de subestación típica industrial.....	51
Figura 17. Resultados flujo de carga, sin compensación reactiva.	52
Figura 18. Resultados flujo de armónicos, sin compensación reactiva.....	53
Figura 19. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.....	54
Figura 20. Distorsión de voltaje en “Barra 3” por armónicos.....	55
Figura 21. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”.	56
Figura 22. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”.	56
Figura 23. Resultados flujo de carga, con compensación reactiva.	58

Figura 24. Resultados flujo de armónicos, con compensación reactiva.....	59
Figura 25. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.....	60
Figura 26. Distorsión de voltaje en “Barra 3” por armónicos.....	61
Figura 27. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”	62
Figura 28. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”	62
Figura 29. Resultados flujo de carga, con filtro de armónicos.	64
Figura 30. Resultados flujo de armónicos, con filtro de armónicos.	65
Figura 31. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.....	66
Figura 32. Distorsión de voltaje en “Barra 3” por armónicos.....	67
Figura 33. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”	68
Figura 34. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”	68

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en las redes eléctricas con compensación reactiva” tuvo como objetivo determinar el diseño de filtros pasivos más adecuado, con la finalidad de minimizar los efectos armónicos, para una red eléctrica con cargas características de una zona industrial, y con compensación reactiva, ubicada dentro del área de influencia de un concesionario de distribución, en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Cuando una red eléctrica alimenta cargas lineales (cuya impedancia no cambia con el voltaje aplicado) y, cargas no lineales (cuya impedancia sí cambia con el voltaje aplicado), se origina un factor de potencia por debajo de 0.90, demandando mayor potencia reactiva de la red eléctrica, además de la existencia de corrientes armónicas, que ocasionan el deterioro de los equipamientos eléctricos involucrados, además de distorsionar las tensiones de las barras y las corrientes de las cargas.

Para mejorar (compensar) el factor de potencia se implementaron bancos de capacitores, apareciendo el fenómeno de resonancia, el mismo que origina sobre voltajes y sobre corrientes perjudicando el sistema eléctrico, además de incrementar las distorsiones de tensión y corrientes existentes.

Para solucionar los problemas, de compensación del factor de potencia, el fenómeno de resonancia y mejorar los indicadores de las distorsiones de tensión y corriente, se implementaron filtros pasivos de armónicos.

Como resultado se obtuvo que el factor de potencia se incrementó a 99.9%, y los indicadores de THDv y THDi estuvieron dentro de los límites del 5% y 7% respectivamente, cumpliendo con la norma internacional IEEE Std. 519-2014.

Palabras Claves: Banco de capacitores, armónicos, distorsión de voltajes distorsión de corrientes.

ABSTRACT

The present research work entitled "Design of filters to minimize harmonic effects in power grids with reactive compensation" aimed to determine the most suitable design of passive filters, in order to minimize harmonic effects, for a power network with loads characteristics of an industrial zone, and with reactive compensation, located within the area of influence of a distribution concessionaire, in the National Interconnected Electric System (SEIN).

When an electrical network supplies linear loads (whose impedance does not change with the applied voltage) and, nonlinear loads (whose impedance does change with the applied voltage), a power factor below 0.90 arises, demanding greater reactive power from the electrical network, in addition to the existence of harmonic currents, which cause the deterioration of the electrical equipment involved, in addition to distorting the bar voltages and the load currents.

To improve (compensate) the power factor, capacitor banks were implemented, appearing the resonance phenomenon, the same that originates on voltages and on currents damaging the electrical system, in addition to increasing existing voltage and current distortions.

Passive harmonic filters were implemented to solve the problems of power factor compensation, the resonance phenomenon and improve the indicators of voltage and current distortions.

As a result, it was obtained that the power factor increased to 99.9%, and the THDv and THDi indicators were within the limits of 5% and 7% respectively, complying with the international standard IEEE Std. 519-2014.

Key Words: Capacitor bank, harmonics, voltage distortion, current distortion.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia presentan problemas de bajo factor de potencia, por déficit de energía reactiva en las subestaciones, que se traducen en una inadecuada regulación del voltaje y un inadecuado funcionamiento de las máquinas eléctricas, que a su vez se reflejan en una disminución de su capacidad y eficiencia, con el consiguiente aumento de las pérdidas.

Estos problemas se resuelven con la instalación de bancos de capacitores, que compensan la falta de energía reactiva en la respectiva subestación. Sin embargo, estos capacitores se acoplan al sistema eléctrico, formando circuitos resistivos, inductivos y capacitivos (R-L-C), que originan resonancias a la frecuencia natural del sistema, la misma que es una función de los elementos capacitivos e inductivos del sistema.

Asimismo, las cargas en un sistema eléctrico de potencia no son lineales, y por lo tanto originan corrientes armónicas, pudiendo las frecuencias naturales del sistema excitarse por alguna componente armónica que tenga una frecuencia cercana o coincidente con la frecuencia natural del sistema, produciéndose sobre-voltajes y sobre-corrientes dañinas al sistema.

El presente trabajo titulado “Uso de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva” tiene por finalidad evaluar y cuantificar, el grado de corrección sobre los indicadores de distorsión de tensión, por el uso de filtros pasivos, que se presentan en las barras o subestaciones de un sistema eléctrico de distribución, cuando se utilizan capacitores para compensar el factor de potencia

El índice del presente proyecto de investigación consta de ocho capítulos, que describimos a continuación:

En el capítulo I se indica el análisis y estudio de la problemática, así como su formulación, y se detalla la justificación, limitantes y los objetivos de la investigación.

En el capítulo II se presenta el marco teórico basado del tema del proyecto y que guarda relación directa con el objetivo, la hipótesis, así como los antecedentes del estudio y la definición de términos.

En el capítulo III se especifica la hipótesis, se presentan las variables y su respectiva operacionalización.

En el capítulo IV se da a conocer el tipo, diseño y método de la investigación, señalándose la población y muestra de estudio que será utilizada para la recolección de datos con las técnicas e instrumentos presentados, y se finaliza con los métodos de análisis y procesamiento de datos.

En el capítulo V se presenta los resultados hallados en la investigación.

En el capítulo VI y VII se da a conocer la discusión de resultados y las conclusiones de la investigación respectivamente.

En el capítulo VIII y IX, se exponen las recomendaciones y las referencias bibliográficas citadas con la norma APA, respectivamente.

Finalmente, en los anexos presentamos la matriz de consistencia y el instrumento de recolección de datos.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

En la actualidad, con la modernidad e incremento de la tecnología, se ha incrementado la utilización de cargas no lineales domésticas como: televisores, computadoras, radios, luminarias con componentes electrónicos, y las cargas industriales no lineales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc., que utilizan electrónica de potencia.

Las cargas no lineales generan a partir de ondas senoidales a la frecuencia nominal, otras ondas con diferentes frecuencias generando el fenómeno conocido como armónicos. Los armónicos son voltajes o corrientes sinusoidales, con frecuencia que son múltiplos de la frecuencia nominal del sistema (frecuencia fundamental).

Los armónicos producen el deterioro y degradación de los equipamientos que componen un sistema eléctrico de potencia como son los generadores, motores, transformadores, cables, etc. Entre los principales efectos negativos de la presencia de armónicos en la red eléctrica tenemos:

- Sobrecalentamiento en los conductores, particularmente en el neutro de las instalaciones debido al efecto Skin.
- Reducción del factor de potencia de la instalación, y deterioro del banco de capacitores utilizados para su corrección.
- Calentamiento y degradación de los aislamientos de los componentes del sistema eléctrico.

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad diseñar los filtros adecuados para minimizar los efectos de los armónicos ya existentes en el sistema eléctrico, en especial si hay presencia de capacitores para mejorar el factor de potencia.

1.2 Formulación del problema

La formulación del problema de investigación se hace indicando el problema general y los problemas específicos, luego de operacionalizar la variable independiente y en forma de pregunta.

El problema se enuncia en forma general y en forma específica (dos casos), un caso considerando el indicador de distorsión armónica de tensión y el otro considerando el indicador de distorsión armónica de corriente.

a) Problema general

- ¿De qué manera el consumo residencial de energía eléctrica influye en la mejora de la paz social de los usuarios en San Martín de Porres?

b) Problemas específicos

- ¿De qué manera los diseños de filtros mejoran los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva?
- ¿De qué manera los diseños de filtros mejoran los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva?

1.3 Objetivos

Disponemos de un objetivo general, relacionado al filtro, y dos objetivos específicos relacionados con los indicadores de distorsiones totales de tensión y de corriente.

a) Objetivo General

- Determinar de qué manera el diseño de filtros minimiza los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

b) Objetivos específicos

- Determinar de qué manera el diseño de filtros mejoran los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.
- Determinar de qué manera el diseño de filtros mejoran los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

1.4 Limitantes de la investigación

El presente trabajo de investigación tiene como limitantes la red del Sistema Interconectado Nacional (SEIN) peruano, en su componente de distribución para subestaciones industriales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

(Villatoro, 2009) realizó un estudio sobre teorías de diseño de filtros activos para mitigación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Hace mención que desde finales del siglo pasado los sistemas eléctricos de potencia tienen una mayor proporción de cargas de carácter no lineal, lo cual ha originado un nivel creciente de distorsión armónica, lo que produce perturbaciones en el transporte, distribución y consumo de energía eléctrica.

(Villatoro, 2009) plantea que aumento de las cargas no lineales se debe a que las empresas utilizan equipos que basan su funcionamiento en componentes de electrónica de potencia para simplificar el trabajo, consiguiendo que la calidad y cantidad de la producción se incremente. Con la finalidad de contrarrestar los efectos negativos de las distorsiones armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, es que se presentan teorías sobre la potencia reactiva instantánea para los sistemas trifásicos, con el objetivo de servir de base al diseño de filtros activos de potencia, quienes en la actualidad son los que se encargan de contrarrestar los efectos de las distorsiones armónicas sobre las corrientes y tensiones.

Un filtro de activo de potencia es un circuito electrónico de potencia que se conecta en paralelo con la carga actuando como una fuente de intensidad controlada, o bien en serie con la carga actuando como una fuente de tensión (Villatoro, 2009).

(Bueno & Fajardo, 2013) realizaron el Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos de una red bifásica residencial. Las cargas no lineales producen efectos de distorsión de corriente y voltaje que afectan con la interferencia de los sistemas telefónicos, capacidades de manejo de corriente sobre los conductores, coordinación de las protecciones, rendimiento de los transformadores que alimentan los

sistemas de distribución y transmisión, así como los sistemas de generación, entre otros.

En Ecuador se ha incrementado la carga no lineal en el sector residencial y se prevé que ésta se verá afectada en gran manera con la implementación al año 2015, de los sistemas de inducción para las cocinas que se realizará en el nivel de tensión de 220 V en corriente alterna. Por esta razón es necesario hacer un filtrado de una red bifásica, considerando las dos fases y el conductor neutro de alimentación en los sistemas residenciales, para que se garanticen los niveles de factores de distorsión armónica (THD) dentro de los valores normalizados (Bueno & Fajardo, 2013).

Una de las formas de mejorar esta situación es la utilización de filtros activos de potencia (AFP), por lo que se desarrolló un filtro multinivel para una red bifásica, con la característica principal de incluir el neutro en el filtrado logrando un equilibrio entre fases y neutro. De esta manera se logra que la forma de onda de la corriente que circula por la red eléctrica sea sinusoidal (bajo factor armónico) (Bueno & Fajardo, 2013).

Estructuralmente el filtro consta de dos puentes inversores o dos etapas por fase, para la carga o descarga de los dispositivos almacenadores de energía (capacitores), logrando así cinco niveles de tensión por fase.

(Rios & Aristizabal, 2003) plantean que los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

(Rios & Aristizabal, 2003) propone que las soluciones a dicho problema se realizan en forma jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (condensadores, filtros pasivos, filtros activos).

Independientemente del tipo de compensador utilizado para reducir los niveles de armónicos en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, esto con el fin de determinar resonancias serie (baja impedancia al paso de corriente) y paralelo (baja admitancia a la tensión de alimentación (Rios & Aristizabal, 2003).

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas de potencia tiene dos objetivos: servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas, y proveer al sistema de toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita.

(Espinoza Mendoza, 2018) presentó un informe sobre las armónicas que se han vuelto un elemento común en casi todas las instalaciones eléctricas, su presencia se ha vuelto algo cotidiano en los hogares, comercios, industrias.

Tal como se sabe, las armónicas son originadas por las cargas conocidas como no lineales entre las cuales se encuentran todos los dispositivos que involucran electrónica de potencia. Se sabe que las armónicas causan diversos problemas que regularmente ocasionan que la vida útil de los equipos se reduzca, principalmente debido a que las corrientes armónicas circulantes ocasionan un calentamiento excesivo en los equipos, lo que repercute en un incremento en las pérdidas eléctricas, adicionalmente, los

voltajes armónicos impuestos en los equipos hacen que el aislamiento sea esforzado más de lo normal (Espinoza Mendoza, 2018).

Existen en el mercado diversas opciones para solucionar el problema de las armónicas, al menos mantenerlo dentro de límites recomendados, la selección de la mejor dependerá de la situación particular que se presente (Espinoza Mendoza, 2018).

Entre las soluciones más comunes se encuentran los filtros activos, pasivos, lograr desfases con la finalidad de cancelar las armónicas.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

(Ninahuanca Torres, 2009) abordó el tema de uso de filtros de armónicas en las industrias. En la actualidad las instalaciones industriales tienen implementados controles automáticos en sus procesos, como por ejemplo los variadores de velocidad y el requerimiento de tensiones estabilizadas (UPS) para la alimentación de controladores lógicos programables. La utilización de estos equipos trae consigo perturbaciones y defectos en la red eléctrica de sus instalaciones que pueden propagarse por la red de distribución de energía y por consiguiente extenderse también a los usuarios.

Una de las razones por las que los propietarios no invierten en modernizar sus plantas para la reducción de armónicas es debido a que la legislación peruana no establece límites ni sanciones a los usuarios que generan corrientes armónicas. Sólo cuando las instalaciones sufren las consecuencias de este fenómeno como fallas momentáneas o incluso paradas de planta los propietarios buscan soluciones (Ninahuanca, 2009).

En este trabajo se muestran las diferentes soluciones tecnológicas con las que actualmente se pueden contrarrestar los problemas generados en las instalaciones industriales.

(Aranda Mendoza, 2015) señala que, para la absorción de armónicos, resulta necesario establecer criterios y evaluar de forma independiente los

diferentes casos que se presentan en las redes industriales, para lo cual es necesario considerar los conceptos y distintos enfoques del problema en la actualidad. Considera que las experiencias obtenidas en la evaluación y mejora en la calidad de suministro en redes industriales, apoyados en los modelos de los diferentes componentes de la red que permiten evaluar el comportamiento de las cargas no lineales y la afectación que estas introducen al sistema en los niveles de distorsión armónica de tensión (THDv) y corriente (THDi).

Los condensadores son ampliamente usados en los sistemas de distribución para la compensación de la potencia reactiva, el control de tensión y al mismo tiempo para la disminución de las pérdidas (Aranda Mendoza, 2015).

Los beneficios de su uso hoy están estrechamente ligados al nivel de contaminación armónica que presentan las redes, lo que en ocasiones exige el uso de medidas correctivas para su protección en dependencia de los niveles de contaminación existentes (Aranda Mendoza, 2015).

(Aranda Mendoza, 2015) señala que las pautas para el análisis de la distorsión armónica están definidas en IEEE Std 519-1992,1,4 donde se muestra cómo es posible analizar la contribución armónica de las cargas no lineales en las tensiones y las corrientes del sistema a través de la modelación de las impedancias de los elementos en función de la frecuencia.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Armónicos en un sistema eléctrico de potencia

El problema de los armónicos en una red de distribución

(Piolet, 2015) manifiesta que los sistemas eléctricos de potencia están diseñados para suministrar potencia eléctrica a cargas lineales. Las cargas lineales son las resistencias, inductancias, capacitancias o una combinación de ellas que, al aplicarles un voltaje sinusoidal, como

resultado se produce una corriente proporcional que también es sinusoidal. Ver figura 1.

Con el avance tecnológico, las cargas domésticas como los computadores, impresoras, cargadores de celulares, hornos microondas etc, las cargas industriales como los motores, convertidores, ventiladores, rectificadores, ascensores etc; las cargas de alumbrado basado en la tecnología LED, etc, están compuestos principalmente por componentes electrónicos, que por sus características de consumo se denominan “cargas no lineales” (Piolet, 2015).

Una “carga no lineal” produce distorsión principalmente de la corriente, la cual se caracteriza por estar compuesta por “armónicos”. Ver figura 2

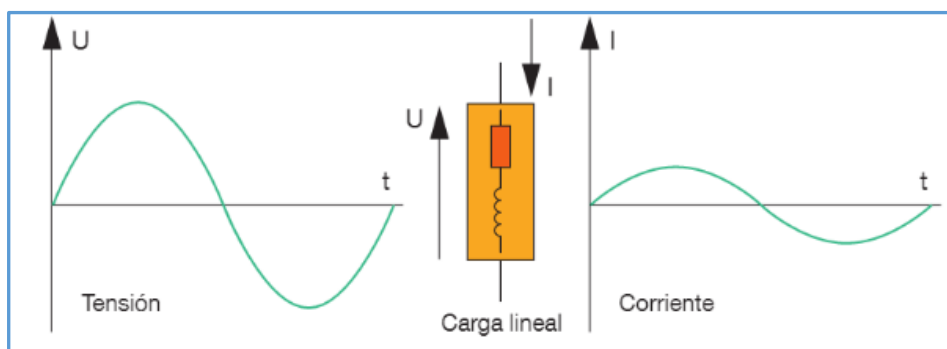


Figura 1. Ejemplo de carga lineal - Corriente sinusoidal.
Fuente: Revista “Sector Electricidad”

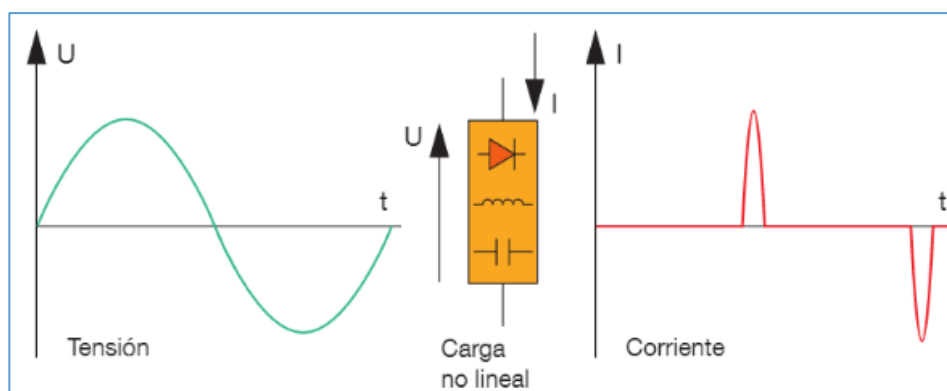


Figura 2. Ejemplo de carga no lineal. Corriente no sinusoidal.
Fuente: Revista “Sector Electricidad”

Definición de armónicos

El teorema de Fourier, plantea que toda onda periódica no sinusoidal, puede ser descompuesta en la suma de la onda sinusoidal fundamental más las ondas sinusoidales armónicas. La onda sinusoidal fundamental tiene la frecuencia nominal del sistema de potencia (60 Hz. en caso de Perú), mientras que las ondas sinusoidales armónicas tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Cuando una onda periódica, no tiene forma sinusoidal, contiene armónicos que modifican su valor máximo (pico) y su valor eficaz (rms).

En la figura 3 podemos ver la forma de onda distorsionada para una señal de corriente no sinusoidal (fundamental más tercera armónica), donde se aprecia la onda a frecuencia fundamental de 60 Hz (onda sinusoidal) más la onda de tercera armónica, o de orden 3 (180 Hz).

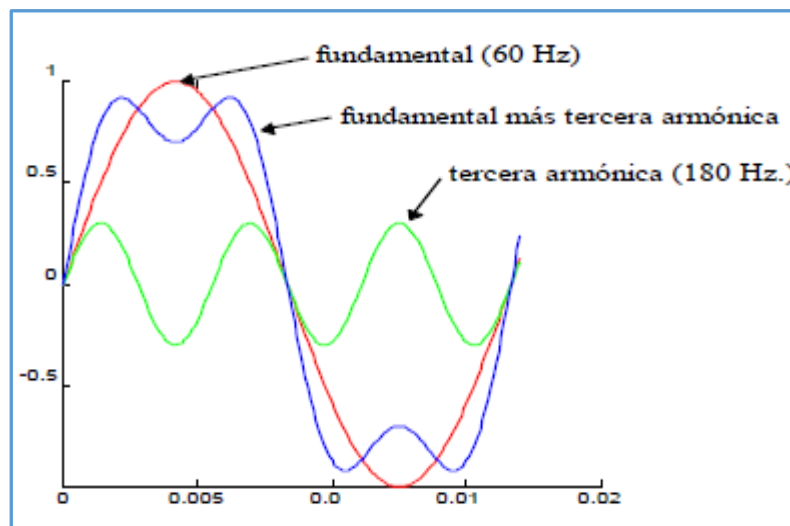


Figura 3. Señal fundamental más tercera armónica.

Fuente: J. Mora & Y. Cevallos. 2014. Universidad Politécnica Salesiana.

Los armónicos se caracterizan por: a) su amplitud expresada en % de la amplitud de la onda a la frecuencia fundamental, b) su paridad, es decir si es armónico par o impar, y por c) su orden (h) o rango de la componente armónica (Ejemplo: el orden $h = 3$ corresponde a la frecuencia 180 Hz, además de ser impar)

Origen de las corrientes armónicas

(Piolet, 2015) describe que con el uso masivo de los equipamientos en base a la electrónica de potencia (tecnología de estado sólido), todos los consumidores del servicio público de electricidad enfrentamos la presencia de corrientes armónicas, en las redes de distribución de energía eléctrica servicio público.

Como ejemplo, podemos mencionar que la corriente típica de un convertidor, está compuesta por una corriente a frecuencia fundamental (60 Hz), y armónicas cuyas frecuencias son múltiplos de ésta (5°, 7°, 11° y 13° orden). En la figura 4, mostramos la forma de onda y el espectro de frecuencias armónicas de la señal, de algunas cargas típicas.

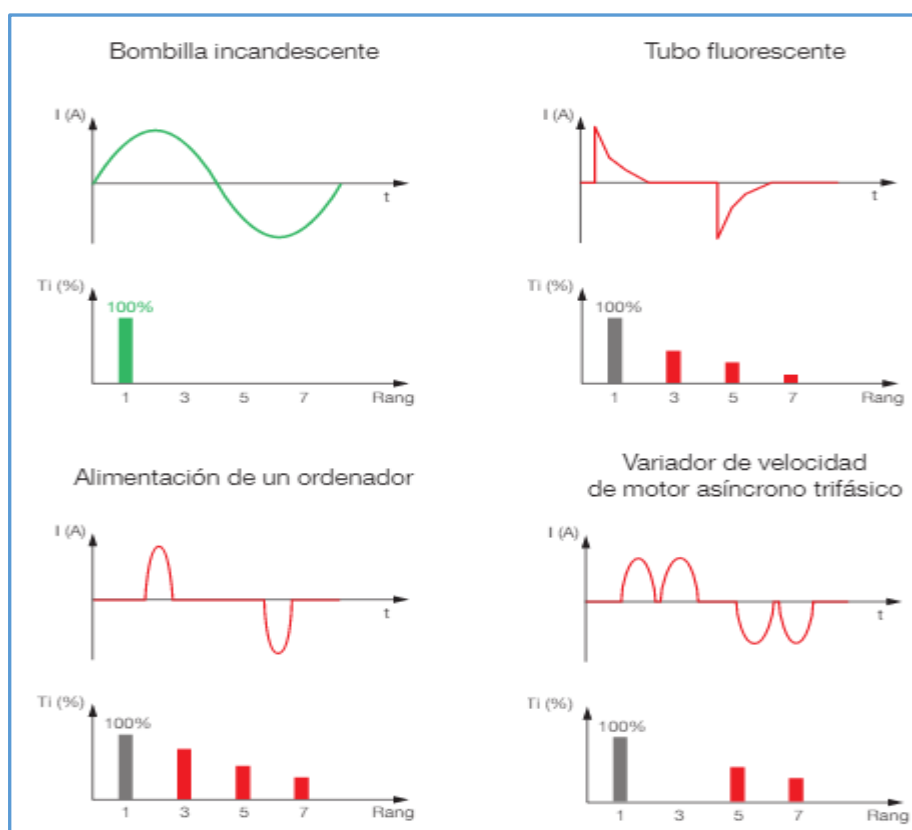


Figura 4. Espectro de cargas típicas.
Fuente: Revista "Sector Electricidad"

Efectos de las corrientes armónicas en la red eléctrica

Las corrientes armónicas causan en la red eléctrica los siguientes problemas (Das J. , 2015):

- Incremento de las pérdidas eléctricas e ineficiente aprovechamiento de la red de energía.
- Aumento de la corriente en los capacitores y bancos de capacitores, que ocasiona un calentamiento excesivo, reduciendo su vida útil.
- Disparo intempestivo de los interruptores y equipos de protección, así como la actuación inadecuada de los fusibles.
- Mal funcionamiento de equipos de cómputo y otros elementos electrónicos de control y cargas sensibles.
- Interferencia en los equipamientos de los sistemas de iluminación y sistemas de telefonía.
- Resonancia entre los componentes del sistema eléctrico.
- Fallas en el aislamiento de los equipamientos eléctricos.

Variables indicadoras de la distorsión armónica en voltaje y corriente

De acuerdo con (Varela & Alvarado, 2015) para evaluar la distorsión de las ondas de corriente y tensión debido a las armónicas, disponemos de las siguientes variables indicadoras:

❖ Factor de potencia

Para redes sin armónicos, el factor de potencia se denominada “cos φ ” que es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente fundamental (S_1).

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S_1}$$

Para redes con presencia de armónicos, el factor de potencia está definido como la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), consumida por un equipo o dispositivo.

$$FP_{Total} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}} = \cos \varphi$$

Donde Q1 es la potencia reactiva fundamental y D es la potencia de distorsión que queda definida por:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_1^2)}$$

En la figura 5 podemos ver las relaciones entre las magnitudes de la potencia aparente fundamental (S1), la potencia aparente total (S), potencia activa fundamental (P1), la potencia reactiva fundamental (Q1) y la potencia reactiva total (N).

Se puede diferenciar claramente, entre los ángulos φ e θ , los que determinan el factor de potencia (FP) y el factor de potencia total FP_{Total}

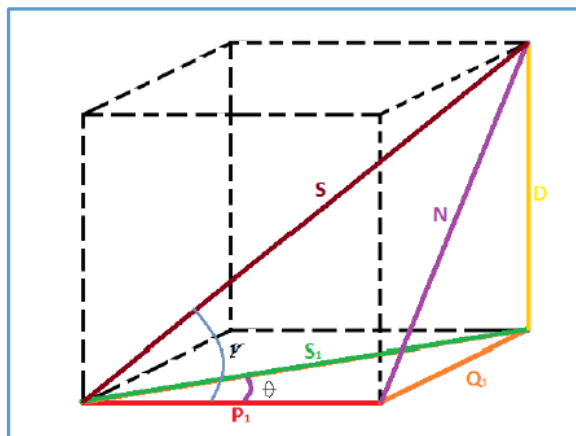


Figura 5. Triángulo de potencias.
Fuente: Revista Ingeniería Eléctrica

También el factor de potencia total FP_{Total} , equivale al factor de potencia (FP) multiplicado por el factor de potencia de distorsión $FP_{distorsión}$.

Donde el $FP_{distorsión}$ está dada por la siguiente relación:

$$FP_{distorsión} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2}}$$

Entonces:

$$FP_{Total} = FP * FP_{distorsión}$$

En presencia de armónicos el factor de potencia FP es inferior FT_{Total}

❖ Factor de cresta

Se define como la relación entre el valor pico de la corriente (I_m) o de la tensión (V_m) y sus respectivos valores eficaces.

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \quad \text{ó} \quad k = \frac{V_m}{V_{RMS}}$$

Para las señales sinusoidales el factor de cresta es $\sqrt{2}$, pero para una señal no sinusoidal, como en el caso de una señal armónica, el factor de cresta puede alcanzar valores superiores o inferiores a $\sqrt{2}$. En casos excepcionales, el factor de cresta para señales armónicas, puede estar en el rango entre 1.5 y 5.

❖ Potencia activa

La potencia activa P de una señal armónica, es la suma de las potencias activas correspondientes a las tensiones e intensidades del mismo orden. La descomposición de la tensión e intensidad de corriente en sus componentes armónicos se define como:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

Donde φ_h corresponde al desfase para el armónico de orden h , entre la onda de tensión y la de corriente.

❖ Potencia reactiva

La potencia reactiva Q se define únicamente para la componente fundamental, y está dada por la relación:

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1$$

❖ Distorsión armónica total (THD)

Es la relación entre el valor eficaz (rms) de todos los componentes armónicos de una señal, considerando hasta el armónico de orden 50, y el valor eficaz de la componente fundamental.

El THD nos permite verificar globalmente el nivel de contaminación de una red, en tensión o en corriente.

Cuando se trata de armónicos de tensión, la fórmula utilizada es:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\%$$

Cuando se trata de armónicos de intensidad, la fórmula utilizada es:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\%$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\%$$

Para armónicas individuales utilizamos:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\%$$

❖ Distorsión de la demanda total (TDD)

Es la relación entre el valor eficaz de las corrientes armónicas y la corriente de máxima demanda de la carga.

El TDD sólo se aplica a las corrientes, y es utilizado para verificar la calidad del servicio, cuando tenemos niveles altos del indicador THDi

con un nivel de cargas bajas, que no afectan en gran medida al sistema eléctrico. Su fórmula es:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L}$$

Calidad en el suministro de energía eléctrica

Se entiende por “calidad de suministro eléctrico” a la normalización o estandarización del suministro eléctrico, a través de reglas donde se fijan los niveles, parámetros básicos, formas de onda, armónicos, niveles de distorsión armónica, interrupciones etc.

La calidad del suministro de energía eléctrica, es una obligación de las empresas de generación, de las empresas de transmisión, de las empresas de distribución y de los consumidores finales.

Con relación a las distorsiones armónicas, varios organismos internacionales se han preocupado para establecer límites para que las compañías eléctricas suministren un voltaje mínimo distorsionado que no perjudique a los equipamientos de los usuarios del servicio.

El organismo internacional IEEE, presentó la norma IEEE Std 519-2014, en la cual se establecen los límites a las compañías suministradoras para que la distorsión de voltaje no afecte a los usuarios.

En la tabla 1 se presentan los límites recomendados, para los voltajes armónicos, suministrados por las compañías de electricidad a los usuarios.

Tabla 1

Límites de Distorsión de Voltaje

Voltaje Nominal	Distorsión Individual de Voltaje (%)	Distorsion Total De Voltaje THD (%)
1 kV > V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV > V ≤ 161 kV	3.0	5.0
V > 161 kV	1.0	1.5

Fuente: Adaptado de la Norma IEEE Std. 519-2014

En la tabla 2 se presentan los límites recomendados, para la distorsión de corriente en armónicos impares, originada por la demanda o carga eléctrica, es decir las distorsiones originadas por los consumidores finales de la energía eléctrica.

Tabla 2

Límites de Distorsión de Corriente

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	Distorsión Total de Demanda
				TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	15.0

Fuente: Norma IEEE Std 519-2014.

Nota: I_{SC} = máxima corriente de cortocircuito en el punto PCC, I_L = corriente de carga para la máxima demanda en PCC, bajo condiciones normales de operación.

El fenómeno de resonancia

La resonancia es la amplificación en la respuesta de un sistema, frente a una excitación periódica, y ocurre cuando la frecuencia de la fuente de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema.

El ejemplo clásico es el circuito LC, que al ser excitado por una corriente armónica, las reactancias inductivas y reactancias capacitivas vistas por la fuente de corriente harán resonancia a la frecuencia $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ conocida como frecuencia de resonancia.

Existen dos tipos de resonancia, la resonancia serie y la resonancia paralela, que describimos a continuación:

a) Resonancia serie

Existe resonancia serie, cuando un banco de capacitores en serie con la reactancia del sistema, origina un camino de baja impedancia para la corriente armónica, ver figura 6.

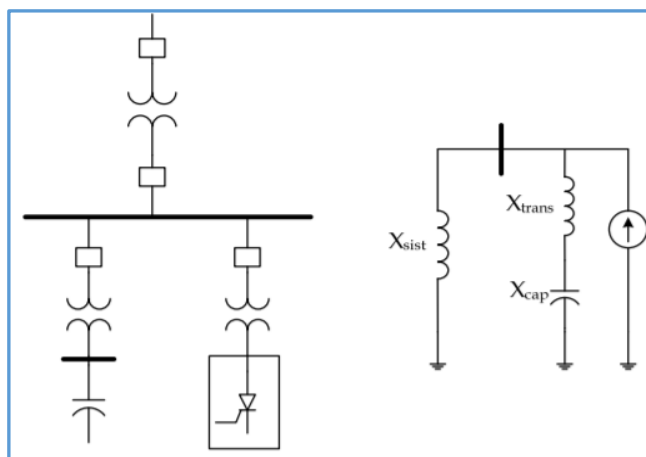


Figura 6. Circuito resonante serie.

Fuente: H. Alvarado, J. Ramírez, 2010 "Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas de sistemas eléctricos".

La resonancia serie puede ser la causa de altos niveles de distorsión en la tensión, entre la inductancia y la capacitancia del circuito, debido a la corriente armónica concentrada en el camino de baja impedancia.

La resonancia hará que falle el capacitor o el fusible asociado por el efecto de la sobretensión. La condición de resonancia serie está dada por la siguiente fórmula:

$$hr = \sqrt{\frac{Xc}{Xl}}$$

donde:

hr = orden del armónico que hay en la condición de resonancia

Xc = reactancia capacitiva del banco de condensadores

Xl = reactancia inductiva del sistema eléctrico de potencia.

b) Resonancia paralela

La resonancia paralela ocurre cuando la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del sistema, que están en paralelo, son iguales y tienen una cierta frecuencia que está presente en el sistema eléctrico. La fuente de energía ve una impedancia muy alta, y la frecuencia para la cual esta impedancia es alta, es precisamente la frecuencia de resonancia.

En la figura 7, se muestra la topología del circuito en la cual puede ocurrir la resonancia paralela:

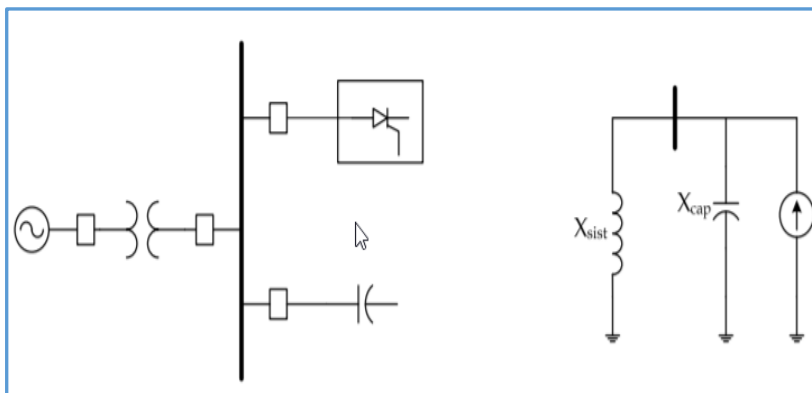


Figura 7. Circuito resonante paralelo.

Fuente: H. Alvarado, J. Ramírez, 2010 "Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas de sistemas eléctricos".

La resonancia paralela, crea una distorsión de la tensión además de una amplificación de la corriente, de manera significativa. La tensión distorsionada produce el flujo de corriente distorsionada en los ramales adyacentes y finalmente estas corrientes amplificadas producen el fallo del equipamiento.

La frecuencia de resonancia se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$hr = \sqrt{\frac{Xc}{Xl}} = \sqrt{\frac{MVAsc}{MVARcap}}$$

Donde:

hr = orden del armónico que hay en la condición de resonancia

MVAsc = potencia de cortocircuito en MVA en el punto de conexión de la carga no lineal.

MVARcap = potencia en MVAR del capacitor.

Esta fórmula es muy precisa para las relaciones de X/R altas.

Resonancia armónica con bancos de capacitores

Las empresas eléctricas y la industria utilizan bancos de capacitores o condensadores para mejorar el factor de potencia, así como para mejorar los niveles de tensión, con la finalidad de disminuir las pérdidas en las líneas y disminuir la caída de tensión.

Sin embargo, el uso de la electrónica de potencia, en la industria eléctrica, ocasiona problemas de resonancia, cuya consecuencia es la amplificación de las corrientes y tensiones en la red eléctrica.

Para el caso de redes eléctricas en baja tensión, podemos tomar los siguientes criterios prácticos:

- No considerar el efecto de la resonancia en los bancos de capacitores, si la potencia de la carga (kVA) que contiene armónicos es menor que el 10% de la potencia del transformador (kVA).

- No considerar el efecto de la resonancia en los bancos de capacitores, si la potencia de la carga que contiene armónicos es menor al 30% de la potencia del transformador, y la potencia de los capacitores son menores al 20% de la capacidad del transformador.
- Los bancos de capacitores deben usarse como filtros pasivos, si la potencia de la carga que contiene armónicos es mayor al 30% de la capacidad del transformador.

Medidas a tomar en cuenta en el uso de capacitores para la corrección del factor de potencia

Según (Aguado & Bravo, 1995) se disponen de las siguientes medidas para usar capacitores en la corrección del factor de potencia:

a) Reubicación del banco de capacitores

Los capacitores son sensibles a las corrientes armónicas, ya que su impedancia disminuye al aumentar la frecuencia. Entonces podemos reducir la sobre corriente debido al fenómeno de resonancia, cambiando la ubicación del capacitor. En general no se debe colocar un capacitor en una barra, donde la frecuencia de resonancia no sea igual a la frecuencia armónica de la red eléctrica.

b) Cambio de la capacidad del banco de capacitores

Podemos aumentar o disminuir la potencia de los capacitores y modificar así la frecuencia de resonancia, cuidando que se compense el factor de potencia de la red eléctrica. En caso que el armónico generado en la red, coincida con la frecuencia de resonancia el banco de capacitores no puede operar con el transformador asociado.

c) Desintonización del filtro de armónicos

Un filtro se encuentra desintonizado, cuando la frecuencia armónica del sistema eléctrico es diferente a la frecuencia de resonancia. Estos filtros están diseñados para operar a una frecuencia de resonancia, por debajo de la frecuencia de la menos armónica del sistema, que normalmente es la 5ta armónica.

Estos filtros se obtienen agregando una reactancia al banco de capacitores existente, y tienen por objetivo compensar el factor de potencia de la red eléctrica, evitar las resonancias en paralelo y filtrar las corrientes armónicas.

La figura 8 muestra el caso donde los armónicos provenientes de la compañía de suministro eléctrico, ocasionan sobre corrientes en los capacitores. Aquí no podemos reubicar los capacitores y tampoco modificar su potencia reactiva (kVAR), entonces la solución es desintonizar el filtro, de manera que los armónicos fluyan por el sistema y no por los capacitores.

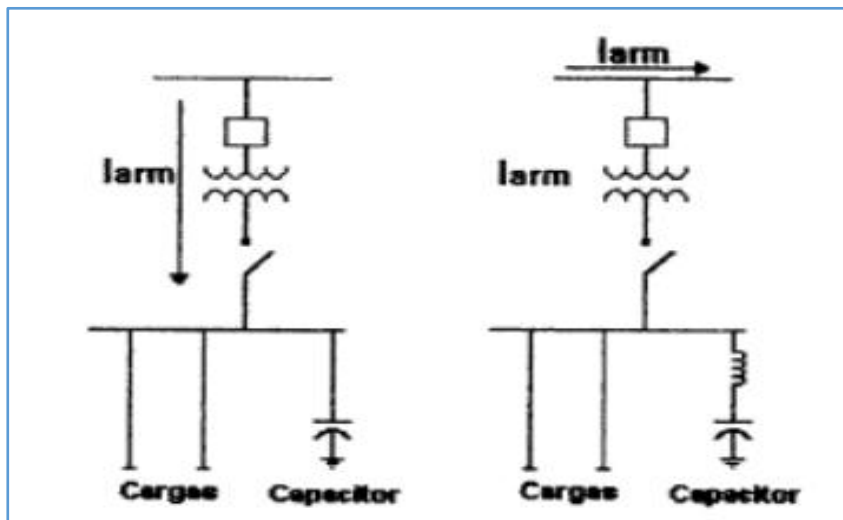


Figura 8. Desintonización de capacitores

Fuente: E. Aguado & R. Bravo. "Efectos causador por los armónicos en banco de condensadores"

El factor de desintonía p (%) se define como la relación entre la reactancia del reactor y la reactancia del capacitor a la frecuencia fundamental. La relación entre p y f_r está dada por la ecuación:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{1}{p}}$$

d) Desconexión del neutro de capacitores conectados en estrella

Los armónicos de secuencia cero (tercer armónico y sus múltiplos) circulan a través del neutro de los capacitores conectados en estrella. En este caso desconectamos la conexión de neutro a tierra, pero hay que verificar la capacidad de los capacitores y la capacidad del interruptor, en esta nueva condición.

e) Aumentar el número de pulsos del rectificador

Cuando utilizamos convertidores o rectificadores, los armónicos que inyectan al sistema eléctrico de potencia, pueden ser minimizados al incrementar el número de pulsos. En la figura 9 se muestra el esquema de un rectificador de 12 pulsos. Para el caso de 12 pulsos se generan armónicos de orden 11, 13, 23, 25 etc.

Al incrementar el número de pulsos de un rectificador, se generan armónicos con menor magnitud, así como armónicos de orden superior, pues la frecuencia aumenta.

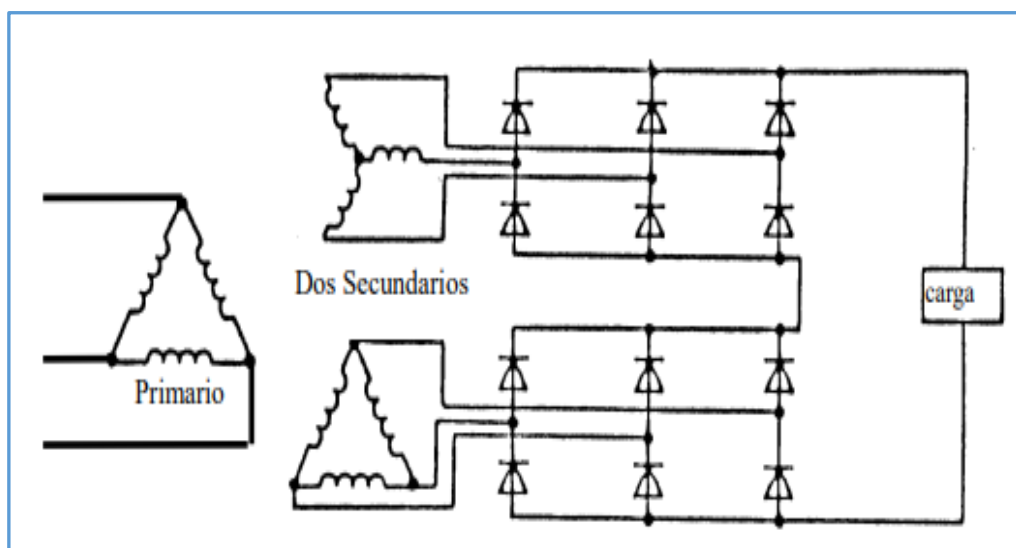


Figura 9. Circuito rectificador de 12 pulsos.

Fuente: E. Aguado & R. Bravo. "Efectos causador por los armónicos en banco de condensadores"

En general si hay varios rectificadores, se pueden conectar a través de transformadores de diferentes grupos de conexión, desfasándose las componentes armónicas y su suma resultaría en armónicos de menor magnitud, que si los conectamos con transformadores del mismo grupo de conexión.

Las distorsiones armónicas totales THD para un rectificador de seis pulsos se encuentra entre 25% y 30%, mientras que para un rectificador de 12 pulsos el THD se encuentra entre 10% y 12%.

f) Utilización de filtros para mejorar el factor de potencia de la instalación eléctrica

Debido a que los capacitores deben colocarse cerca de la carga, para mejorar el factor de potencia, se convierten en filtros de las corrientes armónicas provenientes del sistema.

Por esta razón, debemos estudios de flujo de armónicos, para diseñar los filtros, cuidando de no superar los límites establecidos por las normas tanto para los capacitores como para el sistema eléctrico.

En la figura 10, utilizamos un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia, pero como la compañía de suministro eléctrico (sistema) también inyecta corrientes armónicas, las mismas que no podemos evitar, entonces debemos utilizar filtros para derivar estos armónicos a tierra.

Una alternativa es instalar un filtro para todo el sistema, adicionando una inductancia al banco de capacitores (C), ver figura 10, de esta manera hay un camino de baja impedancia, para las corrientes armónicas entre el rectificador y el filtro así formado.

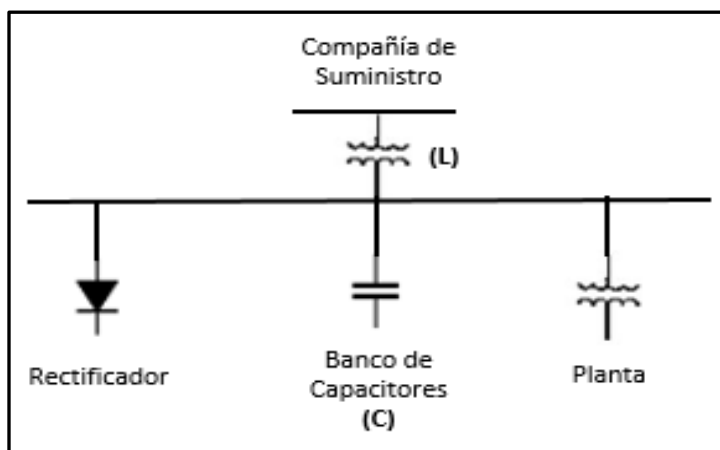


Figura 10. Banco de Capacitores en un sistema
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Otra alternativa es ubicar varios filtros, uno para cada orden de armónico, que se presente en el sistema eléctrico, tal como se indica en la figura 11, donde cada filtro debe de sintonizarse a su frecuencia de resonancia.

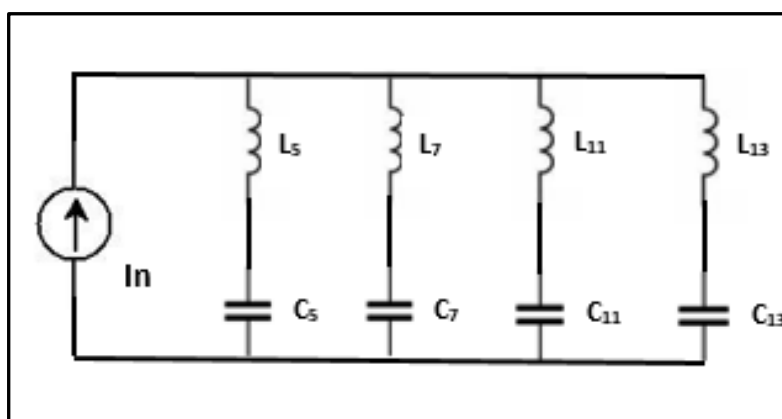


Figura 11. Circuito equivalente
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

En este caso, si realizamos el barrido de frecuencias, ver figura 12, donde se muestra la variación de la impedancia (ohmios), en función de la variación de la frecuencia, notamos que las impedancias son mínimas en cada frecuencia de sintonización: 300 Hz, 420 Hz, 660 Hz y 780 Hz.

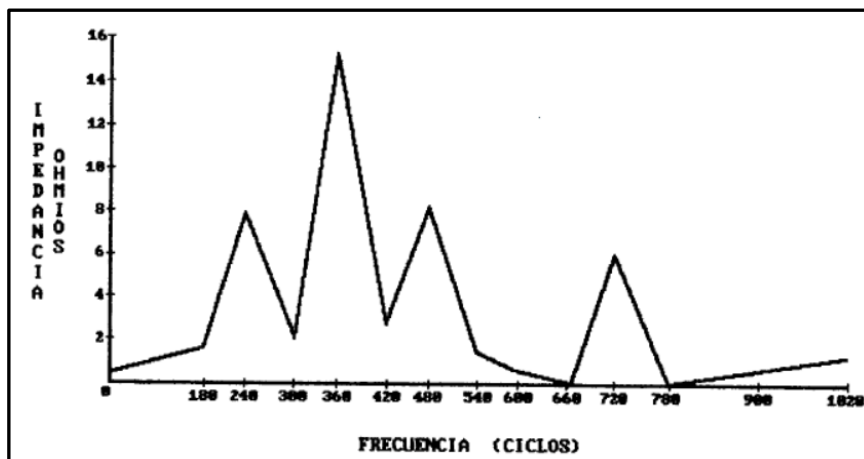


Figura 12. Gráfico de impedancias versus frecuencia.

Fuente: E. Aguado & R. Bravo. "Efectos causador por los armónicos en banco de condensadores"

En cada frecuencia de sintonización, existe una máxima impedancia, que es la resonancia paralela, que está por debajo de frecuencia del filtro correspondiente, pero por encima de la frecuencia de sintonización anterior.

El filtro de armónicos se comporta como una reactancia inductiva, para frecuencias por encima de la frecuencia de sintonía y no hay resonancia con el sistema; y se comporta como una reactancia capacitiva, para frecuencia por debajo de la frecuencia de sintonía el filtro, y podría haber resonancia con el sistema.

Los filtros no eliminan completamente las corrientes armónicas, porque ellos se deben sintonizar un poco más debajo de la frecuencia de resonancia (alrededor del 6% menos), con la finalidad de asegurar que la frecuencia de resonancia paralela, se encuentre por debajo de la armónica.

En una red eléctrica, diseñar un filtro para eliminar cada armónico que se presente, no es barato, por esta razón la solución es utilizar los tipos de "filtros pasa altos" para todos los armónicos encima de $h=12$, y un filtro pasa bajos para todas las armónicas menores al orden $h=12$, es decir para los órdenes del $h = 3$ al $h = 11$.

2.2.2 Filtrado de armónicos en un sistema eléctrico de potencia

A continuación, se presentan los esquemas de filtrado de armónicos para un sistema eléctrico de potencia (Rios & Aristizabal, 2003).

Métodos clásicos

Utilizamos los filtros para solucionar los problemas de armónicos en un sistema eléctrico con compensación capacitiva. Estas soluciones se clasifican en dos tipos: a) soluciones preventivas y b) soluciones correctivas.

Las soluciones del tipo preventivas, tienen por objetivo principal evitar los armónicos y sus consecuencias negativas. Estas soluciones pueden ser:

- Cancelación de fase, o el control de armónicos, en los convertidores de potencia.
- Desarrollo de metodologías y procedimientos para controlar, reducir o eliminar los armónicos en los equipos de un sistema eléctrico de potencia, en especial en los generadores, transformadores y capacitores.

Las soluciones del tipo correctivas tienen por objetivo principal eliminar los armónicos existentes en la red eléctrica. Estas soluciones pueden ser de dos tipos:

- Utilización de filtros, de acuerdo a los órdenes de armónicos existentes en la red eléctrica.
- La desintonización de un circuito de resonancia, mediante la reconfiguración de la red eléctrica o la ubicación de banco de capacitores.

En el presente trabajo de investigación se utilizará los filtros como medida correctiva para eliminar la presencia de armónicos en la red eléctrica de potencia.

Tipos de filtros de armónicos

Los armónicos pueden ser eliminados mediante el uso de filtros, que básicamente son una combinación serie-paralelo de condensadores y reactancias sintonizadas a una frecuencia armónica específica.

Los filtros se diseñan para presentar una impedancia muy baja al orden de armónico donde se está sintonizando.

En teoría el filtro de armónicos debe proveer una impedancia cero, para la frecuencia del armónico que se desea eliminar. Los filtros se pueden clasificar en filtros pasivos y filtros activos (Rios & Aristizabal, 2003).

a) Filtros Pasivos

Son filtros constituidos únicamente por elementos pasivos, como resistencias, reactancias y condensadores.

Pueden ser filtros sintonizados y filtros desintonizados conocidos también como antirresonantes.

a.1) Filtros Sintonizados

Presentan una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando hacia el filtro y no hacia el suministro la mayor parte de la corriente distorsionada, originada por las cargas no lineales.

La frecuencia de sintonía debe mantenerse debajo de la armónica que se desea filtrar. Hay que tomar en cuenta el valor máximo de la corriente armónica que se desea filtrar, pues de esta corriente depende el dimensionamiento del reactor y de la tensión del capacitor.

Existen configuraciones variadas de filtros, siendo los más comunes el filtro sintonizado simple y el filtro sintonizado pasa altos de 2° orden.

En la figura 13, se presentan las configuraciones usuales.

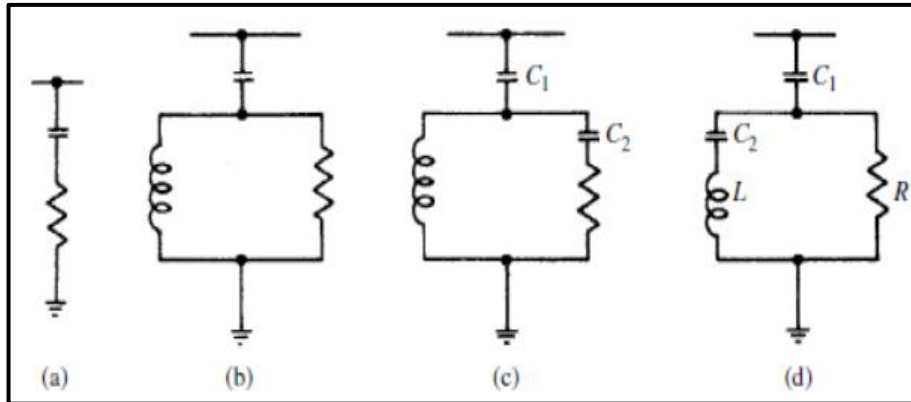


Figura 13. Configuraciones usuales de filtros shunt pasivos. a) primer orden b) segundo orden, c) tercer orden, d) tipo "C".
Fuente: J. Arrilaga & N. Watson. "Power System Harmonics".

a.1.1) Filtro sintonizado Simple

Este es el tipo de filtro más simple y consiste en un banco de capacitores conectado en serie con la inductancia. Ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar.

En la figura 14 se muestra la configuración y el comportamiento que presenta el filtro sintonizado simple ante la variación de la frecuencia.

Este filtro tiene las siguientes características principales:

- Se utiliza para eliminar una armónica determinada.
- La frecuencia de resonancia del filtro se llama frecuencia de sintonía.
- El filtro se sintoniza a aquella frecuencia que se desea eliminar.
- A la frecuencia de sintonía (de resonancia) la impedancia del filtro es mínima.
- El factor de calidad del filtro $Q_0 = X_0/R$ es alto, entre 30 y 100, lo cual hace que la característica de la impedancia sea más o menos estrecha.
- Se utiliza en instalaciones con rectificadores, inversores PWM y hornos de arco en casos específicos.

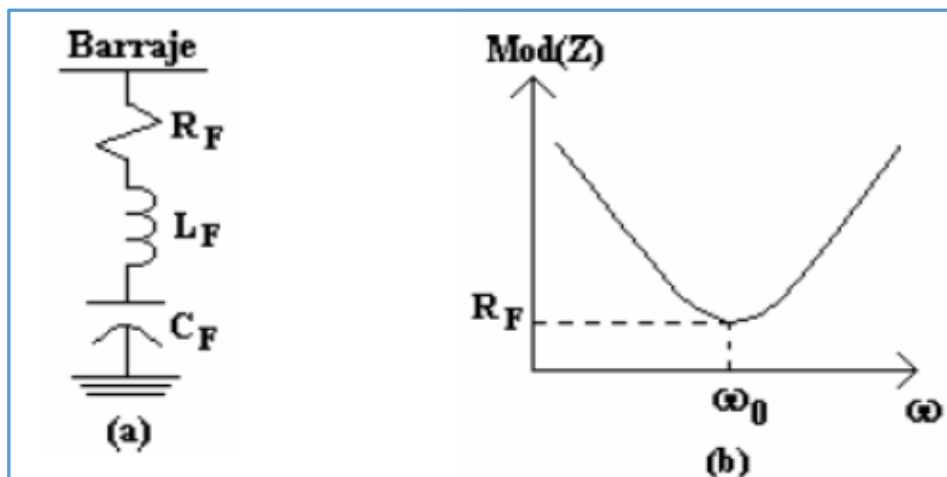


Figura 14. a) Filtro sintonizado simple b) Comportamiento en frecuencia.
Fuente: R. Rios & M. Aristizabal. "Análisis de armónicos en sistemas eléctricos"

Entre las principales ventajas se tienen:

- Proporciona una máxima atenuación para una armónica individual
- A la frecuencia fundamental puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red.
- Tiene bajas pérdidas asociadas a la resistencia de la inductancia.

Entre las principales desventajas se tienen:

- Es vulnerable a la desintonía, debido a las tolerancias que presentan sus componentes, a la temperatura y/o variaciones de la frecuencia fundamental.
- Interactúan con la red eléctrica originando una resonancia paralela a igual que un banco de condensadores.

a.1.2) Filtro pasa alto de segundo orden

Es el más común entre los filtros de característica amortiguada, ya que la resistencia en paralelo con la inductancia, le proporciona una característica amortiguada, en un rango amplio de frecuencias.

En la figura 15 se muestra la configuración y el comportamiento que presenta el filtro pasa alto de segundo orden, ante la variación de la frecuencia.

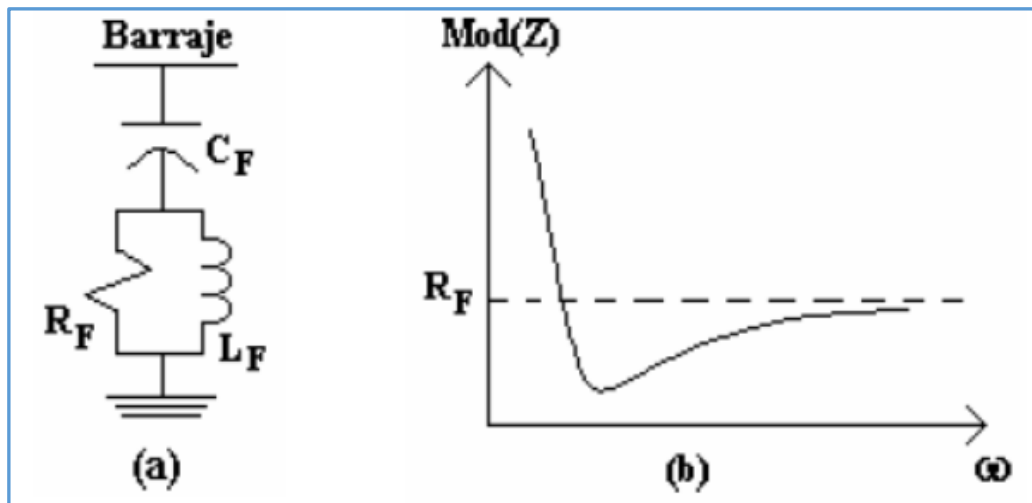


Figura 15. Característica de impedancia de filtro pasa alto 2do orden
Fuente: R. Rios & M. Aristizabal. "Análisis de armónicos en sistemas eléctricos"

Este filtro tiene las siguientes características principales:

- Se utilizan para eliminar un amplio rango de armónicas.
- Se emplean cuando las armónicas no tienen una frecuencia fija, lo que sucede comúnmente en los ciclo-conversores y hornos de arco.
- Estos filtros también tienen una frecuencia de sintonía.
- Presentan una alta impedancia para la frecuencia debajo a la de sintonía y una alta impedancia para frecuencias arriba a la de sintonía.
- El factor de calidad del filtro Q_0 es bajo y se define como $Q = X_0/R$, entre 0.5 y 4.

Entre las principales ventajas se tienen:

- Atenúan un amplio espectro de armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia.
- Es muy robusto frente a desintonías comparado con el filtro sintonizado simple.

- Entre las principales desventajas se tienen:
- Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactúa con la red.
- Presenta pérdidas adicionales debido a la resistencia incorporada.

a.2) Filtros Desintonizados o antirresonantes

Estos filtros se diseñan para presentar una frecuencia de resonancia por debajo de la menor armónica que tiene el sistema eléctrico, que generalmente corresponde a la 5ta armónica.

Normalmente el valor de la frecuencia de desintonía se encuentra comprendida entre 228 Hz y 282 Hz (para sistemas con frecuencia nominal de 60 Hz), la cual se obtiene agregando un reactor de desintonía en serie con los capacitores de uso convencional.

Este reactor elevará la tensión del capacitor por encima de la tensión de la red eléctrica, por lo que la tensión nominal del capacitor ha de elegirse superior a la tensión de la red eléctrica. El valor de la sobretensión en el capacitor dependerá del grado de desintonía que se elija.

El objetivo el filtro desintonizado es evitar la amplificación de armónicos causadas por las resonancias entre las reactancias y capacitancias y evitar la sobrecarga en los bancos de capacitores.

Los filtros desintonizados, tienen además un efecto parcial de filtrado, permitiendo la reducción del nivel de distorsión armónica de voltaje existente en la red, y este efecto es mayor a medida que la frecuencia de resonancia del filtro se aproxima a la frecuencia de resonancia armónica natural, es decir cuanto mayor es el grado de desintonía menor será la absorción de armónicos.

El mayor efecto de absorción de los armónicos (grado de filtrado) dependerá de la impedancia de cortocircuito del sistema eléctrico y de la resistencia residual del circuito de filtrado.

Se recomienda el uso de los filtros antirresonantes (o de rechazo) en todos los casos en que la relación entre las cargas generadoras de armónicos y la carga total se encuentre en el orden del 20% al 30%, dependiendo del grado de distorsión que presenten las cargas no lineales.

a.3) Aplicación de los filtros en general

El uso de los filtros para eliminación de armónicos en instalaciones industriales y en las redes eléctricas con compensación capacitiva, permiten obtener los siguientes beneficios:

- Compensación de la potencia reactiva a la frecuencia industrial para un factor de potencia definido.
- Disminución del porcentaje de distorsión armónica total (THD)
- Eliminación del fenómeno de resonancia, que surgiría por la conexión de capacitores sin protección contra armónicos.
- Disminución de las pérdidas activas en cables y dispositivos electromagnéticos por la reducción del THD.

b) Filtros Activos

Es un equipo de electrónica de potencia con control digital, que se caracteriza por el uso de uno o más componentes activos (que proporcionan cierta forma de amplificación de la energía). Típicamente un elemento activo puede ser un transistor o un amplificador operacional.

Este filtro posee sensores que miden la corriente armónica y la eliminan, es decir inyectan armónicos en contrafase.

2.2.3 Diseño de un filtro de armónicos

En el diseño de un filtro de armónicas, se requiere información sobre la configuración del sistema eléctrico, las impedancias de sus componentes, (transformadores, líneas de transmisión, fuentes generadoras, capacitores,

filtros, reactores, cargas), factor de carga, el nivel básico de aislamiento, las tensiones de operación y la frecuencia nominal.

Para ello de acuerdo con (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Wayne, 2004), debemos seguir las siguientes recomendaciones:

Definir la capacidad del filtro

El filtro, además de filtrar las corrientes armónicas, proporciona al sistema eléctrico, las necesidades de energía reactiva para mejorar el factor de potencia y para mantener la tensión apropiada en las horas de punta.

La capacidad nominal del banco de capacitores del filtro, siempre es mayor a la capacidad efectiva del filtro, debido al efecto sustractivo del reactor y por el sobredimensionamiento del banco de capacitores.

Para determinar los requerimientos de potencia reactiva, se debe de considerar: el rango de variación de tensión del sistema eléctrico, el rango de variación de la carga, el número de pasos del filtro que serán conectados, la configuración normal y de contingencias del sistema existente y futuro.

Selección inicial de la frecuencia de sintonía del filtro

Los filtros no son sintonizados a una frecuencia armónica exacta. En condiciones de resonancia, la baja impedancia hace que todas las corrientes armónicas cercanas a esa frecuencia sean absorbidas por el filtro, entonces el filtro requerido será más grande y más costoso.

Además, la interacción del filtro con la impedancia del sistema, puede dar lugar a una resonancia paralelo a una frecuencia casi menor que la frecuencia de sintonía.

Es práctico sintonizar el filtro en un rango entre el 1 y el 10% debajo de la frecuencia deseada, lo cual permitirá un suficiente filtrado de armónicos, pero también permitirá la desintonización del filtro.

El objetivo de sintonizar el filtro también puede ser evitar las armónicas en vez de eliminarlas, y se usa cuando los niveles de distorsión no son muy críticos, pero se quiere evitar sobrecargar los capacitores del filtro con las corrientes armónicas.

Optimización de la configuración del filtro

En la norma IEEE Std 519-2014 se proporcionan los límites de distorsión armónica tanto para la corriente como para la tensión armónica, para condiciones normales y para condiciones anormales.

Los estudios de armónicos, realizados a través de un programa de simulación de armónicos, permiten conocer el número, la sintonización y la ubicación del filtro de armónicas.

Los factores a tomarse en cuenta son: número de pasos del filtro, salida de un filtro si es que hay más de uno, rango de variaciones de la tensión y de la carga, configuraciones normales y de contingencia del sistema de potencia, armónicas características y no características, armónicas presentes en el sistema, desintonización del filtro por variaciones de frecuencia en el sistema, rango de tolerancias de fabricación de los equipos, variación de la capacitancia con el cambio de temperaturas y salidas por falla de las unidades capacitoras del filtro.

Puede ocurrir que, a pesar de instalar el filtro, los niveles de distorsión siguen altos, debido a que la presencia del filtro ha causado una nueva resonancia paralela con el sistema, cercana a una de las frecuencias armónicas bajas. En este caso se debe de resintonizar el filtro a una frecuencia armónica menor. Si no se corrige entonces hay que instalar varios filtros.

Definir la capacidad de los componentes

Después de optimizar la solución a través de simulaciones con programas especializados, debemos definir las características técnicas de los componentes del filtro, como son el capacitor, el reactor, la resistencia y por último el interruptor asociado.

2.3 Conceptual

Se manejó el software especializado para simulación eléctrica denominado Power Factory - DigSilent, para determinar la influencia de los filtros en los efectos armónicos, tomando en cuenta las distorsiones tanto de voltaje como de corriente, en un sistema eléctrico con compensación capacitiva, para mejorar el factor de potencia de la red eléctrica.

2.4 Definición de términos básicos

- Energía activa: expresada en kilowatt-hora (kWh). Puede ser aprovechada luego de ser transformada en calor o trabajo mecánico por la máquina receptora. Esta energía corresponde a la potencia activa P (kW).
- Energía reactiva: expresada en kilovar-hora (kVARh). Es utilizada en los arrollamientos de motores, transformadores y generadores para crear el campo magnético para su funcionamiento. Esta energía corresponde a la potencia reactiva Q (kVAR). A diferencia de la energía activa, la energía reactiva resulta improductiva para el usuario.
- Factor de potencia: de una máquina eléctrica es igual a la relación entre la potencia activa P (kW) sobre la potencia aparente S (kVA) y puede variar entre 0 y 1.
- Capacidad: Medida de la aptitud de un generador, línea de transmisión, banco de transformación, de baterías, o capacitores para generar, transmitir o transformar la potencia eléctrica en un circuito; generalmente

se expresa en MW o kW, y puede referirse a un solo elemento, a una central, a un sistema local o bien un sistema interconectado.

- Calidad de la energía eléctrica: es el mayor grado de confiabilidad que puede disponer un suministro eléctrico. Un suministro de calidad tiene una señal de tensión lo más sinusoidal posible, una frecuencia constante y no presenta interrupciones de servicio.
- Armónicos: distorsiones periódicas de formas de ondas de corriente o de tensión en sistemas eléctricos.
- Corrientes armónicas: son las componentes similares de una corriente eléctrica periódica descompuesta en la serie de Fourier. Los armónicos tienen una frecuencia que es múltiplo (2, 3, 4, 5,n) de la frecuencia fundamental (60 Hz en Perú). El número "n" determina el rango de la componente armónica. Ejemplo: para la frecuencia fundamental de 60 Hz, el armónico de rango 5 presentará una frecuencia de 300 Hz.
- Espectro armónico: es la descomposición de una señal en sus armónicos en el dominio de la frecuencia. Así se representa en un diagrama de barras el porcentaje de cada una de las señales armónicas, cuya suma produce la señal total analizada.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

Las hipótesis son supuestos que se propondrán para una de las dimensiones, así como las dos dimensiones que en conjunto influyen en minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

a) Hipótesis general

- El diseño de filtros influye en la minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

b) Hipotesis específicas

- El diseño de filtros influye en la mejora de los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.
- Determinar de qué manera el diseño de filtros mejoran los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

3.2 Definición conceptual de las variables

a) Variable dependiente: Y

Minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

b) Variable independiente: X

Diseño de filtros

3.3 Definición conceptual de las variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Y: Minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva.</p>	<p>Distorsión de voltaje. Distorsión de corriente. Resonancia armónica.</p>	<p>Tasa de distorsión armónica total (THDv y TDHi)</p>
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>X: Diseño de filtros pasivos</p>	<p>Potencia del Filtro. Límites de tensión. Límites de corriente.</p>	<p>Calidad del filtro. (QF)</p>

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo y diseño de investigación presentan las siguientes características:

a) Tipo de investigación

- Descriptiva
- Explicativa
- Correlacional

b) Diseño

- No experimental

4.2 Método de investigación

El método de investigación es de carácter mixto, por una parte es cualitativo al hacer un análisis de la realidad, observación y evaluación del fenómeno mediante mediciones de armónicos, el sustento teórico de la ingeniería eléctrica, y por otra cuantitativo al utilizar el software de simulación eléctrica para ingeniería, denominado Power Factory - DigSilent.

4.3 Población y muestra

La población está constituida por los usuarios con características típicas de cargas industriales, que pertenecen a la red eléctrica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional peruano (SEIN).

El tamaño de muestra de la red eléctrica a analizar se circunscribe a una red típica de distribución de una zona industrial, que parte de una subestación de 20 KV con cargas en niveles de 220 Voltios y 440 Voltios, donde se analizarán los efectos de los armónicos, debido a carga no lineales.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

El presente trabajo de investigación se desarrolló en una red industrial típica de la ciudad de Lima, para el año 2019.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

La recolección de datos de los principales parámetros de la red eléctrica se tomará de la información que tiene publicada el Comité de Operación Económica del Sistema (COES), que es la entidad que tiene a su cargo la operación y mantenimiento del sector eléctrico a nivel nacional en el Perú.

La recolección de datos del nivel de armónicos para la red típica a analizar, y que contiene cargas no lineales, se tomará de mediciones ya realizadas (en otros estudios), cuyos valores son bastante típicos para este tipo de cargas.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis y el procesamiento de los datos se utilizó el software especializado denominado Power Factory-DigSilent, que es un simulador de procesos eléctricos, y, que es el programa estándar a nivel de Perú, con el que se realizan los estudios de simulaciones eléctricas.

V. RESULTADOS

Los resultados presentados se sustentan en el desarrollo de simulaciones de flujo de carga, flujo de armónicos, análisis de barrido de frecuencia, análisis de distorsiones armónicas tanto de tensión como de corriente, además del cálculo del filtro de armónicos adecuado, para una subestación o barra típica industrial, ubicada dentro del sistema de distribución del sistema eléctrico interconectado (SEIN), en el nivel de tensión de 20 kV.

Se realizaron simulaciones en la barra típica industrial, de la red de distribución en 20 kV, para los siguientes casos de estudio:

- Caso 1: Sistema eléctrico, sin compensación del factor de potencia (sin capacitores)
- Caso 2: Sistema eléctrico, con compensación del factor de potencia a través de capacitores.
- Caso 3: Sistema eléctrico, con filtros de armónicos.

4.1 Sistema eléctrico sin compensación del factor de potencia

4.1.1 Análisis de flujo de carga

La red eléctrica utilizada para el análisis del presente trabajo de investigación se muestra en la figura 16, donde se presenta la red equivalente de la red primaria de distribución, que llega a la subestación típica industrial, representada por la Barra 1 con un nivel de tensión de 20 kV. De esta barra, a través de dos transformadores de 5 MVA cada uno, se alimenta la barra “Barra 2” de 220 voltios y la barra “Barra 3” de 440 voltios, se alimentan cargas del tipo lineal y no lineal.

Entre las cargas no lineales están las cargas “Carga 1” y “Carga 2” de 200 KVA y factor de potencia de 0.82 cada una, las cargas “Carga 3” y “Carga 4” de 500 KVA y factor de potencia de 0.80 cada una, las cargas de dos motores de corriente continua de 100 kW cada uno, y las cargas lineales correspondientes a dos motores asíncronos de 225 kW cada uno.

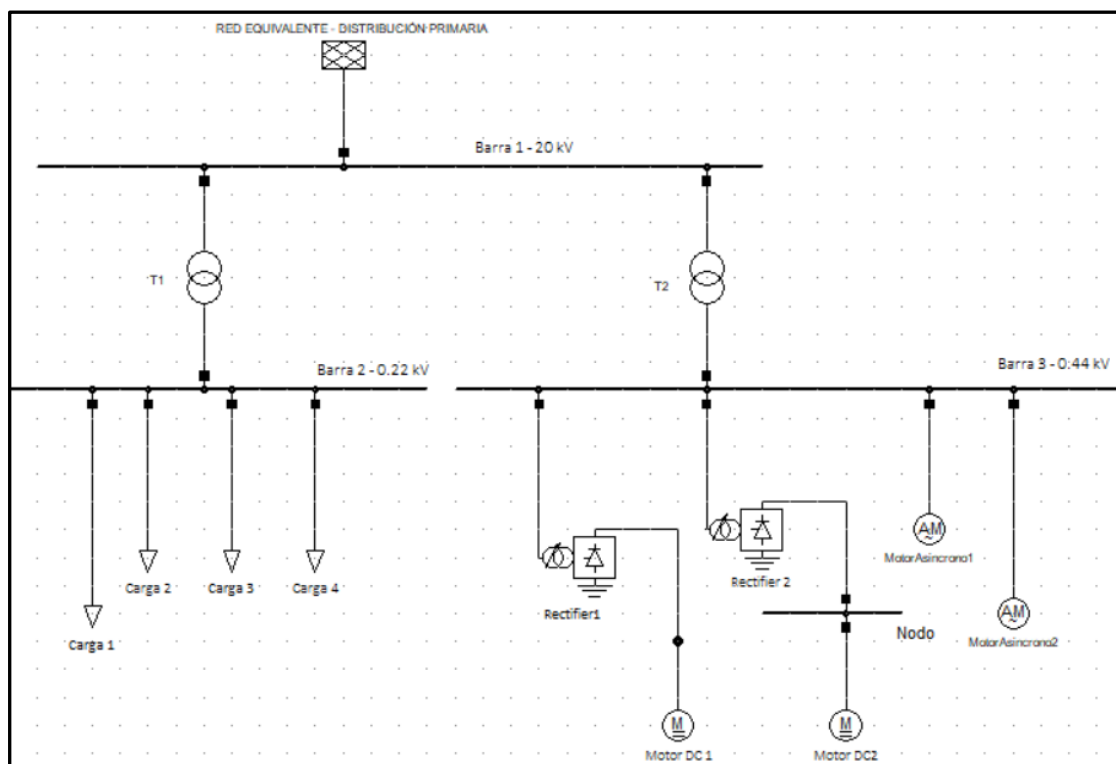


Figura 16. Red eléctrica de subestación típica industrial.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Realizado el estudio de flujo de carga, en la red eléctrica de la subestación típica industrial, cuyos resultados se muestran en la figura 17, se obtuvieron los siguientes factores de potencia ($\cos \varphi$).

- Barra 1 : $\cos \varphi = 0.818$
- Barra 2 : $\cos \varphi = 0.806$
- Barra 3 : $\cos \varphi = 0.869$

Los resultados obtenidos para el factor de potencia son muy bajos, lo que se traduce en un mayor consumo de energía reactiva.

En un sistema eléctrico de potencia, el factor de potencia debe estar encima de 0.95, con la finalidad de no perder eficiencia en el uso de la energía eléctrica, y para no pagar la energía reactiva consumida en exceso, a la empresa distribuidora.

La solución para elevar los factores de potencia se realiza mediante la instalación de bancos de capacitores en las barras “Barra 2” y “Barra 3” en

la red de la subestación típica industrial.

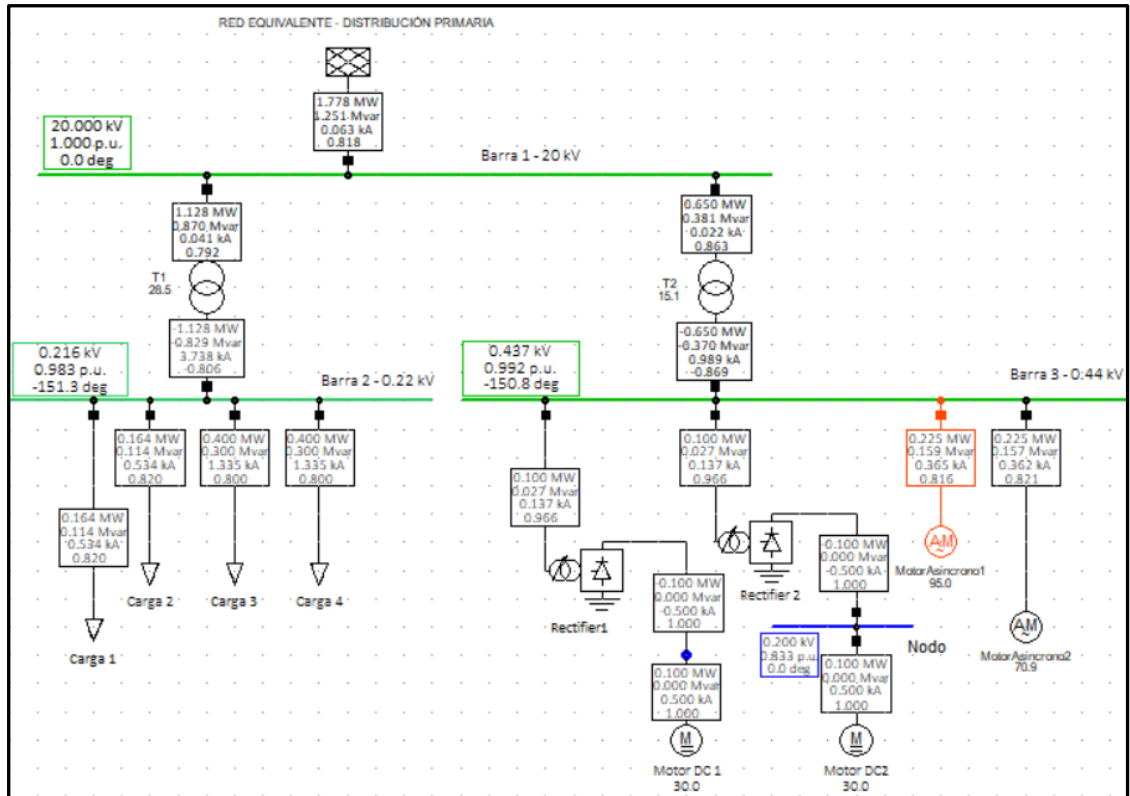


Figura 17. Resultados flujo de carga, sin compensación reactiva.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

4.1.2 Análisis de flujo de armónicos

Se realizó el estudio de flujo de armónicos, tomando como base el armónico 5, para obtener el indicador de las distorsiones totales de voltaje (THDv) en cada una de las tres barras analizadas. En la figura 18 se muestran los resultados que presentamos a continuación:

- Barra 1 : THDv = 5.11 %
- Barra 2 : THDv = 7.40 %
- Barra 3 : THDv = 8.61 %

Los indicadores obtenidos para la distorsión total de voltaje (THDv), están por encima de los límites recomendados por la norma IEEE Std 519-2014 “Prácticas y requerimientos recomendados para el control de armónicos en

sistemas eléctricos de potencia. El valor límite recomendado para el THDv, es de 5% para redes con tensiones nominales hasta 69 kV.

Asimismo, obtuvimos el indicador de las distorsiones totales de corriente THDi en cada una de las 3 barras analizadas:

- Barra 1 : THDi = 10.9 %
- Barra 2 : THDi = 14.2 %
- Barra 3 : THDi = 25.1 %

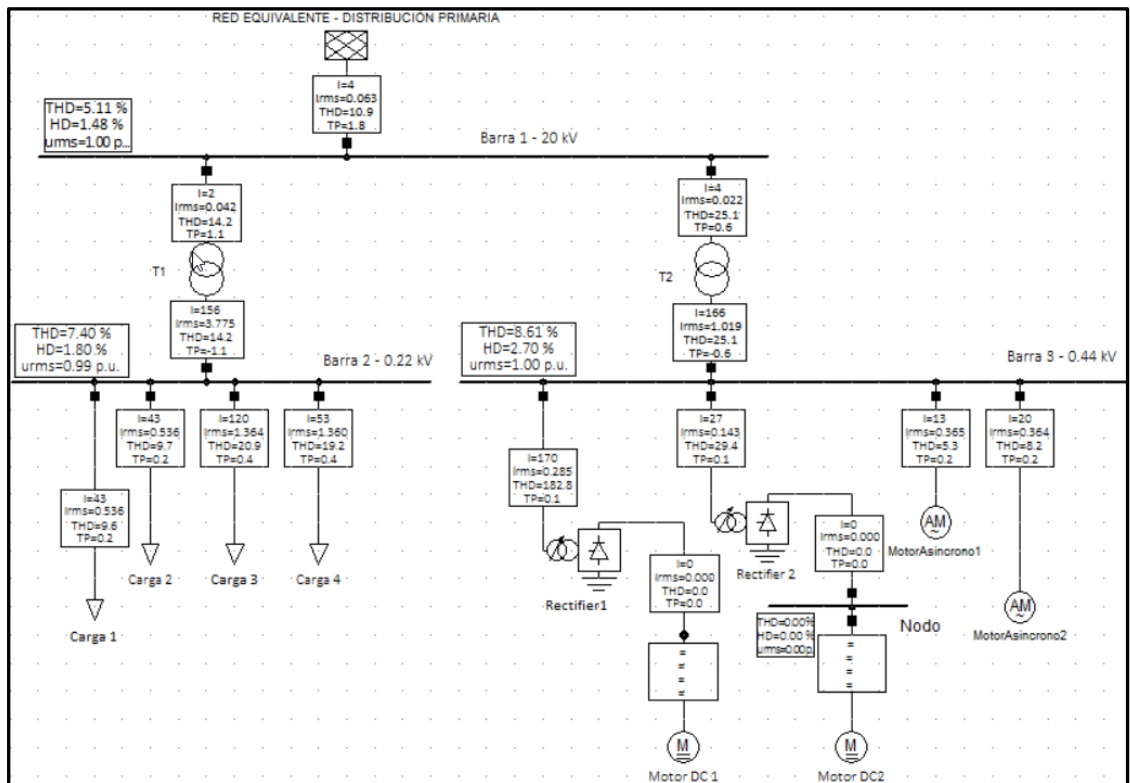


Figura 18. Resultados flujo de armónicos, sin compensación reactiva.

Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

4.1.3 Análisis de distorsiones de voltaje

Del análisis de flujo de armónicos, se obtienen las distorsiones armónicas de voltaje línea a línea en kV, tanto para la “Barra 2” como para la “Barra 3”. Resultados que se muestran en la figura 19 y figura 20 respectivamente.

Las distorsiones de tensión se presentan en función del orden de armónicos.

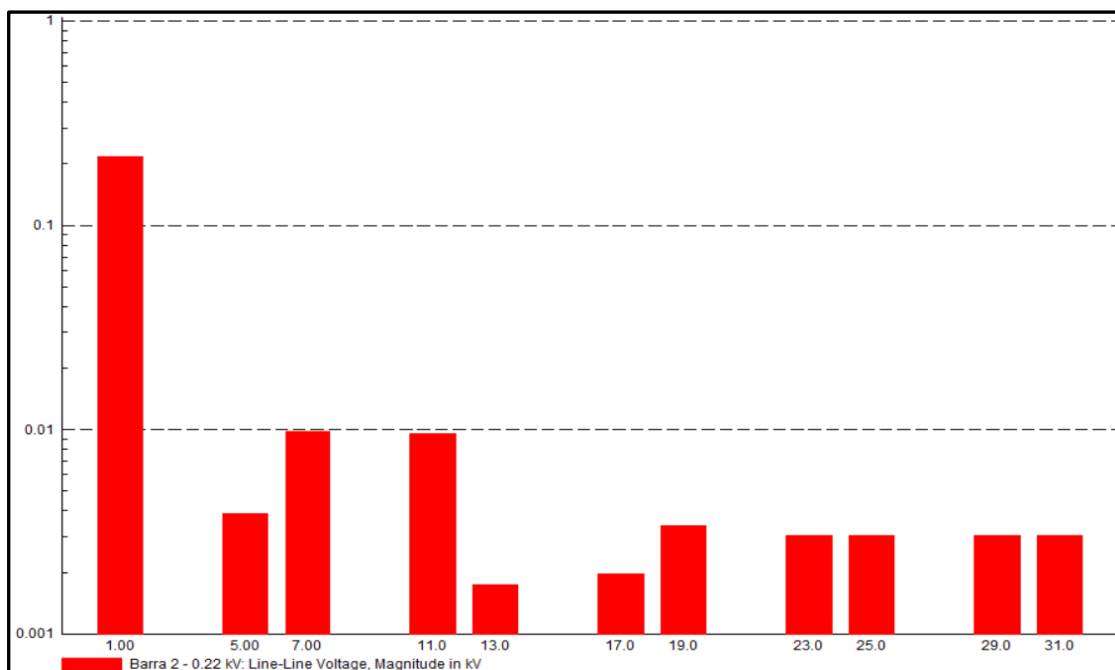


Figura 19. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

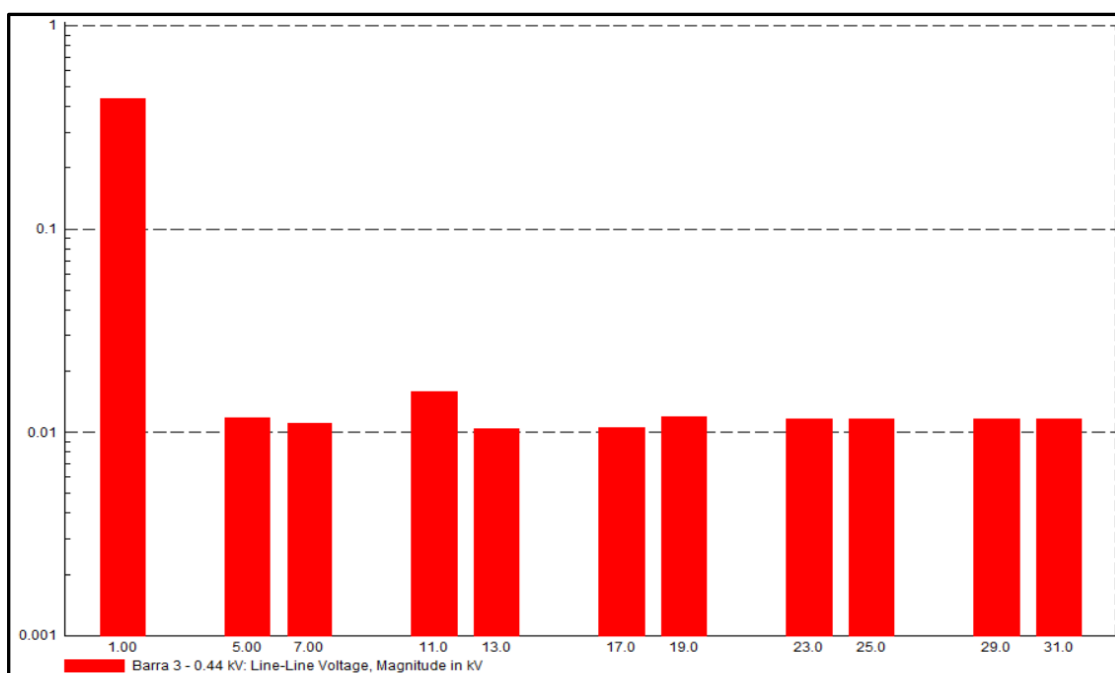


Figura 20. Distorsión de voltaje en “Barra 3” por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Los resultados mostrados en las figuras 19 y 20, señalan que las distorsiones de los armónicos de tensión, superiores al armónico 1, son pequeños del orden de 12 voltios (aproximadamente el 2%).

4.1.4 Análisis de barrido de frecuencias

El análisis de barrido de frecuencias, nos indica como varía la impedancia de la red eléctrica cuando varía la frecuencia, en una determinada barra o subestación.

Las figuras 20 y 21 muestran respectivamente, estas variaciones tanto para la “Barra 2” como para la “Barra 3”. Se observa un comportamiento lineal, característico de un circuito inductivo, como es el caso de la red analizada, donde no se ha considerado ni línea ni cables.

Esta característica lineal, nos indica que no hay resonancias en este sistema eléctrico, pues la inductancia varía proporcionalmente con el incremento de la frecuencia (orden de armónicos)

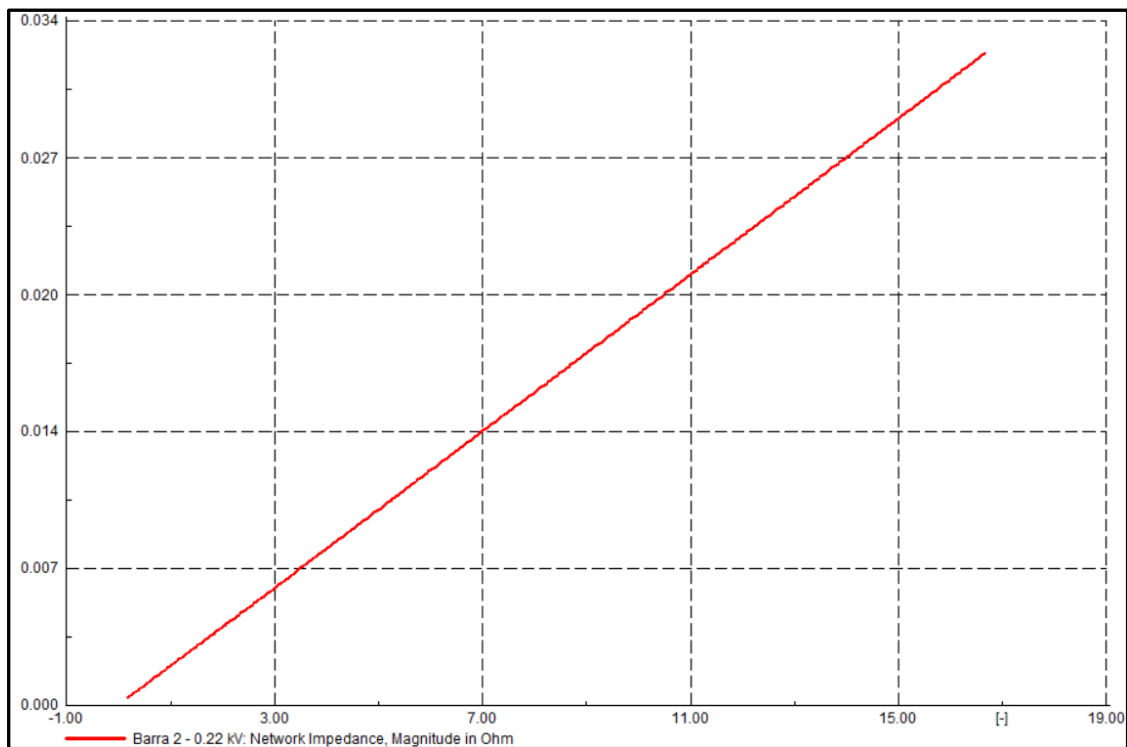


Figura 21. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

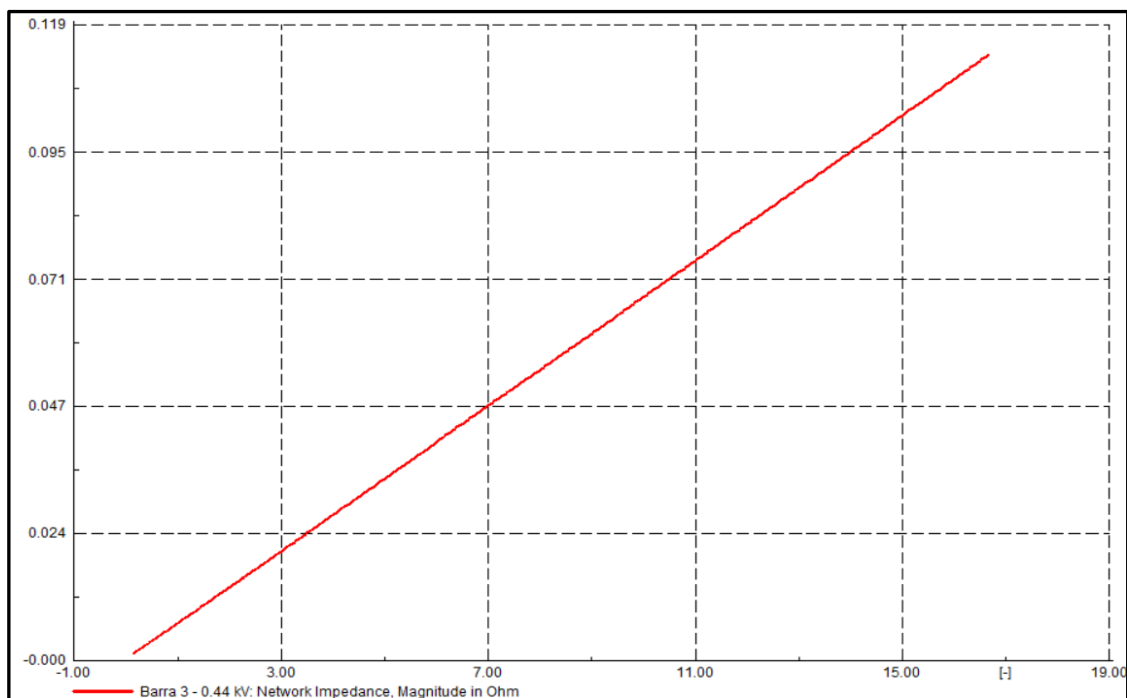


Figura 22. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

4.2 Sistema eléctrico con compensación del factor de potencia a través de capacitores

De acuerdo con el análisis y resultados hechos en la sección 4.1.1, se obtuvieron factores de potencia menores que 0.95. Estos resultados obligan a realizar la compensación de energía reactiva del sistema eléctrico, para mejorar estos factores, colocando bancos de condensadores en las barras “Barra2” y “Barra 3” de 750 KVA y 350 KVA respectivamente.

El dimensionamiento de la capacidad de potencia reactiva de los bancos de capacitores, se realizó aplicando el programa de simulación Power Factory DigSilent, de manera de obtener factores de potencia cercanos a la unidad.

4.1.1 Análisis de flujo de carga

El estudio de flujo de carga se realizó en la red eléctrica de la figura 16, correspondiente a una subestación típica industrial. Sus resultados se muestran en la figura 23, presentan los siguientes factores de potencia ($\cos \varphi$).

- Barra 1 : $\cos \varphi = 0.997$
- Barra 2 : $\cos \varphi = 0.997$
- Barra 3 : $\cos \varphi = 0.999$

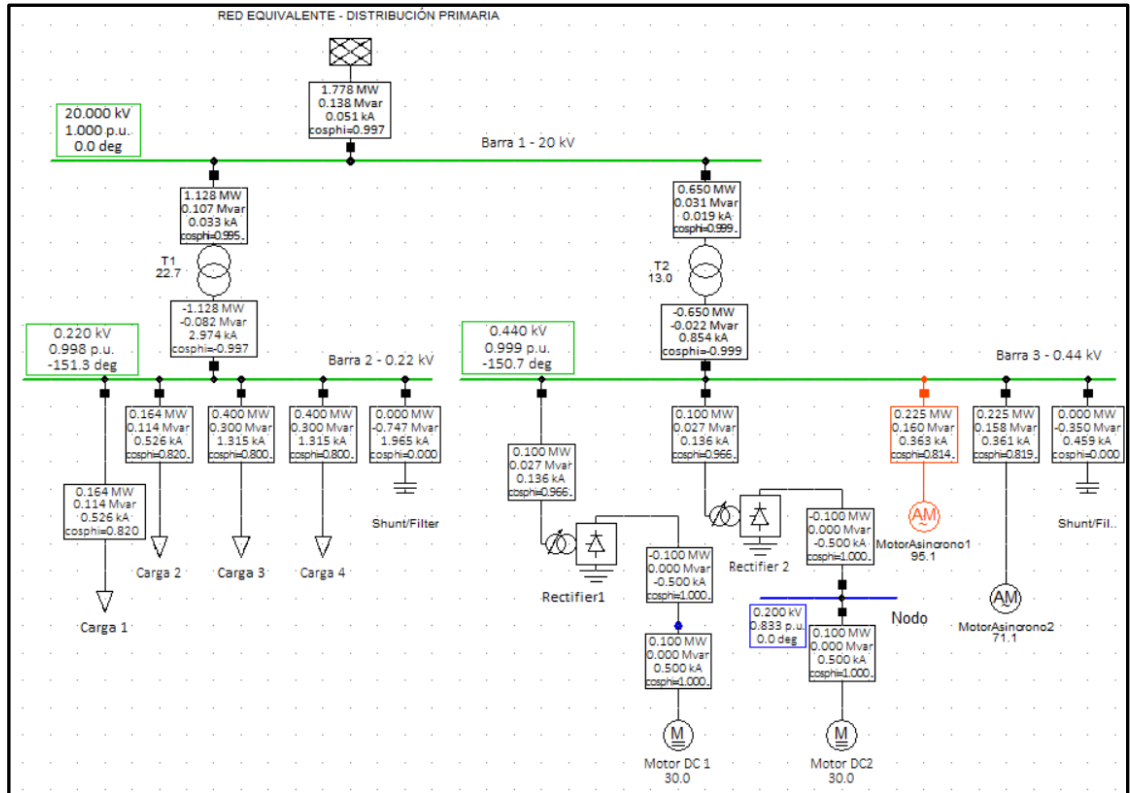


Figura 23. Resultados flujo de carga, con compensación reactiva.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Con la ubicación de los capacitores en las barras “Barra 2” y “Barra 3”, los factores de potencia mejoraron, encontrándose alrededor de 1.

4.2.2 Análisis de flujo de armónicos

Se realizó el estudio de flujo de armónicos, tomando como base el armónico 5, para obtener el indicador de las distorsiones totales de voltaje (THDv) en cada una de las tres barras analizadas. En la figura 24 se muestran los resultados, que presentamos a continuación:

- Barra 1 : THDv = 53.43 %
- Barra 2 : THDv = 65.00 %
- Barra 3 : THDv = 217.03 %

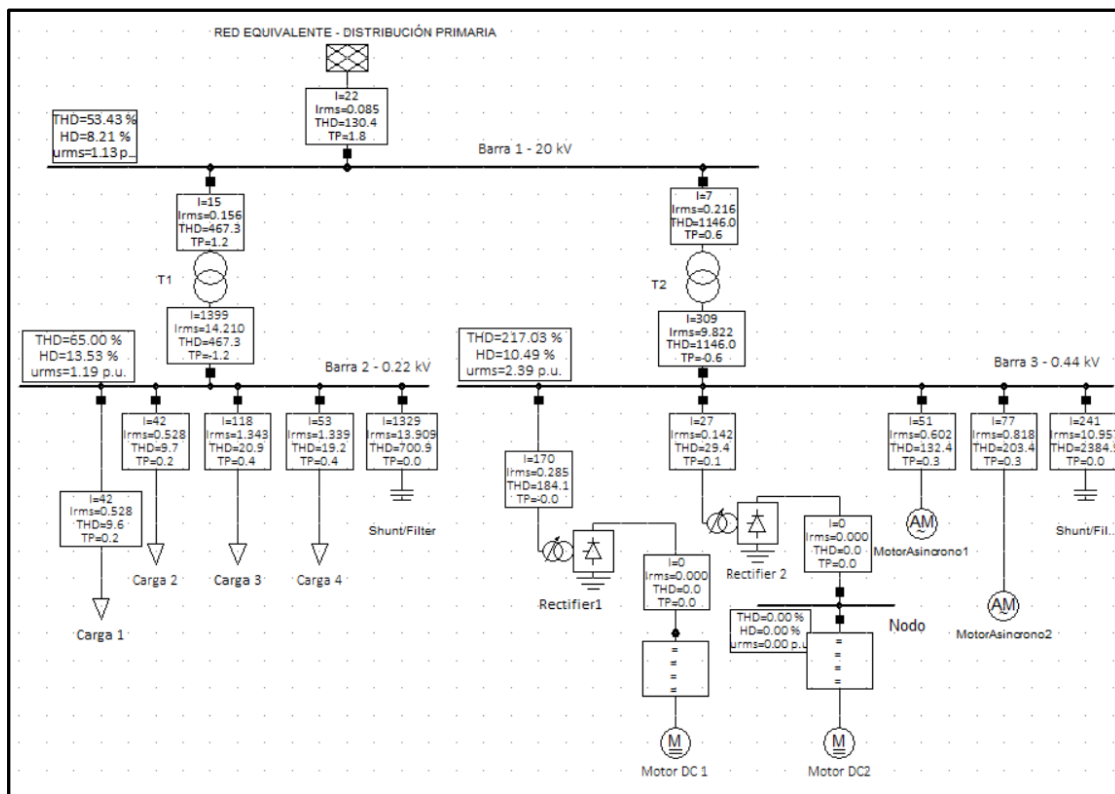


Figura 24. Resultados flujo de armónicos, con compensación reactiva.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Con la entrada de los bancos de capacitores, los indicadores de la distorsión total de voltaje (THDv) se han incrementado fuertemente. Se verifica que los capacitores mejoran el factor de potencia, pero empeoran los indicadores de THDv.

Los valores obtenidos están por encima de los límites recomendados por la norma IEEE Std 519-2014 "Prácticas y requerimientos recomendados para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. El valor límite recomendado para el THDv, es de 5% para redes con tensiones nominales hasta 69 kV.

Asimismo, obtuvimos el indicador de las distorsiones de armónicos totales de corriente THDi en cada una de las 3 barras analizadas:

- Barra 1 : THDi = 130.4 %
- Barra 2 : THDi = 467.3 %
- Barra 3 : THDi = 1,146.0 %

4.2.3 Análisis de distorsiones de voltaje

Del análisis de flujo de armónicos, obtenemos las distorsiones de voltaje línea a línea en kV, tanto para la “Barra 2” como para la “Barra 3”, las cuales se muestran en las figuras 25 y figura 26 respectivamente.

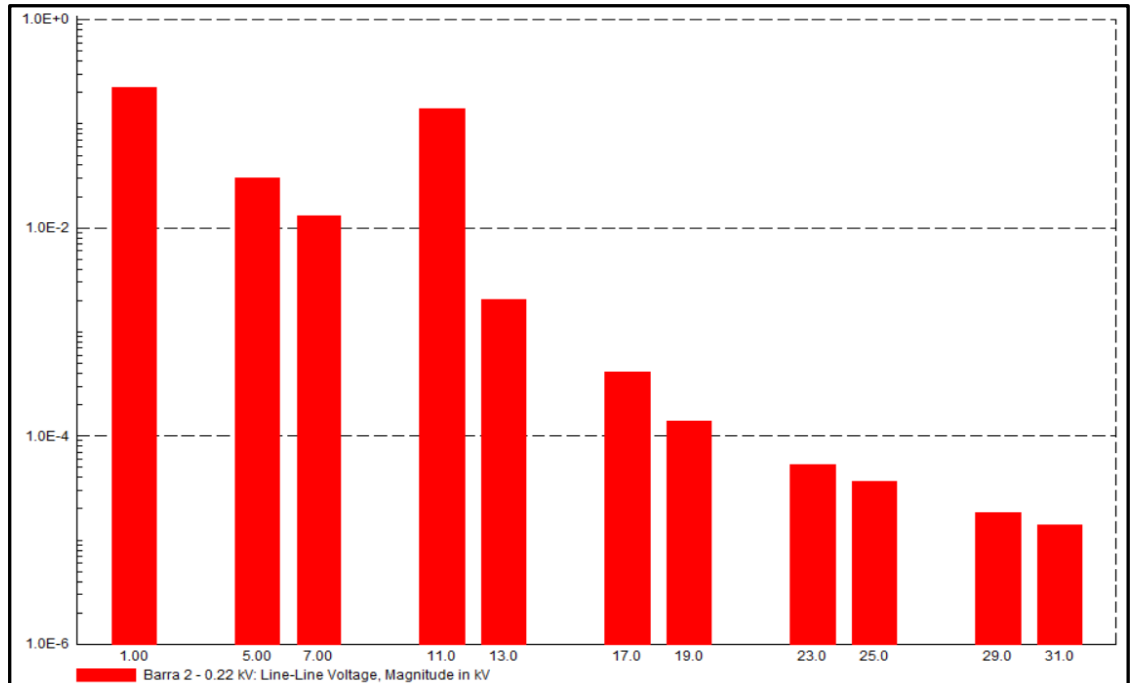


Figura 25. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Los resultados para las barras “Barra 2” y “Barra 3”, nos muestran que las distorsiones de los armónicos de tensión, superiores al armónico de orden 1, ya no son pequeños.

Los capacitores han originado la distorsión de la onda de tensión, en especial en el armónico 11.

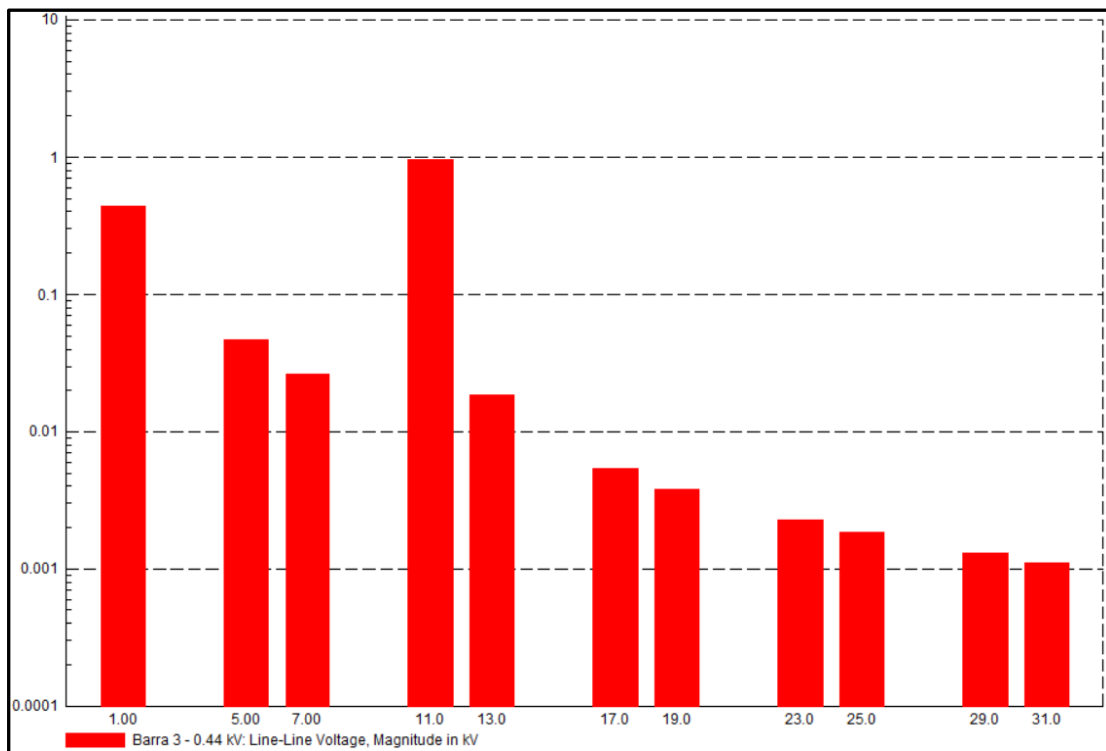


Figura 26. Distorsión de voltaje en “Barra 3” por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

4.2.4 Análisis de barrido de frecuencias

El análisis de barrido de frecuencias, tanto para la “Barra 2” como para la “Barra 3”, cuyos resultados se presentan en las figuras 27 y 28 respectivamente, muestran un comportamiento no lineal, debido a la inclusión de los capacitores para compensar el factor de potencia.

Se presentan picos que corresponden a puntos de resonancia paralela entre los capacitores y el sistema.

En la figura 27, la “Barra 2” presenta una resonancia en el orden armónico 5.415 (324.9 Hz.), y una resonancia en el orden armónico 11.027 (661.62 Hz.)

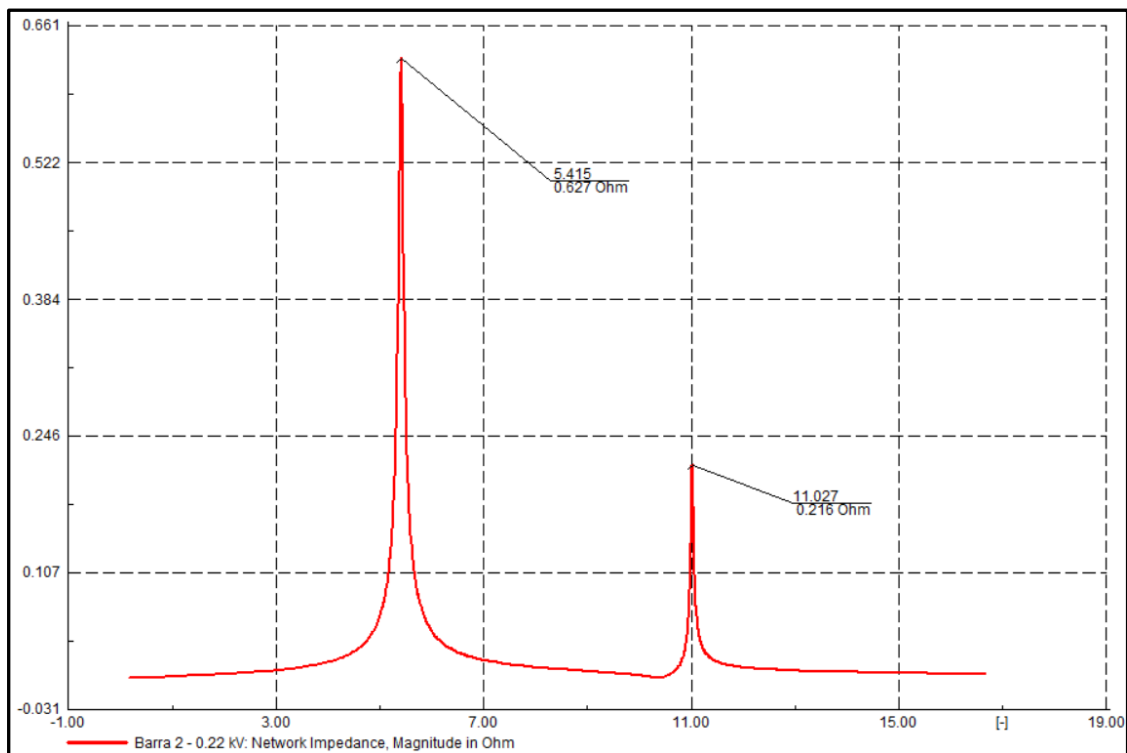


Figura 27. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

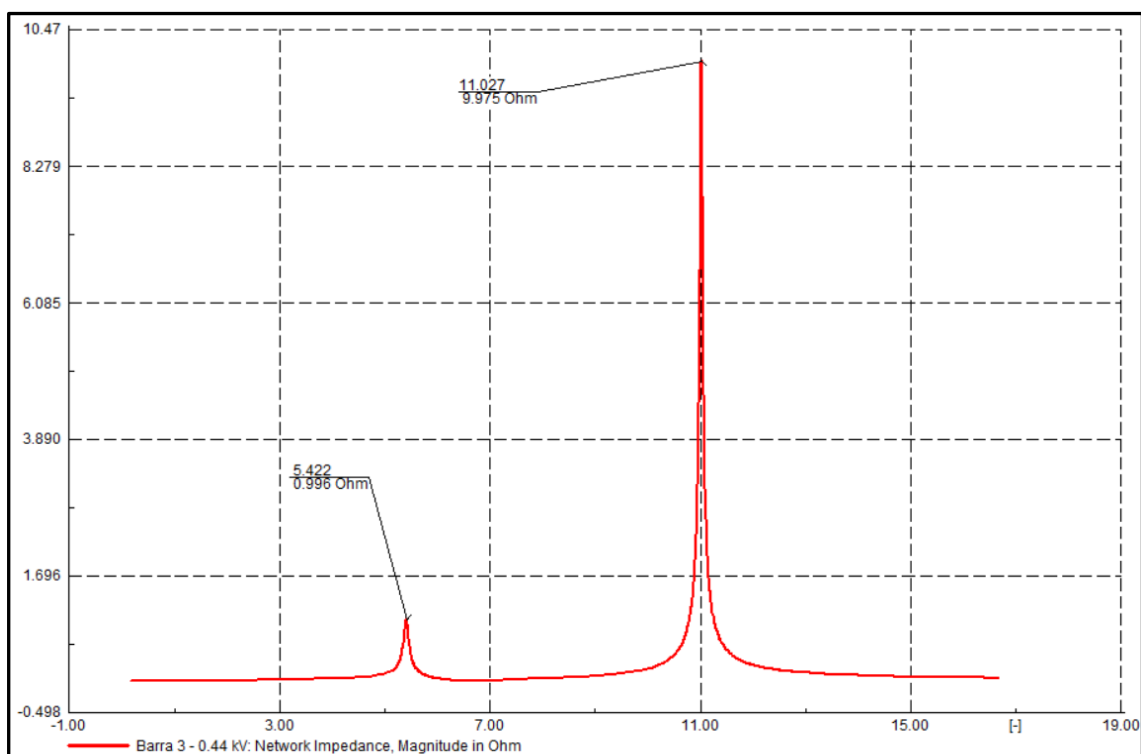


Figura 28. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

En la figura 28, la “Barra 3” presenta una resonancia en el orden armónico 5.422 (325.32 Hz.), y una resonancia en el orden armónico 11.027 (661.62 Hz.)

La solución para evitar o mitigar estos puntos de resonancia consiste en diseñar filtros de armónicos, los cuales cumplen la función de proveer al sistema eléctrico de la energía reactiva para compensar el factor de potencia, y la eliminación de las corrientes armónicas.

4.3 Sistema eléctrico con filtros de armónicos

De acuerdo con el análisis y resultados hechos en la sección 4.2.1, se obtienen factores de potencia mayores a 0.95, cercanos a 1. Esto significa que la instalación de los bancos de capacitores mejora el factor de potencia de la instalación eléctrica, pero empeora los límites de distorsión armónica, según se aprecia en la sección 4.2.2.

La solución para mejorar el factor de potencia y eliminar los armónicos es diseñar filtros adecuados, aprovechando los capacitores instalados. En Anexo 2, se adjunta las etapas que se siguieron para el diseño de los filtros pasivos de armónicos, utilizados en el presente trabajo de investigación.

4.3.1 Análisis de flujo de carga

El estudio de flujo de carga con filtros de armónicos, se hizo sobre la red eléctrica mostrada en la figura 16, correspondiente a una subestación típica industrial.

Sus resultados se muestran en la figura 29, donde se obtuvieron los siguientes factores de potencia ($\cos \varphi$).

- Barra 1 : $\cos \varphi = 0.999$
- Barra 2 : $\cos \varphi = 0.999$
- Barra 3 : $\cos \varphi = 1.000$

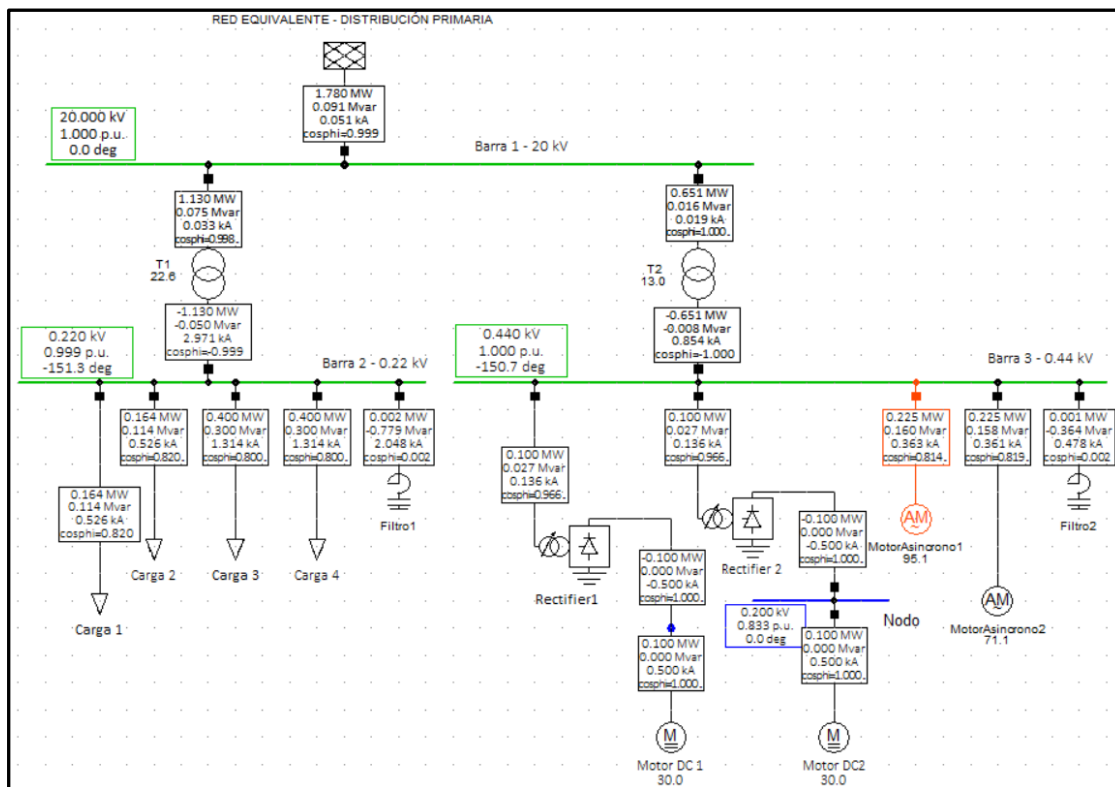


Figura 29. Resultados flujo de carga, con filtro de armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Con la ubicación de los capacitores en las barras “Barra 2” y “Barra 3”, los factores de potencia mejoraron, encontrándose alrededor de 1.

4.3.2 Análisis de flujo de armónicos

Se realizó el estudio de flujo de armónicos, tomando como base el armónico 5, para obtener el indicador de las distorsiones totales de voltaje (THDv) en cada una de las tres barras analizadas. En la figura 30 se muestran los resultados, que presentamos a continuación:

- Barra 1 : THDv = 2.61 %
- Barra 2 : THDv = 3.01 %
- Barra 3 : THDv = 5.34 %

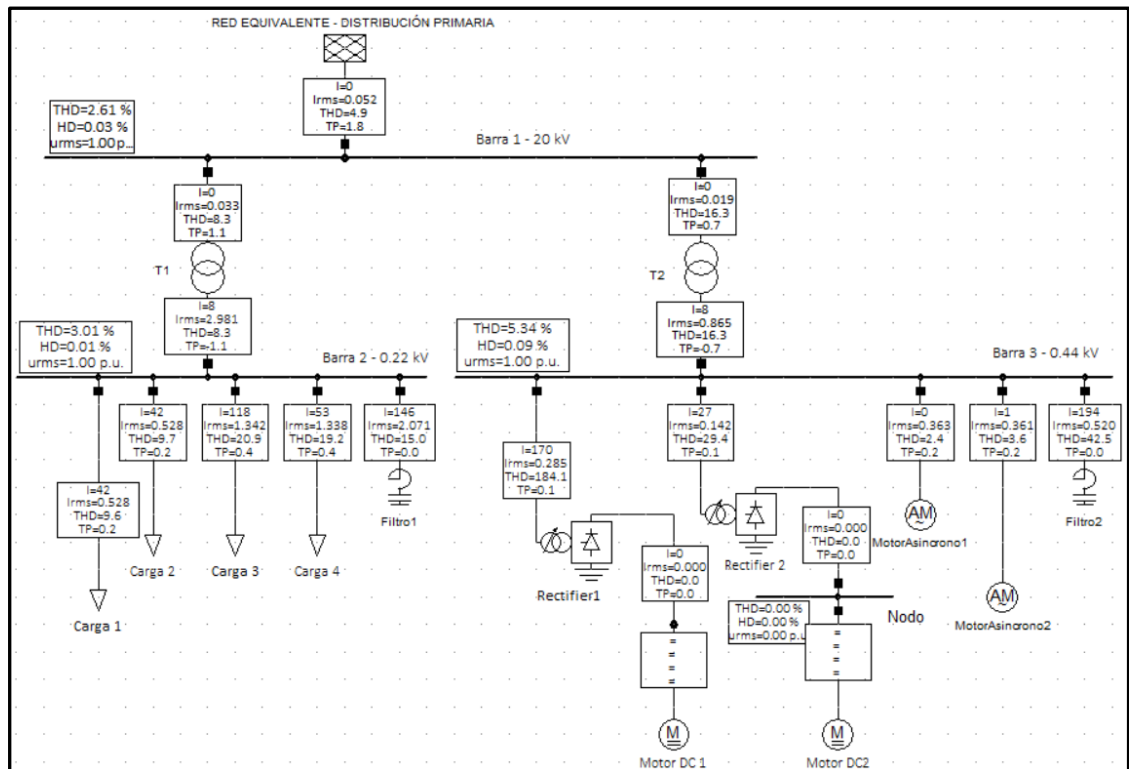


Figura 30. Resultados flujo de armónicos, con filtro de armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Con los filtros armónicos, los indicadores de la distorsión total de voltaje (THDv) están dentro los límites recomendados por la norma IEEE Std 519-2014 “Prácticas y requerimientos recomendados para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”.

El valor límite recomendado para el THDv, es de 5% para redes con tensiones nominales hasta 69 kV.

Asimismo, obtuvimos el indicador de las distorsiones totales de corriente THDi en cada una de las 3 barras analizadas:

- Barra 1 : THDi = 4.9 %
- Barra 2 : THDi = 8.3 %
- Barra 3 : THDi = 16.3 %

4.3.3 Análisis de distorsiones de voltaje

Del análisis de flujo de armónicos, obtenemos las distorsiones de voltaje línea a línea en kV, tanto para la “Barra 2” como para la “Barra 3”, las cuales se muestran en las figuras 31 y figura 32 respectivamente.

Las distorsiones de tensión se presentan en función del orden de armónicos.

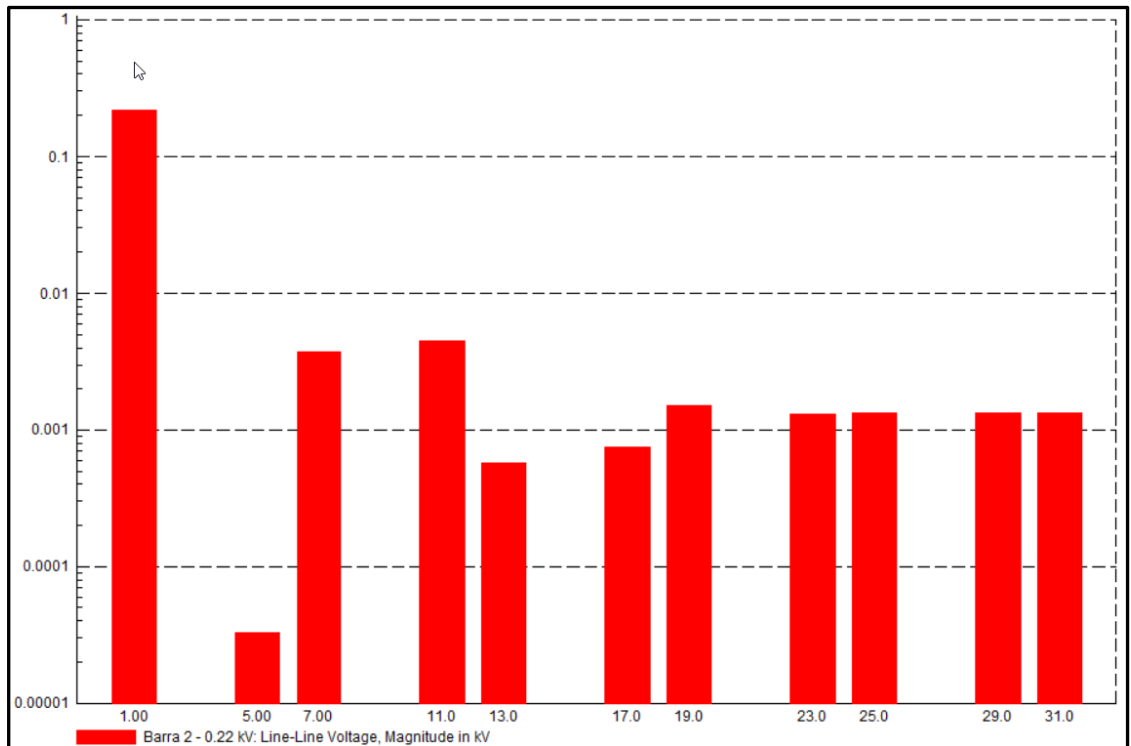


Figura 31. Distorsión de voltaje en “Barra 2” por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

Los resultados de las figuras 31 y 32, referidos a las barras “Barra 2” y “Barra 3”, nos indican que las distorsiones de los armónicos de tensión, superiores al armónico de orden 1 (fundamental), vuelven a ser pequeños.

Significa que los filtros han corregido las distorsiones de voltaje en ambas barras, reduciéndolas aproximadamente al 2%.

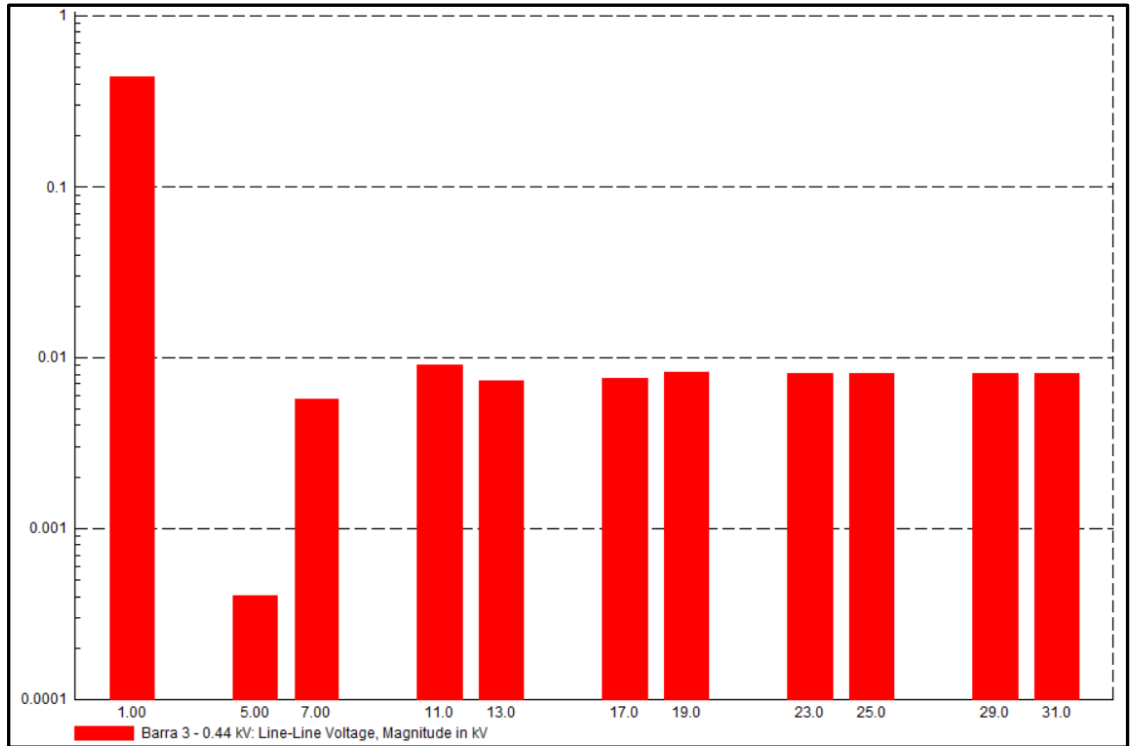


Figura 32. Distorsión de voltaje en "Barra 3" por armónicos.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

4.3.4 Análisis de barrido de frecuencias

El análisis de barrido de frecuencias, tanto para la "Barra 2" como para la "Barra 3", cuyos resultados se presentan en las figuras 33 y 34 respectivamente, muestran un comportamiento no lineal, debido a que el filtro dispone de capacitores para compensar el factor de potencia.

Se presentan picos que corresponden a puntos de resonancia paralela entre los capacitores y el sistema.

En la figura 33, observamos que en la "Barra 2" de la red eléctrica, presenta resonancia paralela en el orden armónico 3.672 (220.32 Hz.), el cual no causará problemas al sistema eléctrico porque no es un orden armónico dañino característico.

Además, presenta una resonancia serie en el orden armónico 5.025 (301.5 Hz), la misma que no dañará al sistema, pues el filtro drenará esta corriente a tierra.

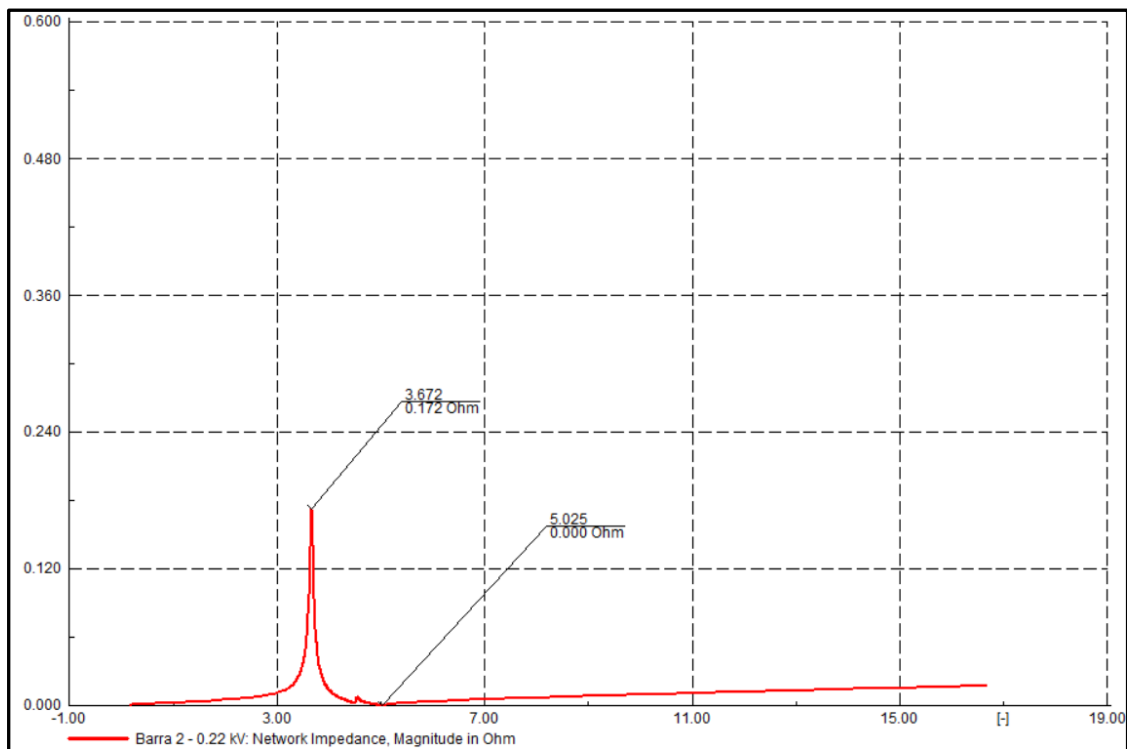


Figura 33. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 2”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

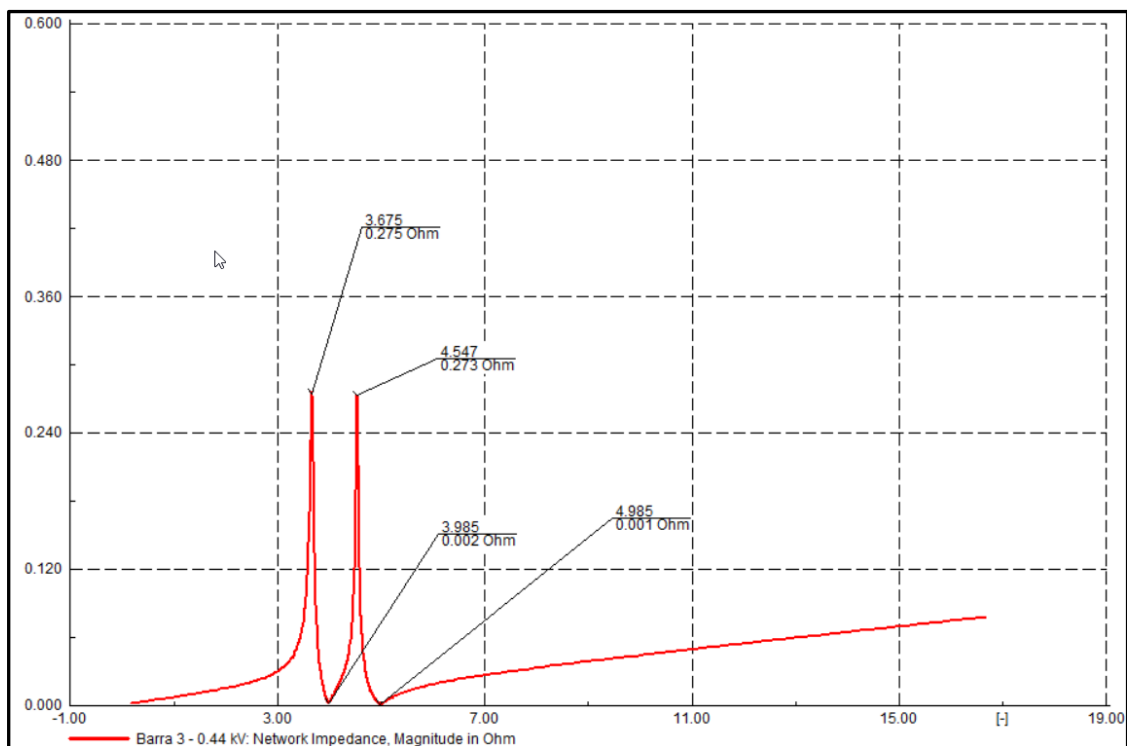


Figura 34. Variación de la impedancia con relación a la frecuencia en “Barra 3”.
Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

En la figura 34, observamos que en la “Barra 3” de la red eléctrica, presenta dos picos de resonancia paralela, una en el orden armónico 3.675 (220.5 Hz.) y otra en el orden armónico 4.547 (272.82), las mismas que no causarán problemas al sistema eléctrico, porque no corresponden a órdenes de armónicos dañinos característicos.

Además, presenta dos puntos de resonancia serie, una en el orden de armónico 3.985 (239.1 Hz) que no causará problemas al sistema eléctrico por ser un orden de armónico no dañino, y otra en el orden armónico 4.985 (299.1 Hz.), la misma que será derivada a tierra por el filtro.

4.4 Resumen de resultados

A continuación, se presenta la tabla 3, que contiene los resultados de los tres casos analizados.

Tabla 3

Resumen de resultados de los casos analizados

Variable	Caso1: Sin Capacitores	Caso 2: Con Capacitores	Caso 3: Con Filtros
Factor Potencia (p.u.)			
Barra 1	0.818	0.997	0.999
Barra 2	0.816	0.997	0.999
Barra 3	0.869	0.999	1.000
THD de voltaje (%)			
Barra 1	5.11	53.43	2.61
Barra 2	7.40	65.00	3.01
Barra 3	8.61	217.03	5.34
THD de corriente (%)			
Barra 1	10.90	130.40	4.90
Barra 2	14.20	467.30	8.30
Barra 3	25.10	1,146.00	16.30
HD de corriente (%)			
en Barra 1			
h = 7	6.50	13.90	2.80
h = 13	1.70	2.20	1.30
h = 19	1.60	0.40	1.20

Nota: THD = distorsión total de armónicos; HD = distorsión de armónicos

Fuente: (2020 UNAC) Autoría Propia

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

a) Contrastación de la hipótesis general

H0: El diseño de filtros no influye en minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

H1: El diseño de filtros si influye en minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

De los resultados presentados en la tabla 3, observamos que los indicadores de distorsión armónica total de voltaje (THDv), para el caso de considerar los filtros armónicos, son los siguientes:

- Barra 1 : THDv = 2.61 %
- Barra 2 : THDv = 3.01 %
- Barra 3 : THDv = 5.34 %

Para las Barras 1 y 2 los THDv, están menores a 5% (límite máximo aceptado por la norma IEEE Std 519-2014, salvo el caso de la Barra 3 que está un 6.8% encima del límite, que para efectos prácticos también cumple.

Por lo tanto, podemos rechazar la hipótesis nula, y aceptar que los filtros armónicos si influyen en la minimización de los armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

b) Contrastación de las hipótesis específicas

b1) H0: El diseño de filtros no mejora los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

H1: El diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

De la tabla 3, la variación del indicador de la distorsión armónica total de tensión THDv, fue la siguiente,

Antes del uso de filtros armónicos tenemos:

- Barra 1 : THDv = 53.43 %
- Barra 2 : THDv = 65.00 %
- Barra 3 : THDv = 217.03 %

Después del uso de filtros armónicos tenemos:

- Barra 1 : THDv = 2.61 %
- Barra 2 : THDv = 3.01 %
- Barra 3 : THDv = 5.34 %

Para las Barras 1 y 2 los THDv, están menores a 5% (límite máximo aceptado por la norma IEEE Std 519-2014, salvo el caso de la Barra 3 que está un 6.8% encima del límite, que para efectos prácticos también cumple.

Por lo tanto, podemos rechazar la hipótesis nula, y aceptar que los filtros armónicos si mejoran los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

b2) H0: El diseño de filtros no mejora los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

H1: El diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

De acuerdo con la definición presentada en (IEEE, 2014) el punto de acoplamiento común (PCC), es el punto en un sistema de suministro de energía público, eléctricamente más cercano a una carga particular, en el que otras cargas están o podrían estar conectadas.

El PCC es un punto ubicado aguas arriba de la instalación considerada.

En el caso del presente trabajo, el PCC corresponde a la “Barra 1” en el nivel de 20 kV, donde los límites de distorsión de corriente originada por los consumidores para armónicas impares, señalados por el estándar IEEE Std 519-2014, ver tabla 2, son los siguientes:

En el presente caso la I_{SC}/I_L es de 28.03, y con la tabla 2, buscamos en la fila: $20 < I_{SC}/I_L < 50$, obteniendo el límite para armónicos menores de $h=11$ de 7.0, para armónicos entre $h=11$ y $h= 17$ el límite de 3.5, para armónicos mayores que $h=17$ y menores que $h= 23$ el límite de 2.5

En el presente caso, ver tabla 3, las distorsiones de corriente HD halladas en la “Barra 1”, para los armónicos de orden $h=7$, $h=13$ y $h=19$ resultaron:

“Barra 1”

$h= 7$ HDi = 2.8 para un Límite de 7.0

$h= 13$ HDi = 1.3 para un Límite de 3.5

$h= 19$ HDi = 1.2 para un Límite de 2.5

Notamos que los resultados se encuentran dentro de los límites establecidos.

Por lo tanto, podemos rechazar la hipótesis nula, y aceptar que los filtros armónicos si mejoran los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En la investigación llevada a cabo por (Villatoro, 2009), la cual tenía como objetivo exponer las principales teorías sobre la potencia instantánea, utilizadas para la compensación en los filtros activos de potencia, además de conocer la razón por la cual surgen los armónicos en la onda eléctrica y

utilizar métodos para compensarlos, concluye que los filtros activos mitigan las distorsiones de voltaje y corrientes ocasionados por los armónicos, lo cual tiene similitud con la investigación realizada, ya que también concluimos que las distorsiones armónicas de voltaje y corriente se atenúan significativamente con el uso de filtros para armónicos.

En la investigación llevada a cabo por (Bueno & Fajardo, 2013) la cual tenía como objetivo hacer un filtrado de armónicos, debido a las cargas no lineales en el sector residencial, considerando una red bifásica (dos fases y el terminal neutro de alimentación en sistemas residenciales), a través de filtros activos de potencia, para garantizar que los niveles de los factores de distorsión armónica (THD) se encuentren dentro los valores normalizados, concluye que al implementar estos filtros se logra mejorar apreciablemente los THD de corriente del 48.8% al 2.8%, lo cual corrobora nuestros resultados que para el mismo indicador baja de 130.4% al 4.9% en la barra de 20 kV.

En la investigación realizada por (Rios & Aristizabal, 2003) la cual tenía como objetivo estudiar el sistema de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Pereira, cuando éste es afectado por corrientes y voltajes armónicos, concluye que el filtro sintonizado simple, proporciona la máxima atenuación para una armónica individual, a frecuencia fundamental, además de proporcionar la potencia reactiva requerida en la red y, tener bajas pérdidas asociadas a la reactancia del inductor y la resistencia del filtro, lo cual es coherente con los resultados obtenidos en la presente investigación, pues también concluimos que las distorsiones armónicas de voltaje y corriente se atenúan significativamente con el uso de filtros para armónicos.

En la investigación realizada por (Aranda Mendoza, 2015) la cual tenía como objetivo estudiar y determinar los fundamentos teóricos viables para la amortiguación y eliminación de armónicos en un sistema de potencia, llegando a la conclusión de que un filtro sintonizado es suficiente para la atenuación de los armónicos de corriente, evitando las sobrecorrientes en

los conductores, mejorando las condiciones de operación del transformador y evitando la condición de resonancia, pues los transformadores, condensadores y las líneas son los elementos de las ramas más afectados por la circulación de corrientes armónicas que se evidencia con el THDi elevado del sistema; resultados que son similares a los obtenidos en el presente trabajo de investigación, debido a que también concluimos que las distorsiones armónicas tanto de voltaje como de corriente se atenúan significativamente con el uso de filtros para armónicos.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a reglamentos vigentes

Los datos utilizados en el presente documento de investigación, se han obtenido de la base de datos del Comité de Operación Económica del Sistema (COES), que es la entidad que tiene a su cargo la operación y mantenimiento del sector eléctrico a nivel nacional en el Perú.

Adicionalmente, se ha utilizado información obtenida de otros autores, los mismos que han sido citados en el presente documento, y que además se encuentran listados en la bibliografía.

VII. CONCLUSIONES

Se concluye que el diseño de filtros pasivos, tiene una influencia significativa para minimizar los efectos de los armónicos en las redes eléctricas con compensación capacitiva.

Se concluye que el diseño de filtros pasivos, mejora drásticamente los indicadores de distorsión armónica de voltaje (THDv) minimizando los efectos de las tensiones armónicas en las redes eléctricas con compensación capacitiva.

Se concluye que el diseño de filtros pasivos, mejora drásticamente los indicadores de distorsión armónica de corriente (THDi) minimizando los efectos de las corrientes armónicas en las redes eléctricas con compensación capacitiva.

Un factor importante que se debe de tomar en cuenta, cuando se diseñan los filtros pasivos, es su ubicación. El efecto positivo de atenuar las distorsiones tanto de voltaje como de corriente, dependerá de la ubicación de los mismos, en la red eléctrica donde necesitamos mejorar la calidad de energía suministrada.

Los armónicos, en las redes compensadas capacitivamente, no se pueden eliminar completamente y, se aceptan siempre y cuando estén dentro de las recomendaciones prescritas en las normas técnicas respectivas.

Los reactores que componen los filtros de armónicos, tienen la ventaja de proteger la vida útil de los capacitores, así como de proteger al sistema eléctrico de las sobretensiones peligrosas, en las barras o subestaciones.

Se concluye que, en un sistema con cargas no lineales, productoras de armónicos, donde es necesario mejorar el factor de potencia, es necesario utilizar filtros de armónicos, para minimizar las distorsiones y la resonancia.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un programa de mediciones de armónicos, con una frecuencia determinada, en las barras o subestaciones de la red eléctrica industrial, donde exista cargas no lineales, con la finalidad de hacer el seguimiento de los armónicos, tanto en magnitud como en fase. De esta manera podemos monitorear si ellos se han incrementado o existen nuevas frecuencias de resonancia paralela.

Se recomienda hacer mediciones periódicas de señales armónicas, aguas arriba, es decir en el punto de conexión con la Empresa de Distribución, pues ésta puede estar inyectando corrientes armónicas, provenientes del sistema interconectado nacional, y de esta manera sobrecargar los capacitores de los filtros ubicados en la instalación industrial.

Es conveniente hacer el mantenimiento preventivo de los filtros armónicos, debido a que los capacitores que lo componen, se deterioran principalmente con la temperatura y las sobretensiones, que afectan directamente su impedancia, y pueden desintonizarse, no cumpliendo con derivar a tierra los armónicos para los cuales han sido diseñados.

Se recomienda, verificar las potencias de cortocircuito, en el punto de acoplamiento común (PCC), debido a que, si hubiera cambios topológicos en la red de la empresa distribuidora, las potencias de cortocircuito varían y, por lo tanto, puede haber una desintonización del filtro armónico.

Se recomienda considerar la solución de emplear el tipo de filtros activos, los cuales utilizan la electrónica de potencia. Su principio de operación consiste en

inyectar señales armónicas iguales a las existentes en el sistema eléctrico, pero desfasadas 180 grados, de modo que los armónicos se anulen.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, E., & Bravo, R. (1995). Tesis. *Efectos causados por los armónicos en bancos de condensadores*. Santiago de Cali, Colombia: Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.

Aranda Mendoza, J. (2015). Tesis. *Análisis descriptivo de la amortiguación y eliminación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Arrillaga, J., & Watson, N. (2003). *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, Ltd.

Arrillaga, J., Smith, B. W., & Wood, A. (2000). *Power System Harmonic Analysis*. New Zealand: John Wiley & Sons Ltd.

Bueno, H., & Fajardo, M. (octubre de 2013). Tesis. *Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos en una red bifásica residencial*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Cayetano, H. (2012). Tesis. *Análisis de armónicas en el dominio de la frecuencia para una carga minera*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Chang, G., Ribeiro, P., & Ranade, S. (1998). Harmonics Theory. *IEEE Tutorial Course on Harmonics Modeling and Simulation Course Text*, TP-125-0.

Das, J. (2002). *Power System Analysis*. Atlanta: Marcel Dekker, Inc.

Das, J. (2015). *Power System Harmonics and Passive Filter Design*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- De Jesús Alvarado, H., & Ramirez, J. (2010). Tesis. *Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicos en sistemas eléctricos*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional.
- De la Rosa, F. (2006). *Harmonics and Power Systems*. Missouri-USA: Taylor&Francis Group.
- Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., & Wayne, H. (2004). *Electrical Power Systems Quality*. N. York: McGraw-Hill.
- Espinoza Mendoza, L. G. (2018). *Efectos de la instalación de bancos de capacitores en sistemas industriales con presencia de armónicos*. Mexico.
- Fajardo, M., & Bueno, H. (Octubre de 2013). Tesis. *Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos de una red bifásica residencial*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Garay, F. (2010). Tesis. *Aplicación de filtros híbridos para reducir armónicos en una planta industrial*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- IEEE. (2014). *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE Std 519-2014.
- Martínez, J., Gomez, J., Martínez, D., & Vargas, C. (2017). Análisis de factor de potencia en variadores de velocidad conectados a un sistema eléctrico. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 1-7.
- Ninahuanca Torres, J. A. (2009). Tesis. *Uso de filtros armónicos en las industrias*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ninahuanca, T. (2009). Tesis. *Uso de filtros armónicos en las industrias*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Piolet, F. (2015). ¿Qué son los armónicos y cómo nos afectan? *Sector Electricidad*.
- Rios, C., & Aristizabal, M. (2003). Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. *Scientia et Technica*, 22.

- Rios, C., & Aristizabal, M. (2003). *Análisis de armónicos en sistemas eléctricos*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Rubio, F. G. (2013). *Eficiencia energética y derecho*. Madrid: Dykinson.
- Sampieri. (2014). *Metodología de Investigación*. Mexico: McGraw-Hill.
- Sanchez, M. (2009). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Mexico: Instituto Tecnológico de Puebla.
- Sankaran, C. (2002). *Power Quality*. London: CRC Press LLC.
- Varela, J., & Alvarado, F. (Febrero de 2015). *Banco de pruebas para filtrado de armónicas en las redes eléctricas*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Villatoro, B. (mayo de 2009). Tesis. *Teoría de diseño de filtros activos para mitigación de armónicos en sistemas electricos de potencia*. Guatemala, Guatemala: Universidad San Carlos Guatemala.
- Wakileh, G. (2001). *Power Systems Harmonics*. Austria: Springer.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

TEMA: DISEÑO DE FILTROS PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS ARMÓNICOS EN REDES ELÉCTRICAS CON CAPACITORES

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera el diseño de filtros minimiza los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva?	OBJETIVO GENERAL Determinar de qué manera el diseño de filtros minimiza los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.	HIPÓTESIS GENERAL El diseño de filtros influye en minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.	VARIABLE DEPENDIENTE Y: Minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.	Distorsión de Voltaje Distorsión de Corriente Resonancia Armónica	Tasa de Distorsión Armónica Total THDv y THDi	TIPO DE INVESTIGACIÓN Descriptiva Explicativa Correlacional DISEÑO No experimental POBLACIÓN Red eléctrica del SEIN MUESTRA Red de distribución típica
PROBLEMAS ESPECÍFICOS 1. ¿De qué manera el diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva? 2. ¿De qué manera el diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva?	OBJETIVOS ESPECÍFICOS 1. Determinar de qué manera el diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva. 2. Determinar de qué manera el diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS 1. El diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de voltaje (THDv) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva. 2. El diseño de filtros mejora los indicadores de distorsión de corriente (THDi) minimizando los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva.	VARIABLE INDEPENDIENTE X: Diseño de filtros	Potencia del Filtro Límites de Voltaje Límites de Corriente	Calidad del Filtro (QF)	

Instrumento de Captación de Datos: Referencias bibliográficas del COES y mediciones típicas.

Anexo 2: Etapas de diseño para filtro sintonizado serie

Un filtro sintonizado serie, (Wakileh, 2001) es un capacitor diseñado para atrapar una cierta corriente armónica, mediante la adición de un reactor, con una impedancia igual a $X_L=X_C$, sintonizado a una frecuencia f_n .

Las etapas del diseño son las siguientes:

1. Se determina el tamaño del capacitor Q_c en MVAR, a través de estudios de flujo de potencia, utilizando programas especializados de ingeniería eléctrica como el DigSilent.

2. La reactancia del reactor viene dada por la fórmula:

$$X_C = \frac{kV^2}{Q_C}$$

3. Para atrapar el armónico hn , el reactor deberá tener un tamaño de :

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2}$$

4. Calculamos la *reactancia característica* X_n con la siguiente fórmula:

$$X_n = X_{Ln} = X_{Cn} = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

5. También el *factor de calidad del filtro* Q , que es un valor que se encuentra en el rango de: $30 < Q < 100$

6. Ahora calculamos la resistencia del reactor con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

7. La potencia del filtro Q_{FILTRO} viene dada por la expresión:

$$Q_{FILTRO} = \frac{kV^2}{X_C - X_L} = \frac{h_n^2}{(h_n^2 - 1)} * \frac{kV^2}{X_C} = \frac{h_n^2}{(h_n^2 - 1)} * Q_C$$