

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica – Eléctrica
y Mecatrónica**



**DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS PARA EL CONTROL Y
ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN USUARIOS DE BAJA TENSION**

Tesis presentada por el Bachiller:

Paja Cutipa, Ronald Héctor

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Asesora:

**Ing. Chani Ollachica, Deidamia
Giovanna**

**Arequipa - Perú
2023**

DICTAMEN DE APROBACIÓN

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 24 de Abril del

2023 **Dictamen: 006491-C-EPIMMEM-2023**

Visto el borrador del expediente 006491, presentado por:

2015120051 - PAJA CUTIPA RONALD HECTOR

Titulado:

**DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS PARA EL CONTROL Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN
USUARIOS DE BAJA TENSIÓN**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29569057 - CASTILLO CACERES CESAR PIO
DICTAMINADOR**



**29387211 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO
DICTAMINADOR**



**29616686 - RIVERA ACOSTA VICTOR GONZALO
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo de tesis a mi familia, en especial a mis padres, Mariza Helen Cutipa Larico y Hector Paja Justo, por su ejemplo y dedicación de trabajo duro, constante y pasional hacia sus hijos, fueron una motivación para poder culminar la carrera y el apoyo mas grande que hubiera podido desear para conseguirlo y por los retos profesionales que me deparan en el futuro, sin ellos no hubiera sido posible haber empezado este camino profesional.

A mi hermana, Ana Victoria, por su apoyo incondicional, por todos estos años de compañía y paciencia.

A María Amenita por su eterna paciencia y amor que tuvo conmigo, gracias por esperarme para iniciar una nueva vida.

A mis tíos Manuel y Esther por su apoyo y orientación a lo largo de todos estos años.

A mis abuelos Victoria y Pedro por sus largas conversaciones y ánimos, allí donde estén, los llevare en mi corazón a pesar que ya partieron hace tiempo.

Por último, a Laika y Auron por su compañía, siempre los llevare en mi memoria.

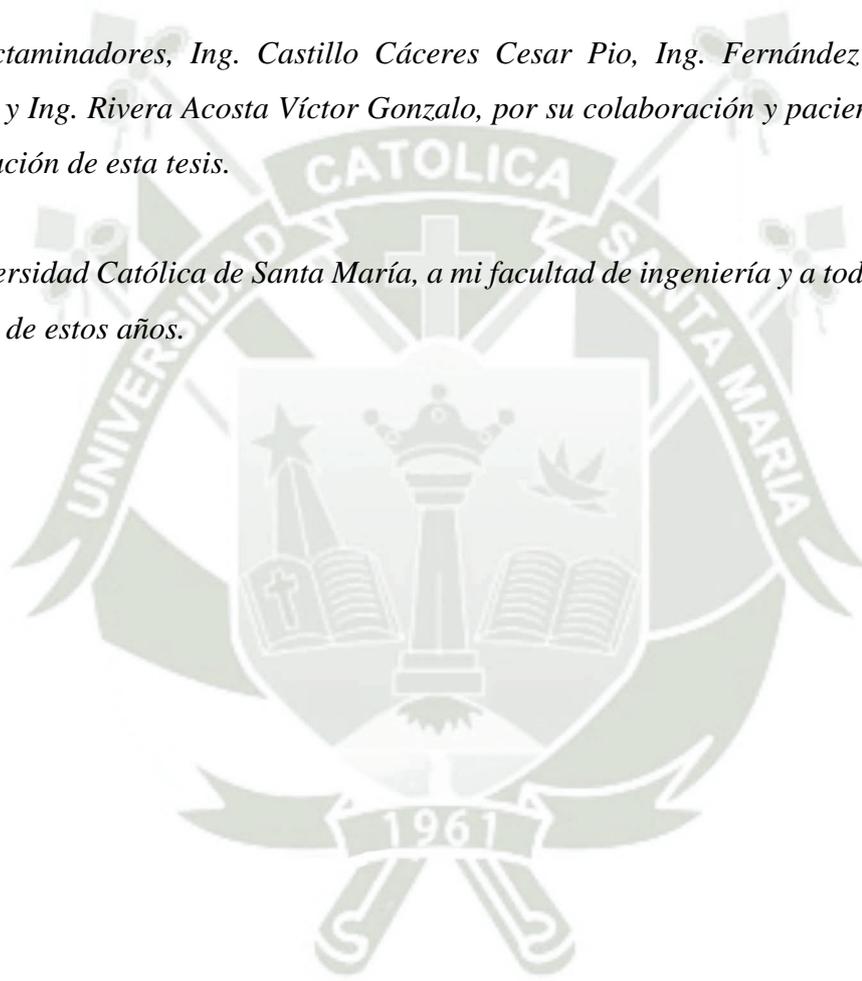
AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, a la virgen de Chapi por su bendición durante los momentos más complicados a lo largo de estos años de estudio.

A mi asesora Ing. Deidamia Giovanna Chani Ollachica que con su orientación enseñanzas y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

A mis dictaminadores, Ing. Castillo Cáceres Cesar Pio, Ing. Fernández Barriga Camilo Grimaldo y Ing. Rivera Acosta Víctor Gonzalo, por su colaboración y paciencia a lo largo de la elaboración de esta tesis.

A la Universidad Católica de Santa María, a mi facultad de ingeniería y a todos mis profesores a lo largo de estos años.



RESUMEN

El trabajo de investigación tomó como finalidad diseñar un filtro activo que controle y elimine los armónicos en usuarios de baja tensión. Para el desarrollo del estudio se tomó como gestión recopilar datos mediante los analizadores de redes, para su análisis y posterior uso en el programa de simulación. El programa elegido para la simulación y diseño del filtro fue SIMULINK de MATLAB. Esta herramienta permitió diseñar el filtro activo y evaluar los parámetros de distorsión mediante la visualización de la pantalla FFT en el bloque Powergui.

El diseño del filtro activo en paralelo fue seleccionado debido a su viabilidad de implementación en una red trifásica real. En esta tesis se implementaron las transformadas de Park y de Clarke, aplicando el principio básico de compensación para un filtro activo en un sistema trifásico de tres hilos. Los armónicos a eliminar se enfocaron en los niveles impares dentro del diseño del filtro, ya que los niveles pares tienden a anularse debido a la simetría de la señal alterna.

Al culminar el proceso de simulación se obtiene como resultado que el filtro diseñado reduce los armónicos de corriente y tensión lo que implica la mejora en la calidad de energía reducción los efectos adversos de los armónicos. Concluyendo que, los filtros de potencia Activa representan una solución eficiente para la mitigación de armónicos creados por cargas no lineales.

Palabras Claves: Filtro activo, armónicos, baja tensión, Matlab y Simulink

ABSTRACT

The purpose of the research work was to design an active filter to control and eliminate harmonics in low voltage users. For the development of the study, it was taken as managing to collect data through network analyzers, for analysis and subsequent use in the simulation program. The program chosen for the simulation and design of the filter was SIMULINK from MATLAB. This tool allowed to design the active filter and evaluate the distortion parameters by viewing the FFT screen in the Powergui block.

The parallel active filter design was selected due to its feasibility of implementation in a real three-phase network. In this thesis the Park and Clarke transforms were implemented, applying the basic principle of compensation for an active filter in a triphasic three-wire system. The harmonics to be removed were focused on the odd levels within the filter design, since the even levels tend to cancel out due to the symmetry of the alternating signal.

At the end of the simulation process, the result is that the designed filter reduces current and voltage harmonics, which implies an improvement in power quality, reducing the adverse effects of harmonics. Concluding that, Active power filters represent an efficient solution for the mitigation of harmonics created by non-linear loads.

Keywords: Active filter, harmonics, low voltage, Matlab and Simulink

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la energía está involucrada de manera directa o indirecta con cada una de las actividades que ejecutamos, siendo poco posible imaginar que el desarrollo de un país se dé aislado de ella; la electricidad se encuentra presente desde los pequeños artefactos eléctricos que tenemos en nuestros hogares hasta productos más significativos como la radio, la televisión, medios de transporte ya sean terrestre acuáticos o aéreos que nos permite desplazarnos de un lugar a otro, el internet el cual nos permite comunicarnos y estar conectados desde cualquier lugar, entre otras, por lo que la convierte en el primer insumo que mueve al mundo comercial, industrial y personal.

En base a lo expuesto anteriormente constantemente se busca mejorar la calidad de la energía eléctrica, para ello no debe haber interrupciones en la tensión, ni deformaciones causadas por armónicos en la red, ni variaciones en el voltaje eficaz (RMS) que se le suministra al usuario; por lo que se hace énfasis que la calidad de la energía eléctrica esta enlazado con la continuidad del servicio, la estabilidad del voltaje y la frecuencia eléctrica, y estos influyen en la eficacia de los equipos eléctricos que se utilizan tanto en las empresas como en los hogares provocando fallas por un mal funcionamiento que conllevan pérdidas económicas. (Bueno y Fajardo, 2013)

Al pasar de los años, ha venido creciendo la implementación de equipos electrónicos que van desde pequeñas potencias como ordenadores personales y alumbrado con balastos electrónicos hasta los de mayor potencia en las que se puede mencionar los rectificadores de corriente empleados en tracciones eléctricas, variadores de velocidad y sistemas de alimentación ininterrumpida; dichos equipos centran su funcionamiento en componentes de electrónica de potencia como: diacs, triac, transistores, diodos y tiristores los cuales generan que las cargas del sistema eléctrico no sean lineales originando armónicos en el sistema eléctrico, que producen sobre voltajes y sobre corrientes que resultan ser dañinas. (Villatoro, 2009)

En concordancia con lo antes expuesto, tenemos que los armónicos es un resultado de uso moderno de la electrónica siendo un problema cada vez más recurrente, ya que la demanda de consumo de cargas no lineales se ha incrementado considerablemente, ocasionando distorsiones al sistema eléctrico y, por ende, afecta la calidad de la; finalmente dichas variaciones traen efectos adversos tanto en el sistema en sí como en los usuarios que se encuentra conectados; entre los efectos más significativos tenemos: los conductores se calientan, los protectores presentan anomalías, hay desequilibrios entre las fases y el conductor de neutro y problemas secundarios en los condensadores y transformadores; específicamente para los usuarios los efectos presentados son el mal comportamiento y la reducción de la vida útil de las cargas conectadas.

Las cargas no lineales consumen las cargas no senoidales lo que genera deformaciones en las ondas de tensión específicamente en los puntos en que se encuentra la conexión de los equipos, entre otros problemas vinculados a la deformación de la corriente, tenemos que la potencia que genera las cargas es baja por lo que pierde la eficiencia y produce variación de la tensión; ante dichas fallas existen filtros que permiten solventar dichos problemas, dando solución a los problemas presentes (Núñez et al., 2009)

Es por ello que el presente trabajo de investigación se plantea como objetivo diseñar un filtro activo para el control y eliminación de armónicos en usuarios de baja tensión, que se pueda adaptar al sistema eléctrico, para ello se va a realizar un análisis de ondas de voltaje, los armónicos y de los filtros que se pueden emplear para contener o eliminar, por lo que se pretende desarrollar modelos que permita evaluar la funcionalidad de los filtros a través de sistema simulados y finalmente brindar las conclusiones del diseño del filtro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Delimitación del problema.....	3
1.3. Justificación de la investigación.....	3
1.4. Objetivos de la investigación.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Alcance.....	5
1.6. Hipótesis.....	5
1.6.1. Hipótesis general.....	5
1.6.2. Hipótesis específicas.....	5
1.7. Variables de la investigación.....	5
1.7.1. Variable independiente.....	5
1.7.2. Variable dependiente.....	6
1.7.3. Operacionalización de variables.....	6
CAPÍTULO II.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7

2.1. Antecedentes de investigación.....	7
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Filtros	10
2.2.2. Filtros pasivos	14
2.2.3. Filtros activos.....	14
2.2.4. Filtro activo de potencia.....	15
2.2.6. Control de corriente	27
2.2.7. Perturbaciones Eléctricas	27
2.2.8. Armónicos.....	31
2.2.9. Métodos de compensación de armónicos	40
CAPÍTULO III	45
3. INGENIERIA DEL PROYECTO	45
3.1. Metodología del diseño.....	45
3.2. Costos del equipamiento	46
3.3. Medición de los armónicos	46
3.3.1. Aspectos generales.....	46
3.3.2. Tension RMS	49
3.4. Standard IEEE 519 (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)	49
3.5. Materiales empleados para la medición	50
3.6. Evaluación de las tensiones armónicas	52
3.7. Diseño del Filtro activo de potencia paralelo	60
3.7.1. Estructura del filtro activo de potencia paralelo	60
3.7.2. Estructura de carga.....	62
3.7.3. Inversor trifásico	64
3.7.4. Distorsión armónica total (THD)	65
3.8. Diseño del Filtro Activo de Potencia (FAP).....	69

3.8.1. Corriente Histéresis	80
3.8.2. Corriente de compensación	82
3.8.3. Resultados del FAP en Paralelo	82
3.8.4. Implementos a usar para el diseño del filtro activo	86
CAPÍTULO IV	90
RESULTADOS	90
4.1. PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LOS DATOS	90
4.2. BALANCE COSTO- BENEFICIO	98
4.3. DISCUSIÓN	100
Conclusiones	101
Recomendaciones	103
Referencias	104
Anexos	108
Anexo 1 Sistema eléctrico PETROTAL. Punto de medición	108
Anexo 2 Planta considerada para el estudio	109
Anexo 3 Plano general de la simulación del filtro activo de armónicos	110
Anexo 4 Etapa de potencia del filtro activo de armónicos	111
Anexo 5 Inversor trifásico	112
Anexo 6 Fuente de energía de la instalación simulada	113
Anexo 7 Fuente generadora de armónicos en la simulación	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Filtro	10
Figura 2 Banda de paso de un filtro	11
Figura 3 Frecuencia de paso bajo.....	12
Figura 4 Frecuencia de paso alto.....	13
Figura 5 Límites de bandas	13
Figura 6 Filtro activo de potencia	16
Figura 7 Esquema de un SAPF	17
Figura 8 Diagrama de bloques de un SAPF	18
Figura 9 Características de compensación de un filtro activo de potencia paralelo	18
Figura 10 Estructura de un FAP.....	19
Figura 11 Estructura de un convertidor FAP	19
Figura 12 Esquema de control de corriente PWM por banda adaptativa de histéresis	21
Figura 13 Modulación PWM constituida mediante una señal de referencia sinusoidal y una portadora triangular	24
Figura 14 Diagrama de bloques de la corriente de referencia, utilizando la teoría p-q	27
Figura 15 Onda con contenido armónico	31
Figura 16 Triángulo de Potencias	36
Figura 17 Compensación del filtro activo de potencia por el método de la teoría p-q	44
Figura 18 Analizador Trifásico de Calidad de Energía – Fluke 435.....	51
Figura 19 Analizador Trifásico de Calidad de Energía – AEMC 8335	51
Figura 20 Analizador Trifásico de Calidad de Energía – METREL MI2892.....	51
Figura 21 Circuitos equivalentes en baja tensión.....	58

Figura 22 Circuitos equivalentes en baja tensión.....	59
Figura 23 Pozos simulados en Simulink para diseño del filtro activo de armónicos.....	59
Figura 24 Pozos simulados en Simulink de forma unificada con cargas no lineales.....	59
Figura 25 Red trifásica para la simulación.....	60
Figura 26 Red trifásica en el Voltaje.....	61
Figura 27 Señales de tensiones de la fuente.....	61
Figura 28 Red trifásica en la Corriente.....	62
Figura 29 Señales de corriente de la fuente.....	62
Figura 30 Carga trifásica no lineal equilibrada.....	63
Figura 31 Carga desequilibrada no lineal.....	63
Figura 32 Inversor Trifásico.....	64
Figura 33 THD en corriente y voltaje sin FAP al lado de la carga.....	65
Figura 34 THD en corriente y voltaje sin FAP en el generador de armónicos.....	66
Figura 35 Diseño de la red sin el acoplamiento de la señal PWM del FAP.....	67
Figura 36 Orden de armónicos más significativos en corrientes sin FAP.....	67
Figura 37 Corriente sin FAP.....	68
Figura 38 Orden de armónicos más significativos en voltaje sin FAP.....	68
Figura 39 Voltaje sin FAP.....	68
Figura 40 Corriente de línea y carga sin FAP.....	69
Figura 41 Estructura del FAP.....	70
Figura 42 Sistema de seguimiento PLL.....	71
Figura 43 Transformada de Park abc-dq.....	71
Figura 44 Respuesta de la magnitud.....	77
Figura 45 Filtro Butterworth conectado a la compensación del FAP.....	78
Figura 46 Transformada dq-abc.....	78

Figura 47 Estructura de la transformación de Park.....	79
Figura 48 Señal de salida de la transformada dq-abc.....	80
Figura 49 Señal generadora PWM.....	80
Figura 50 Diagrama de la corriente de Histéresis.....	81
Figura 51 Salida de señal de la corriente de Histéresis.....	81
Figura 52 Corriente de compensación ICabc.....	82
Figura 53 Corriente de compensación, corriente de cargar y corriente de línea.....	82
Figura 54 Corrientes IC, IS, IL.....	83
Figura 55 Corriente de línea IL.....	83
Figura 56 Nivel de armónicos en IL.....	84
Figura 57 Diseño del filtro activo de Potencia.....	85
Figura 58 Nivel de armónicos con FAP.....	85
Figura 59 Etapa de Potencia del FAP.....	86
Figura 60 Módulo IGBT, SKM100GB12T4.....	87
Figura 61 LM124AE/883.....	88
Figura 62 PLL 4046.....	89
Figura 63 Forma de Conexión usando el 4046.....	89
Figura 64 Comparación de las corrientes de carga, línea y compensación sin y con FAP	90
Figura 65 Comparación de una red eléctrica sin FAP y una red eléctrica con FAP en corriente	91
Figura 66 Comparación de una red eléctrica sin FAP y una red eléctrica con FAP en voltaje	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables	6
Tabla 2 Categorías y características típicas de las perturbaciones transitorias	29
Tabla 3 Límites de Distorsión de voltaje.....	39
Tabla 4 Límites de Distorsión de Corriente	40
Tabla 5 Costo de equipamiento	46
Tabla 6 Límites de distorsión individual de tensión NTCSE.....	48
Tabla 7 Límites de armónicos de tensión IEEE 519	49
Tabla 8 Límites de armónicos de tensión IEEE 519	50
Tabla 9 Valores máximos de armónicos de tensión (%).....	52
Tabla 10 Descripción de los equipos intervenidos.....	53
Tabla 11 Valores de tensión RMS registrados	53
Tabla 12 Medición en PU.....	54
Tabla 13 Demanda por punto de medición	54
Tabla 14 Valores máximos de armónicos de tensión (%).....	55
Tabla 15 Distorsión armónica de tensión (%).....	55
Tabla 16 Resultados de corrientes de cortocircuito.....	56
Tabla 17 Límites armónicos de corriente – IEEE-519	56
Tabla 18 Armónicos individuales de corriente (%).....	57
Tabla 19 Datos de la carga de la red trifásica.....	61
Tabla 20 Datos del Inversor Trifásico	65
Tabla 21 Datos de fuente generadora de armónicos.....	66
Tabla 22 Polinomio Butterworth.....	75

Tabla 23 Polinomio Butterworth de 4° Orden.....	75
Tabla 24 Armónicos más significativos en IL.....	84
Tabla 25 Comparación del THD con un filtro activo agregado al circuito	86
Tabla 26 Especificaciones del IGBT	87
Tabla 27 Datos para el diseño de un Low Pass Filter	88
Tabla 28 Especificaciones del LM124AE/883.....	88
Tabla 29 Armónicos más significativos en corriente sin Filtro Activo de Potencia (FAP) 93	
Tabla 30 <i>Armónicos más significativos en corriente con Filtro Activo de Potencia (FAP)</i> 94	
Tabla 31 <i>Armónicos más significativos en voltaje sin Filtro Activo de Potencia (FAP)</i> ... 95	
Tabla 32 <i>Armónicos más significativos en voltaje con Filtro Activo de Potencia (FAP)</i> .. 95	
Tabla 33 <i>Comparación entre una red eléctrica con un Filtro Activo de Potencia y una red eléctrica sin un Filtro Activo de Potencia en corriente</i>	96
Tabla 34 Materiales necesarios para la construcción de un filtro activo.....	97
Tabla 35 Costos totales de inversión y mantenimiento.....	98
Tabla 36 Beneficios totales del proyecto	99

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

Según Wildi (2006) los armónicos es cualquier voltaje en la cual la frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia de línea (2, 3, 4... etc.), cuando una corriente o un voltaje presentan distorsiones es a causa de la presencia de armónicos. Cuando son desviadas las ondas de una forma de onda sinusoidal es debido a que dichas ondas contienen armónicos; pudiendo describirlo como la forma o características que tiene una forma de onda de voltaje o corriente vinculada con su frecuencia fundamental. (Anixter, 2018)

La red eléctrica cuando presentan armónicos se incrementa el valor de las pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes de Foucault en los transformadores, aumentando la temperatura durante su funcionamiento, disminuyendo así su vida útil; cuando los transformadores son afectados por distorsiones armónicas llegan a sufrir una desclasificación de potencia, dicha pérdida de potencia se da hasta un nivel donde puede trabajar sin exceder su calentamiento normal. (Circutor SA, 2019)

El uso de electrónica de potencias ha venido en ascenso para cubrir las exigencias del desarrollo de los países, incrementándose a su vez el uso de cargas no lineales tanto en las redes domésticas como industriales y comerciales; dichas cargas generan diferentes frecuencias las cuales son conocidas como armónicos; los cuales son corrientes o voltajes sinusoidales que causan degradación y deterioros que integran un sistema eléctrico de potencia entre los cuales podemos mencionar motores, transformadores, generadores, cables, entre otros; siendo las principales consecuencias: el sobrecalentamiento en los conductores dado al efecto Skin, se reduce la potencia de la instalación, se llegan a degradar y calentar los aislamientos que integran el sistema eléctrico.

Cuando en un sistema eléctrico se presentan cargas no lineales, indica que la corriente no es equitativa al voltaje por lo que su función fluctúa en relación a la resistencia de la carga alterna, lo que indica que la corriente que se está consumiendo no tiene la misma forma de onda en relación al voltaje de suministro; es importante tener presente que las cargas no lineales dibujan corrientes en pulsos que son cortos y abruptos, dichos pulsos deforman la onda de corriente, generando así armónicos que inducen a problemas en la calidad de energía que termina afectando principalmente al equipo de sistema de distribución y a toda carga que se encuentre conectada a él. Las cargas no lineales pueden ser producto de variadores de velocidad, computadoras, impresoras, televisores, rectificadores, sistemas de telecomunicación que empleen conversión de energías.

La calidad de la energía se ve afectada cuando los niveles del sistema eléctrico dejan de funcionar de manera óptima, esto ocurre cuando ingresan distorsiones armónicas, haciendo ineficientes la funcionalidad de los equipos dado a la necesidad de consumir mayor energía, aumentando los costos, el sobrecalentamiento y reduciendo la rentabilidad de los equipos. En función a lo expuesto es necesario diseñar un filtro activo que corrija los efectos producto de los armónicos presentes en el sistema eléctrico y evitar así los daños a los que están expuestos los equipos que se encuentran conectados al sistema que pueden llegar a causar la pérdida del mismo, para ello se debe primeramente conocer con certeza la magnitud y el tipo de los armónicos que se encuentra presentes en la red y cuál es la fuente que los origina con la intencionalidad de determinar el filtro más apropiado.

Medible:

Para diseñar el filtro que se adecue de manera adecuada al sistema eléctrico que está presentando problemas con la presencia de los armónicos se debe medir las ondas de corriente de voltaje del sistema eléctrico y posteriormente en el simulacro del filtro realizar una nueva

medición de las ondas a fin de hacer un comparativo de su eficacia en control y eliminación de los armónicos presentes en la red.

Solucionable:

El problema surge a raíz de la presencia de armónicos en la red eléctrica de usuarios de baja tensión que están reduciendo la funcionalidad de los equipos e incrementado el consumo por el exceso de uso de energía que ocasiona las distorsiones presentes, lo que se puede solucionar con el diseño de un filtro activo que controle y elimine los armónicos presentes en el sistema eléctrico.

1.2. Delimitación del problema

La investigación realizará el diseño de filtros activos para el control y eliminación de armónicos en usuarios de baja tensión, también realizará la simulación del filtro en el programa software de Matlab y Simulink, con el propósito de determinar la viabilidad y eficacia del filtro del filtro diseñado. En el desarrollo, se presentan los gráficos de los armónicos, la comparación de las corrientes, la compensación sin y con el Filtro Activo y los soportes del software manejado.

1.3. Justificación de la investigación

Justificación académica

El presente trabajo de investigación aportará información actualizada en relación a los filtros activos para controlar y eliminar los armónicos en el sistema eléctrico, que podrá ser considerada como antecedentes para trabajos posteriores que tengan vinculación con la problemática establecida; de igual manera el diseño servirá para afianzar los conocimientos de mecánica – eléctrica ampliando el campo laboral.

Justificación económica

Esta investigación pretende disminuir los costos de consumo de energía eléctrica que ocasiona la necesidad de consumir mayor energía de los armónicos, así como también incrementar la vida útil de los equipos que se encuentra conectados al sistema eléctrico.

Justificación social

Socialmente es de gran relevancia, ya que el control y la eliminación de los armónicos en el sistema eléctrico de los usuarios de baja tensión disminuirá los efectos negativos que produce los armónicos, logrando que la vida útil de sus equipos de igual manera sea mayor sin presentar daños totales a causa por la deformación de las ondas eléctricas

Justificación ética

La investigación se realizará bajo pleno conocimiento de la necesidad que tienen los usuarios de baja tensión, de que sus equipos funcionen de manera adecuada sin que existan sobrecalentamientos en el sistema que pueda ocasionar problemas mayores, creando a su vez consciencia en la sociedad de la importancia de contar una buena calidad de energía eléctrica.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un filtro activo para el control y eliminación de armónicos en usuarios de baja tensión

1.4.2. Objetivos específicos

1. Recopilar, estudiar y analizar las ondas armónicas presentes en el sistema eléctrico.
2. Analizar de qué manera el diseño de un filtro activo mejora la distorsión de voltaje reduciendo los efectos de los armónicos en los usuarios de baja tensión
3. Analizar de qué manera el diseño de un filtro activo mejora la distorsión de corriente reduciendo los efectos de los armónicos en los usuarios de baja tensión

1.5. Alcance

1. Análisis teórico de las ondas de distorsión armónica.
2. Identificación de los puntos del sistema eléctrico que genera los armónicos.
3. Especificar como el filtro activo reduce los efectos armónicos en el sistema eléctrico.
4. Diseño de un filtro activos que controle y elimine los armónicos en los usuarios de baja tensión.
5. Eliminar los efectos de armónicos en el sistema eléctrico.
6. Simulación de filtro activo en un sistema eléctrico con presencia de armónicos.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

Es posible diseñar un filtro activo que controle y reduzca los armónicos en los usuarios de baja tensión.

1.6.2. Hipótesis específicas

1. Conocer de manera detallada como se presentan los armónicos en el sistema eléctrico de los usuarios de baja tensión permite el diseño de un filtro activo funcional.
2. Un filtro activo mejora la distorsión de voltaje logrando reducir los efectos de armónicos en los usuarios de baja tensión.
3. Un filtro activo mejora la distorsión de corriente logrando reducir los efectos de armónicos en los usuarios de baja tensión.

1.7. Variables de la investigación

1.7.1. Variable independiente

- a) Filtro activo

1.7.2. *Variable dependiente*

b) Control y eliminación de armónicos en usuarios de baja tensión

CAPÍTULO II

1.7.3. *Operacionalización de variables*

Tabla 1 Operacionalización de las variables

	VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
INDEPENDIENTE	Diseño de Filtro activo	Los filtros activos están formados por inversores de modulación de anchura de pulsos (PWM). Este contiene un complicado sistema que se encarga del control en donde elimina o reduce armónicos. (Murillo, 2010, pág. 1)	Potencia del filtro Especificaciones de voltajes Especificaciones de la corriente	Calidad del filtro activo
DEPENDIENTE	Control y eliminación de armónicos en usuarios de baja tensión	El método tradicional para controlar los armónicos es el uso de filtros activos adaptados a las distorsiones armónicas a eliminar. (Martínez, 2003).	Ondas armónicas Deformación del voltaje Deformación de la corriente	Nivel de distorsión de los armónicos Total (THD). Distorsión armónica de la corriente (THDI) Distorsión de armónicos del voltaje (THDV)

Elaboración propia

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Internacionales

Tepan (2022), realizó una investigación sobre el control directo de tensión para un filtro activo de potencia paralelo monofásico, cuyo propósito era desarrollar un sistema que le permitiera controlar la tensión de salida del VSI que eliminará la potencia reactiva de la línea eléctrica producto de cargas ni lineales; para el logro de los objetivos realizó las pruebas haciendo uso de simulación en Matlab; concluyendo que el investigador logró desarrollar un filtro que eliminara los armónicos de la red de la tensión de salida, para ello fue posible tanto desarrollar como implementar algoritmos que controlaran el FAP a través de la medición de las variables de corriente y tensión de la carga y de las red. Haciendo uso del programa Simulink de Matlab, se propuso un diagrama de bloques utilizando datos de sistema eléctrico de potencia, en el cual incluye la frecuencia de trabajo, la tensión de generación y la inducción y resistencia de la carga no lineal. En lo que respecta a la fase de filtrado se la potencia reactiva se propuso un FAP, cuyo elemento principal fue el bloque inversor, derivando este de la etapa de medición y control permitiendo que la eficiencia fuera mayor en lo que respecta el ajuste de la tensión de salida del inverso, comprobando finalmente la eficiencia del sistema que planteó el programa Simulink. Por último, el investigador precisa que inicialmente los filtros activos de potencia eran destinados solo para ser implementados en instalaciones industriales cuya potencia es alta, destacando que los costos de su implementación eran elevados, progresivamente dichos costos han ido disminuyendo permitiendo que se utilizará en aplicaciones de baja tensión (Tepan, 2022).

Erazo-Velasco (2021) publica un trabajo de investigación sobre el diseño, control y simulación de un nuevo filtro de armónicos para redes eléctricas de baja tensión, cuyo objetivo era desarrollar, diseñar y modelar un filtro inteligente para armónico eléctricos en redes de baja

tensión, con la finalidad de dar mayor confiabilidad, seguridad y eficiencia a las redes eléctricas de baja tensión, siendo posible utilizando una técnica de filtración nueva la cual se basa en la transformada por Clark y Park e implementando un sistema de control a la red en base a la lógica y control difuso; en la cual concluye que mejoró considerablemente la calidad de la energía de baja tensión en la simulación del diseño del filtro, siendo aprobado por el programa SIMULINK del diseño; de igual manera se pudo demostrar que el filtro de armónicos es mucha más eficiente que los diferentes tipos de filtros (pasivo, activo e híbrido); el filtro cuenta con un controlador que logra medir, analizar y tomar las medidas correctivas pertinentes de manera automática, convirtiéndolo en un sistema inteligente; es posible ver los resultados de las mediciones realizadas en la computadora a través de la comunicación en serie con el controlador en tiempo real. (Erazo Velasco, 2021)

Pérez (2021), realizó una investigación sobre filtros activos para la reducción del contenido armónico, cuyo objetivo era diseñar un filtro en serie implementando una estrategia que permitiera controlar la reducción de los armónicos haciendo uso del Simulink de Matlab; en el cual concluyó que existen diversas topologías que pueden ser aplicadas en los filtros activos que permitieran eliminar los armónicos tanto de corriente como de voltaje, los cuales llegan a generar cargas que no son lineales conectadas a un sistema; de igual las diversas topologías existentes dan resultados favorecedores en la compensación de los armónicos de tensión. En lo que respecta al análisis de la programación del control del filtro activo, el investigador estudió diversas teorías que le permitieran obtener para la simulación sistemas diferentes, corroborando si era correcto que se implementara una potencia diferente a cada sistema, al verificar que el sistema tenía el comportamiento deseado se procedió a la simulación del filtro activo de potencia, inicialmente se detectaron errores, finalmente en la última simulación realizada comprobando que el filtro estaba actuando adecuadamente; ante el control

PI se evidenció que el voltaje DC se mantenía, logrando que la señal sinusoidal se detuviera y se compensara pasando de 20.68% a 0.05% (Pérez, 2021).

El Dr. Ing. Oyanguren (2020), realizó un trabajo de investigación sobre el diseño de filtros para minimizar los efectos de armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva, para el cual se planteó como objetivo determinar de qué manera el diseño de filtros minimiza los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva, para el desarrollo de dicha investigación llevo a cabo una metodología descriptiva, explicativa, correlacional, no experimental con método mixto cuantitativo – cualitativo; obteniendo como resultado de la contrastación de hipótesis se rechaza la hipótesis nula, ya que los resultados indican que los filtros armónicos si influyen en la minimización de los armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva, si de igual manera se determina que los filtros armónicos si mejoran los indicadores de voltaje y corriente minimizando así los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación capacitiva ya que se evidencio que en la barra 1 antes del filtro reflejaba una distorsión del voltaje de 53.43% y luego del filtro de 2.61%, concluyendo finalmente que los filtros pasivos influye de manera significativa para minimizar los efectos armónicos en las redes eléctricas con compensación capacitiva, de igual; dicha influencia depende de la ubicación en la que se instale el filtro pasivo a fin de lograr que se mejore la calidad de energía suministrada; los armónicos presentes en las redes compensadas capacitivamente no pueden ser eliminados en su totalidad pero es necesario que se mantengan dentro de las establecidas den las normas, por último indica que en los sistemas que se encuentre cargas no lineales que generen armónicas en el que se requiera mejorar la potencia, es preciso que usen filtros de armónicos a fin de minimizar las distorsiones y la resonancia. (Oyanguren, 2020)

Gutierrez (2019), realizó una investigación sobre el control de filtro activo para reducir los armónicos, con el propósito de diseñar un filtro activo que contará con un adecuado control que permitiera reducir los armónicos para ello hicieron uso de la herramienta Simulink de

Matlab; concluyendo que existen diversas topologías para controlar los armónicos siendo los de mayor uso los híbridos y paralelos; en lo que respecta a la programación del control se diseñaron dos filtros, lo cual requirió una análisis por separado de las estrategias para cada filtro, a partir de allí se programó e, método Simulink; los diseños fueron comparados y permitió realizar cálculos, cuyo resultados dependían de los parámetros eléctricos; en los resultados de la simulación se evidenció que los filtros cumplían con el propósito de reducir los componentes oscilante y constante, manteniendo los voltajes de DC los controladores PI (Gutierrez, 2019).

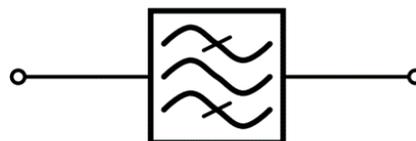
2.2. Bases teóricas

2.2.1. Filtros

El filtro es de por si un elemento que realiza distinción en la frecuencia o conjunto de frecuencias que contiene una señal eléctrica, la cual se conduce por medio un filtro, en donde se rectifica la amplitud y fase de la señal. La función que tienen los filtros ya sean de cualquier tipo es procurar que la información no llegue con interferencias, ruidos o distorsiones que no se quieren (Cogollo, 2016).

El aspecto más representativo del filtro está formando por una caja en la cual tiene 3 líneas onduladas, las cuales hacen alusión a las bandas de frecuencia, en donde la banda inferior incluye $f=0$ Hz y la superior tiende al infinito, la línea intermedia representa a toda aquella frecuencia dentro de los dos valores antes mencionados. (Cogollo, 2016)

Figura 1 Filtro



Fuente. Cogollo (2016)

Los filtros hacen referencia a los mecanismo o dispositivos que de alguna manera cambia las señales que se encuentran conectadas al mismo. Así mismo, se les atribuye como

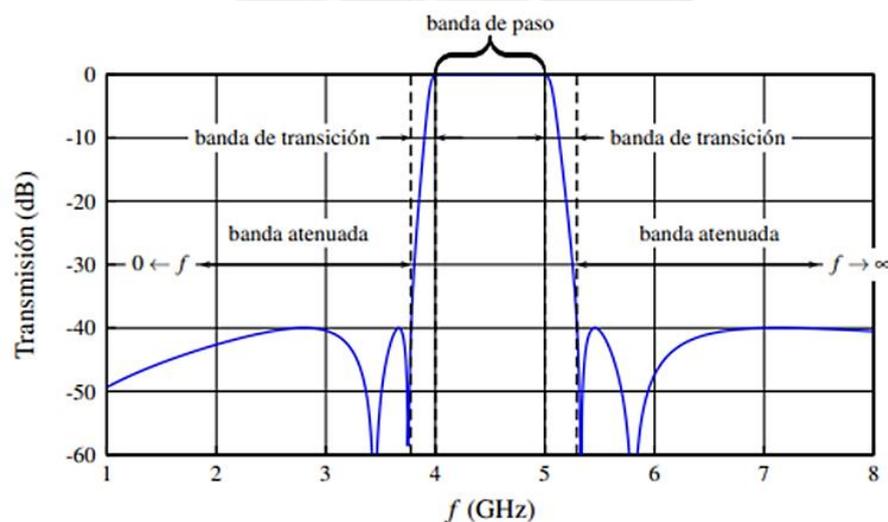
dispositivos que seleccionan las frecuencias, lo que en otras palabras precisa que eligen las señales provenientes de bandas de frecuencia para ignorar o bloquear de la señal otras bandas (Hernández, 2020).

Los filtros de armónicos se diseñan con la intencionalidad de que lo armónicas que puedan estar causando daños sean atenuados y se mantengan dentro de los parámetros establecidos o que permitan que las resonancias del sistema sean amortiguadas evitando así que los armónicos se amplifiquen. Los filtros discriminan de manera determinada grama de frecuencias o frecuencias de señales eléctricas las cuales pasan a través de él, posibilitando la modificación de su fase y amplitud (CTM Magnetics, 2021).

2.2.1.1. Características de los Filtros

- **Banda de Paso:** Limita las frecuencias que pasan por el filtro disminuyendo la atenuación o distorsión. Los límites están nombrados como límite inferior f_1 y superior f_2 , en la figura puede observarse la banda de paso de un filtro.

Figura 2 Banda de paso de un filtro



Fuente. Cogollo (2016)

- **Ancho de Banda:** Es más conocido como la diferencia del límite superior e inferior

$$\Delta f = f_2 - f_1.$$

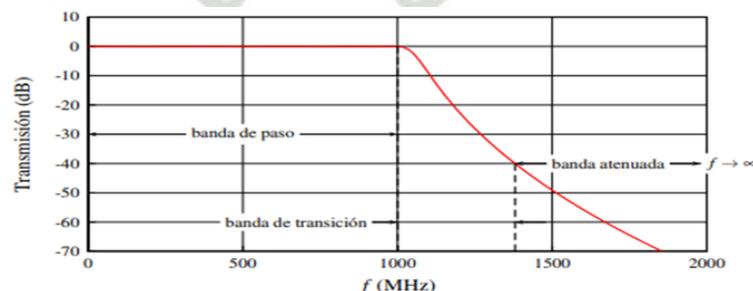
- **Frecuencia Central:** Esta representado por f_0 y es calculado como $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$. De tener un ancho de banda estrecho $f = (f_1 + f_2)/2$.
- **Ancho de Banda relativo o fraccional:** Suele medirse en porcentaje, pero su formular es $w = \Delta f / f_0$, si se quiere sacar el porcentaje solo debemos multiplicar por 100.
- **Banda Atenuada:** Es un rango en el cual no se permite el paso de la frecuencia sin sufrir una atenuación severa.
- **Banda de transición:** Es el rango de frecuencias en el cual están como limitantes la banda de paso y la banda atenuada.

2.2.1.2. Clasificación de filtros:

La clasificación de los filtros es más bien conocida como los filtros en el dominio de frecuencia que atiende a sus bandas de interés:

- **Filtros paso-bajo:** permiten el paso de la frecuencia hasta el límite casi nulo hasta la frecuencia de corte f_c la cual presenta una atenuación mínima de acuerdo a las especificaciones. Una vez pasada la frecuencia de corte, la señal se atenúa de manera gradual denominado también (banda de transición, llegando al límite de la banda atenuada, en donde se hacen requeridas las especificaciones.

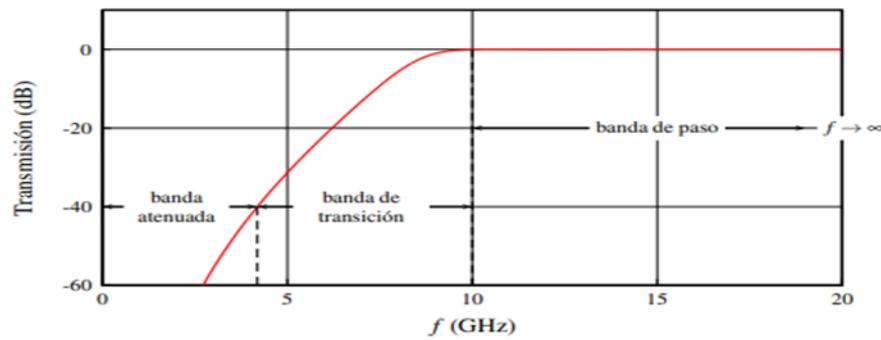
Figura 3 Frecuencia de paso bajo



Fuente. Cogollo (2016)

- **Filtro paso-alto:** Permite el paso de las frecuencias elevadas sin límite considerándose así frecuencia infinita.

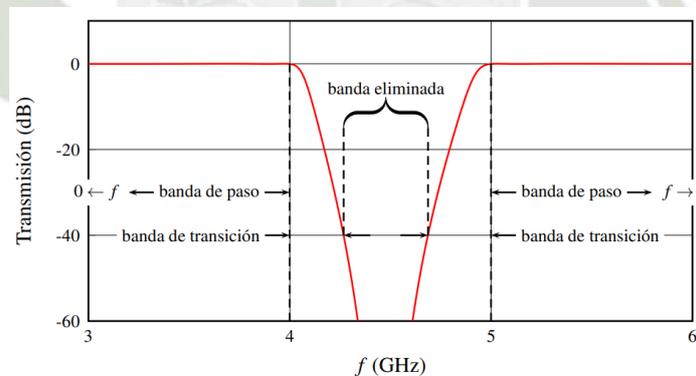
Figura 4 Frecuencia de paso alto



Fuente. Cogollo (2016)

- **Filtro pasa – Banda:** Pueden pasar frecuencias entre los límites inferior f_1 y superior f_2 , por lo que se considera las frecuencias $0 < f_1 < f_2 < \infty$.
- **Filtro de Banda Eliminada:** Tienen a delimitar las frecuencias f_1 y f_2 atenuándolas donde se marca el límite en las bandas de paso.

Figura 5 Límites de bandas



Fuente. Cogollo (2016)

- **Filtros pasa – Todo:** Permiten el paso de todas las frecuencias sin embargo modifican la fase de la señal. La respuesta de un filtro paso-todo es de lineal por lo que la banda de paso no existe (Cogollo, 2016).

2.2.1.3. Tipos de filtros

En los filtros existen dos tipos, que son los activos y los pasivos, en el caso de los pasivos tienen uso de componentes como resistencias, inductores y capacitores; en el caso de los activos, que serán los únicos de los que se hará uso, tienen elementos como los transistores o amplificadores, aparte de las resistencias, inductores y capacitores. Los inductores son elementos muy voluminosos por lo que no es recomendable ya que también son costosos, por lo que se puede eliminar los inductores con amplificadores o técnicas de realimentación. (Miyara, 2004)

2.2.2. Filtros pasivos

Es un circuito que controla la señal de salida según la frecuencia. Se utiliza principalmente para separar un grupo de frecuencias de otro. Originalmente, estos circuitos eran solo diseñados con componentes pasivos (resistencias, inductores, condensadores), de ahí el nombre de filtro pasivo. La diferencia con los filtros activos es que además de los componentes pasivos, hay uno o más componentes activos (transistores o amplificadores operacionales) que pueden regenerar la señal de entrada. Con un filtro pasivo, el voltaje de salida es siempre más bajo que el voltaje de entrada (Cartagena, s.f).

2.2.3. Filtros activos

Los filtros activos están formados por inversores de modulación de anchura de pulsos (PWM). Este contiene un complicado sistema que se encarga del control en donde elimina o reduce armónicos. (Murillo, 2010)

Es un circuito que permite el paso a una banda de frecuencia específica y atenúa las señales dentro de esa banda. Los filtros activos usan transistores o amplificadores operacionales además de resistencias, inductores y capacitores. Los inductores no se usan comúnmente en

filtros activos porque son voluminosos, costosos y pueden tener un gran componente resistivo (Murillo, 2010).

Cárdenas et al., (2005), citado por Pérez (2021), precisa que los filtros activos son fuentes de corriente variable o tensión que conectados directamente mediante un transformador de coplamiento al sistema eléctrico de potencia (SEP). A nivel práctico las corrientes o las tensiones se encuentran enlazadas por inversores que funcionan como lazo cerrado de un sistema de control con el objetivo de introducir la corriente o la tensión que haya sido fijada por medio de un referencia.

2.2.4. Filtro activo de potencia

También conocido como "acondicionador de línea de energía activa" (APLC), su función principal es reducir los armónicos en la red de distribución de energía. El propósito de los filtros activos es reducir las cargas no lineales asociadas con la red. Es decir que la corriente a través de la red eléctrica sea sinusoidal y que el voltaje aplicado a la carga sea senoidal. Los filtros activos de potencia (FAP) son dispositivos dinámicos para la compensación de armónicos. Tienen la capacidad de insertarse en la red para cancelar los efectos armónicos y adaptarse a las condiciones de funcionamiento cambiantes, a diferencia de los componentes de compensación pasivos. Se basan en convertidores PWM (Pulse Width Modulation) y se pueden conectar en serie o en paralelo al sistema de distribución (Lamich, 2013).

Marzouki et al, (2015), citado por Martínez et al, (2021), pone en manifiesto que la calidad de la energía mejora, cuando se logra incrementar los índices de fiabilidad, así como también la estabilidad de la red eléctrica y ello es posible mediante el uso de filtros activos de potencia (FAP), ya que los mencionados filtros permiten que disminuyan los niveles de armónicos.

Los FAP son dispositivos que tienen la capacidad de aislar las cargas perturbadoras de la red eléctrica, mejorando así la calidad de energía que se suministra a dicha carga. Los FAP

se componen principalmente por uno o varios inversores los cuales actúan como fuente de corriente o fuente en cualquiera de las topologías. Generalmente los filtrados se realizan a través de inductancias de enlace a la red, en los casos de los inversores de fuente de tensión. Los filtros activos a diferencia de otros se encargan de que las perturbaciones de tensión sean compensadas logrando que sea de calidad la tensión o que dichas perturbaciones sean aisladas de la red; cabe destacar que pueden ser empelados los FAP para que los flujos de potencia de la red eléctrica sean controlados (Castillo, 2019).

Figura 6 Filtro activo de potencia



Fuente. Lamich (2013)

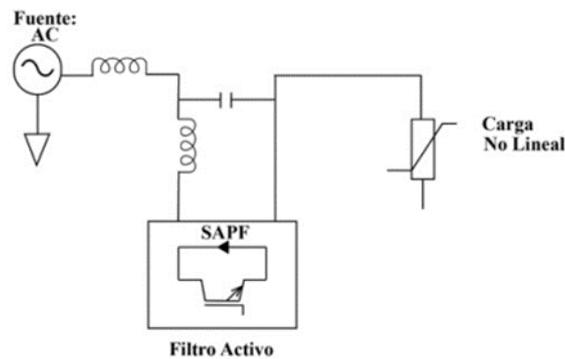
Los filtros activos de potencia da solución a los problemas existentes en la corrientes no lineales y la tensión de carga y pueden conectarse ya sea en paralelo o en serie al sistema de potencia permitiendo así que los armónicos sean compensados, equilibrando la carga, controlando la potencia reactiva y compensando la corriente de hilo nulo; de igual manera son capaces de integrarse mediante una combinación entre un paralelo y un FAP, los cuales son estudiados en el campo de transmisión de CA flexible (FACTS) (Torabi y otros, 2020).

a) Conexión en Serie

El filtro activo de potencia en serie (SAPF) está conectado al circuito principal el cual consiste en el suministro y la carga. El SAPF consta de un transformador, un filtro de salida tipo L o LC y un transformador de inyección. El SAPF está conectado en serie entre la potencia y la carga y generalmente se utiliza para filtrar armónicos de corriente y compensar distorsiones

de tensión como discontinuidades, parpadeo y tensiones trifásicas asimétricas, en sistemas de distribución a niveles de baja y media tensión (Hashim et al, 2016).

Figura 7 Esquema de un SAPF



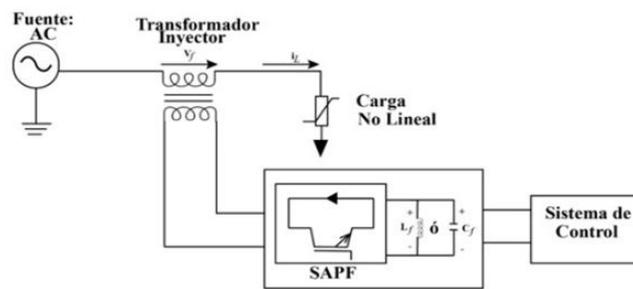
Fuente. Tepan (2022)

El propósito del SAPF es eliminar las incidencias armónicas del voltaje causado por la carga, actuando como protección contra la distorsión armónica que puede ingresar a la fuente de alimentación a través de la entrada del filtro, lo que normalmente hace que parezcan los armónicos en el generador lo que obviamente degrada su eficiencia y la potencia que puede entregar para una carga dada.

Como se puede observar en la Figura 7, estos dispositivos introducen la impedancia del propio filtro, debido a que este filtro está conectado por un transformador de acoplamiento, el cual transforma las impedancias adicionales que aumentan las pérdidas activas del sistema suministradas al sistema SAPF.

Por lo tanto, es necesario incluir un sistema de control en el sistema que permita la conmutación respectiva al filtro, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 8.

Figura 8 Diagrama de bloques de un SAPF



Fuente. Tepan (2022)

b) Conexión en Paralelo

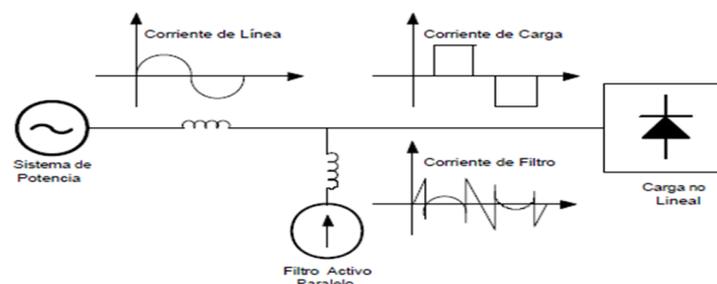
El control de filtro activo en Paralelo se implementa en procesadores de alta velocidad como los procesadores de señal digital (DSP) y FPGA.

Se obtiene una forma de onda de corriente que suprime los armónicos mediante la conexión de corriente usando un convertidor de voltaje controlado por corriente y un inductor. Un convertidor utiliza un condensador como fuente de voltaje de CC para generar una señal de compensación. La forma de onda de la entrada de la señal de referencia al sistema se obtiene mediante la conmutación de dispositivos de potencia (Alzate et al, 2016).

El controlador del filtro activo realiza cuatro acciones principales:

- Generación de la corriente de referencia.
- Control de corriente.
- Control del bus de continua.
- Estrategia de control (Alzate et al., 2016).

Figura 9 Características de compensación de un filtro activo de potencia paralelo

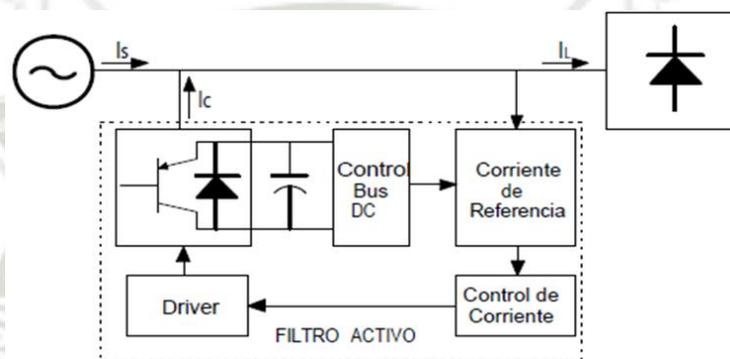


Fuente. Alzate et al. (2016)

2.2.4.1. Estructura básica de un filtro Activo de Potencia (FAP)

En la figura 10 se observa un filtro activo de potencia (FAP) básico el cual es utilizado para la eliminación de corrientes no activas que se encuentran circulando por la fuente. El filtro se encuentra compuesto por cuatro bloques: el control Bus DC, la corriente de Referencia que sirve como el enlace con el punto de conexión de la red, el control de la corriente y sistema de control del FAP.

Figura 10 Estructura de un FAP

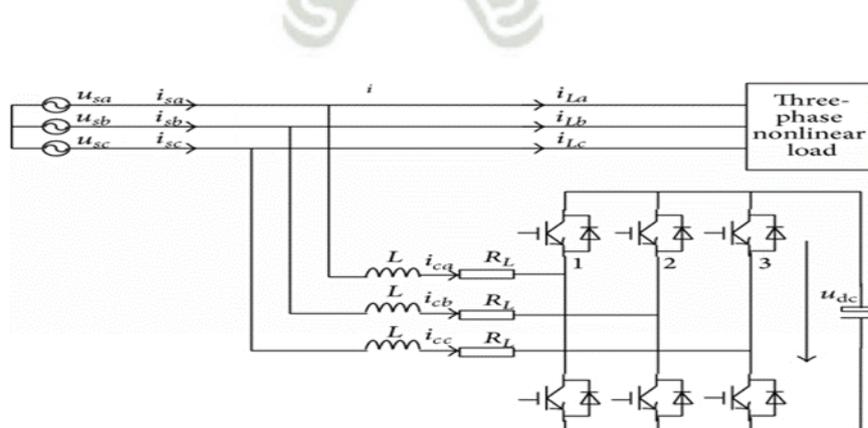


Fuente. Alzate et al. (2016)

a) Control Bus DC

La Figura 10 muestra la estructura topológica del FAP en derivación trifásico. La parte principal es un convertidor de dos niveles, que se conecta con la red eléctrica a través del inductor de filtro, donde se encuentra la resistencia del inductor de filtro R_L .

Figura 11 Estructura de un convertidor FAP



Fuente. Liu et al. (2014)

En el convertidor, los puentes 1, 2 y 3 son utilizados para producir la corriente de compensación i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} de las fases A, B y C, respectivamente. La corriente de compensación es producida por un circuito aritmético. En condiciones ideales, la corriente de compensación i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} , se produce de acuerdo con la corriente de entrada el cual compensará la corriente armónica y la corriente reactiva. El incremento de corriente activa en la fase A causado por la fluctuación del voltaje del bus de DC es Δi_{a1} . (Liu et al., 2014)

$$u_{sa} = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$$

$$\Delta i_{a1} = \sqrt{2}\Delta I_1 \sin(\omega t) \quad \text{Ec. 2.1}$$

El cambio de potencia instantáneo de la fase A p_a Ec. 2.2 a fluctuación del voltaje del bus de DC es:

$$p_a = 2\Delta I_1 U \sin^2(\omega t) \quad \text{Ec. 2.3}$$

La fluctuación del voltaje del bus de DC es:

$$p_{out} = p_a + p_b + p_c \quad \text{Ec. 2.4}$$

La tensión y la corriente trifásicas son simétricas; por lo tanto, el cambio de potencia instantáneo total de todo el sistema causado por la fluctuación del voltaje del bus de DC se puede expresar de la siguiente forma.

$$p_{out} = 3U\Delta I_1 \quad \text{Ec. 2.5}$$

La pérdida del estado activado en los dispositivos de conmutación se puede expresar de la siguiente forma:

$$p_{on} = R_{on}(i_{ca}^2 + i_{cb}^2 + i_{cc}^2) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde i_{ck} ($k = a, b, c$) son las corrientes de compensación del FAP. Como la carga trifásica es simétrica, entonces tenemos:

$$p_{on} = 3R_{on}I_c^2 \quad \text{Ec. 2.7}$$

La pérdida de potencia instantánea total de las resistencias iguales de los inductores del filtro es:

$$p_R = 3R_L I_c^2 \quad \text{Ec. 2.8}$$

La potencia instantánea absorbida por el capacitor del bus de DC se puede expresar como

$$p_{dc} = u_{dc} \left(C \frac{du_{dc}}{dt} \right) \quad \text{Ec. 2.9}$$

b) Control de la corriente

El control de la corriente en la banda de histéresis se muestra en la siguiente lógica:

Si: $i_a < (i_{com} - HB)$; $SF = 1$

Si: $i_a > (i_{com} + HB)$; $SF = 0$

Donde:

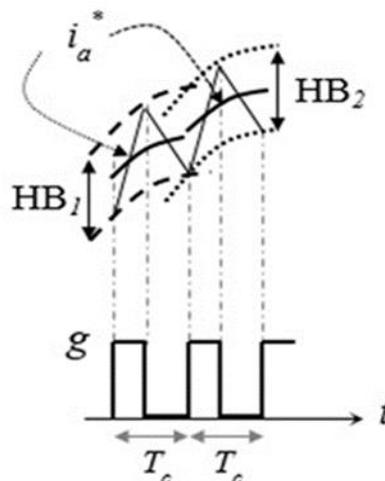
i_a : Corriente de la fase n inyectada por el filtro

i_{com} : Corriente de compensación para la fase n

HB : Máxima desviación de la corriente inyectada por el filtro.

g : Estado de conmutación de los interruptores del convertidor, para la fase n.

Figura 12 Esquema de control de corriente PWM por banda adaptativa de histéresis



Fuente. Murillo-Yarce et al. (2018)

c) Estrategia de Control

La estrategia de control se utiliza como un método algorítmico para descomponer las potencias reactivas y activas utilizando la teoría P-Q para avanzar en el desarrollo de componentes de matriz para encontrar voltajes de compensación.

En el desarrollo de la estrategia de control se presentará un algoritmo utilizando el filtro activo de potencia en paralelo usando la expresión de la corriente y tensión mostrada a continuación (Marulanda-Durango y Cadavid, 2008).

$$v_{L(a,b,c)} = \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix}; \quad i_{S(a,b,c)} = \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

$v_{L(a,b,c)}$: Vector de tensión en carga

$i_{S(a,b,c)}$: Vector de corriente

El vector de tensión y el vector de corriente son llevados de un sistema estacionario a un sistema rotatorio por medio de la transformada de Clarke $(a, b, c) = T(\alpha, \beta, 0)$

$$v_{L(\alpha,\beta,0)} = [T] \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{L\alpha} \\ v_{L\beta} \\ v_{L0} \end{bmatrix}; \quad i_{S(\alpha,\beta,0)} = [T] \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{S0} \end{bmatrix}$$

Donde [T] es la transformada de Clarke

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La potencia activa se expresa mediante el producto interno del vector de corriente y el vector de voltaje de la siguiente manera.

$$p = v_{L(\alpha,\beta,0)} \cdot i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad \text{Ec. 2.11}$$

La potencia reactiva se expresa mediante el producto cruz del vector de corriente y el vector de voltaje de la siguiente manera.

$$q = v_{L(\alpha,\beta,0)} \times i_{S(\alpha,\beta,0)} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

p : potencia activa

q : potencia reactiva

En un sistema trifásico equilibrado, el voltaje y la corriente de secuencia son nulas.

$$\begin{aligned} V_a + V_b + V_c &= 0 & i_a + i_b + i_c &= 0 \\ V_{L0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) &= 0 & i_{L0} = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) &= 0 \end{aligned}$$

La potencia activa y reactiva se pueden expresar de la siguiente forma:

$$p = V_{L\alpha} i_{S\alpha} + V_{L\beta} i_{S\beta}; \quad q = \begin{bmatrix} |0| \\ |0| \\ V_{L\alpha} & V_{L\beta} \\ i_{S\alpha} & i_{S\beta} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.13}$$

El vector de tensión en la potencia activa

$$v_{p(\alpha,\beta,0)} = \frac{p}{i_{S(\alpha,\beta,0)}}$$

El vector de tensión en la potencia reactiva

$$v_{q(\alpha,\beta,0)} = \frac{q}{i_{S(\alpha,\beta,0)}}$$

Vector de tensión de acuerdo a las potencias activa y reactiva

$$v_{L(\alpha,\beta,0)} = v_{p(\alpha,\beta,0)} + v_{q(\alpha,\beta,0)}$$

Una vez encontrado el vector de tensión se procede a hallar la tensión de compensación utilizando la inversa de la transformada de Clarke.

$$v_{c(a,b,c)} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} v_{c(\alpha)} \\ v_{c(\beta)} \\ v_{c(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{c(a)} \\ v_{c(b)} \\ v_{c(c)} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$[T]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Donde:

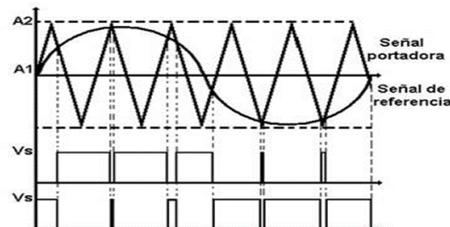
$v_{c(a,b,c)}$: Tensión de compensación de referencia en coordenadas (a, b, c)

$[T]^{-1}$: Transformada inversa de Clarke.

La estrategia de control de PWM en este proyecto se da como una señal de control para encender/apagar un IGBT formado en un inversor que funciona sincrónicamente con la línea eléctrica.

La señal de referencia de compensación (senoidal) se compara con la señal portadora (diente de sierra) ocasionando pulsos en la disposición de la fase, estos pulsos son referenciados mediante el voltaje en la señal PWM el cual se conecta con la corriente de compensación para así regulara los armónicos presentes en la red eléctrica (Rodríguez, 2017).

Figura 13 Modulación PWM constituida mediante una señal de referencia sinusoidal y una portadora triangular



Fuente. Rodríguez (2017)

d) Corriente de Referencia

El valor de la corriente de referencia es usado para cancelar los armónicos generados por una determinada carga y equilibra las corrientes que circulan en las fases, el cual es una de las funciones que debe realizar un filtro activo.

Las estrategias de control utilizadas para realizar el calcula de la corriente de referencias son dos:

- Teoría de la potencia reactiva instantánea.
- Sistema de referencia síncrono.

En la estrategia de control de la potencia reactiva instantánea es necesario contar el sistema de referencia $\alpha - \beta - 0$ el cual es hallando usando la trasformación de Clarke y el sistema de referencia $d - q - 0$ usando la transformación de Park.

Las corrientes de referencia para la compensación según los ejes $\alpha - \beta - 0$ para ser inyectadas al filtro son:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p} \\ q \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Los valores de las corrientes de compensación en el sistema trifásico a-b-c, se obtienen mediante la transformación inversa de Clarke.

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \\ I_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \\ I_{c0} \end{bmatrix}$$

En un sistema trifásico sin neutro no existe corriente homopolar por lo tanto las corrientes de compensación se reduce en los ejes $\alpha - \beta$, entonces las corrientes que deben ser inyectas al filtro son:

$$\begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{c\beta} \\ I_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix}$$

Si el voltaje en la red está distorsionado, la corriente calculada con la fórmula anterior no compensará con precisión los armónicos. Por esta razón, necesitamos generar un sistema de voltajes simétricos en el plano de control en lugar de medirlos directamente. Puedes hacerlo de varias maneras. Por ejemplo, un sistema de seguimiento PLL (Marulanda-Durango y Cadavid, 2008).

Para determinar las corrientes de compensación usando la transformación de Park se parte de que la red suministre la componente continua de la corriente sumada a la corriente que representa las pérdidas del filtro activo y el sistema de compensación suministrará a la carga las corrientes restantes (Marulanda-Durango y Cadavid, 2008).

Las corrientes de referencia para la compensación según los ejes $d - q - 0$ para ser inyectadas al filtro son:

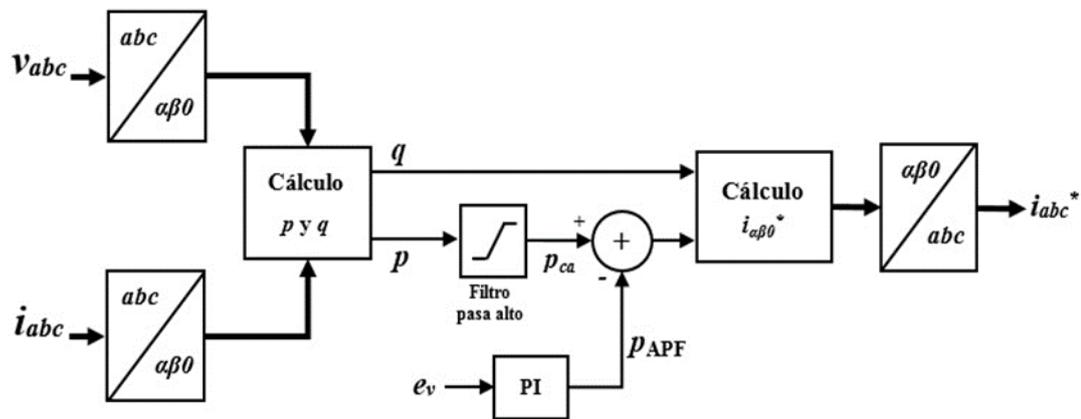
$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_d - \bar{i} \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Las corrientes de referencia para la compensación en el sistema de ejes a-b-c usando la inversa de la transformación de Park es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{c\beta} \\ I_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \\ I_{c0} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Finalmente, con el calcula de la trasformada inversa de Clarke, y una vez encontrado la potencia activa y reactiva en la estrategia de control se procede a encontrar las corrientes de referencia en el sistema trifásico I_{abc} en las coordenadas (a, b, c). El algoritmo se describe mediante el siguiente diagrama (Marulanda y Cadavid, 2008).

Figura 14 Diagrama de bloques de la corriente de referencia, utilizando la teoría p - q



Fuente. Marulanda y Cadavid (2008)

2.2.6. Control de corriente

El controlador de corriente perteneciente al filtro activo de potencia tiene la función principal de que las corrientes salientes del inversor se dirijan explícitamente a las corrientes de referencia que se consiguieron con la estrategia de compensación de armónicos. (Murillo, 2010)

2.2.7. Perturbaciones Eléctricas

La red eléctrica de baja tensión exhibe una onda de tensión, donde la calidad de esta onda que se vería perturbada ocasionalmente, por fallas en las líneas y centros de transformación, por la realización de maniobras y por descargas eléctricas atmosféricas. Los usuarios exponen las redes a cargas variables, con lo cual estas cargas pueden alterar la onda de tensión con caídas permanentes o temporales, también mediante las inyecciones de corriente (irrupciones) al encender y sobretensiones al apagar, esto también provoca distorsiones armónicas, entre otras deficiencias. Además, la carga puede fallar provocando un consumo anómalo y un cortocircuito que debe ser aislado mediante un sistema de protección exigido legalmente. Esto puede causar una interferencia significativa en puntos cerca de la red a menos que se aisle la carga defectuosa. Las perturbaciones de la red pueden clasificarse en dos categorías (Fernández, 2015).

A. Perturbaciones aleatorias

Son fenómenos aleatorios provocados por los elementos que componen la red, líneas, transformadores, cables, etc., o por las propias instalaciones del dueño o la empresa. El resultado típico de estas perturbaciones es una caída temporal de tensión e interrupciones menos prolongadas en ciertas áreas de la red (Fernández, 2015).

B. Perturbaciones estacionarias

Son fenómenos de carácter persistente o permanente, la mayoría de estas interferencias suelen ser debidas al funcionamiento de determinados equipos en la red del dueño o empresa de las instalaciones.

Desde un punto de vista más práctico y comercial, la calidad de los productos de alimentación eléctrica se contempla desde tres perspectivas, tanto desde la perspectiva de la empresa como desde la del cliente en 3 puntos (Fernández, 2015).

- Continuidad de la tensión (interrupciones)
- Variaciones lentas de tensión.
- Otras perturbaciones

C. Perturbaciones Transitorias

Son una de las perturbaciones más graves en la calidad de la energía, ya que pueden afectar negativamente a los equipos conectados a la red eléctrica. Debido a su corta duración y contenido de alta frecuencia, son difíciles de detectar y requieren altas tasas de muestreo y operaciones en tiempo real para realizar las acciones de control o protección deseadas (De Apráiz, 2013)

Transitorios

El estándar IEEE 1159-2009 clasifica los transitorios en dos categorías básicas: impulsivos y oscilatorios

A. Transitorio Impulsivo

Un transitorio de impulso es un cambio repentino en el estado nominal de voltaje, corriente o ambos, con una polaridad unidireccional (o positiva o negativa) a una frecuencia distinta de la frecuencia fundamental. Los transitorios de impulso se caracterizan típicamente por el tiempo de subida y la duración (De Apráiz, 2013).

B. Transitorio Oscilatorio

Los transitorios oscilantes son cambios repentinos del estado estable de voltaje, corriente o ambos a frecuencias distintas a la frecuencia fundamental, con valores de polaridad positiva y negativa. Un transitorio oscilatorio consta de una tensión o corriente cuyo valor instantáneo cambia rápidamente de polaridad. Si la frecuencia primaria está entre 0,5 MHz y 5 MHz se considera de alta frecuencia, si está entre 5 kHz y 500 kHz es de media frecuencia y si el contenido espectral está por debajo de 5 kHz se considera de baja frecuencia (De Apráiz, 2013).

Tabla 2 *Categorías y características típicas de las perturbaciones transitorias*

Transitorios	Contenido espectral	Duración	Magnitud de la tensión
Impulsivo			
Nanosegundos	5 ns subida	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s subida	50 ns - 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms subida	> 1 ms	
Oscilatorio			
Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
Media frecuencia	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu

Fuente. (De Apráiz, 2013).

Interrupciones

Hace referencia a la falta de suministro eléctrico en un punto de entrega, producto de diversas razones o causas generadas en las salidas de las instalaciones del suministrador o cualquier otra que la alimente, por concepto de maniobras, mantenimiento, ampliaciones, entre otras, así como también, por fallas, mal funcionamiento. No son consideradas interrupciones cuando duran un tiempo no mayor a 3 minutos o aquellas que hayan sido causadas por razones de fuerza mayor y que se encuentren debidamente calificadas y comprobadas por las autoridades (Osinermin, 2017).

Subtensión

Se presenta cuando la tensión disminuye entre un 10 y 90% del voltaje nominal por un 0.5 ciclo a un minuto. En términos generales se ocasionadas por cortocircuitos, fallas del sistema, sobrecargas o durante el encendido de cargas que producen una alta demanda de corriente al arrancar. Cuando las subtensiones son permanentes o constantes, lo que indica es que existe una falla en el equipo considerada como grave, por diversos problemas lo que requiere que sea verificada la red eléctrica (Seymour & Horsley, 2020).

Sobretensión

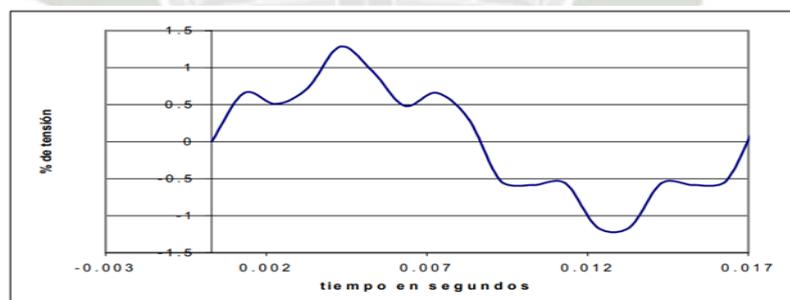
Pueden presentarse manera temporal o permanente y corresponde al incremento de la tensión llegando a superar el 10% del voltaje nominal de la red de distribución y que llega a mantenerse desde décimas de segundo hasta de forma permanente. Se presentan comúnmente en áreas cuyos valores de referencia de las taps del transformador que suministra energía no se encuentra bien configurado generando que las cargas se reduzcan; de igual manera se presentan en zonas donde los consumidores de forma repentina reducen el uso de energía y la empresa sigue suministrando la misma capacidad correspondiente al consumo habitual (A. Tecnológicas, 2019).

2.2.8. Armónicos

Para definir un armónico se debe explicar lo que sería la onda de tensión la cual contiene amplitud y frecuencia de manera constante con un aspecto sinusoidal, en el caso de que una onda periódica no tenga ese aspecto sinusoidal, recién se dice que está teniendo armónicos, de tal forma que esto puede cambiar el pico, además de su valor rms, donde estos causan alteraciones en los equipos que se someten a la tensión. (Arcila, 2010)

Los armónicos son tensiones sinusoidales con frecuencias los cuales son múltiplos integrales de la frecuencia esencial del sistema; pueden ser producidos por aparatos electrónicos de potencia, operación de bancos de capacitadores, la aplicación e reactores saturables, entre otros (Viego et al, 2008). De manera general, se entiende como armónicos eléctricos a las perturbaciones en la frecuencia real de las señales eléctricas las cuales nace de las mismas instalaciones, generando caídas en la tensión a corto y largo plazo, que causan problemas en los equipos que se encuentran conectados en esa red eléctrica. (pepeenergy, 2020)

Figura 15 Onda con contenido armónico



Fuente. Arcila (2010)

2.2.8.1. Espectro de frecuencias armónicas

- a) **Efectos sobre cables.** Ocurre que la distribución de corriente solo es uniforme cuando se utiliza en corriente directa. En el caso de que se haga en corriente alterna, la frecuencia va aumentando, por lo tanto, ya no hay uniformidad y por lo tanto la distribución de corriente será más pronunciada. Si se tienen conductores circulares, la densidad de corriente aumenta de la superficie en el centro. En el caso de las capas

externas, no están tan comprometidas debido al flujo magnético, por lo que se puede decir que la corriente alterna es provocada sobre todo por el voltaje que hay en el interior del conductor. Por lo que significa que la densidad de corriente va en aumento desde el interior del cable conductor hacia las capas externas. (Arcila, 2010)

- b) Efectos sobre transformadores.** Su diseño casi siempre está hecho para trabajar con corriente alterna, en una frecuencia fundamental. El transformador debe tener la capacidad de dispersar el calor que se haya producido debido a las pérdidas que tuvo, sin sobrecalentarse ni desgastar la vida útil del componente. Los armónicos realizan efectos que son más que todo pérdidas sin carga, la corriente que es de magnetización este está referido sobre todo a los armónicos, lo cuales se convierten en algo pequeño, al compararse con la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son pocos. También se tiene que las pérdidas por Eddy, que, en la frecuencia fundamental, son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, provocan que haya un aumento excesivo en los devanados de corrientes de carga que no son sinusoidales. Y si tomas otras pérdidas, tienden a aumentar la temperatura en zonas estructuradas del transformador, es muy importante la clase de transformador porque este ayudara o no a la temperatura más caliente del devanado. (Arcila, 2010)
- c) Efectos sobre capacitores.** La reactancia que tiene los capacitores disminuye cuando hay un aumento de frecuencia, por lo que tiende a funcionar como sumidero al aparecer corrientes con alta frecuencia armónica. Cuando sucede esto, el esfuerzo dieléctrico es mayor y también incrementa la temperatura del capacitor en su interior. Si se calienta no se considera como problema ya que los capacitores trabajan con láminas que reducen pérdidas. (Arcila, 2010)

d) Efectos sobre motores. Los armónicos tienen un efecto de incremento de calor en las máquinas rotativas, a causa de las pérdidas en el hierro, y cobre cuando se someten a altas frecuencias, de esta forma los armónicos causan estragos en la eficiencia de la máquina como sería el caso del torque desarrollado. Si hay armónicos en la corriente de motores, incrementan la difusión de ruidos audibles comparados con la excitación sinusoidal. También pueden llegar a producir esparcimiento de flujo el gap de aire, las cuales pueden provocar la negativa de arranque suave o quizás el deslizamiento en los motores. (Arcila, 2010)

2.2.8.2. Instrumentos para la medición de armónicos

Para poder medir los armónicos se utilizarán instrumentos los cuales han mejorado con el paso de años, sobre todo en los recientes. Uno de los diseños más innovadores ha sido el analizador digital, el cual tiene la capacidad de registrar componentes armónicos con sus frecuencias, a un nivel mayor de 50 veces más frecuencia fundamental que serían 3000Hz. Este dispositivo tiene 7 canales de entrada, los cuales 3 son para línea de voltaje, 3 son para corrientes de línea y 1 canal es de uso general. (Gers, 2008)

La manera en la cual presenta los registros es con aspecto de tabla de datos y con formas de onda: todo esto tiene una información resumida en donde se visualiza en la tabla 6 canales con parámetros de valor, rms, thd, It, TIF y el desbalance NEMA. También se presenta la tabla con distribución de tipo espectral de magnitudes dadas por armónico, 6 canales y corriente neutral.

Se tiene también que las mediciones se manejen en puntos alto de voltaje, es necesario el uso de transformadores de potencial y de corriente. Para lo cual se utilizan transformadores de potencia inductivos, los cuales tienen como respuesta frecuencias que varían entre los 700 Hz y 1000 Hz, mientras los transformadores de tipo capacitivo, no tienen una respuesta uniforme en frecuencias mayores a 60 Hz, es por ello que los transformadores pueden llegar a

amplificar o atenuar los armónicos. En el caso de los transformadores de corriente tienen una respuesta de frecuencia plana cercana a 5KHz, por lo que no es necesario tener sumo cuidado a los transformadores de corriente. (Gers, 2008)

a) Indicios de contenidos de armónicos

- 1. Problemas de neutro:** En un sistema trifásico, el cable neutro alterna con las corrientes de fase a cero. Si hay un sistema donde se agregan algunos armónicos impares, el neutro no los cancelará ya que el sistema es una carga no lineal. Para cargas monofásicas, el neutro supera la corriente de fase. Si un neutro a través de una fase similar al del sin protección produce un calentamiento excesivo, esto provocará una caída de voltaje en el circuito.
- 2. Interruptores Automáticos:** Este tipo de interruptor funciona cuando el circuito se sobrecalienta y presenta una ondulación de corriente rms, que es la protección que este interruptor puede proporcionar contra la sobrecarga debida a corrientes armónicas.
- 3. Bornes de Conexión:** Cuando la suma de los armónicos se suma al neutro, actuará y provocará una sobrecarga, ya que se sabe que solo el admite valores máximos de corriente de fase.
- 4. Tableros Eléctricos:** Las corrientes armónicas de alta frecuencia crean un campo magnético, lo que hace que la placa vibre con el sonido, provocando resonancia.
- 5. Transformadores:** La saturación del transformador produce armónicos. Esto dará como resultados armónicos impares si la carga no es lineal. Este representa una sobrecarga que opera en la región no lineal.
- 6. Generadores:** El sobrecalentamiento es el tipo de problema que presenta los generadores, además de crear una carga generadora de armónicos utilizados

como fuente de alimentación, provoca distorsión en los cruces por cero de la forma de onda actual, lo que resulta en fallas e inestabilidades en el circuito aumento.

7. Fuentes Armónicas: Los inversores y rectificadores controlados por ángulo de fase son importantes principios de distorsión armónica.

b) Variables indicadoras de la distorsión armónica en voltaje y corriente

Distorsión existente en las ondas de corriente y tensión a causa de armónicas se evalúan en base a determinadas variables indicadoras (Oyanguren, 2020). Las cuales se mencionan a continuación:

- **Factor de potencia**, en el caso de las redes que no contienen armónicos, el factor de potencia tiene una denominación con que sería “ $\cos \varphi$ ”, ñla cual representa la relación existente entre potencia activa (P) y la potencia aparente fundamental (S_1) (Oyanguren, 2020).

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S_1} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Si hubiese redes que contengan armónicos, su relación está dada por la potencia activa y la potencia aparente fundamental. (Oyanguren, 2020)

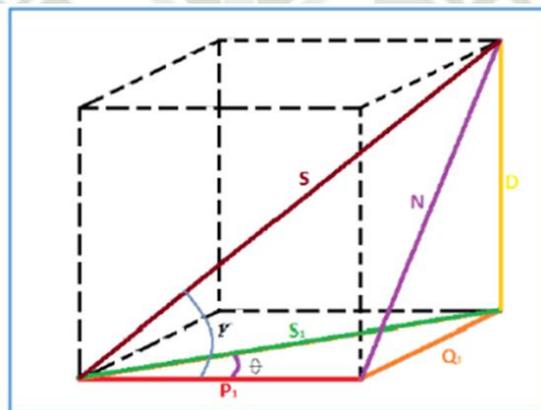
$$FP_{Total} = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2}} = \cos ? \quad \text{Ec. 2.19}$$

Como parte de los elementos Q_1 es la potencia reactiva fundamental y D vendría a ser la potencia de distorsión que tendría representación como:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_1^2)} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Para una mejor comprensión acerca de la posición angular y como se diferencia, en la siguiente imagen, se pueden ver tanto φ como θ , los cuales son determinados por su factor de potencia (FP) y el factor de potencia total FP_{total} , en donde se muestran las diferentes magnitudes, mencionadas en las ecuaciones. (Oyanguren, 2020)

Figura 16 Triángulo de Potencias



Fuente. Oyanguren (2020)

Para hallar el factor de potencia de distorsión, hay que fijarnos en la relación de factor de potencia total FP_{total} el cual es equivalente al factor de potencia (FP), multiplicando el factor de potencia de distorsión $FP_{distorsión}$ (Oyanguren, 2020)

$$FP_{total} = FP * FP_{distorsión} \quad \text{Ec. 2.21}$$

El $FP_{distorsión}$ tiene la siguiente relación:

$$FP_{distorsión} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2}} \quad \text{Ec. 2.22}$$

- **Factor de Cresta**, indica que en las señales sinusoidales el factor de cresta tiene un valor de $\sqrt{2}$, en el caso de no ser una señal sinusoidal, lo que serían los armónicos, puede tener un valor mayor o menor a $\sqrt{2}$. Hay ocasiones excepcionales en las que el rango del valor de cresta varía entre 1.5 y 5 (Oyanguren, 2020). La relación que hay entre el pico de la corriente (I_m) o de la tensión (V_m) en sus valores de eficacia que sería:

$$k = \frac{I_m}{I_{RMS}} \quad \text{ó} \quad k = \frac{V_m}{V_{RMS}} \quad \text{Ec. 2.23}$$

- **Potencia activa**, representado como P en una señal armónica, esta se obtiene con la suma de las potencias activas que corresponden a tensiones e intensidades que estén en el mismo orden (Oyanguren, 2020). Sus componentes armónicos al descomponer la tensión e intensidad son mostrados como:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad \text{Ec. 2.24}$$

φ_h es el desfaseamiento para armónico que es de orden h. que esta entre la onda de tensión y la corriente.

- **Potencia reactiva**, tiene de símbolo Q que tiene como componente fundamental:

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad \text{Ec. 2.25}$$

- **Distorsión armónica total (THD)**, tiene consideración de orden 50 en los armónicos, donde existe una relación de valor eficaz entre todos los elementos de una señal con armónicos (Oyanguren, 2020). Los armónicos trabajan con tensión y corriente, pero no verifica el nivel de contaminación para lo cual usa fórmulas de tensión e intensidad:

Tensión:

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

Intensidad:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\% \quad \text{Ec. 2.27}$$

Cuando se conoce el valor eficaz se utiliza de forma más directa:

$$THD_V = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\% \quad \text{Ec. 2.28}$$

Cuando las armónicas son individuales tenemos la fórmula:

$$IHD_n = \frac{V_N}{V_1} * 100\% \quad \text{Ec. 2.29}$$

- **Distorsión de demanda total (TDD)**, su uso solo es dado en las corrientes, donde verifica lo que es la calidad del servicio, en el caso de que hubiese niveles elevados del indicador THDi, en donde tiene cargas pequeñas, que no causa repercusiones en el sistema (Oyanguren, 2020). Su relación es señalada por el valor eficaz en las corrientes armónicas y la corriente de máxima demanda que tenga la carga. Su fórmula es:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad \text{Ec. 2.30}$$

c) Calidad de energía

Su definición está dada por ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones, que se producen a causa de los armónicos en la red, y las variaciones que tiene

el voltaje RMS, haciendo referencia a la estabilidad que tenga el servicio en el voltaje, frecuencia y su continuidad. (Saucedo y Taxis, 2008)

Para simplificar un poco más se le denomina como la interacción que tiene la energía con variados equipos eléctricos. Además, se debe ver si los equipos eléctricos están operando adecuadamente y de manera confiable, en donde no sea dañados. Si el equipo de eléctrico no está en funcionamiento óptimo, o si se daña cuando se utiliza en una situación normal, la calidad de energía se establece como pobre. (Saucedo y Taxis, 2008)

Para comprender la calidad, se toma en consideración la normalización o estandarización del suministro de energía, el cual está regido a reglas, que establecen parámetros, niveles, armónicos, niveles en la distorsión armónica, interrupciones y más. (Oyanguren, 2020)

Las organizaciones establecieron límites de suministro un nivel de voltaje mínimo a causa de la distorsión que puede perjudicar los equipos relacionados que utilicen los usuarios con este medio, es por ello que la existencia de las distorsiones armónicas dio lugar a la preocupación de los organismos (Oyanguren, 2020).

Las siguientes tablas muestran límites de distorsión tanto en voltaje como corriente para el suministro de electricidad:

Tabla 3 *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. (Oyanguren, 2020)

Tabla 4 *Límites de Distorsión de Corriente*

I_{sc}/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. (Oyanguren, 2020)

2.2.9. Métodos de compensación de armónicos

Existen varios métodos que nos permiten realizar una compensación en los armónicos algunos de ellos son: Cross Theory, P-Q-R Theory, Id-Iq Theory, Vd-Vq Theory, y la metodología utilizada para desarrollar el controlador en este documento es el desarrollo de la transformación de Park y la transformación de Clarke.

2.2.9.1. Transformación de Park o D-Q

La transformada Park o D-Q transforma los componentes a b c de un sistema trifásico a otro sistema de referencia dq0. El propósito de la conversión es convertir el valor trifásico a b c de un valor que varía sinusoidalmente en el tiempo a un valor constante de régimen permanente dq0. El vector que contiene los elementos del nuevo sistema de referencia $[X_r]$ se obtiene multiplicando el vector de coordenadas trifásicas $[x]$ por la matriz de transformación $[T]$, se muestra en la siguiente expresión.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [X_r] = [T] \cdot [X] = [T] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.31}$$

La expresión de la matriz de transformación $[T]$ se muestra de la siguiente forma

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Donde θ es el ángulo de la referencia rotativa en los ejes D-Q

$$\theta = \int_0^t (\omega \cdot t) \cdot dt + \theta_0 \quad \text{Ec. 2.33}$$

Donde:

ω = velocidad angular de la referencia D-Q

θ_0 = ángulo inicial de la referencia D-Q

Cuando la velocidad angular ω es constante, la transformación se puede expresar de la siguiente forma:

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega \cdot t + \theta_0) & \cos(\omega \cdot t + \theta_0 - 2\pi/3) & \cos(\omega \cdot t + \theta_0 + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega \cdot t + \theta_0) & -\sin(\omega \cdot t + \theta_0 - 2\pi/3) & -\sin(\omega \cdot t + \theta_0 + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

2.2.9.2. Transformación de Clarke

La teoría p-q usando las potencias activas y reactiva de la carga no lineal puede obtener las corrientes y voltajes del filtro activo mediante un sistema fijo usando el método de la transformación de Clarke.

$$\{\alpha, \beta, 0\} = T\{a, b, c\}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.34}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

La transformación inversa de Clarke se representa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.36}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.37}$$

Los ejes $(\alpha, \beta, 0)$ son ejes ortogonales y los ejes (a, b, c) son ejes que están fijados dentro del plano a una distancia $(\frac{2\pi}{3})$, la eliminación de la corriente (I_0) y el voltaje (V_0) se puede hacer cuando se esté utilizando un sistema de tres hilos sin un conductor neutro dentro de un sistema que se mantiene en equilibrio, llegando a la expresión:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.39}$$

Las potencias instantáneas $p(t)$, $p_0(t)$ y $q(t)$ están compuestas de dos formas:

A. **Parte contante:** Se encuentra hallando el promedio integral del valor instantáneo.

B. **Parte variable en el tiempo:** Posee un valor medio nulo.

De este modo es formulada la potencia instantánea $p(t)$

$$p(t) = P + \tilde{p}(t) \quad \text{Ec. 2.40}$$

Donde:

P: Valor Promedio

\tilde{p} : Terminio variable

Descomponiendo la potencia instantánea en secuencia cero:

$$p_0(t) = P_0 + \tilde{p}_0(t)$$

La potencia imaginaria instantánea se expresa como:

$$q(t) = Q + \tilde{q}(t) \quad \text{Ec. 2.41}$$

Donde:

Q: Valor Promedio

$\tilde{q}(t)$: Terminio Variable

Para una carga cualquiera la potencia es expresada de la siguiente forma

$$p_{L0}(t) = P_{L0} + \tilde{p}_{L0}(t)$$

$$p_L(t) = P_L + \tilde{p}_L(t)$$

$$q_L(t) = Q_L + \tilde{q}_L(t)$$

Si $q(t) = 0$, el calculo de la potencia se muestra de la siguiente forma:

$$p_S(t) = P_L + \tilde{p}_{L0}(t)$$

Suministrando el resto de la potencia en la compensación serie:

$$p_{C0}(t) = -\tilde{p}_{L0}(t)$$

$$p_C(t) = -\tilde{p}_L(t)$$

$$q_{CL}(t) = -Q_L - \tilde{q}_L(t) = -\tilde{q}_L(t)$$

Representación en forma matricial

$$\begin{bmatrix} p_{Co}(t) \\ p_C(t) \\ q_{CL}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{p}_{Lo}(t) \\ -\tilde{p}_{Lo}(t) \\ -\tilde{q}_L(t) \end{bmatrix}$$

Para determinar el vector de tensión $V_{Co\alpha\beta}$ debe estar en coordenadas $0\alpha\beta$ y se reemplaza de la siguiente forma:

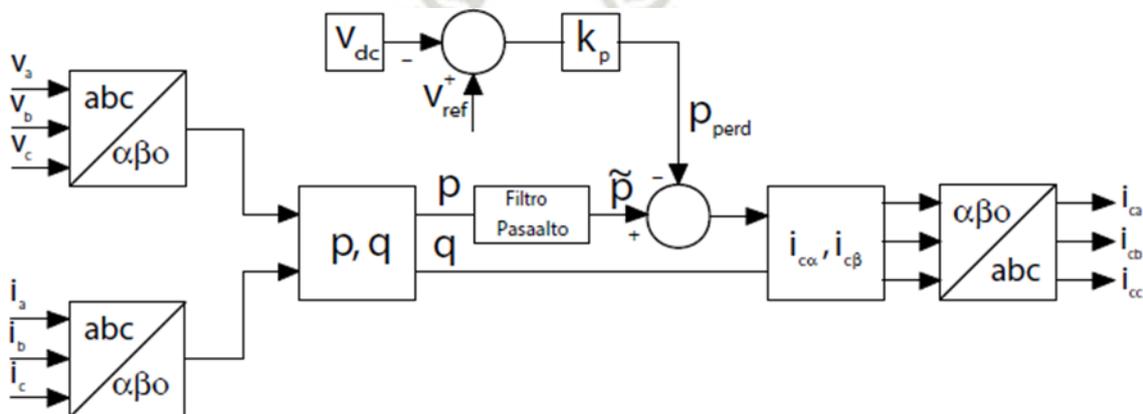
$$V_{Co\alpha\beta} = \begin{bmatrix} V_{Co} \\ V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0^{2T} / i_0^2 \\ i_{\alpha\beta}^T / i_{\alpha\beta}^2 \\ i_{\alpha\beta}^T \perp / i_{\alpha\beta}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p}_{Lo}(t) \\ -\tilde{p}_{Lo}(t) \\ -\tilde{q}_L(t) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.42}$$

La transformada inversa desarrolla las componentes del vector de tensión en coordenadas de fase:

$$V_C = \begin{bmatrix} V_{Ca} \\ V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Co} \\ V_{C\alpha} \\ V_{C\beta} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.43}$$

Usando el algoritmo encontrado de la transformación inversa del vector de tensión podemos encontrar las componentes del voltaje compensado como se muestra en la siguiente figura:

Figura 17 Compensación del filtro activo de potencia por el método de la teoría p-q



Fuente. Alzate et al. (2016)

CAPÍTULO III

3. INGENIERIA DEL PROYECTO

3.1. Metodología del diseño

El presente trabajo de investigación se orientó al diseño de un filtro activo que controla y elimina los armónicos presentes en el sistema eléctrico de usuarios con baja tensión, permitiendo mejorar la calidad de energía y disminuir la sobre cargas de energía y sobre calentamientos causados por la presencia de armónicos en el sistema eléctrico, para ello se realizó un análisis exhaustivo de toda la información recopilada, a fin de obtener información precisa de los requerimientos de mediciones de las ondas eléctricas para detectar los armónicos a fin de controlarlos y eliminarlos, posteriormente se realizó un análisis detallado de las cargas no lineales.

En cuanto a la metodología ejecutada para la realización del filtro activo, cabe destacar se tomaron en consideración tres criterios para su diseño, el primero es el diseño del filtro en sí, el segundo es el control de corriente y finalmente las teorías de compensación de armónicos, para el proceso en base a los criterios antes mencionados se estructura el mismo de la siguiente manera:

1. Se analizó la red de distribución de baja tensión.
2. Se determinó la cantidad de armónicos presentes.
3. Se analizó la distribución de la distorsión de armónicos en el espectro de frecuencia.
4. Se elaboró el esquema principal del circuito compuesto por el sistema de control difuso y los componentes, para conocer la variable de entrada y la variable de salida.
5. Se establecieron las reglas semánticas para el control difuso.
6. Se determinaron las acciones de control y la curva de control.
7. Se obtuvieron los resultados de simulación a través del programa Simulink.

3.2. Costos del equipamiento

Tabla 5 Costo de equipamiento

Material	Cantidad	Precio unitario S/.	Precio Total S/.
Platina de cobre (m)	2	38.00	76.00
Disipadores de calor	4	50.00	200.00
Drivers	3	893.33	2,680.00
Platinas de acero (m)	2	17.10	34.20
Terminales tipo u	16	2.00	32.00
Terminales cerrados	32	2.50	80.00
Cable 18 AWG (m)	10	1.50	15.00
Cable 20 AWG (m)	10	1.20	12.00
Pernos de ½ pulgada	32	1.00	32.00
Estaño (m)	3	4.00	12.00
Bridas de plástico	32	1.20	38.40
Extras		2500	2500
Total			5711.6

Elaboración propia

3.3. Medición de los armónicos

3.3.1. Aspectos generales

1. Introducción

La Planta PETROTAL CORP Lote 95, cuenta como fuente de generación la Central Eléctrica de la Cia Ferrenergy con la operación de seis (06) unidades de generación actualmente en servicio, así mismo la carga con la que cuenta el Sistema Eléctrico está compuesta por Motores que alimentan actualmente a diez (10) pozos con sistema de bombeo electro sumergible (BES) y cuatro (04) bombas de reinyección (HPS), estos equipos cuentan con variadores de velocidad (VFD).

Debido a la forma operativa y a los equipos instalados se requiere monitorear los parámetros eléctricos de calidad [tensiones, corrientes, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y niveles de armónicos].

Objetivos

- Elaborar el estudio de calidad de energía en las instalaciones de PETROTAL, para lo cual se evaluarán los indicadores de calidad y si estos se encuentran dentro de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos (NTCSE) y el estándar IEEE 519.
- Evaluar el impacto de la forma operativa de los Pozos sobre la red eléctrica para esto se evaluarán los registros tomados en los puntos antes y después de los Variadores.

Alcance de los estudios eléctricos

Los alcances del presente estudio se muestran a continuación:

- Realizar mediciones de parámetros eléctricos en los puntos críticos de la Planta Petrotal.
- Procesamiento de las variables eléctricas y determinación de los niveles adecuados de calidad.
- Evaluación de los indicadores de calidad.
 - a. Perfiles de Tensión y Corriente.
 - b. Potencias y factor de potencia.
 - c. Análisis de los niveles de distorsión armónica total de tensión THDv.
 - d. Análisis de los niveles de distorsión demandada total de corriente TDDi.
 - e. Determinación del espectro de armónicos de tensión y corriente.

2. Marco normativo

2.1. NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE LOS SERVICIOS ELÉCTRICOS (NTCSE)

2.1.1. Armónicos

El control de la calidad de los servicios eléctricos aplicable a las empresas involucradas directa o indirectamente en la prestación y uso de este servicio se realiza considerando la calidad del producto la cual fija requisitos mínimos a la amplitud y forma de la onda de tensión a través de los indicadores de tensión y perturbaciones (MINEN, 1997).

La norma técnica de calidad de los servicios eléctricos (NTCSE), la cual fue aprobada mediante el D. S. No 020-97-EM solo contempla indicadores de calidad para el control del Flicker y Tensiones Armónicas.

La forma de evaluar la distorsión es a través del parámetro denominado distorsión armónica total THD (Total Harmonic Distorsion) y para el caso de las armónicas individuales sus tolerancias por nivel de tensión son las siguientes:

Tabla 6 Límites de distorsión individual de tensión NTCSE

ORDEN (n) DE LA ARMONICA o THD	TOLERANCIA V _i ' o THD' (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
mayores de 25	0.1 + 2.5/n	0.2 + 12.5/n
(Armónicas Impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8"

Fuente. (D.S. N° 013-2000-EM, 2000)

En el presente estudio se evaluará el contenido armónico de tensión a nivel de 4.16 kV y 0.23kV a través del registro de mediciones.

3.3.2. Tension RMS

La NTCSE especifica tolerancias para la variación de los niveles de tensión RMS. La tolerancia de niveles de tensión RMS es de $\pm 5\%$ de la tensión de operación. Así mismo, durante el periodo de medición los intervalos que no cumplan con la tolerancia de $\pm 5\%$ de la tensión de operación deben ser como máximo 5% de los intervalos totales registrados.

Flicker

De acuerdo con lo establecido por la NTCSE, el índice de severidad por Flicker (Pst) no debe superar la unidad ($Pst \leq 1$). Se considera el límite $Pst = 1$ como el umbral de irritabilidad asociado a fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia por una muestra específica de población.

3.4. Standard IEEE 519 (Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)

Esta referencia establece los límites de los niveles de distorsión de tensión y corriente, en base a los niveles de cortocircuito y la máxima corriente de carga. En el cuadro siguiente se presentan los límites propuestos por esta referencia:

Tabla 7 Límites de armónicos de tensión IEEE 519

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

Fuente. (IEEE 519, 2014)

Tabla 8 Límites de armónicos de tensión IEEE 519

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20°	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente. (IEEE 519, 2014)

La corriente armónica se encuentra limitada al 25% de los valores que se evidencian en la tabla 8, donde:

I_{sc}: Máxima corriente de cortocircuito en el punto eléctrico en análisis.

I_L: Máxima corriente de carga durante operación normal.

Descripción del Sistema eléctrico

La empresa Petrotal se encuentra ubicada en la región de Loreto Perú, tiene como objetivo principal generar desarrollo a nivel nacional y a la industria petrolera. La empresa cuenta con una diversidad de instalaciones, las cuales se encuentran ubicadas en la Selva Peruana. El sistema eléctrico de PETROTAL se alimenta de la central generadora Ferrenergy con la Operación de seis (06) unidades de generación (Anexo 1 y 2).

3.5. Materiales empleados para la medición

En el desarrollo del estudio, se utilizó 03 equipos de medición, con sensores de corriente y sensores de tensión y que cumplen con las especificaciones de la IEC 61000-4-30, por tal razón, son equipos de clase A.

a. Equipo de Medición N° 1

- Marca/Modelo: Fluke 435.
- Numero Serie: 12990023.

Figura 18 *Analizador Trifásico de Calidad de Energía – Fluke 435*

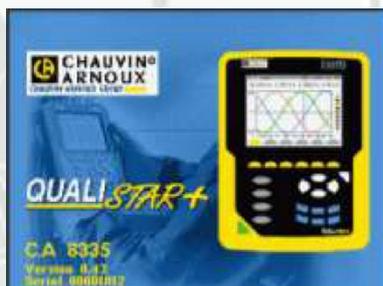


Fuente. Buscador de imágenes Google (2022)

b. Equipo de Medición N° 2:

- Marca/ Modelo: AEMC 8335.
- Numero Serie: 126756LF.

Figura 19 *Analizador Trifásico de Calidad de Energía – AEMC 8335*



Fuente. Buscador de imágenes Google (2022)

c. Equipo de Medición N° 3:

- Marca/Modelo: METREL MI2892.
- Numero Serie: 15410683.
-

Figura 20 *Analizador Trifásico de Calidad de Energía – METREL MI2892*



Fuente. Buscador imágenes Google (2022)

3.6. Evaluación de las tensiones armónicas

En la tabla siguiente se pueden visualizar los valores máximos de los armónicos individuales de tensión expresados en porcentajes

Tabla 9 Valores máximos de armónicos de tensión (%)

Ítem	Medidor	Punto de Medición	Tensión de Operación (kV)	Tensiones armónicas (%)																					
				3ra armónica		5a armónica		7ma armónica		11ra armónica		13ra armónica		17ra armónica		19ra armónica		23ra armónica		25ra armónica		31ra armónica		37ra armónica	
				Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE	Valor Max.	Limite según NTCSE
1	FLUJE	SAUDA-POZO 04	0,48	1760	5	1250	6	1220	5	3180	3,5	6220	3	4980	0,3	1060	1,5	0,300	1,5	0,300	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
2	AENIC	ENTRADA-POZO 04	0,48	5100	5	0900	6	0900	5	2300	3,5	0400	3	0400	0,3	1300	1,5	1300	1,5	1300	1,5	1100	0,56	3700	0,54
3	FLUJE	SAUDA-POZO 08	0,48	4360	5	2490	6	1670	5	1050	3,5	0900	3	0700	0,3	0540	1,5	0,480	1,5	0,480	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
4	AENIC	ENTRADA-POZO 08	0,48	0600	5	1700	6	0300	5	1200	3,5	0400	3	0200	0,3	0900	1,5	0,800	1,5	0,800	1,5	0,300	0,56	0,400	0,54
5	AENIC	ENTRADA-POZO 10	0,48	0600	5	1900	6	0600	5	1000	3,5	0500	3	0100	0,3	0700	1,5	0,600	1,5	0,600	1,5	0,700	0,56	0,500	0,54
6	FLUJE	SAUDA-POZO 10	0,48	0360	5	0150	6	0160	5	0130	3,5	0330	3	0150	0,3	0190	1,5	0,100	1,5	0,100	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
7	FLUJE	SAUDA-POZO 5	0,48	2680	5	0470	6	1070	5	0680	3,5	0680	3	0670	0,3	0540	1,5	0,440	1,5	0,440	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
8	AENIC	ENTRADA-POZO 5	0,48	8800	5	2000	6	0700	5	1200	3,5	1200	3	1300	0,3	1200	1,5	1100	1,5	1100	1,5	0,800	0,56	0,600	0,54
9	FLUJE	ENTRADA-HPS 03	4,16	0370	5	0240	6	1100	5	1010	3,5	1500	3	0580	0,3	1040	1,5	1,440	1,5	1,440	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
10	AENIC	SAUDA-HPS 03	4,16	0100	5	0200	6	1200	5	1000	3,5	1500	3	0500	0,3	0900	1,5	1,300	1,5	1,300	1,5	0,300	0,56	0,500	0,54
11	AENIC	SAUDA-POZO 6	0,48	3300	5	1200	6	1300	5	1200	3,5	1000	3	3700	0,3	2700	1,5	2100	1,5	2100	1,5	1100	0,56	0,700	0,54
12	FLUJE	ENTRADA-POZO 6	0,48	0440	5	1550	6	0300	5	0900	3,5	0460	3	0160	0,3	0780	1,5	0,670	1,5	0,670	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
13	FLUJE	ENTRADA-HPS 03	4,16	0540	5	0590	6	1370	5	1030	3,5	1240	3	0570	0,3	2730	1,5	2400	1,5	2400	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
14	AENIC	SAUDA-HPS 03	4,16	0300	5	0600	6	1400	5	1000	3,5	1400	3	0900	0,3	2000	1,5	2100	1,5	2100	1,5	0,400	0,56	0,600	0,54
15	FLUJE	ENTRADA-HPS 02	4,16	5380	5	0370	6	1076	5	0913	3,5	1256	3	0376	0,3	0432	1,5	1,465	1,5	1,465	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
16	AENIC	SAUDA-HPS 02	4,16	0400	5	1200	6	1400	5	1400	3,5	2100	3	0700	0,3	1800	1,5	2100	1,5	2100	1,5	0,300	0,56	0,400	0,54
17	FLUJE	ENTRADA-HPS 01	4,16	0307	5	0506	6	0988	5	0933	3,5	1460	3	0361	0,3	0703	1,5	1,482	1,5	1,482	1,5	0,000	0,56	0,000	0,54
18	AENIC	SAUDA-HPS 01	4,16	0300	5	1800	6	1800	5	1700	3,5	2100	3	0700	0,3	1800	1,5	2100	1,5	2100	1,5	0,400	0,56	0,700	0,54
19	METREL	FERRENERGY	4,16	0190	5	0330	6	0380	5	0760	3,5	0450	3	0140	0,3	0430	1,5	0,440	1,5	0,440	1,5	0,200	0,56	0,070	0,54

Elaboración propia

Como se puede visualizar, la mayoría de los circuitos el armónico número 15 se encuentra presente en un rango superior al permitido a lo precisado en la NTCSE, los armónicos múltiplos de 3 pueden ocasionar sobrecarga en los conductores de neutro, al depender de los aterramientos se debe tener especial cuidado de los circuitos aterrados, debido a que los circuitos con corte de neutro generan sobretensiones en el neutro, debiendo tener especial cuidado.

Tabla 10 Descripción de los equipos intervenidos

EQUIPOS INTERVENIDOS	MARCA	MODELO	SERIE	FILTRO ARMONICO	INICIO DE REGISTRO		FIN DE REGISTRO		FERRENERGY TOTALIZADOR
POZO 4H	TOSHIBA	57 +E460KCCS	170702410	SI	23/02/2022	15:00	24/02/22	13:00	INICIO:23/02/22 11:00 H
POZO 8H	TRIOL	800 480-06-131	1016159	SI	24/02/2022	16:00	25/02/2022	08:43	Registrando
POZO 10H	TRIOL	800 480-06-131	1098727	SI	26/02/2022	10:00	27/02/2022	09:00	Registrando
POZO 5H	TRIOL	800 310 231480	104353	SI	27/02/2022	10:00	28/02/2022	08:00	Registrando
POZO 6H	TOSHIBA	57 +E460KCCS	190301161	SI	28/02/2022	10:00	01/03/2022	07:00	Registrando

Elaboración propia

En la tabla 10 se observa la descripción de los equipos utilizados para las mediciones tomando en consideración el modelo, serie, inicio y fin de registro.

Tabla 11 Valores de tensión RMS registrados

Ítem	Punto de Medición	Tensión de Operación (kV)	ENTRADA			SALIDA			Tolerancia según NTCSE (kV)
			Tensión RMS (kV)			Tensión RMS (kV)			
			Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	
1	POZO 4H	0.48	0.496	0.487	0.484	0.362	0.329	0.288	[0.50– 0.46]
2	POZO 8H	0.48	0.479	0.468	0.080	0.385	0.382	0.040	[0.50– 0.46]
3	POZO 10H	0.48	0.480	0.475	0.471	0.325	0.324	0.324	[0.50– 0.46]
4	POZO 5H	0.48	0.480	0.472	0.469	0.289	0.286	0.284	[0.50– 0.46]
5	POZO 6H	0.48	0.477	0.469	0.466	0.351	0.345	0.339	[0.50– 0.46]

Elaboración propia

En la tabla 11 se observan cuáles fueron los valores registrados en cada punto de medición, tanto la tensión RMS de entrada como la tensión RMS de salida y finalmente la tolerancia según NT CSE, donde la tensión RMS de entrada promedio del pozo 4 fue de 0.487 y de salida 0.329, para el pozo 5 la tensión RMS de entrada promedio fue de 0.472 y de salida

0.286, para el pozo 8 la tensión RMS de entrada promedio fue de 0.468 y salida de 0.382 y finalmente, para el pozo 10 la entrada de tensión RMS promedio fue de 0.475 y salida de 0.324.

Tabla 12 *Medición en PU*

Ítem	Punto de Medición	Tensión de Operación (kV)	ENTRADA			SALIDA			Tolerancia según NTCSE (p.u.)
			Tensión RMS (p.u.)			Tensión RMS (p.u.)			
			Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	
1	POZO 4H	0.48	1.033	1.014	1.008	0.754	0.684	0.601	[1.05 - 0.95]
2	POZO 8H	0.48	0.998	0.974	0.167	0.801	0.796	0.083	[1.05 - 0.95]
3	POZO 10H	0.48	1.000	0.989	0.982	0.676	0.675	0.675	[1.05 - 0.95]
4	POZO 5H	0.48	1.001	0.983	0.978	0.603	0.597	0.591	[1.05 - 0.95]
5	POZO 6H	0.48	0.993	0.978	0.971	0.732	0.718	0.707	[1.05 - 0.95]

Elaboración propia

En la tabla 12 referente a las mediciones de los PU se evidencia los puntos de medición la entrada de tensión RMS (p.u.), la salida de tensión RMS (p.u.) y la tolerancia según NT CSE (p.u.), para el pozo 4 la entrada promedio de tensión RMS (p.u.) fue de 1.014 y salida 0.684, para el pozo 5 la tensión RMS (p.u.) de entrada promedio fue de 0.983 y de salida 0.597, para el pozo 8 la tensión RMS (p.u.) de entrada promedio fue de 0.974 y salida de 0.796 y finalmente, para el pozo 10 la entrada de tensión RMS (p.u.) promedio fue de 0.989 y salida de 0.675.

Tabla 13 *Demanda por punto de medición*

Ítem	Medidor	Punto de Medición	Tensión Nominal (kV)	Potencia activa (kW)			Potencia reactiva (kVAR)			Factor de Potencia		
				Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.
1	FLUKE	SALIDA POZO 04	0.48	281.500	0.000	-281.100	282.000	0.000	282.000	0.720	0.705	0.690
2	AEMC	ENTRADA POZO 04	0.48	156.644	154.891	153.879	99.113	94.017	85.691	0.877	0.854	0.840
3	FLUKE	SALIDA POZO 08	0.48	219.000	176.000	131.200	187.800	172.200	161.400	0.720	0.710	0.710
4	AEMC	ENTRADA POZO 08	0.48	190.190	181.096	0.000	0.000	-83.451	-88.108	0.910	0.904	0.908
5	AEMC	ENTRADA POZO 10	0.48	109.330	109.136	108.778	44.784	44.391	44.143	0.927	0.926	0.925
6	FLUKE	SALIDA POZO 10	0.48	167.800	-33.700	-166.400	167.800	0.000	-167.800	0.740	0.740	0.740
7	FLUKE	SALIDA POZO 5	0.48	81.400	-10.400	-100.500	33.600	1.400	-34.100	0.070	0.050	0.030
8	AEMC	ENTRADA POZO 5	0.48	160.149	159.792	159.479	-42.990	-43.760	-44.870	0.966	0.964	0.962
9	AEMC	SALIDA POZO 6	0.48	151.622	145.736	140.622	167.264	161.246	155.430	0.676	0.670	0.663
10	FLUKE	ENTRADA POZO 6	0.48	120.400	118.600	117.400	20.300	18.000	16.900	0.670	0.665	0.660

Elaboración propia

De acuerdo a PETROTAL la máxima demanda durante el periodo de medición es de 4.5 MW.

Tabla 14 Valores máximos de armónicos de tensión (%)

Ítem	Medidor	Punto de Medición	Tensión de Operación (kV)	3ra armónica		5ta armónica		7ma armónica		11ra armónica		13ra armónica	
				Valor Max.	Límite según NTCSE	Valor Max.	Límite según NTCSE	Valor Max.	Límite según NTCSE	Valor Max.	Límite según NTCSE	Valor Max.	Límite según NTCSE
1	FLUKE	SALIDA POZO 04	0.48	1.760	5	1.250	6	1.290	5	3.180	3.5	8.230	3
2	AEMC	ENTRADA POZO 04	0.48	5.100	5	0.900	6	0.900	5	2.300	3.5	0.400	3
3	FLUKE	SALIDA POZO 08	0.48	4.360	5	2.490	6	1.670	5	1.050	3.5	0.910	3
4	AEMC	ENTRADA POZO 08	0.48	0.600	5	1.700	6	0.300	5	1.200	3.5	0.400	3
5	AEMC	ENTRADA POZO 10	0.48	0.600	5	1.900	6	0.600	5	1.000	3.5	0.500	3
6	FLUKE	SALIDA POZO 10	0.48	0.390	5	0.150	6	0.160	5	0.130	3.5	0.330	3
7	FLUKE	SALIDA POZO 5	0.48	2.680	5	0.470	6	1.070	5	0.680	3.5	0.690	3
8	AEMC	ENTRADA POZO 5	0.48	8.800	5	2.000	6	0.700	5	1.200	3.5	1.200	3
9	FLUKE	ENTRADA HPS 03	4.16	0.370	5	0.240	6	1.100	5	1.010	3.5	1.500	3
10	AEMC	SALIDA HPS 03	4.16	0.100	5	0.200	6	1.200	5	1.000	3.5	1.500	3
11	AEMC	SALIDA POZO 6	0.48	3.900	5	1.200	6	1.300	5	1.200	3.5	1.000	3
12	FLUKE	ENTRADA POZO 6	0.48	0.440	5	1.550	6	0.330	5	0.900	3.5	0.460	3

Elaboración propia

En la tabla 14 se evidencia los valores expresados en porcentaje (%) máximos de los armónicos individuales, evidenciando que el valor máximo es de 8.230.

Tabla 15 Distorsión armónica de tensión (%)

Ítem	Punto de Medición	Tensión de Operación (kV)	ENTRADA			SALIDA			Tolerancia según NTCSE (%)
			Distorsión armónica total (%)			Distorsión armónica total (%)			
			Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	
1	POZO 8H	0.48	2.400	1.881	0.000	29.770	29.680	29.680	15
2	POZO 10H	0.48	2.500	2.147	1.900	0.000	0.000	0.000	15
3	POZO 5H	0.48	3.200	2.971	2.800	38.730	38.520	37.430	15
4	POZO 6H	0.48	2.250	2.220	2.190	11.800	9.741	7.600	15
5	HPS 03	4.16	4.060	3.470	2.910	4.200	3.531	3.000	15
6	HPS 03	4.16	4.130	3.770	3.620	4.100	2.247	1.700	15
7	HPS 02	4.16	2.900	2.674	2.531	4.200	2.493	0.000	15
8	HPS 01	4.16	4.330	3.870	3.610	5.100	3.294	2.100	15
9	FERRENERGY	4.16	1.300	1.280	1.250	-	-	-	20

Elaboración propia

En la tabla 15 se observan que los valores registrados no llegan a superar la tolerancia establecida por la NTCSE, sin embargo, se observa que los valores con mayor presencia en los circuitos pertenecen a los motores HPS.

Ahora bien, para poder evaluar los niveles de distorsión de armónicos de corriente tomando en cuenta el estándar establecido en las normas IEEE 519-2014, se requiere definir la tolerancia a través de la relación entre la corriente de corto circuito y la corriente máxima que se registra durante el tiempo de medición.

Tabla 16 Resultados de corrientes de cortocircuito

Ítem	Punto eléctrico	Tensión de Operación (kV)	ENTRADA		SALIDA		Isc/IL
			Corriente		Corriente		
			Cortocircuito (A)	Máxima registrada (A)	Cortocircuito (A)	Máxima registrada (A)	
1	POZO 4H	0.48	56101	520	56101	320	107.887
2	POZO 8H	0.48	56101	427	56101	284	131.384
3	POZO 10H	0.48	56101	163	56101	283	345.237
4	POZO 5H	0.48	56101	508	56101	246	110.435
5	POZO 6H	0.48	56101	348	56101	201	161.210
6	HPS 03	4.16	11773	104	11773	106	113.202
7	HPS 03	4.16	11773	102	11773	105	115.422
8	HPS 02	4.16	11773	79	11773	92	149.025
9	HPS 01	4.16	11773	100	11773	117	117.730
10	FERRENERGY	4.16	11921	682	-	-	17.479

Elaboración propia

En la tabla 16 se observa que la relación entre la corriente de cortocircuito (I_{cc}) y la máxima corriente que se registró (I_{carga}) se encuentra entre $100 < 1000$.

Tabla 17 Límites armónicos de corriente – IEEE-519

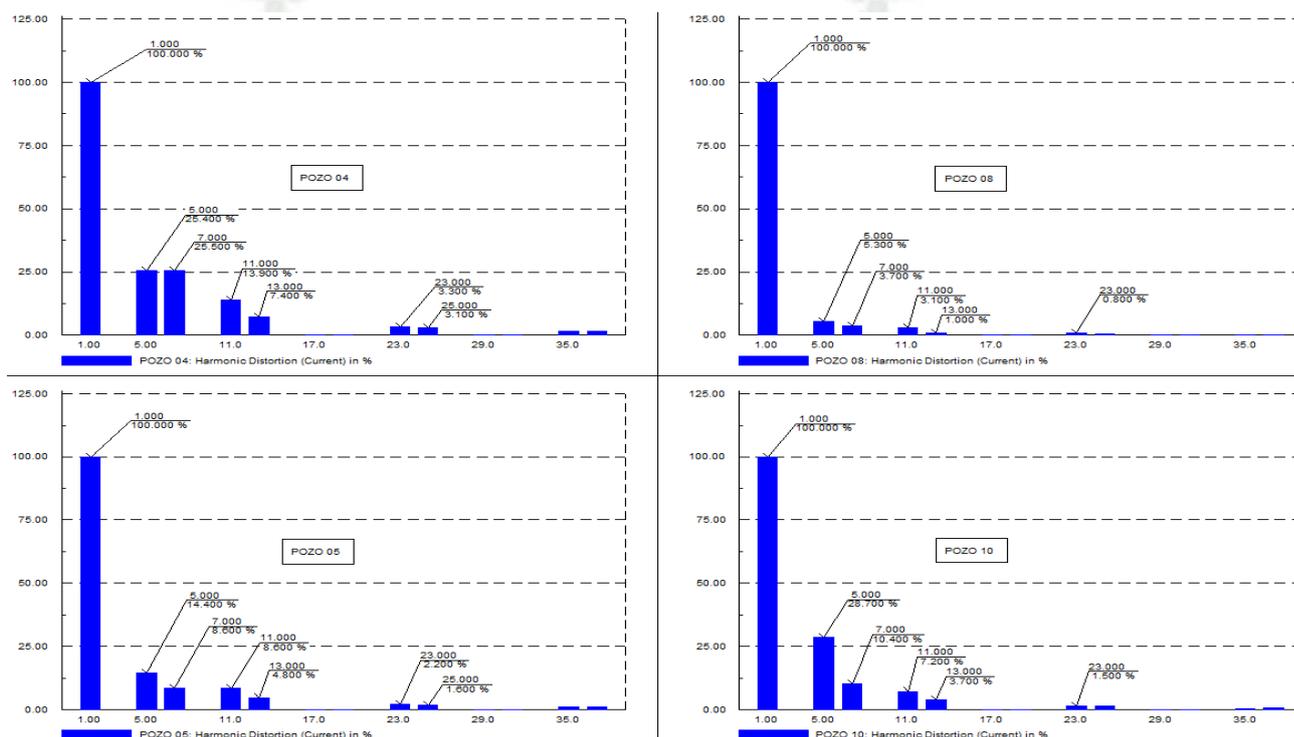
Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Elaboración propia

En la tabla 17 se evidencia el cuadro considerando el rango calculado cuyo TDD es de 15.

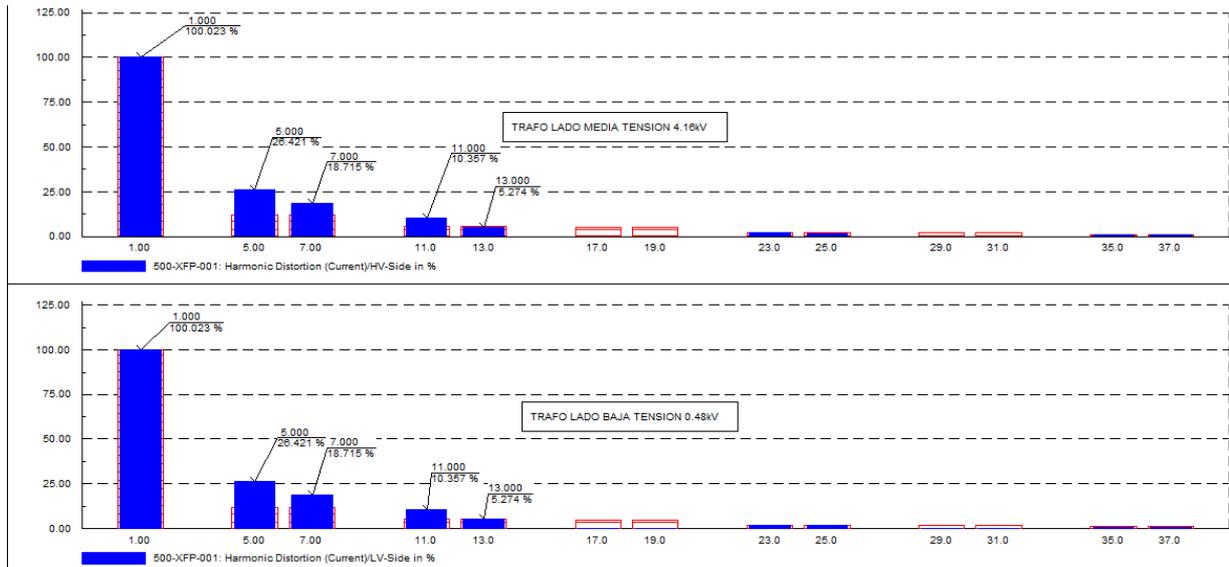
En la tabla 18 se evidencia que los valores que se registraron en la mayoría de los circuitos en los que se llevó a cabo el monitoreo de parámetros, llegan a superar los niveles máximos permitidos según los estándares de la norma IEEE-519, por lo que se puede rescatar que son los circuitos de entrada a pozo y HPS los puntos en que los niveles superan el máximo permitido.

Figura 21 Circuitos equivalentes en baja tensión



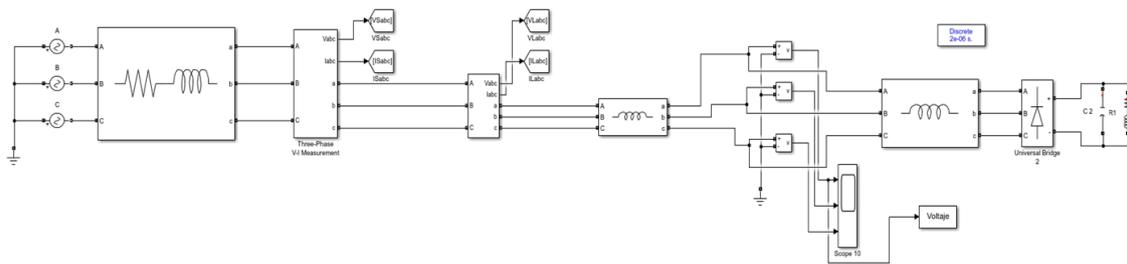
Elaboración propia

Figura 22 Circuitos equivalentes en baja tensión



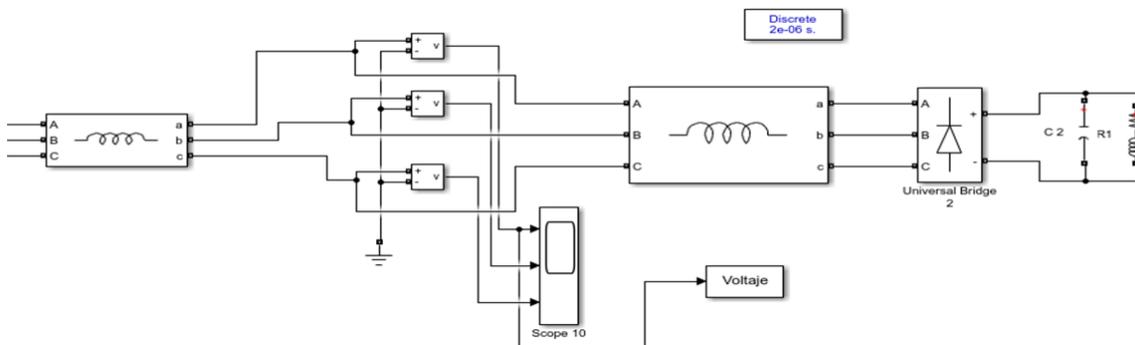
Elaboración propia

Figura 23 Pozos simulados en Simulink para diseño del filtro activo de armónicos



Elaboración propia

Figura 24 Pozos simulados en Simulink de forma unificada con cargas no lineales

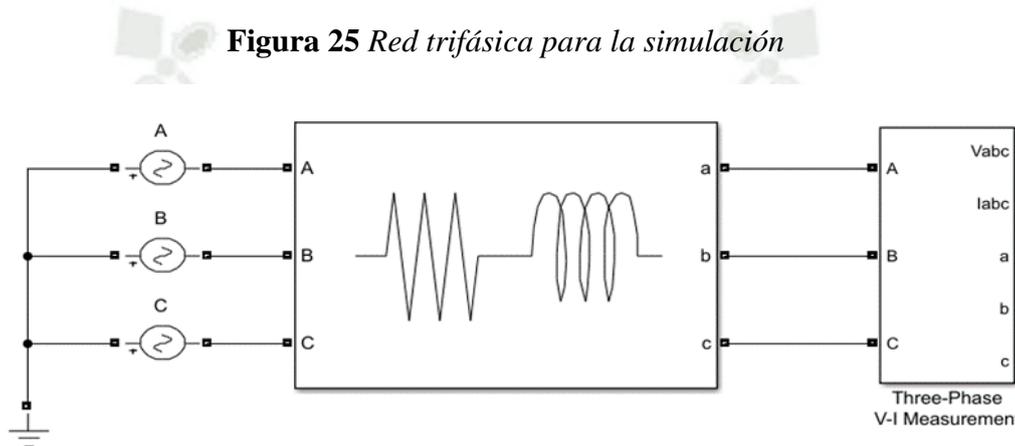


Elaboración propia

3.7. Diseño del Filtro activo de potencia paralelo

3.7.1. Estructura del filtro activo de potencia paralelo

La red eléctrica se considera neutra, senoidal y equilibrada, siendo un sistema de hilos sin variación en los parámetros de amplitud, ángulo de fase e impedancia de las distintas cargas utilizadas en sus respectivas impedancias.



Fuente. Murillo-Yarce et al. (2018)

Los valores de los voltajes de fase empleados, son:

$$A = V_a(t) = \sqrt{2}V \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 339 \sin(2\pi \cdot 60t)$$

$$B = V_b(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120^\circ) = \sqrt{2} \cdot 339 \sin(2\pi \cdot 60t + 120)$$

$$C = V_c(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 240^\circ) = \sqrt{2} \cdot 339 \sin(2\pi \cdot 60t + 240)$$

La impedancia de la fuente es:

$$R = 0.58\Omega$$

$$L = 0.16\mu H$$

En la siguiente tabla se muestran los datos de la carga trifásica que se utiliza en la simulación:

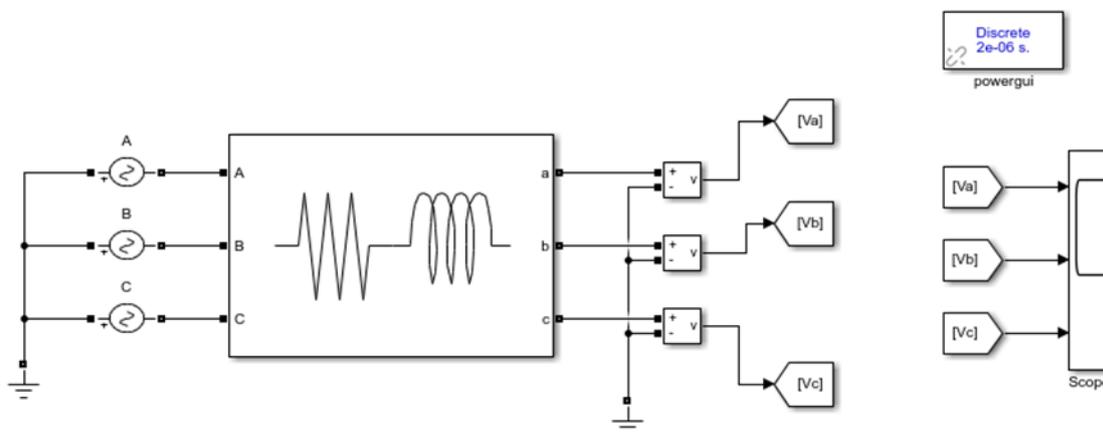
Tabla 19 Datos de la carga de la red trifásica

Voltaje nominal (V_{rms})	480
Frecuencia nominal (Hz)	60
Resistencia (Ω)	0.58
Inductancia (H)	0.16μ

Fuente. (Murillo-Yarce et al, 2018)

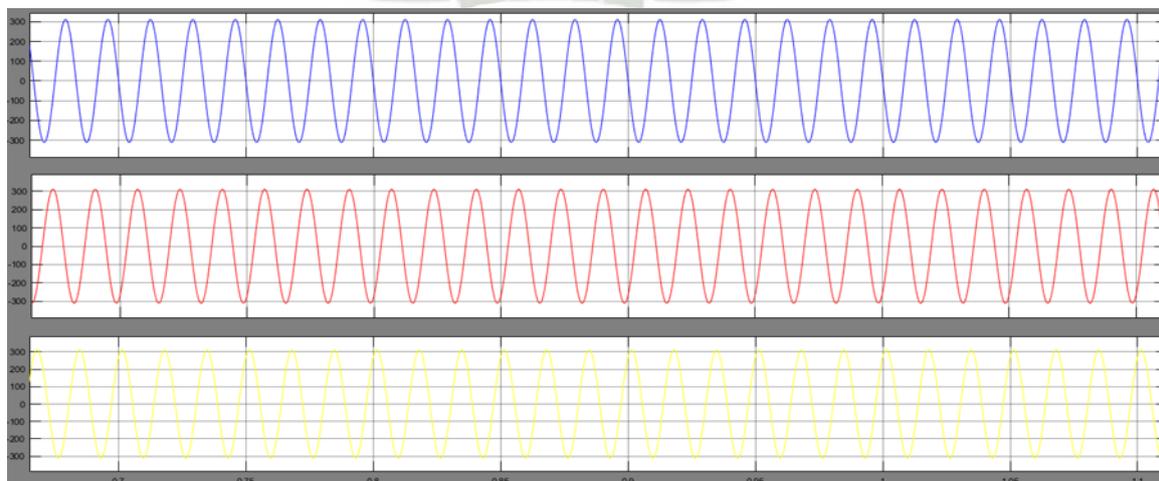
Con los datos procedemos a verificar las señales de tensión y corriente de la fuente

Figura 26 Red trifásica en el Voltaje



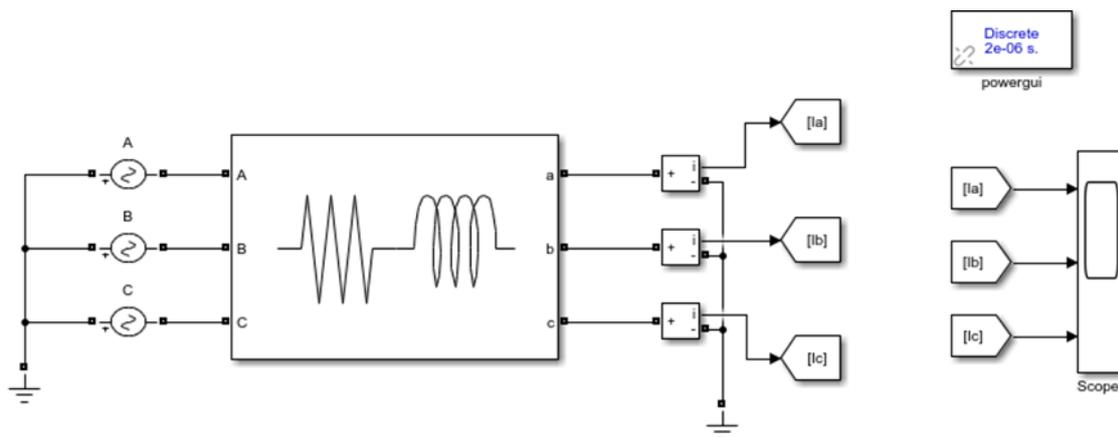
Fuente. Murillo-Yarce et al. (2018)

Figura 27 Señales de tensiones de la fuente



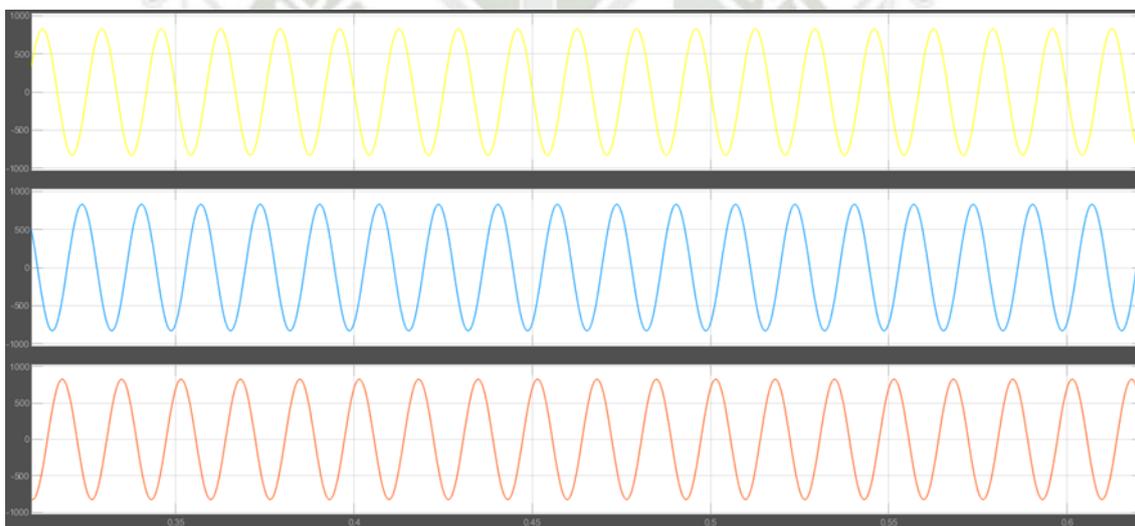
Fuente. Murillo-Yarce et al (2018)

Figura 28 Red trifásica en la Corriente



Fuente. Murillo-Yarce et al (2018)

Figura 29 Señales de corriente de la fuente



Fuente. Murillo-Yarce et al. (2018)

3.7.2. Estructura de carga

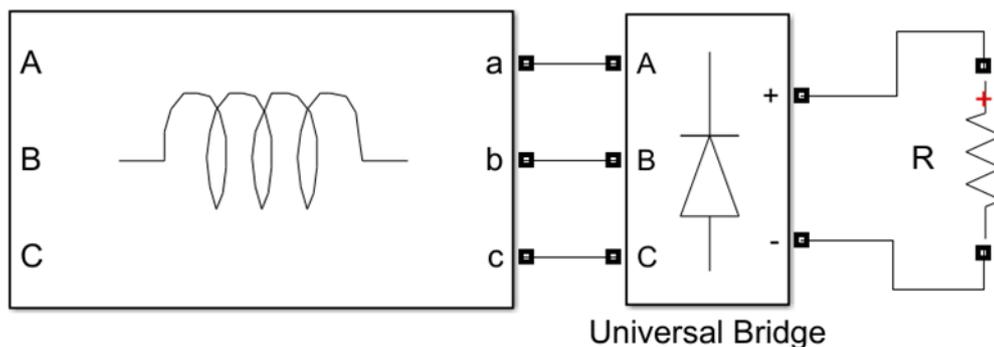
Para evaluar el rendimiento de los filtros de potencia activa se utilizan dos tipos de cargas con las siguientes características:

- Carga equilibrada no lineal.
- Carga desequilibrada no lineal.

A. Carga equilibrada no lineal

Es un puente rectificador trifásico no controlado, conectado en trifásico, con una carga resistiva de 5Ω en el lado de continua y una inductancia de $2mH$ en su lado de alterna.

Figura 30 Carga trifásica no lineal equilibrada

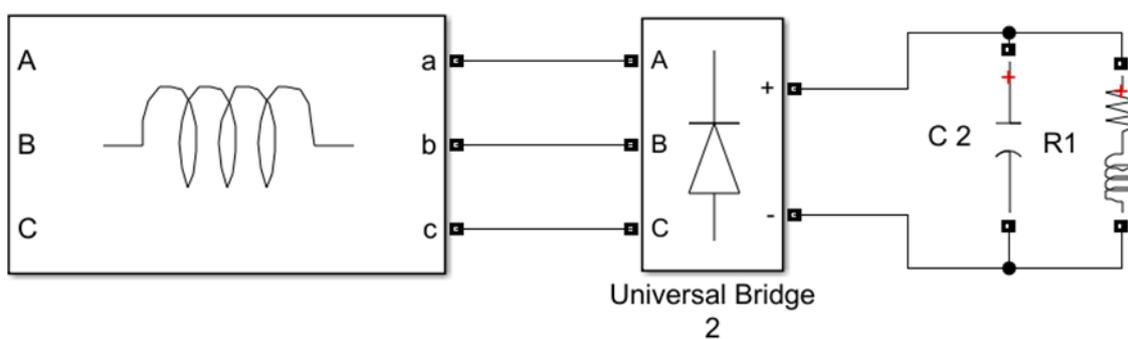


Fuente. Ozkaya (2007)

B. Carga desequilibrada no lineal

Esta carga se compone de un rectificador trifásico no controlado que alimentan cargas en el lado de continúa conformadas por una resistencia en serie con una inductancia, con un valor de la resistencia diferente al propuesto en la carga trifásica no lineal equilibrada de 6.5Ω y una inductancia de $2mH$.

Figura 31 Carga desequilibrada no lineal



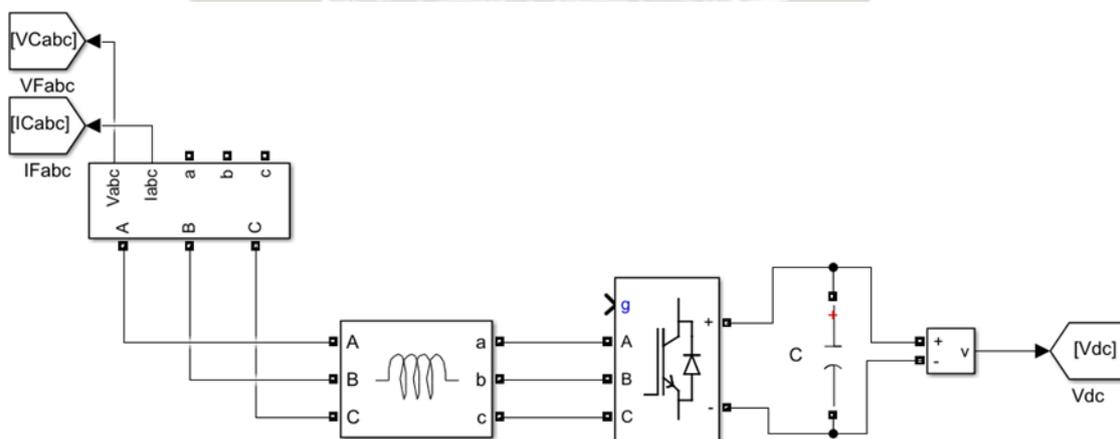
Fuente. Ozkaya (2007)

3.7.3. Inversor trifásico

La parte del inversor es la encargada de mantener constantemente el valor rms de la tensión de salida ante variaciones de la tensión de entrada y de la corriente de carga, o variar la tensión de salida en los anchos de banda más adecuados donde se pueda variar la tensión para un valor más adecuado.

La regulación del propio inversor es una modulación PWM que induce una secuencia de conducción de transistores que proporciona una regulación específica del voltaje de salida efectivo y la regulación del contenido armónico. El diseño del inversor tiene una estructura de 6 pulsos para una red trifásica, la topología está formada por un bus DC, con el fin de mantener la tensión de salida en un nivel adecuado ante diferentes cargas. Los transistores utilizados en el inversor, son llamados IGBT consisten en diodos de rueda libre de recuperación rápida, que actúan como interruptores y cuentan con baja caída de voltaje de línea y capacidad de bloqueo de alto voltaje.

Figura 32 *Inversor Trifásico*



Fuente. Ozkaya (2007)

Para el diseño del inversor se realizó con los siguientes datos:

Tabla 20 Datos del Inversor Trifásico

$V_{dc}(V)$	$\sqrt{2} \cdot 339$
$C(F)$	$1500e^{-6}$
$R_S(\Omega)$	$1e^5$
$R_{on}(\Omega)$	$1e^{-3}$

Fuente. (Ozkaya, 2007, pág. 184)

Donde:

V_{dc} : Amplitud de tensión (V)

C : Capacitancia (F) del Bus DC

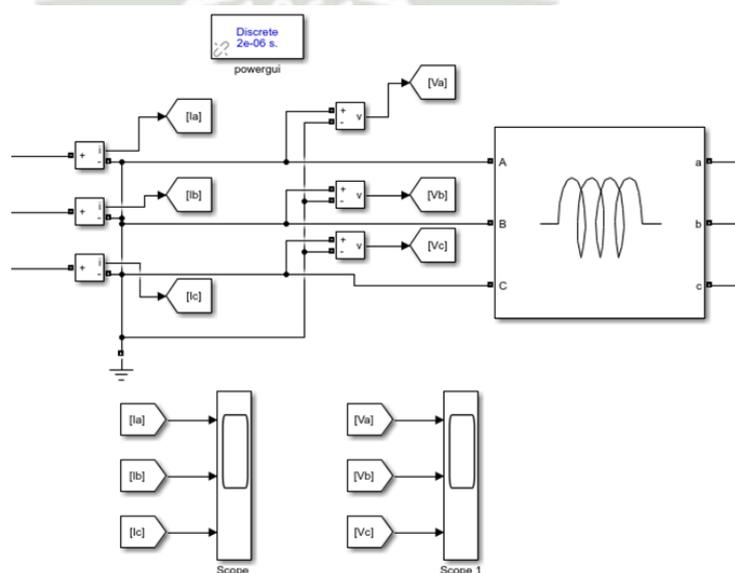
R_S : Resistencia Snubber R_s

R_{on} : Resistencia interna R_{on}

3.7.4. Distorsión armónica total (THD)

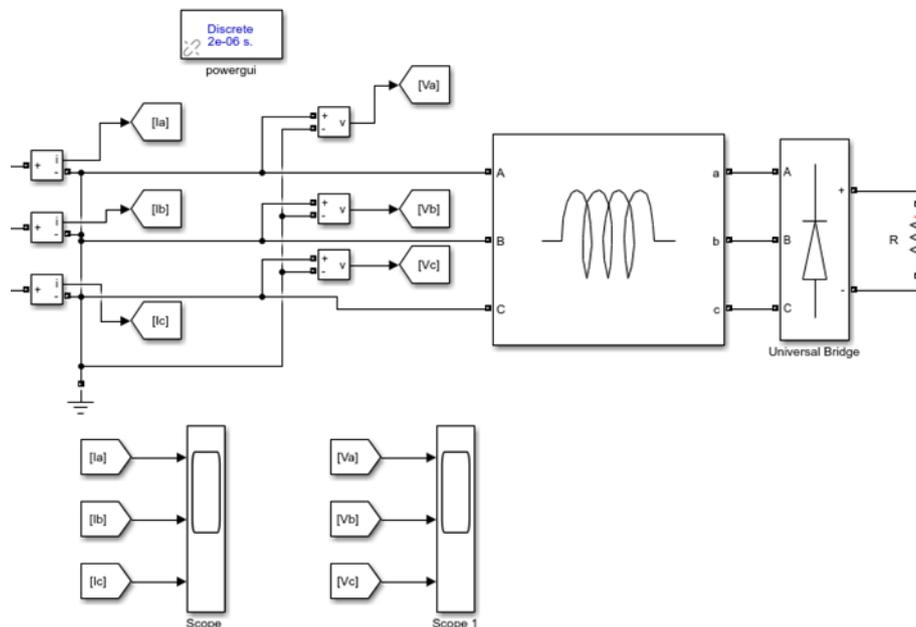
La parte principal de la red está diseñada con fuentes armónicas, que son cargas no lineales que interactúan con la impedancia del sistema, distorsionando la onda sinusoidal y provocando perturbaciones en la red eléctrica a la carga, en este caso se origina en la tensión.

Figura 33 THD en corriente y voltaje sin FAP al lado de la carga



Fuente. Ozkaya (2007)

Figura 34 THD en corriente y voltaje sin FAP en el generador de armónicos



Fuente. Ozkaya (2007)

El diseño está compuesto por los siguientes valores:

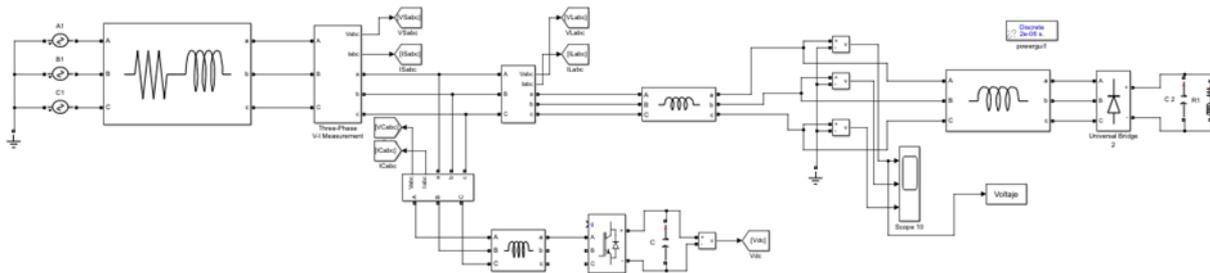
Tabla 21 Datos de fuente generadora de armónicos

L (H)	$10e^{-3}$
R (Ω)	10
R_S (Ω)	$1e^6$
C_S (F)	$2e^{-3}$,
R_{on} (Ω)	$0.23e^{-6}$

Fuente. (Ozkaya, 2007)

En la siguiente figura se muestra la parte principal de la red en la que no está conectada el filtro activo por lo cual cuando se realiza la FFT muestra un alto contenido de los armónicos.

Figura 35 *Diseño de la red sin el acoplamiento de la señal PWM del FAP*



Elaboración propia

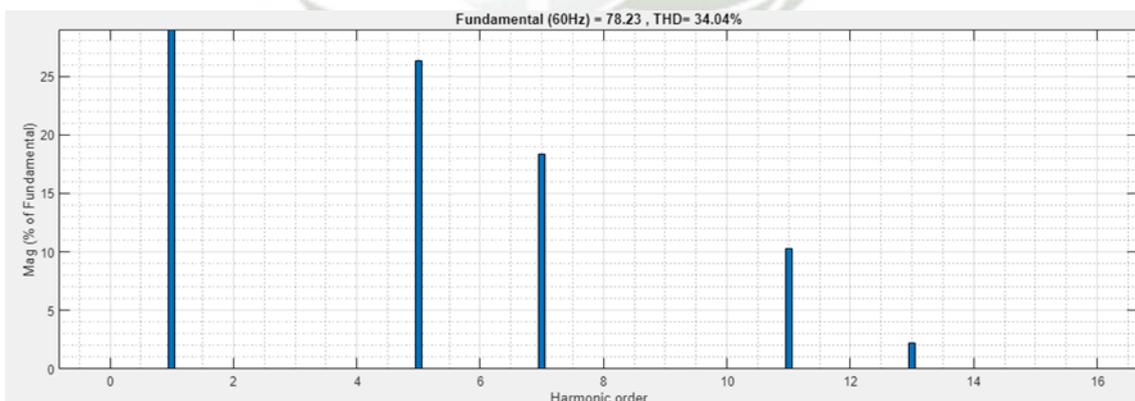
La carga muestra resultados de THD en la corriente y en el voltaje, el cual es afectado por el generador de armónicos dando los siguientes resultados.

$$THDI = 34.04\%$$

$$THDV = 6.56\%$$

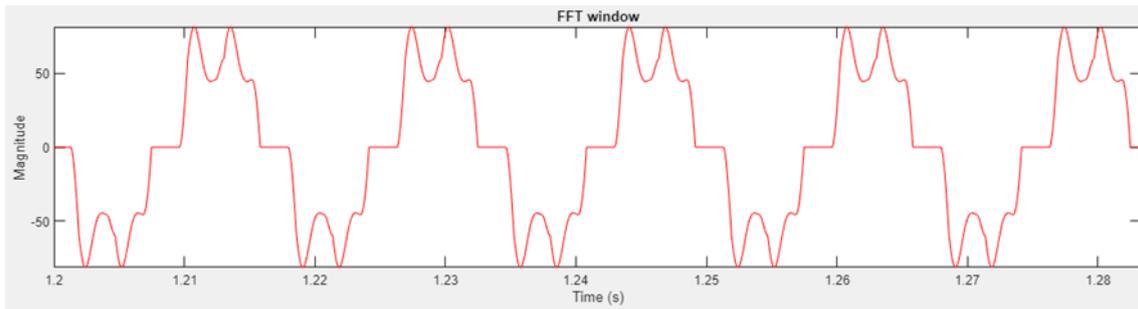
De esta forma se puede observar los resultados variantes que son producir por cargas no lineales mostrándose en el grafico las señales de corrientes, en el punto de carga sin FAP con un análisis de armónicos más significativos en un determinado periodo.

Figura 36 *Orden de armónicos más significativos en corrientes sin FAP*



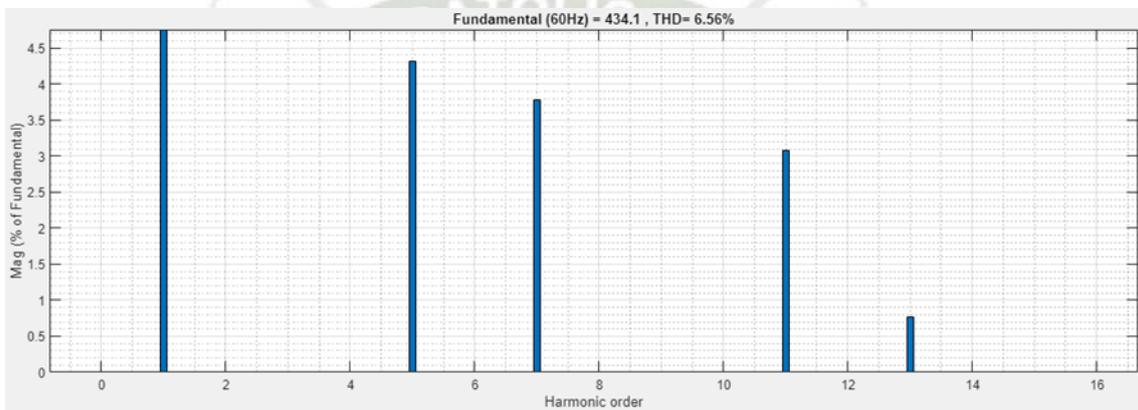
Elaboración propia

Figura 37 Corriente sin FAP



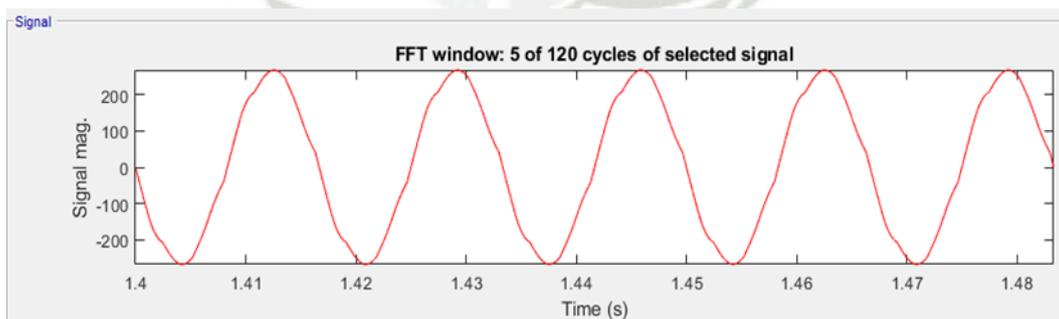
Elaboración propia

Figura 38 Orden de armónicos más significativos en voltaje sin FAP

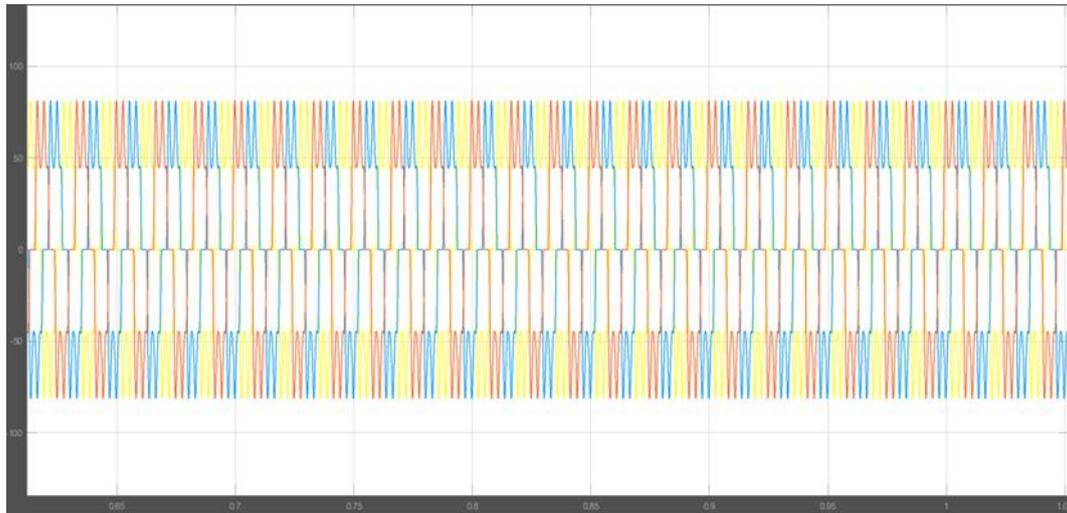


Elaboración propia

Figura 39 Voltaje sin FAP



Elaboración propia

Figura 40 Corriente de línea y carga sin FAP

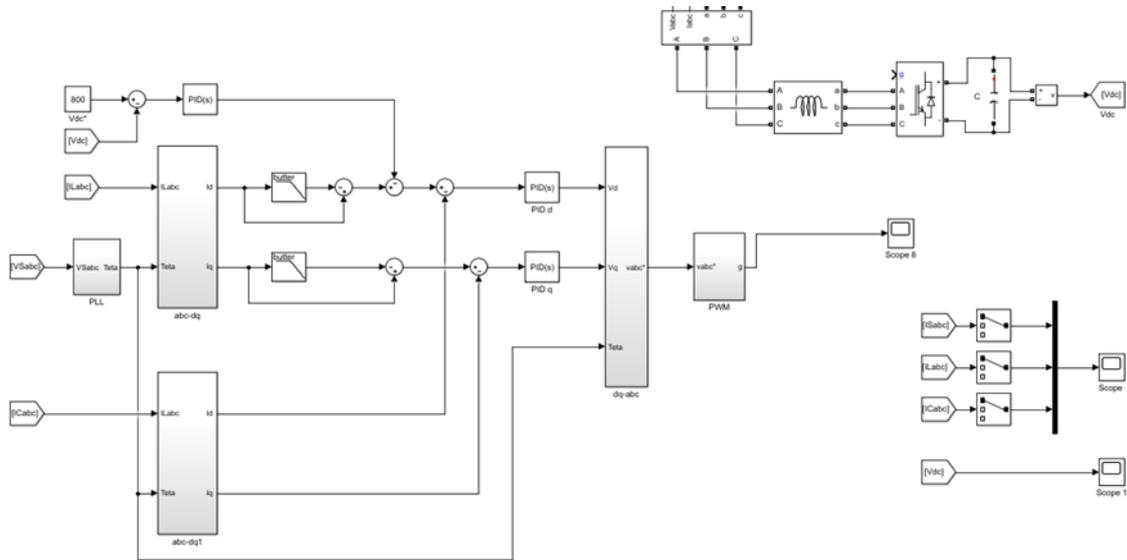
Elaboración propia

Como resultado de visualizar las gráficas anteriores se observa que los armónicos más significativos en corrientes sin FAP se muestran de la siguiente forma:

3.8. Diseño del Filtro Activo de Potencia (FAP)

El filtro activo de potencia en este proyecto es de tipo paralelo donde no es necesario incluir un transformador acoplador, el diseño se basa en representar las ecuaciones de la transformada de Park y Clarke de manera que se expresa el espacio de los vectores como V_{Labc} y I_{Sabc} conformado por un sistema estacionario (a, b, c) a un sistema rotatorio $\alpha, \beta, 0$, como resultado se obtiene $V_{Labc}(\alpha, \beta, 0)$ y $I_{Sabc}(\alpha, \beta, 0)$.

Figura 41 Estructura del FAP



Elaboración propia

a) Sistema de Seguimiento (PLL)

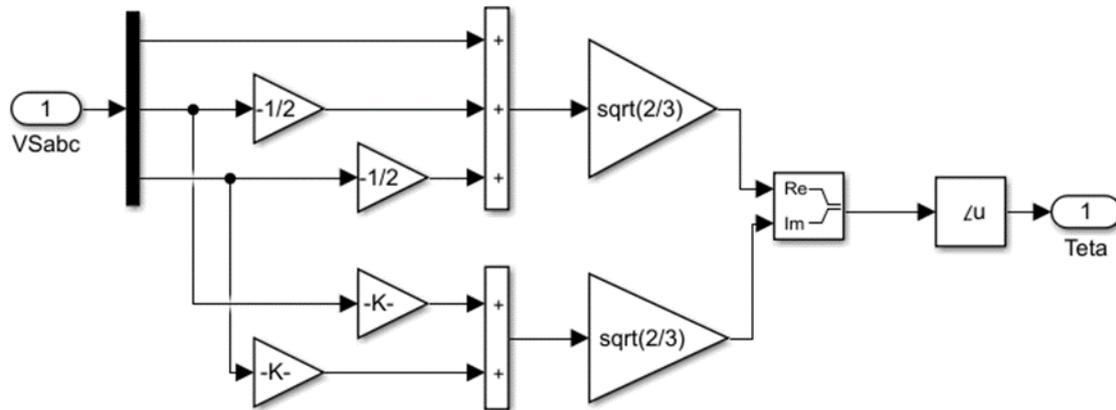
La implementación del PLL es realizar una realimentación para generar una señal que permita coincidir la entrada y la salida con un determinado margen usando la transformada Z en el dominio de tiempo discreto.

Mediante la transformación de Clarke utilizando un sistema de tres hilos sin un conductor neutro, formamos la base del PLL para luego realizar la generación de la transformada Z y obtener el ángulo Teta con el cual se realizará la compensación del filtro activo.

$$[T] = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.44}$$

[T]: transformada de Clarke utilizando un sistema de tres hilos sin un conductor neutro

Figura 42 Sistema de seguimiento PLL



Fuente. Haustveit (2015)

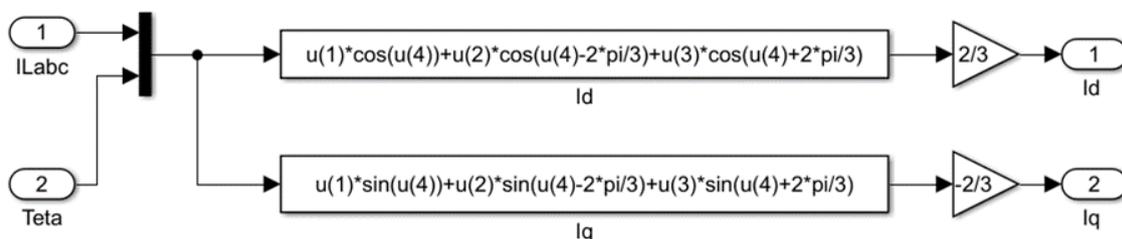
b) Compensación del filtro activo de potencia *en paralelo* por el método de la teoría p-q

Realizando la transformación de Park a, b, c a la transformación $d - q - 0$

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.45}$$

Donde la transformación en 0 se sobreentiende que es nula por consiguiente solo se toma el sistema de tres hilos a, b, c a $d-q$.

Figura 43 Transformada de Park $abc-dq$



Fuente. Haustveit (2015)

c) Filtro pasa bajas Butterworth

Para realizar el diseño de un filtro pasa bajas Butterworth primero se debe de evaluar la relación entre atenuación y amplitud para encontrar el número de orden.

$$\alpha(\omega) = 10 \log \frac{1}{|H(\omega)|^2} = -20 \log |H(\omega)| \quad \text{Ec. 3.46}$$

Especificaciones:

H_p : Máxima Ganancia en la Banda de Paso

H_s : Máxima Ganancia en la Banda atenuada

ω_p : Máxima Frecuencia en la Banda de Paso

ω_s : Máxima Frecuencia en la Banda atenuada

Mediante los parámetros de discriminación y selectividad se demuestra si las frecuencias de banda de paso y banda atenuada son la adecuadas o correctas para calcular el orden del filtro Butterworth.

Parámetro de Discriminación k_d :

$$k_d = \sqrt{\frac{\frac{1}{(H_p)^2} - 1}{\frac{1}{(H_s)^2} - 1}} \quad \text{Ec. 3.47}$$

Parámetro de Discriminación k_s :

$$k_s = \frac{\omega_p}{\omega_s} \quad (\leq 1 \text{ paso bajo}) \quad \text{Ec. 3.48}$$

Filtro Pasa Bajas Butterworth

La ganancia del filtro es dada por la siguiente formula:

$$A_{max} = 1 + \frac{R_1}{R_f} \quad \text{Ec. 3.49}$$

Al ser un filtro pasa bajas suponemos que $R_1 = \frac{1}{2}R_f$, y decimos que $R_f = 10k$, por consiguiente, obtenemos que $R_1 = 5k$ y $A_{max} = 1.5$

Calculamos el factor de amortiguación para evaluar el número de orden del filtro a usar

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{A_{max}}{10}} - 1} \quad \text{Ec. 3.50}$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{1.5}{10}} - 1}$$

$$\varepsilon = 0.64229$$

Fórmula para calcular el número de orden de un filtro pasa bajas Butterworth

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2n}}} \quad \text{Ec. 3.51}$$

Donde:

n: Numero de filtro

$\omega: 2\pi f$

ε : Factor de Amortiguación

Tomando en cuenta que la curva de magnitud es máximamente plana dentro de la banda de paso y es decreciente se entiende que:

$$|H(0)| = 1 \quad ; \quad |H(\omega = \omega_c)| = 0.1$$

Sustituyendo el factor de amortiguación ε para encontrar el orden del filtro

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2n}}}$$

$$0.1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.64229^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2n}}}$$

Los valores de ω_s y ω_p son mostrados 20π y 10π

Usando el parámetro de selectividad se comprueba que las máximas frecuencias en las bandas de paso y atenuada son adecuadas.

$$k_s = \frac{10\pi}{20\pi} \quad (\leq 1 \text{ paso bajo})$$

$$k_s = 0.5 \quad (\leq 1)$$

Una vez comprobado el parámetro de selectividad se procede a encontrar el número de orden del filtro Butterworth.

$$0.1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.64229^2 \left(\frac{20\pi}{10\pi}\right)^{2n}}}$$

$$10^2 = 1 + 0.4125 \cdot 2^{2n}$$

$$2^n = \sqrt{\frac{99}{0.4125}} = 15.4919$$

$$n = \frac{\log(15.4919)}{\log(2)}$$

$$n = 3.9534$$

El valor de orden del filtro se toma en base al valor próximo del resultado, por lo tanto, el filtro es de orden 4.

Una vez determinado el orden del filtro procedemos a diseñar el filtro Butterworth mediante los polinomios de Butterworth dados en la siguiente tabla.

Tabla 22 Polinomio Butterworth

Orden	Polinomio de Butterworth (Denominador)
1	$S + 1$
2	$S^2 + 1.414S + 1$
3	$(S + 1)(S^2 + S + 1)$
4	$(S^2 + 0.765S + 1)(S^2 + 1.848S + 1)$
5	$(S + 1)(S^2 + 0.618 + 1)(S^2 + 1.618S + 1)$
6	$(S^2 + 0.518 + 1)(S^2 + 1.414S + 1)(S^2 + 1.932S + 1)$

Fuente. (Electronica Lugo, 2018)

La frecuencia de corte es hallada de la siguiente forma:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ec.3.52}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi 100 \cdot 1500 \times 10^{-9}}$$

$$f_c = 10610.3295$$

$$f_s = 48000$$

Como el orden del filtro Butterworth es de orden 4 se utiliza el siguiente polinomio

Tabla 23 Polinomio Butterworth de 4° Orden

Orden	Polinomio Butterworth
4	$(S^2 + 0.765S + 1)(S^2 + 1.848S + 1)$

Fuente. (Electronica Lugo, 2018)

Al ser un filtro de 4° Orden, tendrá 2 filtros de 2° Orden Sallen – Key y un amplificador Operacional.

Filtro Paso Bajo Sallen – Key (2° Orden)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K \frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{s^2 + \frac{3-K}{RC}s + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} \quad \text{Ec. 3.53}$$

$$K = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right)$$

$3 - K =$ Coeficiente en S del polinomio Butterworth

Resolviendo los dos filtros de 2° Orden Sallen – Key

Suponiendo que R_{a1} y $R_{a2} = 50k$

Primer Filtro Pasa Baja de 2° Orden

$$K_1 = \left(1 + \frac{R_{b1}}{R_{a1}}\right) \quad \text{Ec. 3.54}$$

$$0.765 = 3 - K_1$$

$$K_1 = 2.235$$

Entonces:

$$2.235 = \left(1 + \frac{R_{b1}}{50k}\right)$$

$$R_{b1} = 61.75k$$

Segundo Filtro Pasa Baja de 2° Orden

$$K_2 = \left(1 + \frac{R_{b2}}{R_{a2}}\right) \quad \text{Ec. 3.55}$$

$$1.848 = 3 - K_2$$

$$K_2 = 1.152$$

Entonces:

$$1.152 = \left(1 + \frac{R_{b2}}{50k}\right)$$

$$R_{b2} = 7.6k$$

Ganancia

$$G(\omega) = 20\log|T(j\omega)|$$

$$G_0 = 20\log(K_0 \cdot K_1 \cdot K_2) = 10\pi$$

$$20\log(K_0 \cdot 2.235 \cdot 1.152) = 10\pi$$

$$K_0 = 0.61$$

Amplificador Operacional

Como $R_1 = 10k$ encontramos el valor de R_2

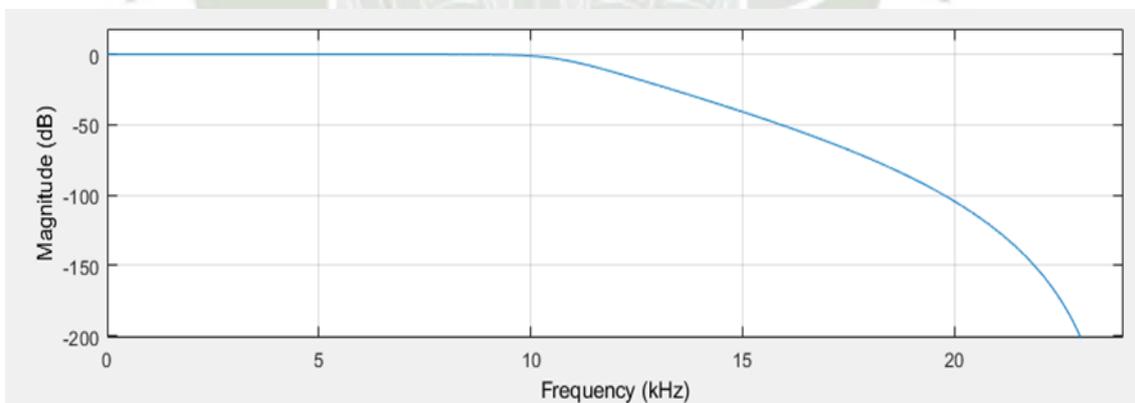
$$K_0 = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ec. 3.57}$$

$$R_2 = 6.1k$$

Función de Transferencia del Filtro

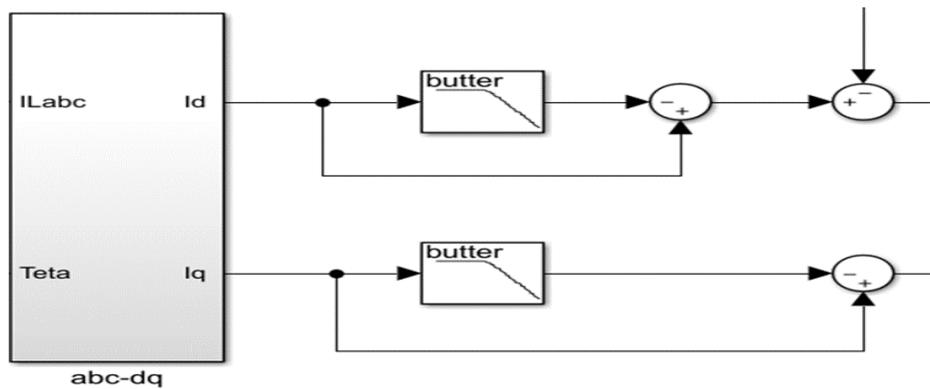
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \left(\frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{S^2 + \frac{3-K_1}{RC}S + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} \right) \left(\frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{S^2 + \frac{3-K_2}{RC}S + \left(\frac{1}{RC}\right)^2} \right) \quad \text{Ec. 3.58}$$

Figura 44 Respuesta de la magnitud



Elaboración propia

Figura 45 Filtro Butterworth conectado a la compensación del FAP



Fuente. Sarma (2018)

d) Transformación dq-abc

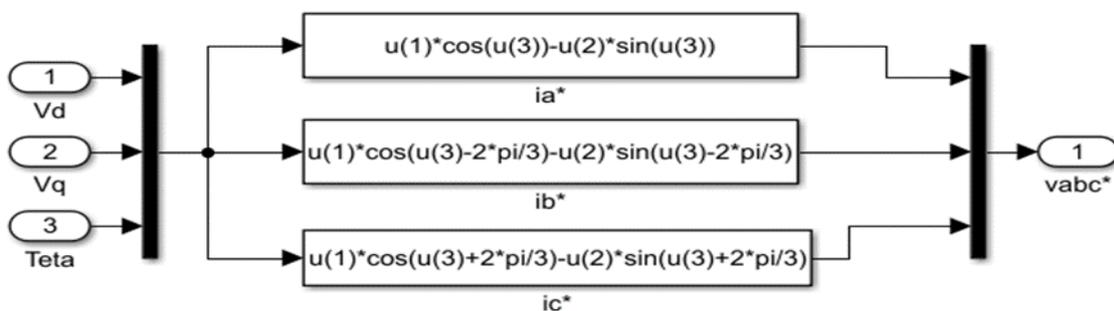
Mediante la transformada de Park se realiza el cambio en la corriente mostrándose en las siguiente formulas

$$i_a = i_d \cos \theta - i_q \sin \theta$$

$$i_b = i_d \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad \text{Ec. 3.59}$$

$$i_c = i_d \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Figura 46 Transformada dq-abc



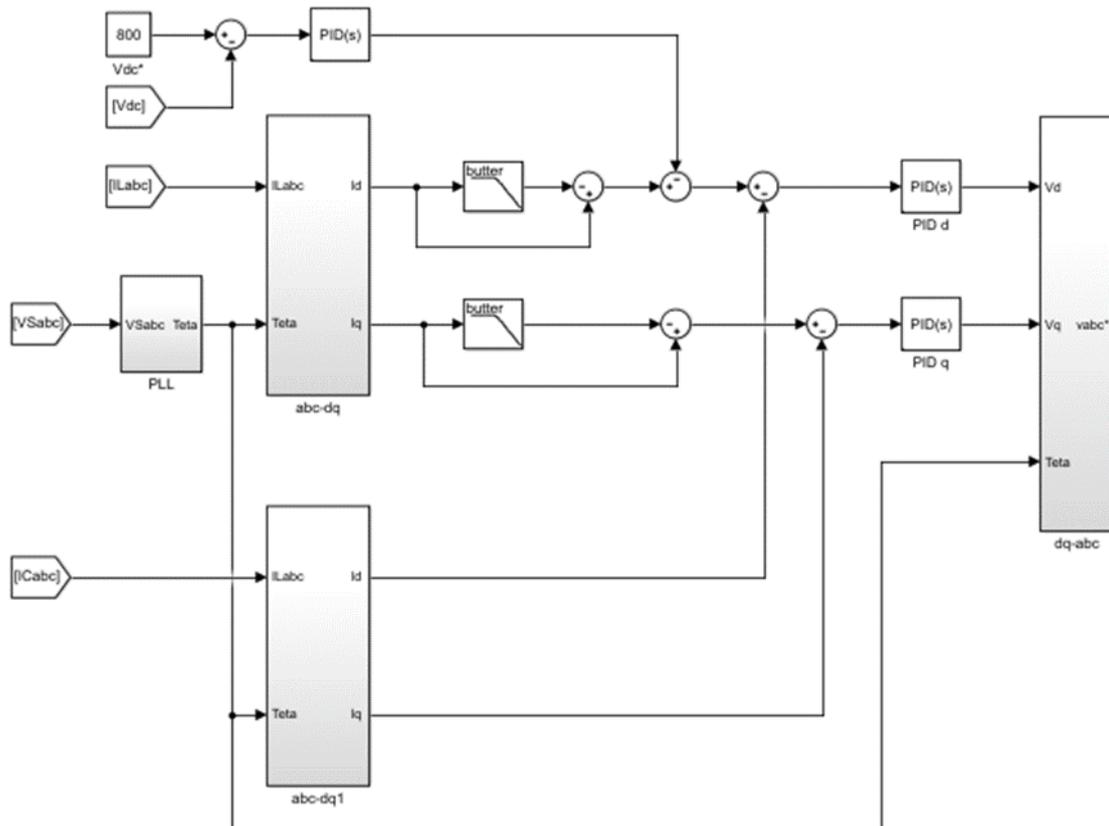
Fuente. Haustveit (2015)

Se implementa controladores PID en tiempo continuo para ajustar la ganancia referenciada hacia la transformación de Park realizada en la conversión dq-abc.

Cuyos valores internos del PID en la simulación pueden ir desde 50 en la proporcional, 0-coeficiente del filtro en la integral y en el coeficiente del filtro con un valor de 100, dichos valores son puestos para asemejarlos lo máximo posible a un comportamiento real.

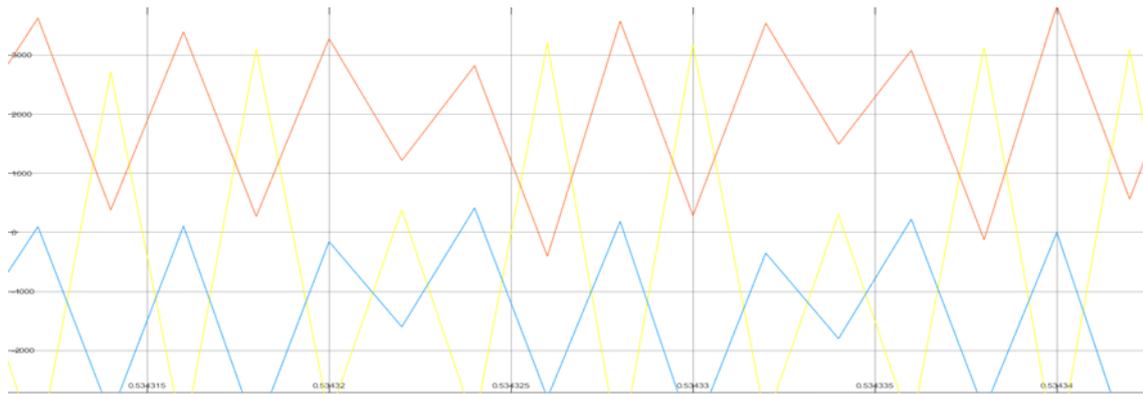
En los PID de antes de la transformada inversa, la proporcional tiene un valor mas elevado, 2000, debido a que se encuentra antes de la transformada inversa.

Figura 47 Estructura de la transformación de Park



Fuente. Haustveit (2015)

Figura 48 Señal de salida de la trasformada dq-abc

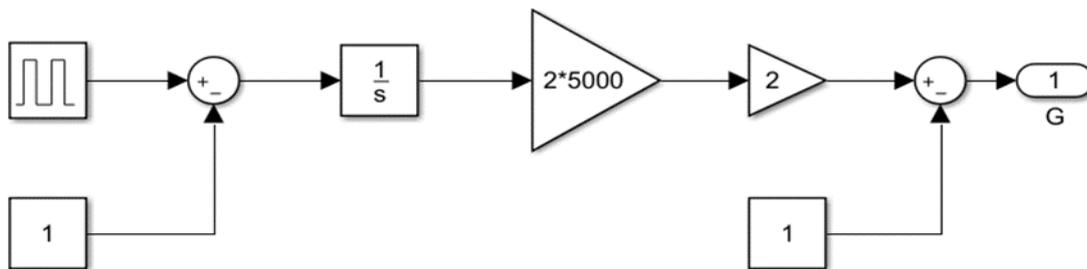


Elaboración propia

3.8.1. Corriente Histéresis

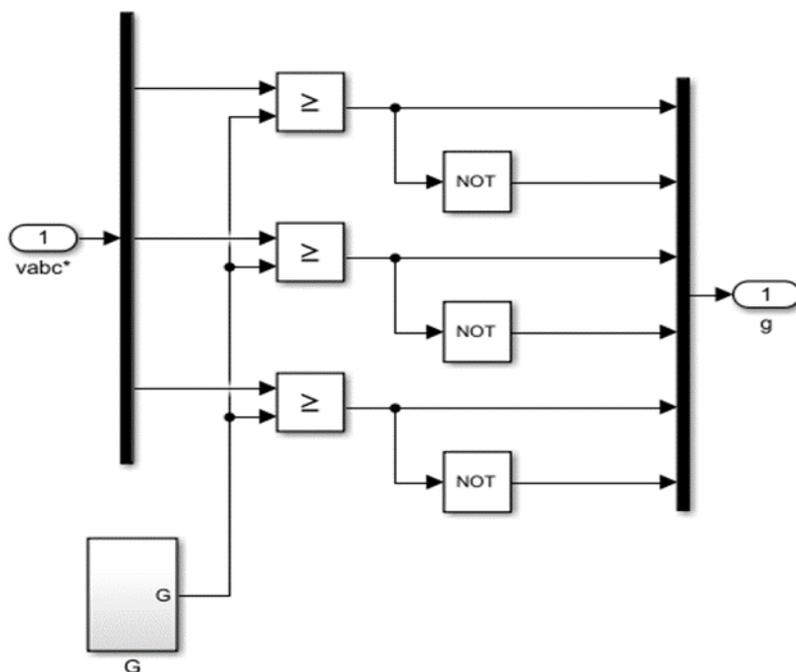
Para realizar la corriente de compensación primero se empieza con la generación de la señal PWM. Dependiendo del número de armónicos en el Modo de generador, el bloque puede ser usado ya sea para una sola fase o de tres fases de control PWM. Usamos un polinomio normalizado de primer orden y un bloque gain para adecuar la señal de salida G.

Figura 49 Señal generadora PWM



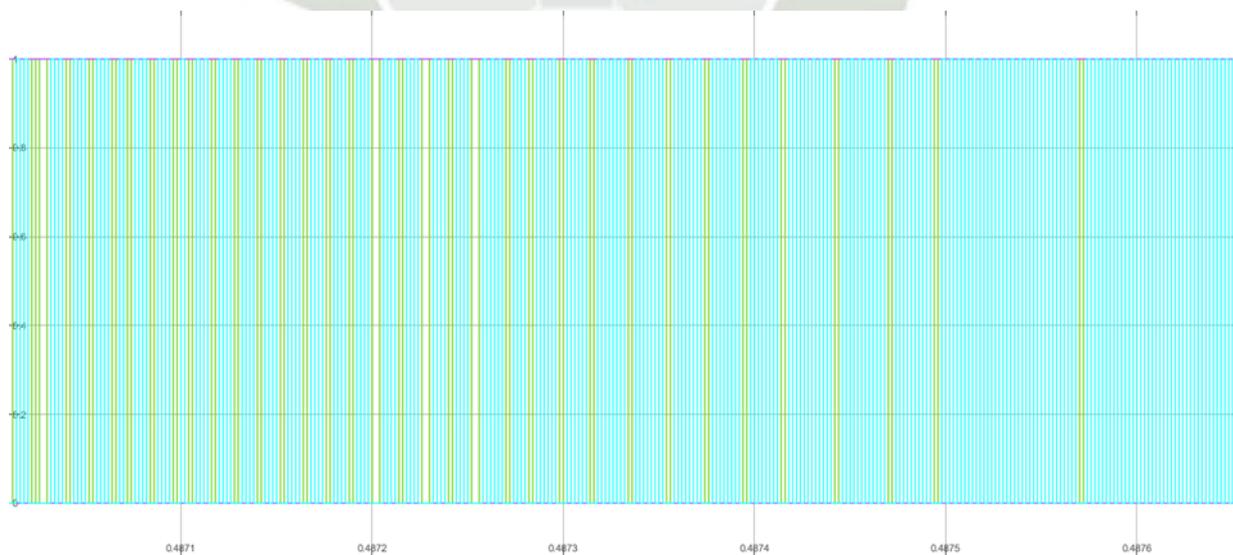
Fuente. Haustveit (2015)

Figura 50 Diagrama de la corriente de Histéresis



Fuente. Haustveit (2015)

Figura 51 Salida de señal de la corriente de Histéresis

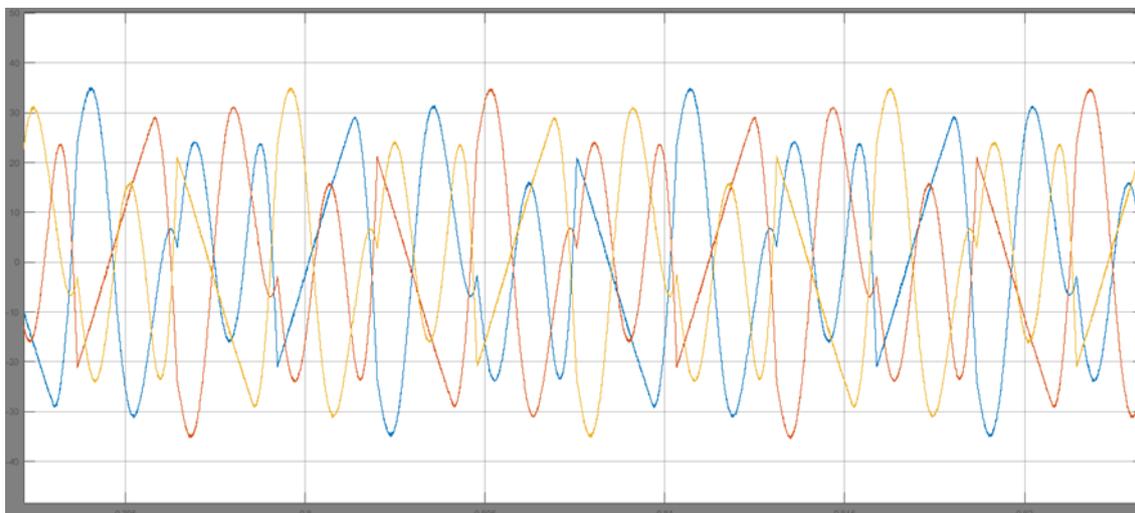


Elaboración propia

3.8.2. *Corriente de compensación*

Es la corriente del filtro que sumado a la corriente de carga y de línea atenuará o disminuirá la creación de armónicos por cargas no lineales presentes en la red eléctrica.

Figura 52 *Corriente de compensación ICabc*

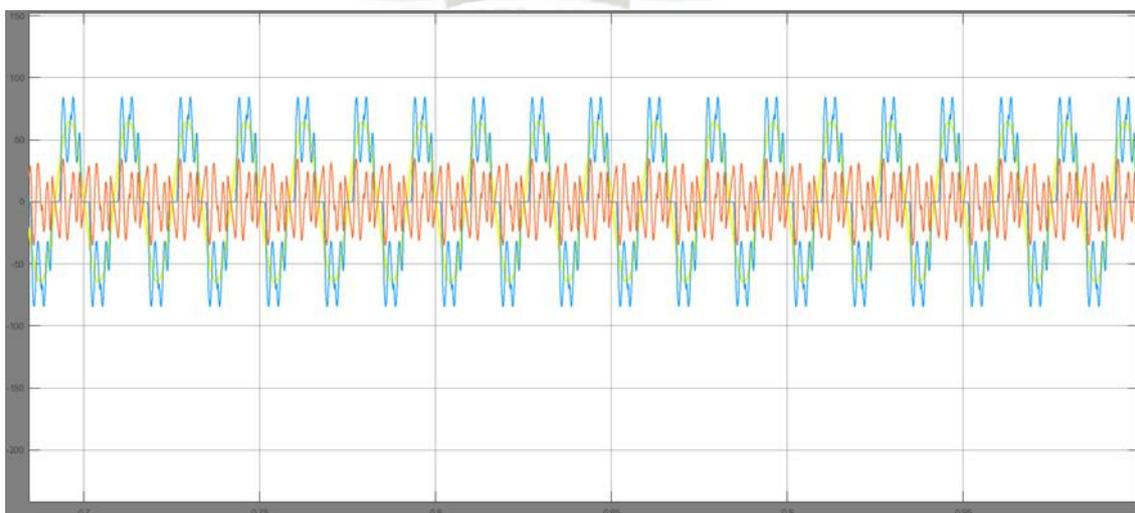


Elaboración propia

3.8.3. *Resultados del FAP en Paralelo*

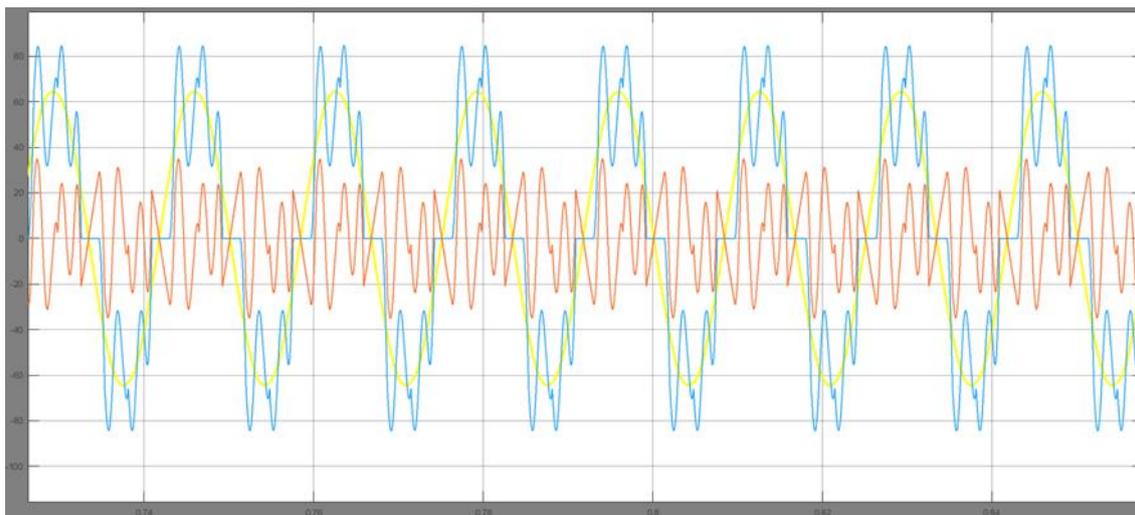
En la siguiente imagen se muestra de manera global la visualización de las tres corrientes en una sola gráfica.

Figura 53 *Corriente de compensación, corriente de carga y corriente de línea*



Elaboración propia

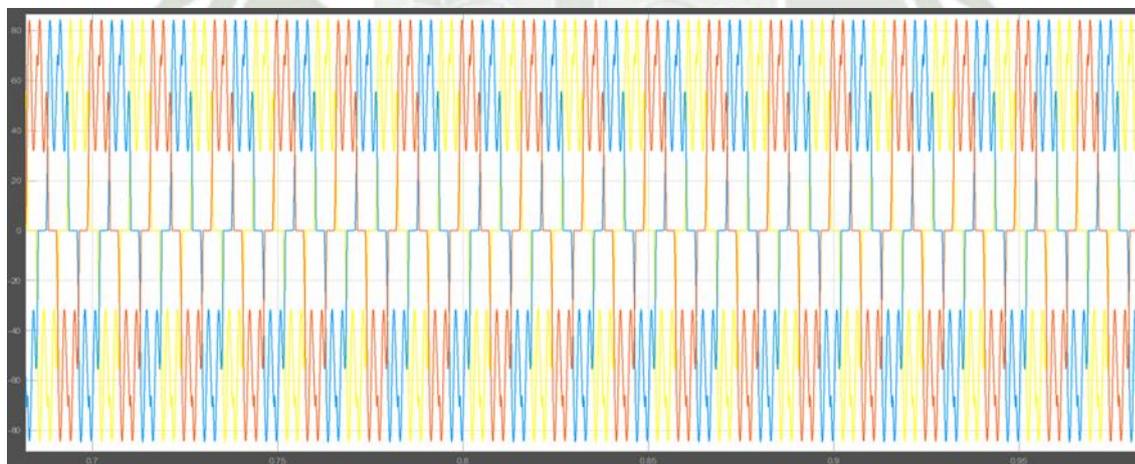
Figura 54 Corrientes IC, IS, IL



Elaboración propia

La siguiente imagen muestra la carga de línea donde se muestran los armónicos producidos por cargas no lineales.

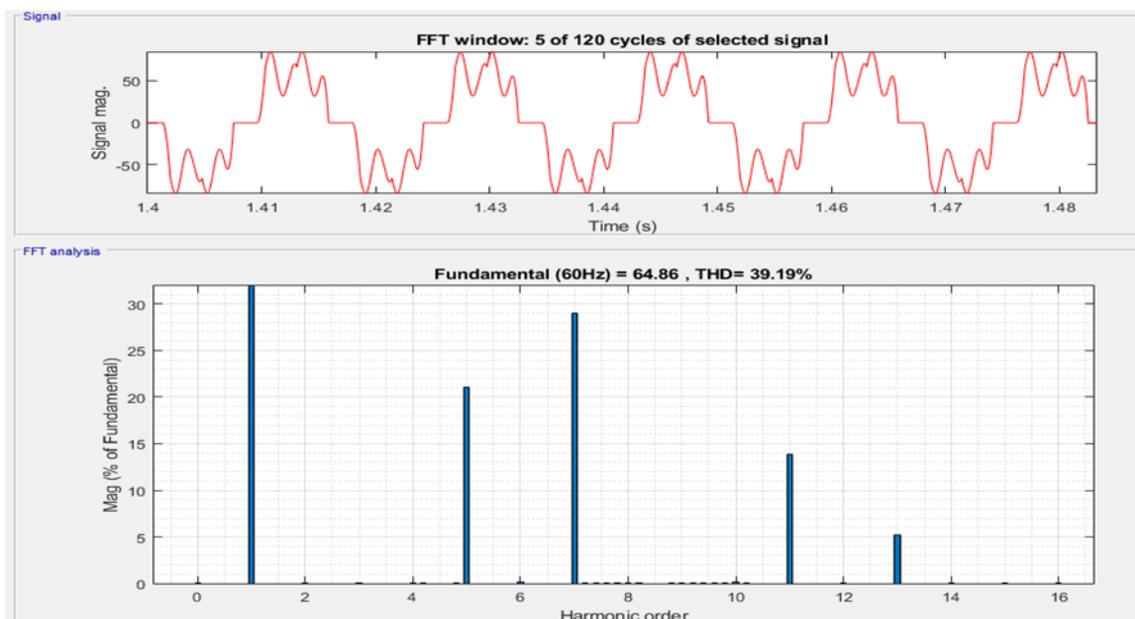
Figura 55 Corriente de línea IL



Elaboración propia

Usando el analizador FFT el cual nos muestra el índice de los armónicos presentes en esta carga de forma que la podamos representar mediante la tabla en qué nivel de armónicos se encuentra.

Figura 56 Nivel de armónicos en IL



Elaboración propia

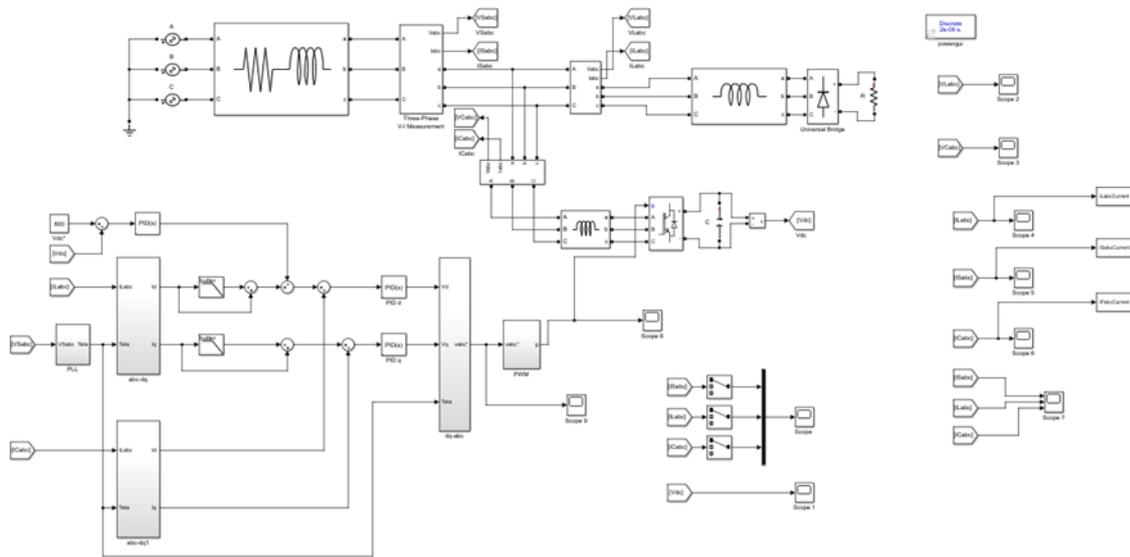
Tabla 24 Armónicos más significativos en IL

Datos		Porcentaje
Armónicos	Frecuencia	
H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	26.36%
H7	420(Hz)	18.43%
H11	660(Hz)	10.33%
H13	780(Hz)	2.22%

Fuente. (Haustveit, 2015, pág. 93)

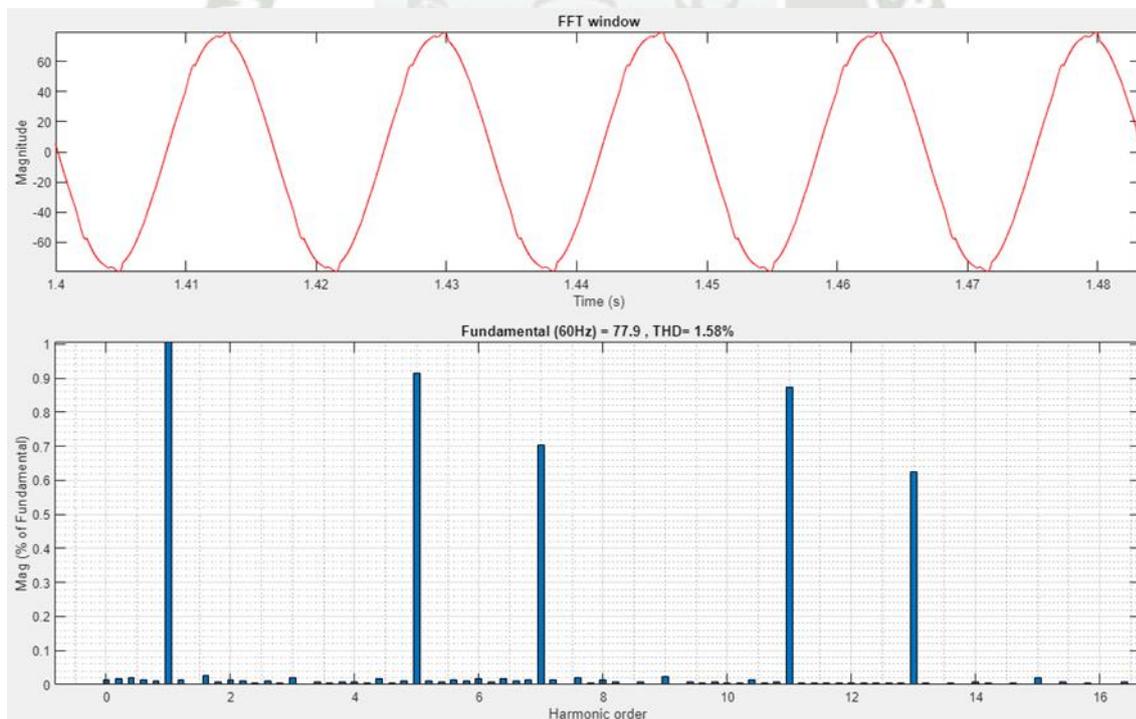
En la siguiente se muestra el diseño de toda la implementación del filtro activo de potencia para la disminución de armónicos en la red eléctrica.

Figura 57 Diseño del filtro activo de Potencia



Elaboración propia

Figura 58 Nivel de armónicos con FAP



Elaboración propia

Como se observa el porcentaje de armónicos ha disminuido al usar el filtro activo de potencia (FAP) en la siguiente tabla se observa el nivel de armónicos porcentual de la disminución.

Tabla 25 Comparación del THD con un filtro activo agregado al circuito

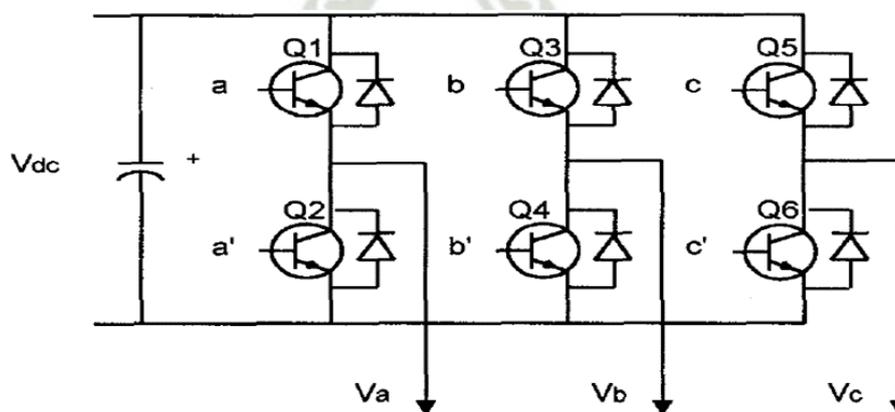
Fuente generadora de armónicos sin filtro activo de potencia	Red con filtro activo de potencia
THD = 34.04%	THD = 1.58%

Fuente. (Sarma, 2018, pág. 9)

3.8.4. Implementos a usar para el diseño del filtro activo

En la etapa de potencia es necesario la utilización de cuatro puentes inversores IGBT, cada uno de estos puentes deben ser colocados en paralelo, sumando a ello la implementación de un inductor y capacitor para la debida conexión, además de presentar un seguro en caso de que se produzca una ausencia de tensión, también es una buena herramienta en la mitigación de armónicos ya que los IGBT permite generar una baja carga armónica en frecuencias bajas de conmutación (Diaz & Dávila, 2014, pág. 2).

Figura 59 Etapa de Potencia del FAP



Fuente. Diaz & Dávila (2014)

Para la salida del inversor trifásico es necesario contar con un filtro, el cual es principalmente un capacitor y un inductor.

Figura 60 Módulo IGBT, SKM100GB12T4



Fuente. El Blog de RS (2020)

Tabla 26 Especificaciones del IGBT

Atributo	Valor
Corriente Máxima Continua del Colector	160 A
Tensión Máxima Colector-Emisor	1200 V
Tensión Máxima Puerta-Emisor	±20V
Tipo de Encapsulado	SEMITRANS2
Tipo de Montaje	Montaje en panel
Tipo de Canal	N
Conteo de Pines	7
Temperatura de Funcionamiento Mínima	-40 °C
Temperatura Máxima de Funcionamiento	+175 °C

Fuente. (El Blog de RS, 2020)

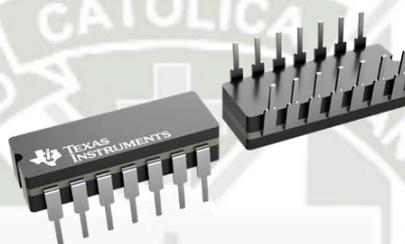
En la etapa del filtro para la transformación de Park es necesario contar con los siguientes datos si se quiere implementar, como el filtro es de cuarto orden la implementación del Amplificador operacional cuádruple de baja potencia serán 3.

Tabla 27 Datos para el diseño de un Low Pass Filter

Material	Cantidad
LM124AE	3
Capacitor	4
Inductor	4
Resistencias	6

Fuente. (El Blog de RS, 2020)

Figura 61 LM124AE/883



Fuente. Octopart (2020)

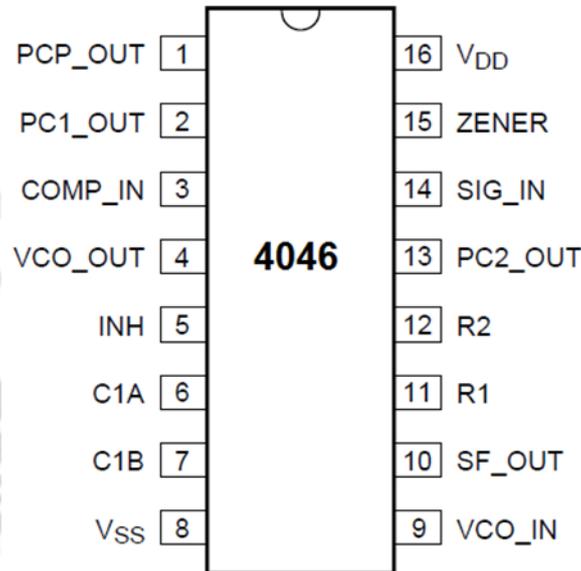
Tabla 28 Especificaciones del LM124AE/883

Atributo	Valor
Tasa de rechazo de modo común	70dB
Corriente de polarización de entrada	150 nA
Voltaje de compensación de entrada (Vos)	2mV
Voltaje de suministro dual máx.	16 voltios
Temperatura máxima de funcionamiento	125 °C
Voltaje de suministro mínimo	3 voltios
Corriente de salida	20mA
Velocidad de subida	0,1 V/μs
Ganancia de voltaje	93,98dB

Fuente. (Octopart, 2020)

Para el diseño del lazo de seguimiento utilizado en el circuito, se desea implementar para sintetizar frecuencias altas, un tipo de PLL a usar sería el 4046.

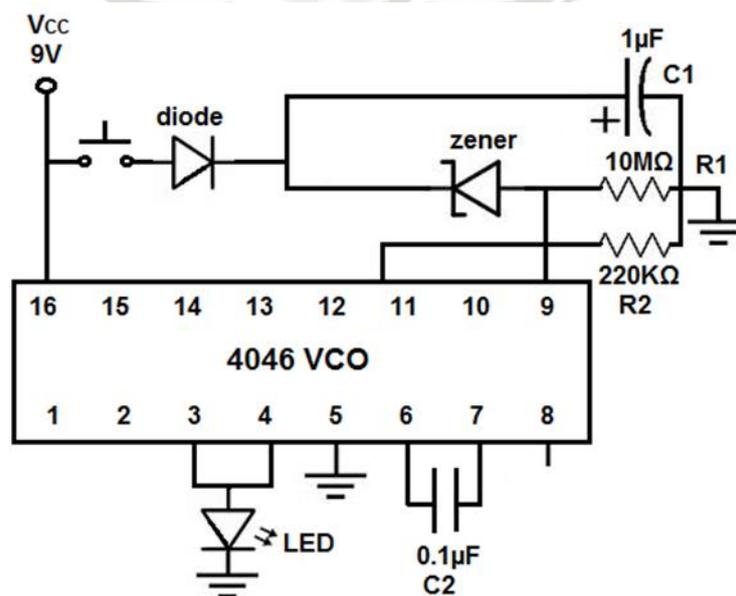
Figura 62 PLL 4046



Fuente. Learning About Electronics (2017)

Para realizar la conexión es necesario contar un bucle de enganche de fase, diodos de potencia, diodo Zener, resistencias y condensadores electrolíticos.

Figura 63 Forma de Conexión usando el 4046



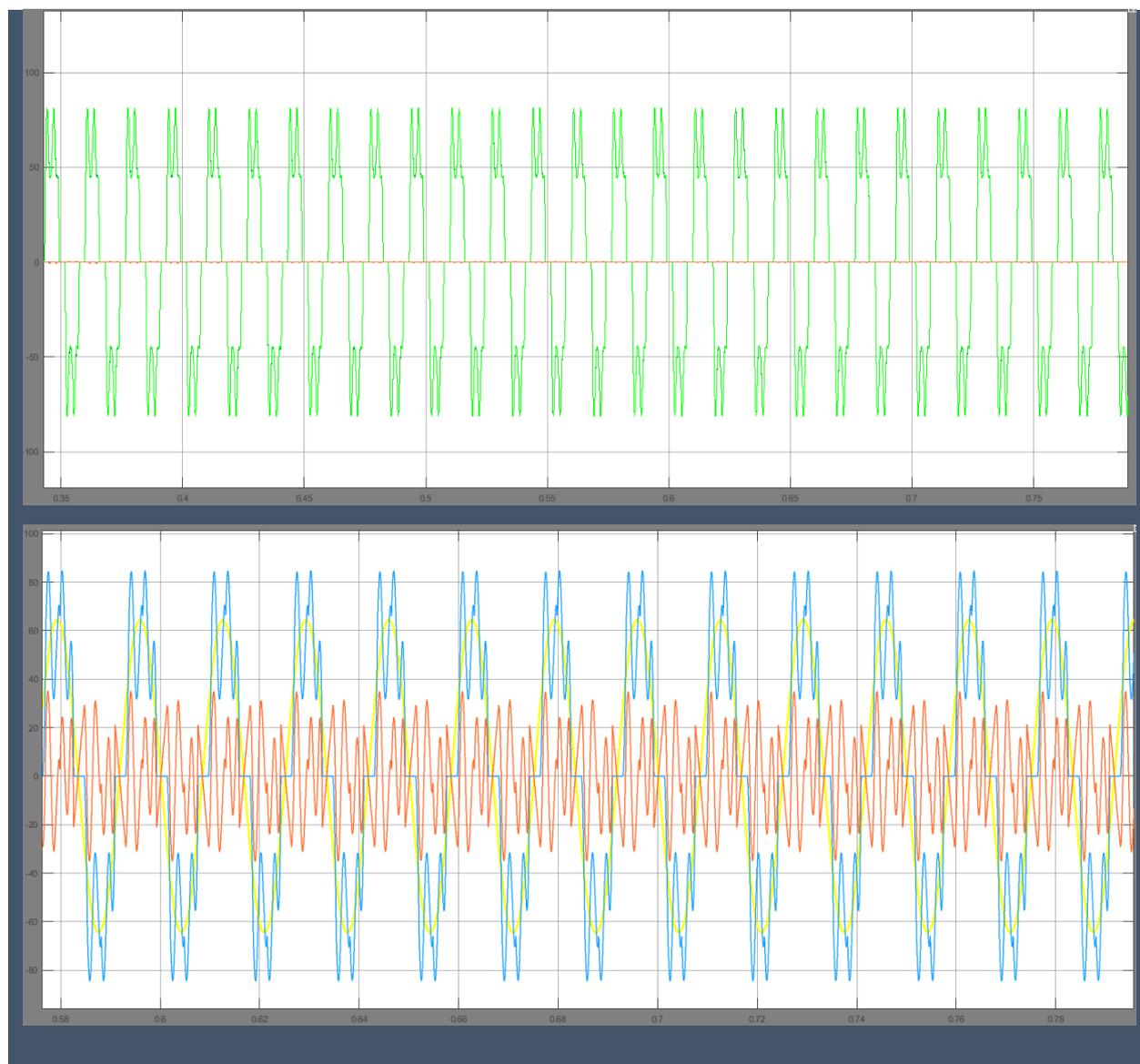
Fuente. Arcas (2019)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

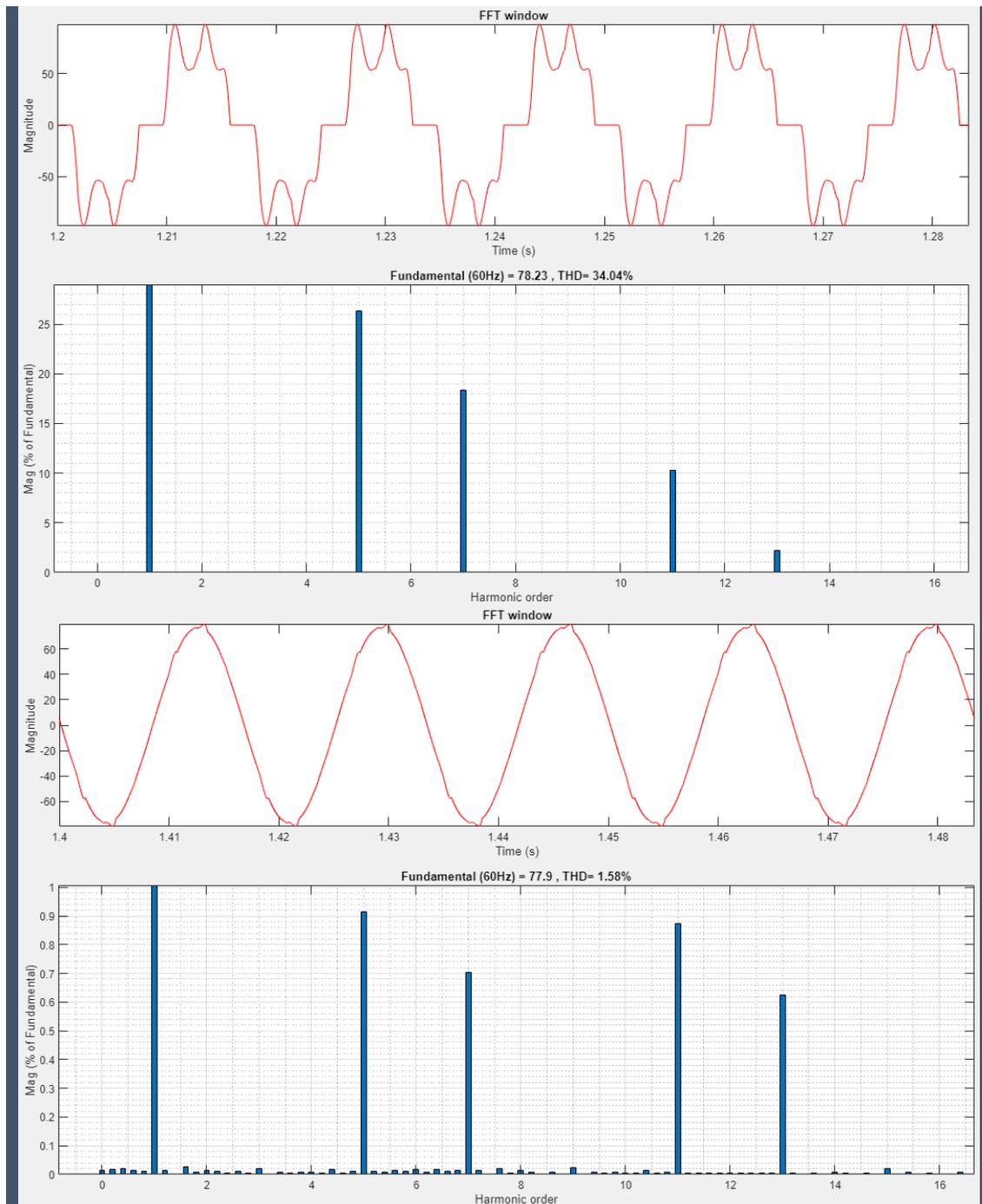
4.1. PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LOS DATOS

Figura 64 Comparación de las corrientes de carga, línea y compensación sin y con FAP



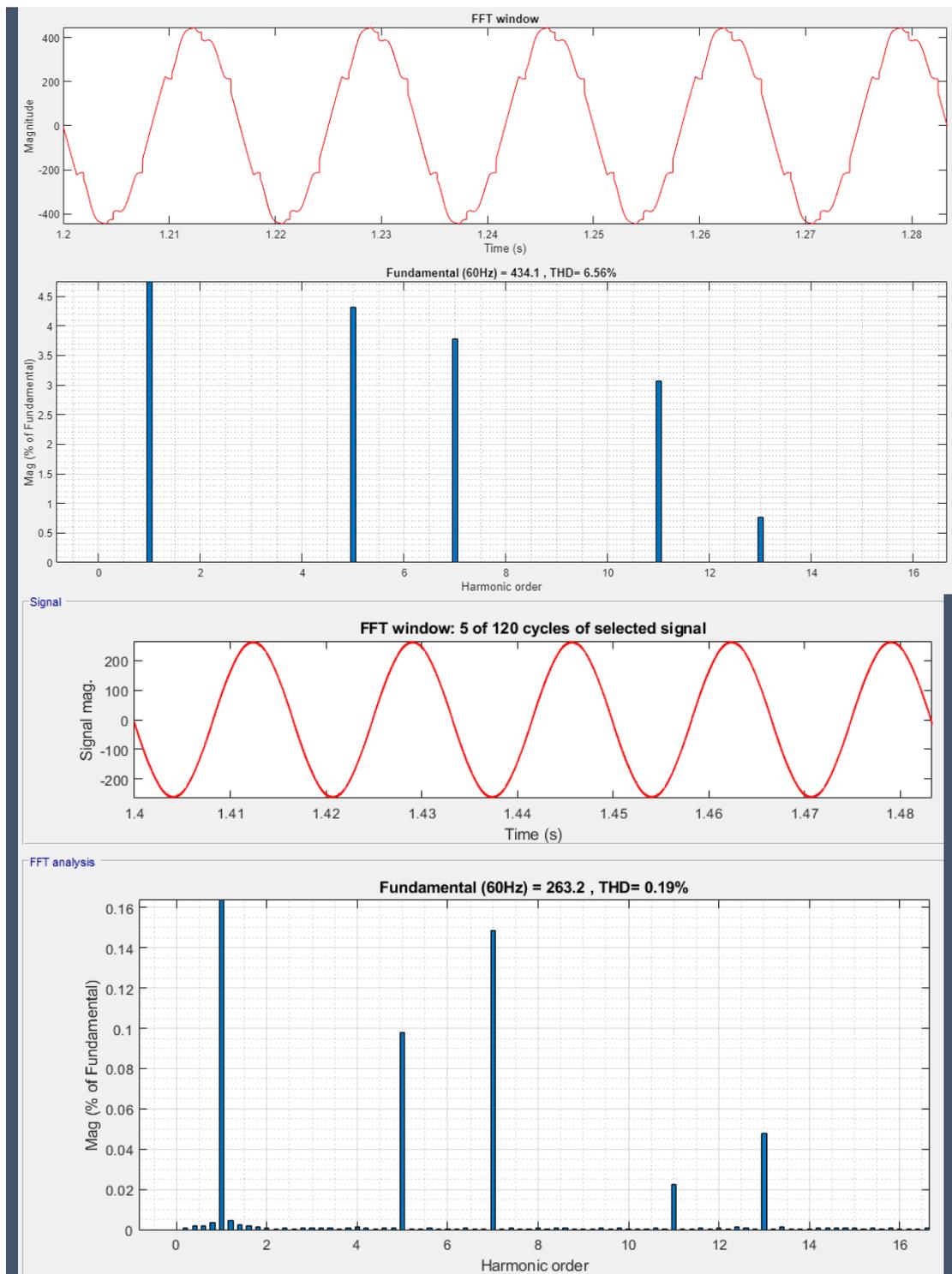
Elaboración Propia

Figura 65 Comparación de una red eléctrica sin FAP y una red eléctrica con FAP en corriente



Elaboración Propia

Figura 66 Comparación de una red eléctrica sin FAP y una red eléctrica con FAP en voltaje



Elaboración Propia

Tabla 29 Armónicos más significativos en corriente sin Filtro Activo de Potencia (FAP)

Datos		Porcentaje
Armónicos	Frecuencia	
H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	26.36%
H7	420(Hz)	18.40%
H11	660(Hz)	10.30%
H13	780(Hz)	2.22%

Elaboración Propia

En la tabla 29 se puede observar el índice de porcentaje de armónicos en la corriente eléctrica donde, los armónicos más significados están presentes en los niveles H1, H5, H7, H11 y H13, viéndose que en el nivel H5 se presenta el mayor porcentaje de armónicos llegando al 26.36%, también se observa que la generación de todos los armónicos es dada en números impares, ya que los armónicos en los niveles de números pares suelen anularse gracias a la simetría de la señal alterna.

Tabla 30 Armónicos más significativos en corriente con Filtro Activo de Potencia (FAP)

Datos		Porcentaje
Armónicos	Frecuencia	
H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	0.92%
H7	420(Hz)	0.70%
H9	540(Hz)	0.01%
H10	600(Hz)	0.01%
H11	660(Hz)	0.87%
H13	780(Hz)	0.63%

Elaboración Propia

La tabla 30 muestra los resultados obtenidos cuando se implementa un filtro activo de potencia (FAP) a la red eléctrica, mostrándonos que el índice de porcentaje en los niveles de generación de armónicos H5, H7, H9, H11 y H13 son menores a 1%, esto indica que usar un filtro activo ayuda en gran medida a reducir e eliminar la generación de armónicos en la red eléctrica, tanto el armónico H9 y H10 son mínimos casi nulos, por lo que se interpreta que los armónicos en esos niveles han sido eliminados.

Tabla 31 Armónicos más significativos en voltaje sin Filtro Activo de Potencia (FAP)

Datos		Porcentaje
Armónicos	Frecuencia	
H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	4.32%
H7	420(Hz)	3.79%
H11	660(Hz)	3.07%
H13	780(Hz)	0.77%

Elaboración Propia

Tabla 32 Armónicos más significativos en voltaje con Filtro Activo de Potencia (FAP)

Datos		Porcentaje
Armónicos	Frecuencia	
H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	0.10%
H7	420(Hz)	0.15%
H11	660(Hz)	0.02%
H13	780(Hz)	0.05%

Elaboración Propia

Tabla 33 Comparación entre una red eléctrica con un Filtro Activo de Potencia y una red eléctrica sin un Filtro Activo de Potencia en corriente

Red Eléctrica con Filtro Activo de Potencia			Red Eléctrica sin Filtro Activo de Potencia		
Datos			Datos		
Armónicos	Frecuencia	Porcentaje	Armónicos	Frecuencia	Porcentaje
H1	60(Hz)	100%	H1	60(Hz)	100%
H5	300(Hz)	0.92%	H5	300(Hz)	26.36%
H7	420(Hz)	0.70%	H7	420(Hz)	18.40%
H9	600(Hz)	0.01%	H9	600(Hz)	0.01%
H11	660(Hz)	0.87%	H11	660(Hz)	10.30%
H13	780(Hz)	0.63%	H13	780(Hz)	2.22%

Elaboración Propia

En la tabla 33 podemos observar la comparación de una red eléctrica con y sin el filtro activo de potencia, donde se muestra que el índice en los armónicos se ha reducido en gran medida.

Tabla 34 Materiales necesarios para la construcción de un filtro activo

Material	Cantidad	Precio (S/) (unidad)
SISTEMA DE POTENCIA		
Módulo-IGBT, SKM100GB12T4	6	113.50
Diodo	6	1.80
Capacitores	1	3.00
PLL		
PLL 4046	1	5.60
Capacitores	2	6.00
Diodo	2	0.60
Resistencias	2	0.40
Diodo Zener	1	2.47
GENERACIÓN PWM		
Resistencias	2	0.40
Temporizador IC 555	1	10.00
Capacitor	1	3.00
FILTRO BUTTERWORTH PASA BAJAS		
Capacitores	4	3.00
Amplificador Operacional LM124AE/883	3	35.04
Resistencias	5	1.00
Adicionales		
Inductores	9	26.19
TOTAL		212.00

Elaboración propia

4.2. BALANCE COSTO- BENEFICIO

La inversión dada en este proyecto de investigación para la elaboración de un filtro activo para armónicos es dada por las tablas [5] y [34] dando un total de 5923.6 soles, sumándole a esto el coste de instalación y la implementación alrededor 2500 dólares como valor mínimo (9447.61 soles), el cual es valor dado por el mercado estadounidense.

Para evaluar si la inversión realizada es la adecuado se realiza el balance coste – beneficio tomando los siguientes datos:

- Costo de Inversión
- Costo de Mantenimiento y operacionalización del filtro
- Duración del filtro (3 años)
- Ahorro anual de coste de Energía

La tabla 34 muestra los costos totales de inversión y mantenimiento del proyecto.

Tabla 35 *Costos totales de inversión y mantenimiento*

INVERSIÓN	TOTAL (Soles)
Coste de Inversión	15371.21
COSTO DE MANTENIMIENTO Y OPERACIONALIZACIÓN DEL FILTRO	
Primer Año	1000.00
Segundo Año	1000.00
Tercer Año	1000.00
COSTO TOTAL	18371.21

Elaboración Propia

Para poder evaluar los beneficios totales del proyecto se toma en cuenta los costos de ahorro de energía de los tres años de duración del filtro, claro que aclarar que la duración puede sobrellevar un mayor tiempo de vida si se da el mantenimiento adecuado.

La tabla 35 muestra los beneficios totales del proyecto, referente a los tres años de vida útil del filtro, a su vez los datos los beneficios de ahorro de energía fueron recogidos como un

promedio de empresas estadounidenses que abarcan filtros activos para mitigar armónicos, ya que la empresa en cuestión toma como dato confidencial este tipo de asuntos.

Tabla 36 *Beneficios totales del proyecto*

AHORRO DE COSTE DE ENERGÍA	
Primer Año	7200.00
Segundo Año	8150.00
Tercer Año	8150.00
COSTO TOTAL	23500.00

Elaboración propia.

El balance o relación coste – beneficio es dada por la siguiente formula:

$$\text{Balance (coste – beneficio)} = \frac{\text{Beneficios Totales}}{\text{Costos Totales}} \quad \text{Ec. 4.60}$$

$$\text{Balance (coste – beneficio)} = \frac{23500.00}{18371.21}$$

$$\text{Balance (coste – beneficio)} = 1.2791$$

Al ser la relación coste-beneficio mayor a 1, indica que el proyecto es viable, indicando que el proyecto generará un retorno positivo hacia la empresa en cuestión.

4.3. DISCUSIÓN

De acuerdo a las pruebas realizadas en el diseño del filtro activo, comparando los niveles de armónicos de una red eléctrica sin el filtro activo a otra red eléctrica con un filtro activo se demuestra la utilización que pueden tener los filtros activos, para el diseño del filtro activo se usó la transformada de Park y Clarke, para transformar los valores trifásicos a, b, c a un sistema de referencia dq0, con el objetivo de lograr valores constantes en un régimen permanente por medio de estas ecuaciones de transformación, gracias a la corriente de histéresis diseñada en el bloque PWM se pudo establecer la corriente de compensación, con lo cual puedo decir que la teoría concuerda y valida los datos necesarios para establecer el diseño del filtro activo de potencia.

Respecto al planteamiento de la hipótesis se puede decir que se valida con el diseño del filtro, ya que la reducción de los armónicos se puede observar en las tablas realizadas en la parte de resultados donde el filtro activo mejora la distorsión que se produce en la red eléctrica, además mediante la implementación del filtro activo a la red eléctrica se pudo observar que la forma de señal distorsionada por los armónicos se atenúa de forma que se mostraba de forma sinusoidal tanto para la corriente como para el voltaje, siendo la corriente mucho más atenuada que el voltaje.

Los resultados de los datos para la corriente y para el voltaje se mantienen mínimos esto nos dice que la atenuación efectuada por el filtro es ayudada en gran medida por la corriente de compensación (I_{Cabc}), ya que permite evaluar conjuntamente la corriente de carga (I_{Sabc}) y de línea (I_{Labc}) de manera que se establezca una relación que de realce en la disminución de los armónicos generados por cargas no lineales.

Conclusiones

Se logró diseñar un filtro activo de armónicos para usuarios de baja tensión, el cual permite controlar y eliminar los armónicos presentes en el sistema. Este proceso se llevó a cabo utilizando el programa MATLAB y su herramienta SIMULINK. Mediante los bloques de simulación disponibles en SIMULINK, se modeló la red eléctrica con la presencia de armónicos, los cuales se obtuvieron a partir de mediciones reales. Además, se incorporó una fuente generadora de armónicos y se conectó el filtro activo de armónicos en paralelo para su funcionamiento.

Utilizando los analizadores de redes Fluke 435, AEMC 8335 y METREL MI2892, se recopilaron los datos necesarios de la instalación. Estos datos fueron analizados a través de la creación de tablas basadas en las mediciones realizadas. Se llevó a cabo un estudio exhaustivo para determinar los armónicos más perjudiciales presentes en la instalación, y como resultado se identificaron los armónicos 5, 7 y 11.

Mediante la simulación, se logró reducir los efectos de los armónicos de corriente y tensión, lo cual resulta en una mejora significativa en la calidad de la energía. Esta mejora se refleja en la sincronización entre corriente y voltaje, así como en la reducción de los efectos adversos causados por los armónicos. Estos efectos incluyen el aumento de la temperatura en los equipos conectados a la red, la disminución de la eficiencia de dichos equipos y un notable ahorro energético, lo que se traduce en beneficios económicos.

El proceso de filtrado de armónicos, según las simulaciones realizadas, logró reducir significativamente los niveles de distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés). En particular, se observó una reducción del 34.04% al 1.58% en la corriente y del 6.56% al 0.19% en el voltaje. Es importante destacar que se obtuvo un mejor rendimiento en la reducción de armónicos en el voltaje. Además, se llevaron a cabo pruebas utilizando las transformadas de Park y de Clarke, las cuales resultaron en un enfoque eficaz para el análisis de la señal y la

evaluación de los resultados. En conclusión, el diseño y desarrollo de los filtros de potencia activa se considera una solución eficiente para mitigar los armónicos generados por cargas no lineales.



Recomendaciones

- Realizar un análisis para un filtro activo tipo paralelo en tres hilos trifásico con tensiones o voltajes de red desbalanceadas para observar el comportamiento de los armónicos.
- Se puede implementar el diseño de controladores de potencia tipo serie-paralelo dentro del filtro activo de potencia, donde se puede trabajar encontrando la especialización funcional de cada topología con cada tipo de carga. Esta topología es interesante en el diseño del circuito por su función como interruptor activo para la carga, con lo cual se pueden proponer diferentes estrategias de compensación para el control asociado a los dos convertidores de potencia.
- En cuanto a la etapa de potencia se ha realizado mediante un inversor trifásico por medio de IGBT's, donde la utilización de estos transistores se puede cambiar por medio otras topologías, como transformadores multinivel.
- La utilización de IGBT's es importante en la etapa de potencia, por lo que es necesario utilizar los mejores IGBT's disponibles para permitir una mayor velocidad de conmutación con bajas o mínimas pérdidas.
- Usar técnicas de control PWM eficientes y usar la conmutación con un medio para reducir las pérdidas de semiconductores como lo son los IGBT's. (Liu y otros, 2014) (Tepan, 2022) (Vargas, 2005)

Referencias

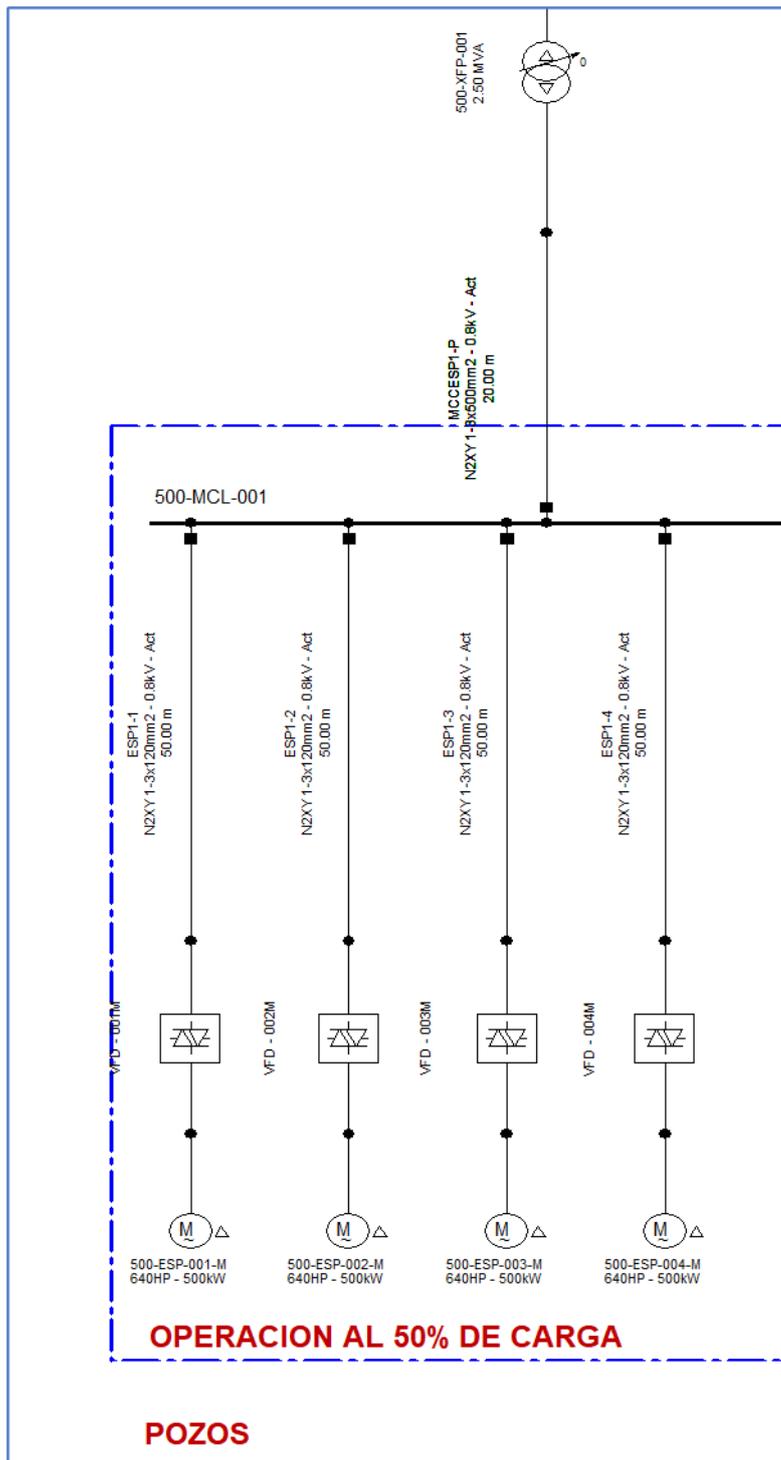
- A. Tecnológicas. (17 de octubre de 2019). *Nueva normativa internacional de dispositivos de protección contra sobretensiones temporales o permanentes (IEC 63052)*. Obtenido de <https://at3w.com/blog/nueva-normativa-internacional-de-dispositivos-de-proteccion-contra-sobretensiones-temporales-o-permanentes-iec-63052/>
- Alain, D., & Cortez, L. (2017). *Procesos y Fundamentos de la investigación científica*. Machala, Ecuador: UTMACH.
- Alvarado, H., & Ramírez, J. (2010). *Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicos en sistemas eléctricos*. Instituto Politécnico Nacional.
- Alzate, A., Murillo, D., & Silva, R. (2016). Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos. *Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento*, 20(50), 96-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a07>
- Anixter. (2018). *Una visión general de los armónicos en sistemas eléctricos*. Obtenido de https://www.anixter.com/es_mx/resources/literature/wire-wisdom/an-overview-of-harmonics-in-electrical-systems.html#:~:text=En%20un%20sistema%20de%20energ%C3%ADa,relaci%C3%B3n%20con%20su%20frecuencia%20fundamental.
- Arcas, J. (2019). *How to Buil a Voltake-controlled Oscillator (VCO) Circuit with a 4046 Chip*. *Osciladores y generadores de onda*.
- Arcila, J. (2010). *Armónicos en sistemas electrónicos*. I.E.B S.A. Obtenido de http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf
- Badii, J., Castillo, A., Rodríguez, M., Wong, H., & Villalpando, L. (2007). *Diseños experimentales e investigación científica*. San Nicolás, México: UANL.
- Bueno, H., & Fajardo, M. (2013). *Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos de una red bifásica residencial*. Cuenca - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Cartagena. (s.f). *FILTROS PASIVOS*. Obtenido de <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/temarios/H%20Filtros%20pasivos%20con%20practica.pdf>
- Castillo, L. (2019). *Determinación del Método de Control del Inversor más Adecuado para Lograr Mejores Resultados en el comportamiento de un filtro activo de potencia conectado en paralelo*. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.

- Circutor SA. (13 de mayo de 2019). *Armónicos: origen, efectos y soluciones*. Obtenido de <http://circutor.es/es/productos/destacados/4622-armonicos-origen-efectos-y-soluciones>
- Cogollo, S. (2016). *Fundamentos de la teoría de Filtros*. Valencia - España: Universitat Politècnica de València. Obtenido de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/b6e1b8b1-cfc7-46d3-90b7-ac4a9d6ce5a8/TOC_0287_04_01.pdf?guest=true
- CTM Magnetics. (15 de febrero de 2021). *CTM Magnetics. The basics of passive harmonic filters*. Obtenido de <https://ctmmagnetics.com/the-basics-of-passive-harmonic-filters/>
- De Apráiz, M. (2013). Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico. *Universidad de Cantabria*.
- Electronica Lugo. (2 de Junio de 2018). *Electronica Lugo*. Obtenido de <https://electronicalugo.com/diseño-y-aplicaciones-del-circuito-de-filtro-butterworth-de-paso-bajo/>
- Erazo Velasco, I. (2021). Diseño, control y simulación de un nuevo filtro de armónicos para redes eléctricas de baja tensión. *Revista Polo del Conocimiento*, 6(10), 155-170. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i10.3192>
- Fedrigo, D. (2003). *Diseño de filtros para la eliminación de armónicos en sistemas de potencia industriales y comerciales*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Fernández, F. (27 de agosto de 2015). *Soluciones de calidad de energía*. Obtenido de <http://www.fernandezfica.cl/img/articulos/perturbaciones.pdf>
- Gers, J. (2008). *Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos*. Perú: Tecsup. Obtenido de https://app.tecsup.edu.pe/file/sga/documentos/revistaIi/Ii_3/3.pdf
- Gutierrez, G. (2019). *Control de filtro activo para la reducción del contenido armónico*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Hashim, H., Omar, R., & Rashid, M. (2016). Design and analysis of a three phase series active power filter (SAPF) based on hysteresis controller. *IET Clean Energy and Technology Conference*.
- Haustveit, E. (2015). Laboratory platform for PM machine drive study- Adaptive Torque Estimation. *Research Gate*. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.2.29569.20328>
- Hernández, J. (2020). *Capítulo 2 - Filtros eléctricos pasivos*. El Salvador: Universidad del Salvador.
- Lamich, M. (2013). *Filtros Activos de Potencia*. Barcelona. Obtenido de http://www.jcee.upc.es/JCEE2006/pdf_ponencias/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf

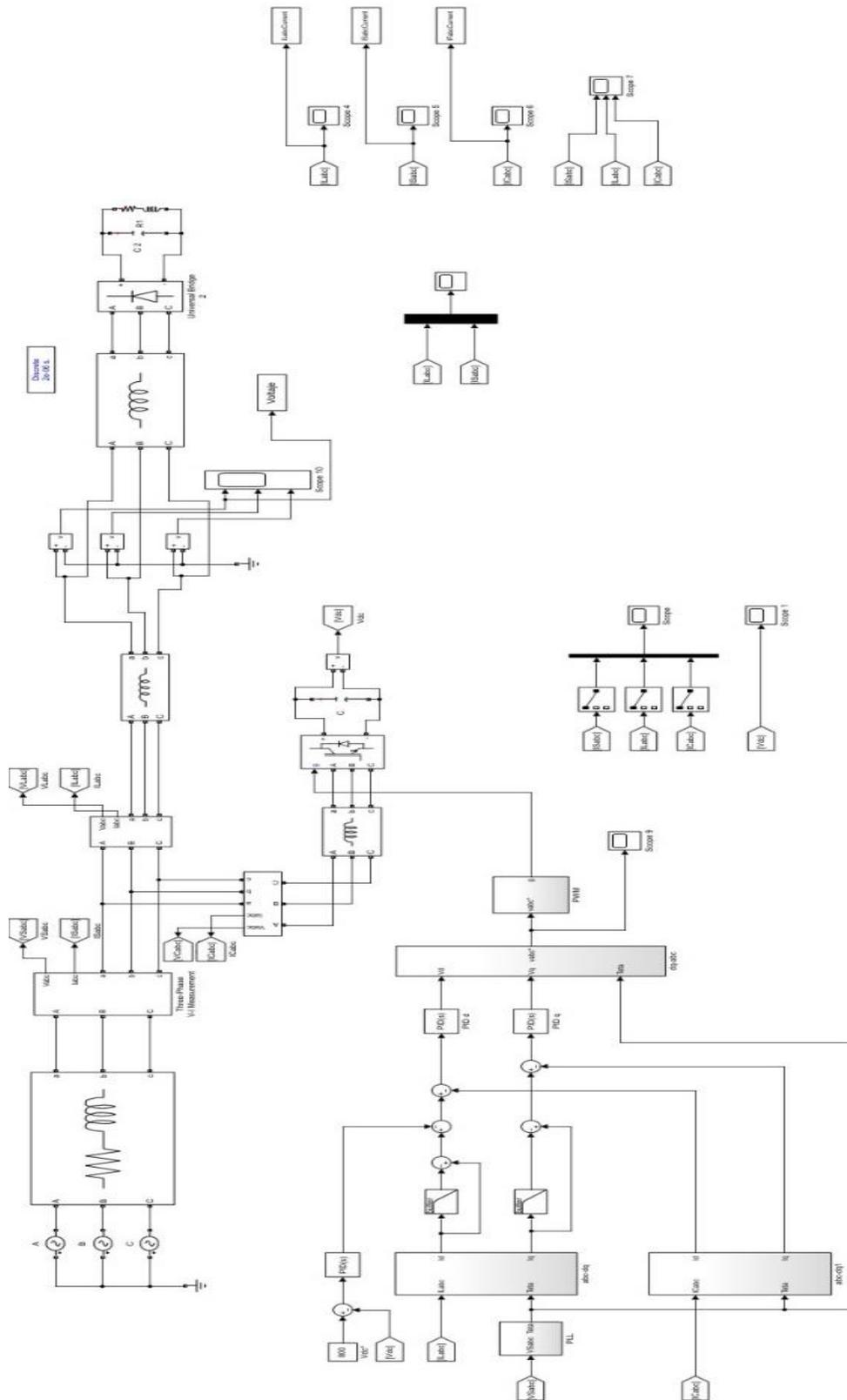
- Liu, B., Ding, Z., Zhao, H., & Jin, D. (2014). Active power filter DCBus Voltage piecewise reaching law variable structure control. *Journal of applied mathematics*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2014/835720>
- Martínez, F. (2003). Técnicas de conversión AC/DC en sistemas monofásicos con factor de potencia unitario. *Revista Tecnura*, 6(12), 31-41.
- Martinez, F., Sanabria-Morel, B., Morel-Otazu, T., & Pacher, J. (2021). Análisis de filtros activos de potencia para el equilibrio de cargas mediante convertidores de dos y siete niveles de cuatro hilos. *Revista científica de la UCSA*, 8(1), 68-90.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2021.008.01.068>
- Marulanda, J., & Cadavid, J. (2008). *Control por histéresis de la corriente en los filtros activos de potencia*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- MINEN. (1997). *Normas técnicas de los servicios eléctricos*. Obtenido de D.S. N° 020-97-EM:
https://www.osinergmin.gob.pe/cartas/documentos/electricidad/normativa/NTCSE_DS020-97-EM.pdf
- Miyara, F. (2004). *Filtros Activos*. Rosario - Argentina: Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf>
- Murillo, D. (2010). *Compensación de armónicos con un filtro activo de potencia*. Pererira - Colombia: Universidad tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2089bc2f-3ff3-4024-af3b-1283644dfdbd/content>
- Núñez Zúñiga, T., Moreno Martínez, R., Ramos Carrión, J., & Soto Loc, A. (2009). Filtro híbrido de potencia. *Revista de Investigación UNMSM*, 26-36.
- Osinergmin. (2017). *Normas reglamentarias de calidad de los servicios eléctricos*. Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/NTCSE.pdf
- Oyanguren, F. (2020). *Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva*. Universidad Nacional del Callao.
- Oyanguren, F. (2020). *Diseño de filtros para minimizar los efectos armónicos en redes eléctricas con compensación reactiva*. Callao - Perú: Universidad Nacional del Callao. Obtenido de <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5118/OYANGUREN%20RAMIREZ%20-%20FIEE%20-%202020.pdf?sequence=1&isAllowed>

- pepeenergy. (27 de octubre de 2020). *¿Qué son armónicos de la red y como puedo proteger mi instalación?* Obtenido de <https://www.pepeenergy.com/blog/armonicos-red-proteger-instalacion/>
- Pérez, D. (2021). *Filtro activo en serie para la reducción del contenido armónico*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Rodríguez, A. (2017). *Propuesta de nueva función PWM para circuitos inversores*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Saucedo, D., & Taxis, J. (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su solución*. México. D.F.: Instituto Politecnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/429/FINALsaucedomtz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Seymour, J., & Horsley, T. (2020). Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico. *Schneider Electric*.
- Tepan, J. (2022). *Control directo de tensión para un filtro activo de potencia paralelo monofásico*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Torabi, S., Ghanbari, M., Mahmoundian, M., Nayafi, A., Rodrigues, E., & Poruresmaeil, E. (2020). A Novel Control Strategy to Active Power Filter with Load Voltage Support Considering Current Harmonic Compensation. *Applied Sciences*, 1-18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/app10051664>
- Vargas, A. (2005). *Subtensiones (SAGs & DIPs) y su impacto económico en la calidad de la energía e industria guatemalteca*.
- Viego, P., Sousa, V., Gómez, J., & De Armas, M. (2008). Consideraciones sobre el efecto armónicos de tiempo en motores trifásicos asincronicos. *Revista Ingeniería Energética*, 29(1), 47-52. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127755008>
- Villatoro, B. (2009). *Teorías de diseño de filtros activos para mitigación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*. Universidad de san Carlos de Guatemala.

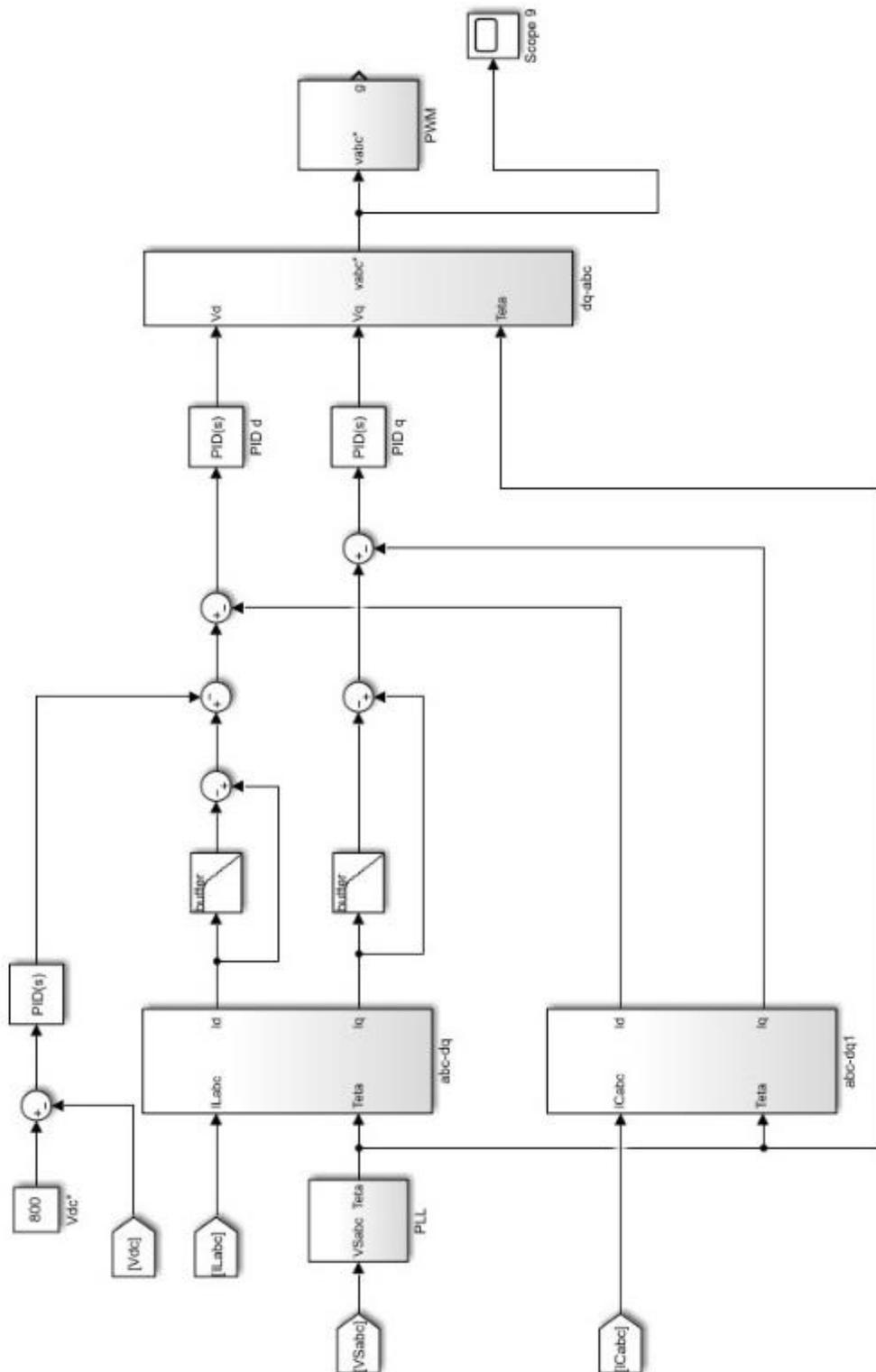
Anexo 2 Planta considerada para el estudio



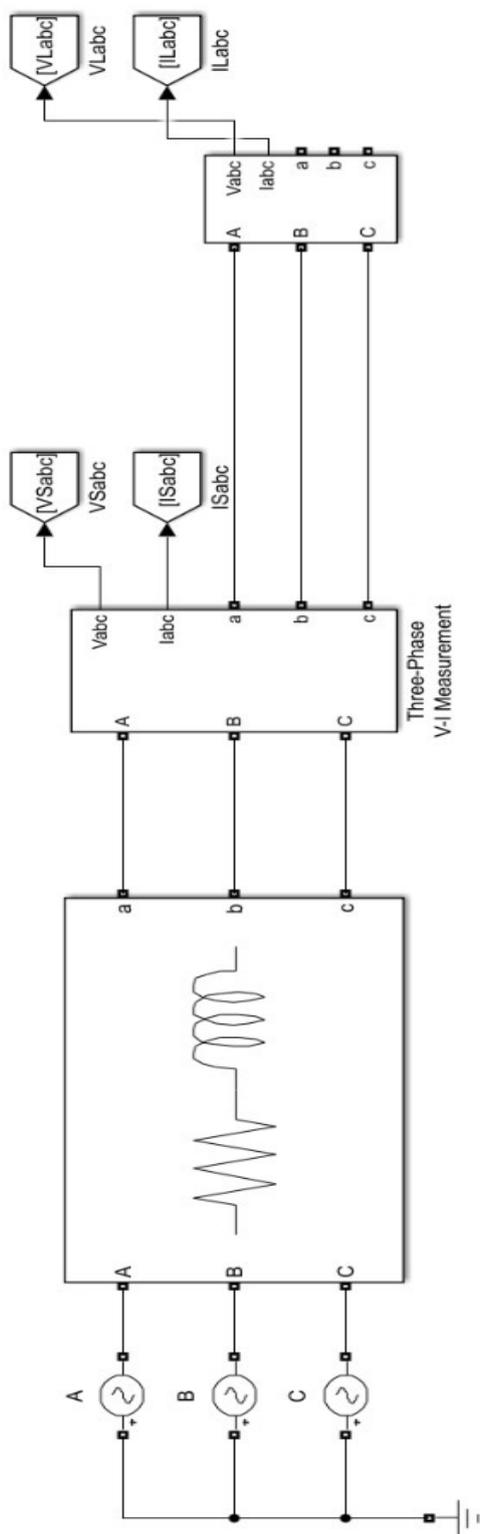
Anexo 3 Plano general de la simulación del filtro activo de armónicos



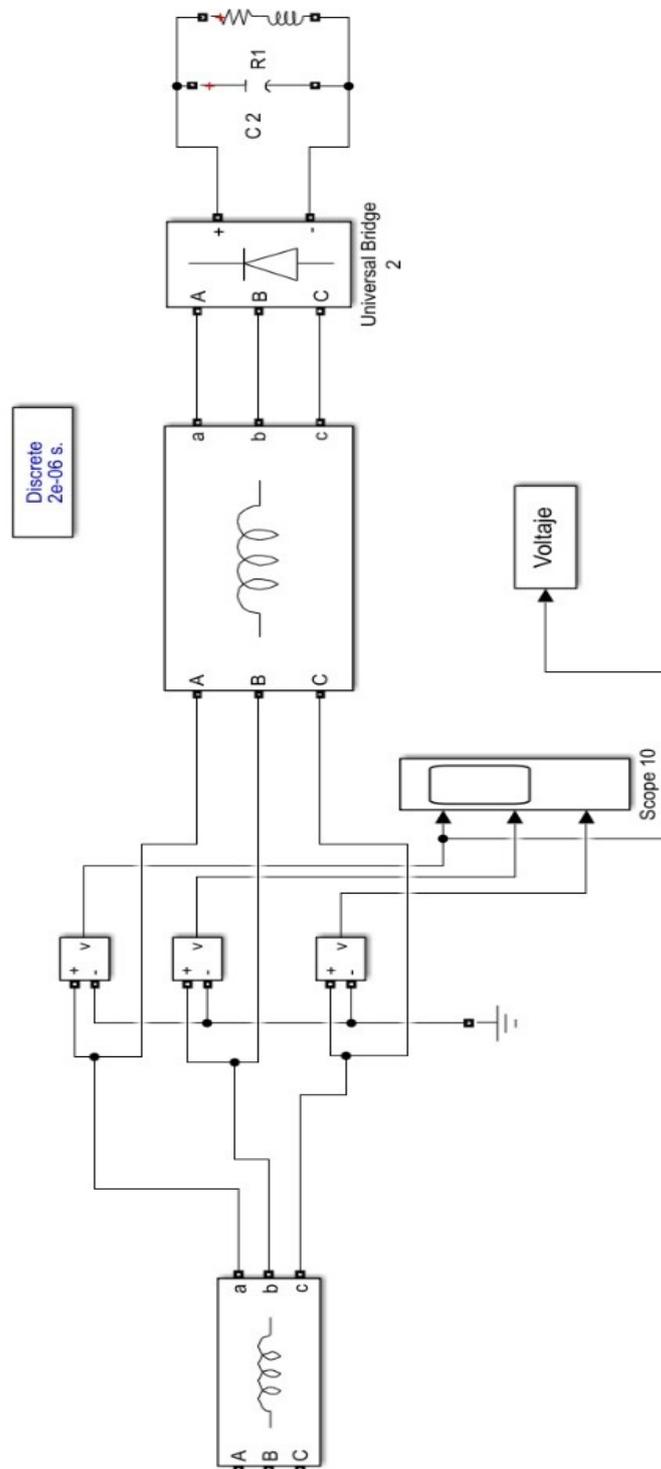
Anexo 4 Etapa de potencia del filtro activo de armónicos



Anexo 6 Fuente de energía de la instalación simulada



Anexo 7 Fuente generadora de armónicos en la simulación



DISEÑO DE FILTROS ACTIVOS PARA EL CONTROL Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN USUARIOS DE BAJA TENSIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	repositorio.utp.edu.co Fuente de Internet	1%
4	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado