



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

CONTROL DE FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO

Gustavo Gavin Gutierrez Guevara

Universidad de Pamplona

Facultad de ingeniería y arquitectura

Departamento de ingenierías eléctrica, electrónica, sistemas y telecomunicaciones

Programa de ingeniería eléctrica

Pamplona, Colombia

2019

CONTROL DE FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO

Gustavo Gavin Gutierrez Guevara

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de:
Ingeniero eléctrico

Director (a):

M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda

Codirector (a):

M.Sc. Luis David Pabón Fernández

Universidad de Pamplona

Facultad de ingeniería y arquitectura

Departamento de ingenierías eléctrica, electrónica, sistemas y telecomunicaciones

Programa de ingeniería eléctrica

Pamplona, Colombia

2019

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR
TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

**CONTROL DE FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO
ARMÓNICO**

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: 18 DE SEPTIEMBRE

FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: 18 DE DICIEMBRE

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR

AUTOR: Gustavo Gavin Gutierrez Guevara

DIRECTOR: M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda

DIRECTOR DE PROGRAMA: M.Sc. Yesid Eugenio Santafe Ramon

JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE: PhD. Aldo Pardo García

OPONENTE: M.Sc. Pablo Alexander Santafe

SECRETARIO: M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda

PAMPLONA, COLOMBIA

2019

Dedicatoria

*Los científicos estudian el mundo tal como es;
los ingenieros crean el mundo que nunca ha
sido.*

Theodore Von Karman

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Dios, sin él no hubiese sido posible la realización de este proyecto de grado con el cual se me concederá el título de Ingeniero Eléctrico de la universidad que me abrió las puertas para poder cumplir mis sueños.

En segundo lugar, deseo expresar mi agradecimiento al director de este proyecto de grado, M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo. Gracias por la confianza ofrecida desde que empezamos esta investigación.

Por ultimo agradecer a mi madre y mis abuelos por su apoyo y motivación en este proceso, gracias a ustedes por todos los consejos y la confianza que me brindaron.

Resumen

En este documento, se diseñaron dos filtros activos en paralelo con control dado por teoría P-Q y banda de histéresis para cada uno de ellos, la topología y estrategia de control de estos filtros fueron seleccionadas entre varias que se presentaron en el documento, estas se escogieron en base a la facilidad de implantación y simplicidad de control de las mismas; estos filtros se programaron en el software Simulink y se simularon en escenarios dispuestos para cada uno de ellos, uno un sistema eléctrico trifásico trifilar y el otro un sistema de características similares pero tetrafilar, ambos con problemas de armónicos, finalmente a través de estas simulaciones se observó la compensación de armónicos que realiza cada filtro.

Palabras clave: *Filtro activo, contenido armónico, armónicos, cargas no lineales, convertidores, calidad de la energía, control.*

Abstract

In this document, two active filters were designed in parallel with control given by PQ theory and hysteresis band for each of them, the topology and control strategy of these filters were selected from several that were presented in the document, these were chosen based on the ease of implementation and simplicity of control thereof; These filters were programmed in the Simulink software and simulated in scenarios arranged for each of them, one a three-phase three-phase electrical system and the other a system of similar but tetrafilar characteristics, both with harmonic problems, finally through these simulations He observed the harmonic compensation performed by each filter.

Keywords: *Active filter, harmonic content, harmonics, non-linear loads, converters, power quality, control.*

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Lista de figuras	IX
Introducción	1
Objetivos	4
Planteamiento del problema	5
1. Filtros activos	6
1.1 Definición de filtro activo.....	6
1.2 Funciones de un filtro activo.....	7
1.3 Clasificación de los filtros activos	8
1.3.1 Filtro activo en conexión paralelo.....	8
1.3.2 Filtro activo en conexión serie.....	11
1.3.3 Filtro activo híbrido.....	12
1.4 Estrategias de control.....	16
2. Control del filtro activo en paralelo.	20
2.1 Control de filtro activo en paralelo trifásico trifilar.....	20
2.1.1 Teoría de la potencia instantánea para un filtro activo en paralelo trifásico trifilar.....	21
2.1.2 Control por banda de histéresis.	26
2.2 Control de filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar.	27
2.2.1 Teoría de la potencia instantánea para un filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar.....	28
2.3 Programación de algoritmos de control de filtro activo trifásico trifilar en Simulink-Matlab.	31
2.4 Programación de algoritmos de control del filtro activo trifásico tetrafilar en Simulink-Matlab.	37
3. Escenarios de simulación y parámetros eléctricos del filtro activo en paralelo.....	42
3.1 Planteamiento de escenarios eléctricos.	42
3.2 Planteamiento de escenarios eléctricos en Simulink.	43
3.3 Parámetros eléctricos del filtro activo en paralelo.....	46
3.4 Circuito eléctrico del filtro activo en paralelo en Simulink.....	49
4. Simulación del filtro activo.....	54
4.1 Escenario trifilar.....	54
4.2 Escenario tetrafilar	61
Conclusiones	70
Bibliografía	72
Anexo A: Sintonización del controlador PI.....	75

Lista de figuras

Figura 1-1:	Principio de compensación de filtro activo en derivación [13].	9
Figura 1-2:	Configuración básica de un filtro activo de derivación [13].	10
Figura 1-3:	Convertidores PWM para filtros activos shunt [13].	11
Figura 1-4:	Filtro activo en serie [11].	12
Figura 1-5:	Filtrado activo en serie con la línea [16].	13
Figura 1-6:	Filtrado activo en serie con el filtro pasivo [16].	14
Figura 1-7:	Filtrado activo en paralelo con el filtro pasivo [16].	15
Figura 2-1:	Control de un filtro activo trifásico trifilar [13].	21
Figura 2-2:	Representación gráfica de la transformada de Clarke [13].	22
Figura 2-3:	Flujo de las potencias entre la red y la carga con un FA en paralelo [20].	25
Figura 2-4:	Esquema de control por histéresis [20].	27
Figura 2-5:	Control de un filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar [13].	28
Figura 2-6:	Cálculo de las corrientes de compensación usando la teoría p-q [23].	29
Figura 2-7:	Subsistema medidor de corriente.	31
Figura 2-8:	Medidores de corriente.	32
Figura 2-9:	Subsistema medidor de tensión.	32
Figura 2-10:	Medidores de tensión.	32
Figura 2-11:	Filtro activo.	33
Figura 2-12:	Interior del filtro activo.	33
Figura 2-13:	Transformada de Clarke.	34
Figura 2-14:	Calculo de las potencias instantáneas.	34
Figura 2-15:	Determinación de la potencia real de compensación.	35
Figura 2-16:	Calculo de corriente de referencia.	36
Figura 2-17:	Inversa de la transformada de Clarke.	36
Figura 2-18:	Controlador de banda de histéresis.	37
Figura 2-19:	Interior del filtro activo tetrafilar.	38
Figura 2-20:	Transformada de Clarke del voltaje.	38
Figura 2-21:	Transformada de Clarke de la corriente.	39
Figura 2-22:	Cálculo de las potencias instantáneas.	39
Figura 2-23:	Determinación de la potencia real de compensación.	40
Figura 2-24:	Cálculo de las corrientes de compensación en el plano complejo.	40
Figura 2-25:	Inversa de la transformada de Clarke para las corrientes.	41
Figura 3-1:	Sistema eléctrico con carga trifásica trifilar no lineal.	44
Figura 3-2:	Carga trifásica trifilar no lineal.	44
Figura 3-3:	Parámetros de la impedancia de la carga.	45
Figura 3-4:	Sistema eléctrico con carga trifásica tetrafilar no lineal.	45
Figura 3-5:	Carga trifásica tetrafilar no lineal.	46
Figura 3-6:	Parámetros de la impedancia de la carga.	46
Figura 3-7:	Convertidor para filtro activo en paralelo [13].	47
Figura 3-8:	Topologías de inversor de fuente de tensión [20].	49
Figura 3-9:	Parte eléctrica del filtro trifilar.	50

Figura 3-10:	Parte eléctrica del filtro tetrafilar.	50
Figura 3-11:	Valor de la inductancia del filtro activo.....	53
Figura 4-1:	Corrientes y tensiones de la carga trifilar.	54
Figura 4-2:	Contenido armónico de las corrientes de la carga trifilar.	55
Figura 4-3:	Potencias de la carga trifilar.	55
Figura 4-4:	Conexión del filtro activo al sistema trifilar.	56
Figura 4-5:	Voltaje de DC del inversor trifilar.	57
Figura 4-6:	Potencia real instantánea y sus componentes.	58
Figura 4-7:	Potencias de compensación de filtro trifilar.	58
Figura 4-8:	Corrientes de referencia del filtro trifilar.....	59
Figura 4-9:	Corrientes y voltajes del sistema trifilar.	59
Figura 4-10:	Inserción de filtro extra al sistema trifilar.....	60
Figura 4-11:	Corrientes de la red trifilar.	60
Figura 4-12:	Contenido armónico de las corrientes de la red trifilar.	61
Figura 4-13:	Potencias de la red trifilar.	61
Figura 4-14:	Corrientes y tensiones de la carga tetrafilar.....	62
Figura 4-15:	Contenido armónico de las corrientes de la carga tetrafilar.	62
Figura 4-16:	Potencias de la carga tetrafilar.	63
Figura 4-17:	Conexión del filtro activo al sistema tetrafilar.....	64
Figura 4-18:	Voltaje de DC del inversor tetrafilar.	64
Figura 4-19:	Potencia instantánea real y sus componentes.....	65
Figura 4-20:	Potencias de compensación de filtro tetrafilar.	66
Figura 4-21:	Corrientes de referencia del filtro tetrafilar.	66
Figura 4-22:	Corrientes y voltajes del sistema tetrafilar.	67
Figura 4-23:	Inserción de filtro extra al sistema tetrafilar.....	68
Figura 4-24:	Corrientes de la red tetrafilar.	68
Figura 4-25:	Contenido armónico de las corrientes de la red tetrafilar.	69
Figura 4-26:	Potencias de la red tetrafilar.	69

Introducción

En la actualidad, los fenómenos de la calidad de la energía causan preocupación a algunas de las empresas que prestan el servicio de energía eléctrica, debido a que estos fenómenos pueden ocasionar pérdidas en energía y económicas, daños en los equipos e inconformismo en los usuarios; uno de estos fenómenos, en los cuales se centra este proyecto son los armónicos, los cuales son ondas periódicas con una frecuencia múltiplo de la fundamental, estos armónicos son originados principalmente por cargas no lineales, las cuales son muy comunes en la actualidad [1], [2].

Los armónicos tienen efectos negativos sobre muchos elementos de la red, por ejemplo en los conductores causa el efecto skin, en los transformadores ocasionan pérdidas sin carga o de núcleo, aumento de pérdidas de joule, pérdidas por corrientes de Eddy, etc.; en los capacitores incrementa el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento dentro del mismo, lo que provoca una reducción de su vida útil; en los motores provocan pérdidas en el hierro y en el cobre, afectan la eficiencia de la máquina, también aumentan el ruido, etc.; en equipos de medición pueden ocasionar errores en las mediciones, etc; por todo esto es necesario eliminar los armónicos de la red, para lo cual en este proyecto se plantea un filtro activo [3].

Sin embargo el tema de los filtros activos es un tema de investigación conforme a los avances de la electrónica de potencia que se ha venido investigando desde el siglo pasado, por ejemplo el ingeniero brasilero Mauricio Aredes en la década de los 90 realizó varias investigaciones acerca de filtros activos, como la que realizó en 1997 en compañía de J. Hafner y K. Heumann, en la cual analizaron que los filtros activos conllevaban altos costos y el alto requisito de potencia nominal limitaba el rango de operación, por lo que propusieron un filtro híbrido con un filtro pasivo LC y un filtro activo en derivación que comparte el capacitor de filtro que se desacopla del voltaje de línea fundamental; ese mismo año los mismos tres personajes plantearon y simularon dos estrategias para controlar un filtro activo en paralelo en una red trifásica tetrafilar, la primera se basaba en una estrategia de potencia instantánea que proporciona potencia real y constante a la

fuerza aun ante tensiones desequilibradas, y la segunda basada en estrategia de corrientes sinusoidales que proporciona dichas corrientes a la fuente sin importar si hay voltajes desequilibrados [4], [5].

La temática de los filtros activos se ha investigado a lo largo de muchos años, por lo cual hay bastantes investigaciones, algunas antiguas como las mencionadas anteriormente e incluso más actuales basadas en creaciones de nuevos diseños y estrategias de control para solucionar los problemas de armónicos, como por ejemplo las realizadas en el año 2017 por V.K. Arun Shankar y N. Senthil Kumar donde implementaron un filtro activo en derivación para la compensación de armónicos en una red trifásica basado en un controlador PI (proporcional integral) y un controlador de lógica difusa (FLC); o más recientemente en el año 2018 el artículo que realizaron Indu Maurya, S.K. Gupta y Priyanka Maurya, en el que implementan un método de detección armónica basado en la transformada Wavelet (herramienta matemática para el procesamiento de señales digitales) y en técnicas basadas en ventanas (combinación del método dq-frame fundamental síncrono y la Transformación Wavelet) para un filtro activo shunt; incluso en lo transcurrido del año actual (2019) se han publicado diferentes investigaciones, como la que realizaron Sahithullah Mahaboob, Senthil Kumar Ajithan y Sasikala Jayaraman quienes realizaron el diseño de un filtro activo en paralelo pero lo hicieron mediante la optimización de luciérnaga basada en depredadores y presas que es un método para mejorar el rendimiento del dispositivo [6], [7], [8].

Por otro lado cabe resaltar que esta temática se ha investigado en muchos países, siendo Colombia uno de ellos, algunas de estas investigaciones realizadas en Colombia se deben a trabajos de grado, por ejemplo el que realizaron Miguel Ángel Bernal Piñeros y Sebastián David García Ramírez de la Universidad Tecnológica de Pereira quienes realizaron un estudio de la reducción de contenido armónico usando un filtro activo tipo serie, en el cual estudiaron cuatro posibles casos con problemas de calidad de la energía debido a los armónicos y se plantearon y simulaban soluciones con el filtro activo en serie; otro proyecto de grado que se ha estado visualizando para la realización del proyecto actual es el trabajo de grado de Alexander Casilimas Peña de la Universidad Tecnológica de Pereira quien realizó el “diseño y simulación de un filtro activo trifásico en paralelo usando el algoritmo $I_{cos(\varphi)}$ ” (el cual se utiliza para obtener las corrientes de referencia que controlan el

comportamiento del filtro) y se le hacen varias pruebas para evaluar su comportamiento ante posibles problemas [9], [10].

Basado en todo lo anterior se puede notar que los armónicos de las redes se deben compensar, y que los filtros activos como solución a los armónicos son un tema del que hay muchos antecedentes para investigar, por lo cual en este proyecto se diseñó un filtro activo para la compensación de los armónicos de una carga no lineal e implementó una estrategia de control que está basada en su simplicidad, todo esto se realizó mediante la herramienta de Simulink-Matlab.

Objetivos

- **Objetivo general**

Diseñar filtro activo con la implantación de una estrategia de control para la reducción del contenido armónico simulado en la herramienta de Simulink-Matlab.

- **Objetivos específicos**

- *Determinar la topología y estrategia de control del filtro activo centrado en la facilidad de implantación y simplicidad del control.*
- *Programar algoritmos para el control del filtro activo seleccionado.*
- *Diseñar los escenarios de simulación y parámetros eléctricos del filtro activo que se adapten a los algoritmos de control para reducir el contenido armónico.*
- *Simular el sistema frente a una carga no lineal para validar su funcionamiento.*

Planteamiento del problema

Los problemas de calidad de la energía son muy frecuentes en las redes eléctricas, problemas tales como transitorios, interrupciones de voltaje, variaciones de frecuencia, armónicos, entre otros; estos afectan dichas redes causando desde pérdidas de energía hasta daños en equipos, lo cual afecta tanto a las empresas distribuidoras como a los usuarios finales de energía eléctrica, por lo cual es necesario eliminar estos fenómenos cuando se presentan en la red [11]. Uno de los problemas de calidad de la energía, y en el que se enfocó este proyecto son los armónicos, los cuales en la actualidad son cada vez más comunes debido a que estos son producidos por cargas no lineales que día a día abundan más, gracias a que la mayoría de equipos actuales basan su funcionamiento en componentes electrónicos como diodos, transistores, tiristores, triacs, etcétera, por lo cual se deben tomar medidas para contrarrestar estos armónicos, ya que afectan de gran manera el sistema eléctrico, llegando a causar problemas como: el aumento de las pérdidas de joule, el sobrecalentamiento y reducción de vida de transformadores, motores, generadores y conductores, fallas en bancos de capacitores y en transformadores, efectos de resonancia, vibración de motores y generadores, interferencia en sistema de telecomunicaciones, problemas de funcionamiento en cargas electrónicas sensibles, entre otros [12].

Lo expuesto anteriormente justifica la necesidad de buscar soluciones para contrarrestar los armónicos que se presentan en el sistema; los dispositivos más comunes para mitigar estos armónicos son los filtros, ya sean pasivos o activos, aunque los primeros tienen una desventaja de que solo se enfocan en una frecuencia o en una banda-base que normalmente es poco amplia, y además no pueden hacer mucho contra los interarmónicos, por otro lado los filtros activos con los nuevos avances de la electrónica emplean sensores y actuadores más modernos para eliminar las desventajas mencionadas anteriormente, además se basan en dispositivos electrónicos por lo que tienen un campo amplio y moderno de investigación [12].

1. Filtros activos

En este capítulo se observan las diferentes clases de filtros activos que generalmente se utilizan para la eliminación de armónicos en las redes eléctricas, se describe de forma general las características de cada una de estas clases, las ventajas y desventajas de cada topología y la estructura de las mismas, exponiendo información precisa de estas diferentes topologías para dejar en claro porque se escogió una de ellas.

Por otro lado también se exponen diferentes métodos y teorías que se utilizan para el control de estos filtros activos, y se observan las características principales de estas estrategias y su simplicidad, para exponer porque se escogió una de estas estrategias para el control del filtro.

1.1 Definición de filtro activo

Los filtros activos son circuitos electrónicos de potencia que están formados por convertidores estáticos de potencia que se conectan en serie o en paralelo con la carga no lineal que genera armónicos, los cuales mediante algoritmos de control, actúan como fuentes de corriente o de voltaje, eliminando de forma instantánea las armónicas generadas por dichas cargas [11].

Como se mencionó anteriormente los filtros actúan como fuente de corriente o de voltaje, esto depende de la topología y de la onda que se quiera corregir ya sea la onda de la tensión o la onda de la intensidad, por ende es necesario tener claras las diferentes topologías de filtro, las cuales se exponen en este capítulo más adelante.

1.2 Funciones de un filtro activo

Como se ha señalado anteriormente la principal función de un filtro activo es eliminar armónicos, sin embargo su campo de acción no se limita solo a eso, ya que estos dispositivos cumplen varias funciones que dependen del tipo de filtro y tecnología del mismo. Por ejemplo según Miguel Ángel Sánchez Cortés en su libro "Calidad de la energía" de 2009 dijo que los filtros activos para acondicionamiento de la potencia suministran las siguientes funciones [11]:

- *Compensación de potencia reactiva.*
- *Compensación armónica, aislamiento armónico, amortiguamiento armónico, y terminación armónica.*
- *Compensación de voltaje o de corriente de secuencia negativa, ayudando así al balanceo de las corrientes y de los voltajes.*
- *Regulación del voltaje.*

Aunque los filtros activos poseen muchas más funciones, como las que expone Manuel Lamich del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Politécnica de Catalunya en su artículo "Filtros Activos: Introducción y Aplicaciones", donde dice que las funciones de los filtros activos son:

- *Reducción de los armónicos de corriente que circulen por la red, entre el FAP y los centros de generación de energía.*
- *Reducción de la corriente por el neutro. Si este existe la amplitud de los armónicos de corriente múltiplos de tres se suman a través del neutro.*
- *Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.*
- *Corrección del factor de potencia provocado por un $\cos\Phi$ distinto de la unidad.*
- *Equilibrado de la corriente que circula por las distintas fases.*
- *Equilibrado de la tensión entre fases y con el neutro.*
- *Regulación de la tensión y reducción del Flicker.*

1.3 Clasificación de los filtros activos

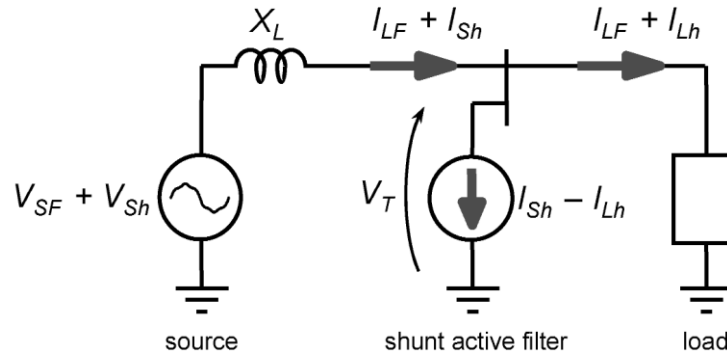
Los filtros activos se pueden clasificar en diferentes tipos, de acuerdo a la forma en que se conectan a la red, a continuación se exponen algunos, como los son el filtro en conexión paralelo, también conocido como filtro en derivación o filtro shunt que es el más común, también se describen los filtros en conexión serie y los filtros híbridos que son una combinación entre filtrado pasivo y un filtro activo.

1.3.1 Filtro activo en conexión paralelo

Es la configuración más conocida, además de la eliminación de armónicos permite hacer correcciones del factor de potencia, equilibrar corrientes de línea en casos de carga desbalanceada, corregir Flicker, además de tener la capacidad de atenuar la propagación de armónicos a causa de resonancias ente los filtros pasivos y la impedancia de la red. El filtro se ubica en paralelo con la carga que genera armónicos en el punto de conexión de la carga y allí ejerce su función, que se consiste en suministrar a la red en ese nodo y en contrafase las corrientes armónicas que genera la carga, de modo que se anulen entre sí en dicho nodo; el filtro activo actúa como fuente de corriente [13], [14].

Según Akagi en el libro “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning”, en la figura 1-1 se resume el concepto básico de un filtro de derivación, ya que él dice que en la figura “una carga no lineal extrae un componente de corriente fundamental I_{LF} y una corriente armónica I_{Lh} del sistema de potencia. La corriente armónica I_{Sh} es inducida por la fuente de voltaje armónico V_{Sh} . Un filtro activo de derivación puede compensar tanto las corrientes armónicas I_{Sh} como I_{Lh} . Sin embargo, la función principal de un filtro activo de derivación es la compensación de la corriente armónica de carga I_{Lh} . Esto significa que el filtro activo confina la corriente armónica de carga en los terminales de carga, dificultando su penetración en el sistema de potencia. Para simplificar, el sistema de alimentación se representa sólo por una impedancia equivalente X_L en la Fig. 1-1. Si la corriente armónica de la carga I_{Lh} fluye a través del sistema de alimentación, produce una caída de tensión armónica adicional igual a $X_L * I_{Lh}$ que degenera aún más la tensión del terminal de carga V_T ” [13].

Figura 1-1: Principio de compensación de filtro activo en derivación [13].



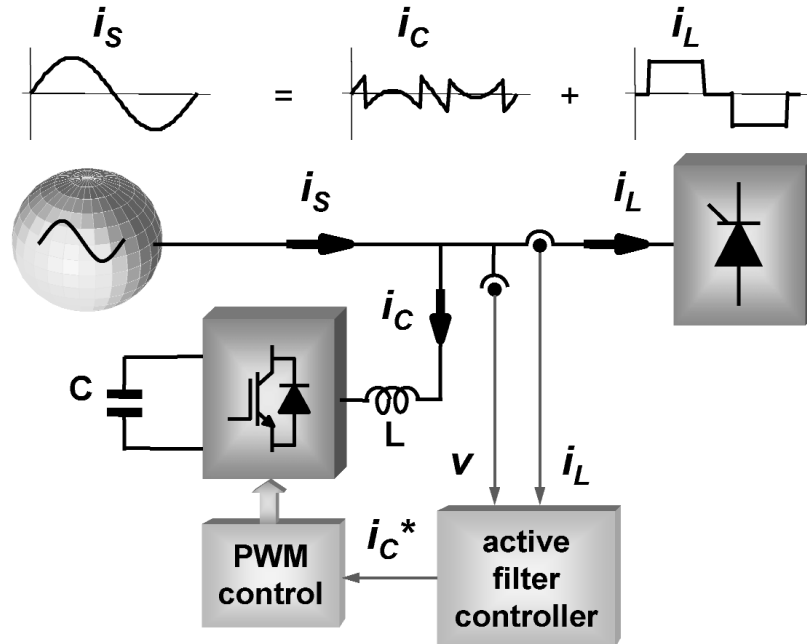
Además Akagi también expone que “si la impedancia del sistema X_L es baja, la corriente armónica I_{Sh} que debe ser compensada por el filtro activo de derivación puede ser muy alta, esto puede aumentar considerablemente la potencia del filtro activo de la derivación, haciéndolo poco práctico. Por lo tanto, si el sistema de energía tiene una alta capacidad de cortocircuito, que es lo mismo que decir que tiene una baja impedancia equivalente X_L , el filtrado activo de I_{Sh} actual debe dejarse para otras configuraciones de filtro” [13].

Un filtro activo de derivación puede presentar una característica de compensación selectiva, es decir, es posible seleccionar qué corriente se va a compensar, ya sea la corriente de origen I_{Sh} y/o la corriente de carga I_{Lh} , o incluso un conjunto escogido de componentes armónicos de ellos. La mayoría de las aplicaciones de filtros activos de derivación están destinadas a compensar los armónicos de corriente de carga producidos por una carga específica [13].

Los filtros activos en paralelo están compuestos en general por dos bloques, un convertidor PWM (procesamiento de potencia) y un controlador de filtro activo (procesamiento de señal), el primero es responsable del procesamiento de energía al sintetizar la corriente compensadora que debe extraerse del sistema de alimentación y el segundo es responsable del procesamiento de señales en la determinación en tiempo real de las referencias de corriente de compensación instantánea, que se pasan continuamente al convertidor de PWM. En la Figura 1-2 se muestra la configuración básica de un filtro activo en paralelo para la compensación de armónicos de una carga específica. En la figura se

observa un convertidor alimentado por tensión con un controlador de corriente PWM y un controlador de filtro activo que realiza un algoritmo de control casi instantáneo [13].

Figura 1-2: Configuración básica de un filtro activo de derivación [13].



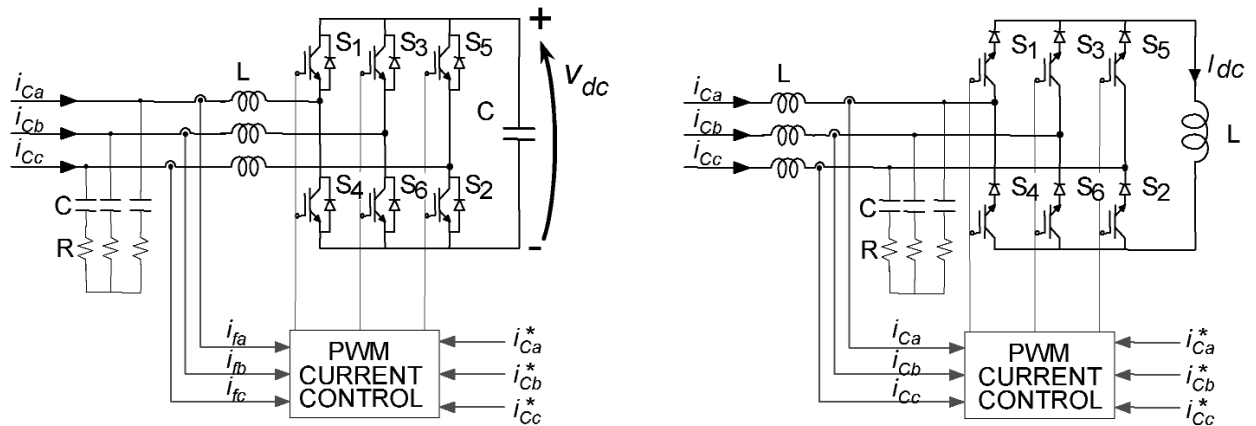
Cabe resaltar que el convertidor PWM debe tener una alta frecuencia de conmutación (f_{PWM}) para reproducir con precisión las corrientes compensadoras. Comúnmente, $f_{PWM} > 10f_{hmax}$, donde f_{hmax} representa la frecuencia del orden más alto del armónico que debe ser compensado. En la Fig. 1-2, el condensador DC y el IGBT con diodo antiparalelo se utilizan para indicar un filtro activo de derivación que se construye a partir de un convertidor de fuente de tensión (VCS). Hoy en día, casi todos los filtros activos de derivación en operación comercial utilizan convertidores de fuente de tensión [13].

- **Convertidores PWM para filtros activos de derivación**

En la figura 1-3 se observan dos convertidores de potencia trifásicos para implementar filtros activos en paralelo, por un lado en la parte izquierda se aprecia un convertidor de fuente de voltaje (VSC) y en la parte derecha se observa un convertidor de fuente de corriente (CSC), los controladores PWM asociados a estos convertidores tienen diseños diferentes, pero ambos tienen la función obligar al convertidor a comportarse como una fuente de corriente controlada. En la figura también que se puede observar que no hay

fuente de alimentación, solo elementos de almacenamiento, C en un lado y L en el otro, los cuales están en los lados de corriente continua de cada convertidor, esto debido a que el filtro debe comportarse como un compensador, es decir que la potencia promedio intercambiada entre el filtro activo y el sistema debe ser cero [13].

Figura 1-3: Convertidores PWM para filtros activos shunt [13].



▪ Controladores de filtro activos

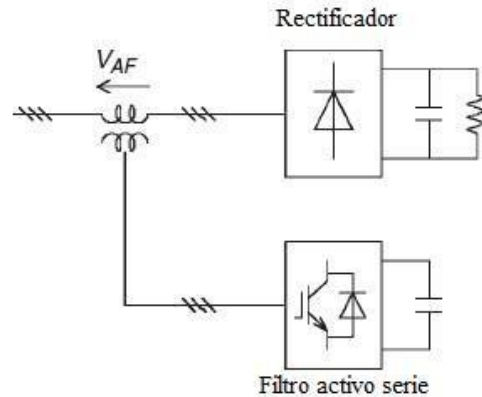
El algoritmo de control implementado en el controlador del filtro activo de derivación determina las características de compensación del filtro activo de derivación. Hay muchas formas de diseñar un algoritmo de control para el filtrado activo, por ejemplo la teoría $p-q$ forma una base muy eficiente para diseñar controladores de filtro activos, aunque estas formas se exponen más adelante [13].

1.3.2 Filtro activo en conexión serie

Los filtros activos en serie son una configuración menos utilizada que los filtros en derivación que comúnmente se acompaña de un filtrado pasivo complementario, estos filtros se conectan entre la red y la carga generadora de armónicos mediante un transformador de acoplamiento como se observa en la figura 1-4, aportando la tensión necesaria para que la corriente de la línea esté libre de armónicos, realmente el sistema del filtro activo en serie actúa como una impedancia variable, con un valor idealmente nulo para la componente fundamental e infinito para las demás componentes; el convertidor

actúa como fuente de tensión, aportando el valor necesario para conseguir la impedancia requerida según los armónicos de la carga [15].

Figura 1-4: Filtro activo en serie [11].



En cuanto a estructura es similar al filtro activo en derivación, ya que cuenta con un bloque de control del filtro cuya función ya se mencionó anteriormente, y un bloque del convertidor o inversor PWM quien como se dijo anteriormente es responsable del procesamiento de energía al sintetizar los armónicos que se deben compensar, la diferencia notable en la estructura del filtro activo en serie respecto al paralelo es el transformador de acoplamiento que es modelado como un transformador de corriente conectado al filtro activo en serie con la red eléctrica y la carga debido a su estructura, su función es de aislar los dispositivos de protección y medición de la red [15].

1.3.3 Filtro activo híbrido

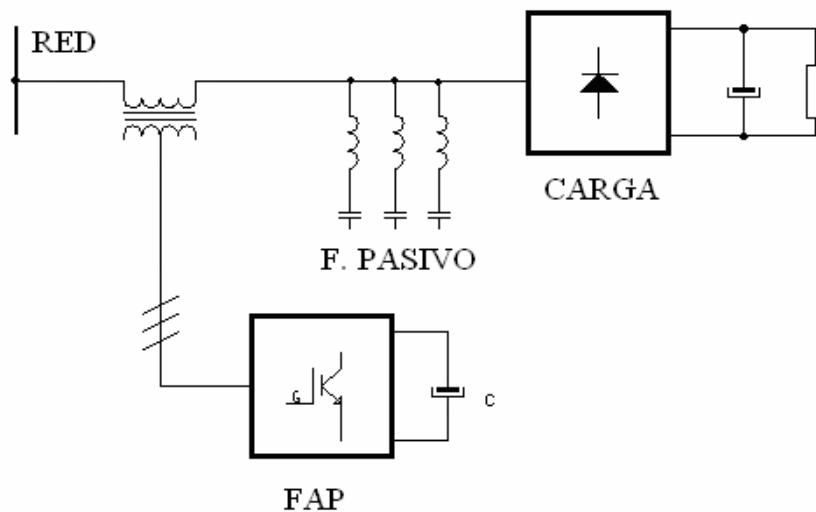
Los filtros activos híbridos constan de un sistema de filtrado pasivo convencional en conjunto con un filtro activo que se sitúa en diferentes posiciones en relación con el filtro pasivo. Esta combinación evita los problemas de resonancias entre los componentes del filtro pasivo y la impedancia de línea y permite altas potencias de filtrado a un costo económico inferior al del filtrado activo puro. Como consta de la composición de dos filtros, existen diferentes estructuras básicas que dependen de la conexión entre los filtros entre las cuales se encuentran [15]:

- **Filtro activo en serie con la línea**

Este sistema es la combinación de un filtro activo que se conecta en serie con la red entre la línea y la carga y se comporta como una impedancia variable de tal modo que la impedancia es nula para la componente fundamental y de carácter resistivo y elevada para los armónicos, en otras palabras el filtro activo actúa como un aislador de armónicos. Como el filtro activo impide el paso de armónicos desde y hacia la red, los armónicos generados en la carga circularán por el filtro pasivo. De este modo la tensión en el lado de línea del filtro activo serie es teóricamente la correspondiente a la frecuencia fundamental [16].

La ventaja de este sistema es que la tarea de la cancelación corre a cargo del filtro pasivo por lo cual el filtro activo se dimensiona para una potencia de tan sólo el 2% al 5% de la carga, debido a esto este sistema es menos costoso que un filtro activo puro, que debe asumir la totalidad de la potencia de cancelación. En la figura 1-5 se observa un filtro activo formado por un convertidor PWM de tensión conectado en serie con la línea a través de un transformador de acoplamiento, donde el secundario de este transformador se dimensiona para la totalidad de la corriente nominal de la carga, aunque la tensión que debe soportar es la debida a las componentes armónicas, mientras que es nula para la componente fundamental [16].

Figura 1-5: Filtrado activo en serie con la línea [16].

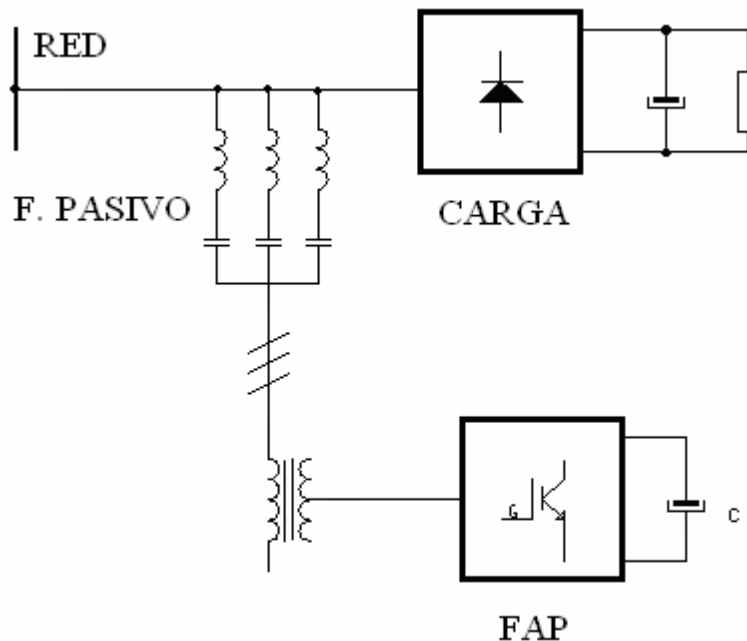


- **Filtro activo en serie con el filtro pasivo**

Este sistema es similar al mencionado en el inciso anterior en donde la sección correspondiente al filtro activo está situada en serie con el filtro pasivo. El sistema se comporta como una fuente de tensión variable, cuyo valor es teóricamente nulo para la frecuencia fundamental y de igual valor al de las componentes armónicas de tensión en la carga. Por esto, la tensión en el punto de conexión del filtro, es la correspondiente a la frecuencia fundamental, como en el caso anterior [16].

El filtro activo presenta impedancia nula a la componente fundamental y variable para las componentes armónicas. Este método tiene la ventaja de que la sección de filtro activo debe soportar solo las corrientes armónicas que circulan por el filtro pasivo y no la corriente principal de la carga. En la figura 1-6 se puede apreciar el sistema donde el filtro activo está constituido por un convertidor estático PWM de tensión conectado en serie con el filtro pasivo a través de un transformador [16].

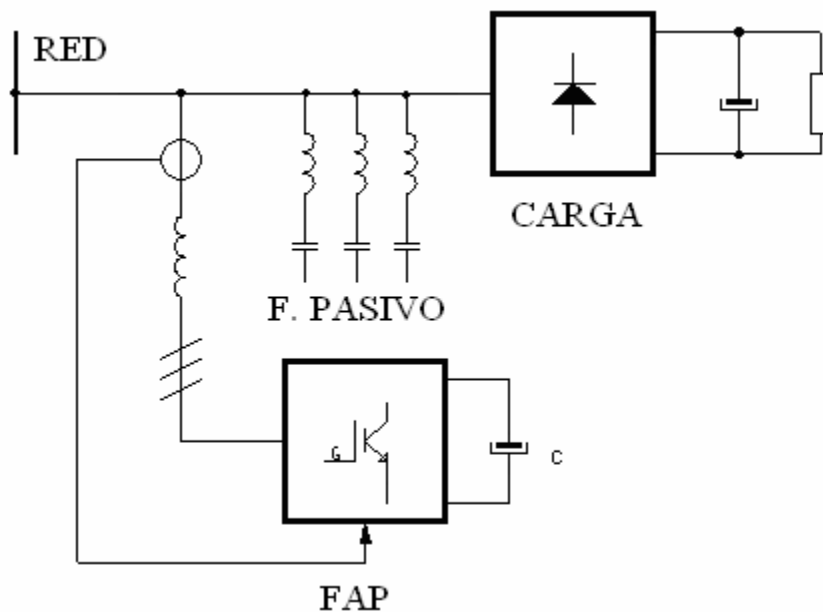
Figura 1-6: Filtrado activo en serie con el filtro pasivo [16].



- **Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo**

En este sistema, el filtro pasivo es el encargado principal de la eliminación de armónicos, sintonizado con los armónicos más bajos y de mayor contenido. Además en paralelo con el filtro pasivo hay un filtro activo de corriente o tensión que es el encargado de eliminar los armónicos de frecuencias más elevadas, en la figura 1-7 se puede apreciar este sistema formado por el filtro pasivo en paralelo con el activo [16].

Figura 1-7: Filtrado activo en paralelo con el filtro pasivo [16].



Otro sistema existente de filtros híbridos es el filtro activo en serie con la línea y con el filtro pasivo que es una combinación de los anteriores y es basado en los mismos principios, en donde la acción de los filtros activos complementa y optimiza la del filtro pasivo [16].

Akagi en el libro “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning” realizó una comparación entre los filtros activos puros (como lo son el filtro activo en derivación y el serie) y los filtros activos híbridos, en él expuso que “un filtro activo puro proporciona múltiples funciones, como filtrado de armónicos, amortiguación, aislamiento y terminación, equilibrio de carga, control de potencia reactiva para la corrección del factor de potencia y la regulación del voltaje, reducción del parpadeo de voltaje y/o sus combinaciones. Por lo cual, el filtro activo puro es muy adecuado para el

"acondicionamiento de potencia" de cargas no lineales como hornos de arco eléctrico y alimentadores de distribución de servicios públicos/industriales. Por otro lado, un filtro activo híbrido se dedica exclusivamente al "filtrado armónico" de rectificadores de diodos trifásicos, porque no tiene capacidad de control de potencia reactiva desde un punto de vista práctico, aunque lo tiene desde un punto de vista teórico" [13].

1.4 Estrategias de control

El objetivo de las estrategias de control es obtener señales idóneas para activar los semiconductores de potencia con el objeto de generar las corrientes y voltajes de compensación.

Hay que tener claro que al hablar de métodos de control hay que distinguir entre lo que es la determinación de los valores de corriente o tensión y lo que es propio del control del convertidor estático. Lo primero se refiere a la definición de los algoritmos, cálculos o estrategias, necesarios para la discriminación entre lo que es la potencia activa y potencia no activa o su equivalente en valores de tensión o corriente. Posteriormente los valores de tensión o corriente deberán ser transformadas en las correspondientes tensiones o corrientes de compensación, que deberán ser creadas mediante los convertidores estáticos insertados en alguna de las topologías de los filtros de potencia que se han descrito anteriormente [15], [16].

Dentro de los métodos que se utilizan en el control para la determinación de los valores de corriente o tensión cabe resaltar dos grandes grupos, que son los desarrollados en el dominio de la frecuencia y los desarrollados en el dominio del tiempo [15], [16].

- **Métodos de control en el dominio de la frecuencia**

A través de estos métodos se discrimina la componente fundamental, de las componentes armónicas y de este modo se genera la señal de control para conseguir la compensación. Generalmente estos métodos se encuentran fundamentados en el análisis de las señales distorsionadas mediante el método de Fourier, ya sea el método de la transformada rápida

de Fourier (FFT), o la transformada discreta de Fourier (DFT), aunque existen otros métodos de control basados en otros principios, como la utilización de filtros de Kalman o de la transformación compleja Wavelet, pero la complejidad de los estos y la elevada necesidad de cálculo no los ha hecho muy populares [15], [16].

En estos métodos en general la frecuencia de muestreo debe ser superior al doble de la frecuencia más alta de la señal a analizar, y la frecuencia de las señales presentes debe ser un múltiplo de la fundamental. Por otro lado estos métodos tienen la desventaja de que precisan gran potencia de cálculo y son lentos de respuesta, puesto que la señal de control se origina después de haber hecho el análisis de la señal periódica [15], [16].

▪ **Métodos de control en el dominio del tiempo**

Estos métodos están basados en la obtención, de forma instantánea, de las señales de control precisas para la compensación. La gran ventaja de estos métodos al contrario de los anteriores es la elevada velocidad de respuesta ante cambios en el sistema de potencia. Estos son los métodos que se han venido utilizando preferentemente desde 1990, a partir de la primera Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea dirigida al control de filtros activos, introducida por Akagi y otros en 1983 [15], [16].

Durante los últimos años se han desarrollado otros métodos en el dominio del tiempo, en los cuales generalmente se obtienen las corrientes de compensación, y no las tensiones, por lo que son muy aptos para la estructura de los filtros activos de potencia que actúan como fuentes de corriente en paralelo con la red. Estos métodos permiten la discriminación entre las componentes de corriente o potencia activa, reactiva en sentido convencional y la restante debida a los armónicos, con lo que se puede hacer compensación independiente para estas componentes, cabe resaltar que para estos métodos se debe realizar transformación de coordenadas. Algunos de estos métodos son la teoría de la potencia instantánea y el sistema de referencia síncrono [15], [16].

Hay otros métodos que no exigen la necesidad de hacer transformaciones de sistemas de coordenadas de las magnitudes a controlar y resultan más simples, aunque no suelen discriminar entre las componentes activas, reactivas y armónicas. En estos métodos se controla el valor de la tensión en el bus de c.c., constituido por un condensador que

intercambia energía con la red y que debe mantener constante el valor medio de su tensión. Algunos de estos métodos son el control mediante medida de la corriente en la red, el control mediante medida de la corriente en la carga, y el control por ciclo (UCI) [15], [16].

Por otro lado para el control de los convertidores una vez obtenidos los valores de las corrientes y tensiones generalmente se utilizan métodos como control por histéresis, modulación PWM y Space Vector Modulation, en el primero, las órdenes de mando de conmutación a los semiconductores se obtienen mediante una comparación, dotada de una banda de histéresis, entre el valor de consigna y el valor real. Lo cual implica que la frecuencia de conmutación será variable, aunque el tiempo de respuesta es muy rápido; el segundo método consiste en la comparación entre la señal de consigna y una onda triangular de frecuencia y amplitud fijas, o su equivalente conceptual en el caso de hacer control digital. Las señales lógicas de la comparación son utilizadas para gobernar los semiconductores del convertidor. Es un método con respuesta rápida y es sencillo de implementar [15], [16].

En cuanto al método de Space Vector Modulation, “es un método en el que se hace uso de la teoría de los vectores espaciales, y en donde la posición del vector espacial de la magnitud a controlar está situada en un espacio complejo dividido en seis sectores. La posición del vector, en un momento determinado, se fija por la combinación obtenida mediante conmutación de los vectores adyacentes, según sea el sector en que se encuentre el vector representativo de la magnitud a controlar. Es un método propio de sistemas trifásicos, más complicado que los anteriores y más difícil de implementar” [15], [16].

Basado en lo descrito en este capítulo, este proyecto se centró en un filtro activo en paralelo, debido a que son los más comunes, por lo cual tienen un mayor campo de investigación, además al funcionar como fuente de corriente son los más idóneos para compensar los armónicos de la corriente, los filtro híbridos también fueron una opción fuerte pero como se mencionó anteriormente estos simplemente se dedican al filtrado de armónicos, mientras que un filtro activo puro tiene más funciones por lo cual es mejor utilizar un filtro activo en paralelo.

Por otro lado al hablar del control del filtro activo en paralelo hay muchas opciones tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, una opción fuerte era una de las técnicas de Fourier, pero estas son un poco lentas y/o complejas, por lo cual se descartó y se optó por la estrategia de la teoría instantánea o teoría p-q el cual es un método rápido y cumple con el objetivo en simplicidad de control; la otra parte del control se decidió realizar por medio de control por banda de histéresis, el cual es un método muy rápido y sencillo.

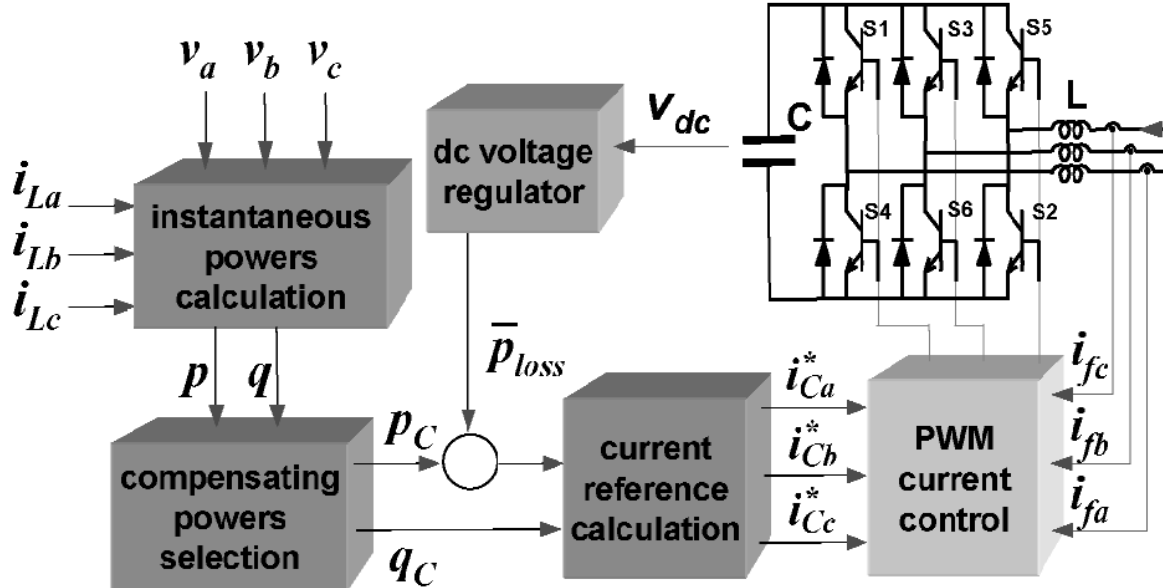
2. Control del filtro activo en paralelo.

En este capítulo se expone cada parte del control requerido por un filtro activo en paralelo trifásico, se observa el caso del control tanto para uno filtro activo trifásico trifilar como para uno tetrafilar, se profundiza en el tema de la teoría p-q y el control por banda de histéresis y se explica teóricamente como es el proceso de compensación y como se controla el filtro activo mediante estos métodos. Por otro lado se observa la implementación de este control en la herramienta de Simulink-Matlab para los dos casos.

2.1 Control de filtro activo en paralelo trifásico trifilar.

El control de un filtro activo trifásico trifilar normalmente consta de cuatro bloques de control funcionales para la parte de la determinación de los valores de corriente o tensión de compensación y un bloque propio del control del convertidor estático como se observa en la figura 2-1, la primera parte del control en este proyecto se realiza mediante la teoría de la potencia instantánea de Akagi, en ella se determinan las potencias instantáneas, las potencias de compensación y el regulador del voltaje del condensador y a partir de esto se calculan las corrientes de referencia que posteriormente se comparará con las corrientes de compensación que salen del convertidor mediante la segunda parte que se realiza a través el control de banda de histéresis [13], [17].

Figura 2-1: Control de un filtro activo trifásico trifilar [13].



2.1.1 Teoría de la potencia instantánea para un filtro activo en paralelo trifásico trifilar.

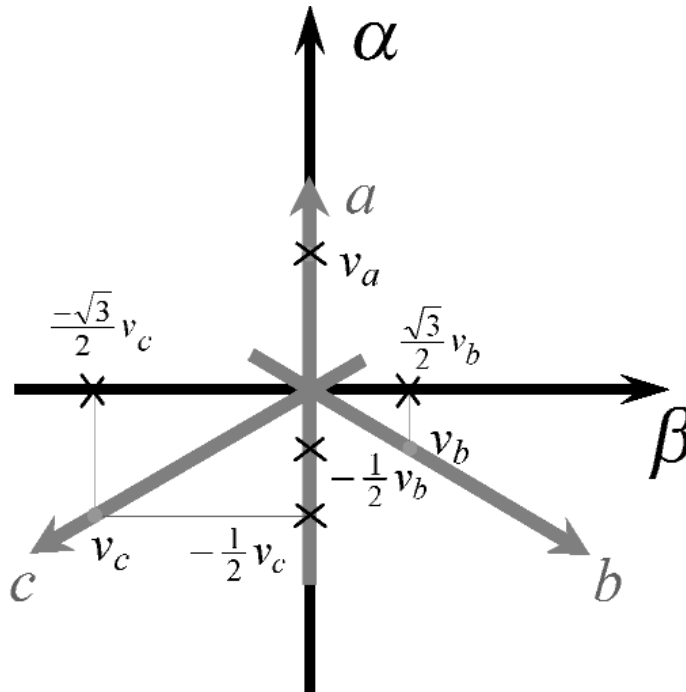
La teoría de la potencia instantánea es usada en el control de filtros activos de potencia, tiene capacidad de compensación de corrientes armónicas y de mejora del factor de potencia en sistemas trifásicos de tres y cuatro hilos, esta estrategia se basa en el cálculo de la potencia instantánea consumida por la carga en un marco de referencia estacionario (por lo cual es necesario utilizar transformaciones entre los sistemas de coordenadas) y su posterior utilización para la determinación de la corriente de referencia [13].

Para iniciar el proceso del cálculo de las potencias instantáneas es necesario realizar primeramente una transformación de coordenadas de los voltajes y corrientes en las fases ABC a un plano complejo (en este caso como es un sistema trifásico sin neutro) de dos ejes ortogonales denominado $\alpha\beta$, para esto se utiliza la transformada de Clarke, mediante la cual se transforman las tensiones y corrientes mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2, además en la figura 2-2 se puede observar la representación gráfica de este proceso [13], [16], [18].

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Figura 2-2: Representación gráfica de la transformada de Clarke [13].



Una vez transformadas las tensiones y corrientes a coordenadas $\alpha\beta$ se pueden calcular las potencias instantáneas, para esto Akagi define un vector de voltajes instantáneos a partir de los componentes de voltaje α y β y de igual forma se hace con la corriente, esto se puede observar en la siguiente ecuación [13]:

$$e = v_\alpha + jv_\beta \quad , \quad i = i_\alpha + ji_\beta \quad (2.3)$$

El concepto convencional de la potencia compleja utiliza un fasor de voltaje y el conjugado de un fasor de corriente. Por lo cual, Akagi define una potencia compleja instantánea utilizando los vectores instantáneos de voltaje y corriente. La potencia compleja

instantánea se define como el producto del vector de voltaje e y el conjugado del vector de corriente i^* , dado en forma de números complejos [13]:

$$s = ei^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2.4)$$

A partir de esta ecuación se pueden definir las potencias real e imaginaria respectivamente, pero estas también se pueden definir de la siguiente manera [13], [19]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cabe resaltar que la potencia p se puede expresar en W porque es el producto de tensiones y corrientes pertenecientes a los mismos ejes, mientras que la potencia q no puede expresarse ni en W ni en VA , puesto que es el producto de tensiones y corrientes situados en ejes perpendiculares distintos. Es por esto por lo que a esta última potencia se le denomina potencia imaginaria instantánea [13].

Continuando con el proceso que se observa en la figura 2-1, una vez determinadas las potencias instantáneas se procede a la selección de las potencias de compensación ya que a partir de estas se calculan las corrientes de referencia.

En las cargas no lineales y/o desequilibradas, es común encontrar que las potencias p y q tienen componentes de potencia constante y componentes de potencia oscilante. Las primeras corresponden a los valores promedio de la potencia activa y reactiva respectivamente, que se originan por las componentes de secuencia positiva de voltajes y corrientes de la carga. Las segundas, componentes de potencia oscilante, están conformadas por la sumatoria de ondas senoidales con frecuencias múltiplos de la fundamental de la red cuyo valor medio es nulo y corresponden generalmente a la contribución de los armónicos y/o a la presencia de las componentes de secuencia negativa de tensiones y corriente. Esto se puede expresar mediante de las siguientes ecuaciones [20], [21]:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.6)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.7)$$

Donde:

p Y q : son las potencias instantáneas real e imaginaria respectivamente.

\bar{p} Y \bar{q} : son las potencias instantáneas constantes real e imaginaria respectivamente.

\tilde{p} Y \tilde{q} : son las potencias instantáneas oscilantes real e imaginaria respectivamente.

Para calcular las corrientes de compensación, se debe partir de que la red suministra la componente constante de la potencia instantánea, sumada a la potencia que requiere el condensador del filtro activo y el filtro activo en sí, suministrará a la carga las potencias restantes. Por lo cual se puede expresar que [20]:

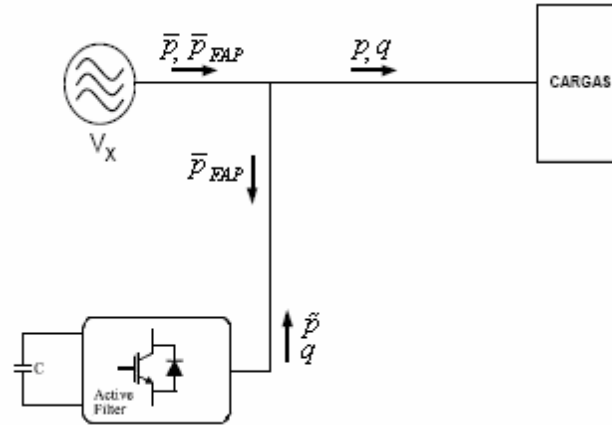
$$P_{red} = \bar{p} + p_{FAP} \quad (2.8)$$

Donde:

P_{red} : es la potencia que suministra la red.

p_{FAP} : "representa las pérdidas que presenta el convertidor de potencia y se obtiene mediante un regulador de voltaje tipo proporcional, el cual al detectar las descargas del condensador conectado al lado de continua del inversor incrementa el valor de la potencia de pérdidas con objeto de recuperar el valor de la tensión prevista en el condensador" [20].

Por otro lado, las potencias que debe suministrar el filtro activo para acondicionar las corrientes de la carga y compensar la potencia reactiva, corresponden a la componente oscilante de la potencia instantánea (\tilde{p}), y la totalidad de la potencia imaginaria (q). Es decir que las potencias necesarias para determinar las corrientes de compensación o referencia son: la potencia imaginaria instantánea total, calculada en la ecuación 2.5, y la potencia real oscilante instantánea restándole p_{FAP} . En la figura 2-3 se puede observar en resumen todo lo descrito acerca de las potencias de compensación, en ella se observa el flujo de las potencias [20].

Figura 2-3: Flujo de las potencias entre la red y la carga con un FA en paralelo [20].

Una vez determinadas las potencias de compensación se procede a calcular las corrientes de referencia, esto se hace despejando las corrientes a partir de la ecuación 2.5 de la siguiente manera [13], [22]:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tilde{p} - p_{FAP} \\ q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A partir de las corrientes de referencia calculadas con la ecuación 2.6, que están en coordenadas α - β , mediante la inversa de la transformada de Clarke se pueden transformar las corrientes a valores de corriente de línea del sistema trifásico en el tiempo de la siguiente forma [13]:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Las corrientes calculadas en la ecuación 2.10 como ya se mencionó son las corrientes de referencia, es decir que la corriente que produce el filtro debe ser igual a esta para que pueda eliminar los armónicos que produce la carga, ya que todo el proceso que se realizó anteriormente fue hecho a partir de medidas de corriente y voltaje realizadas en dicha carga; para lograr que la corriente que produce el filtro sea igual a las corriente de referencia es necesario utilizar un método de control el cual se explica a continuación.

2.1.2 Control por banda de histéresis.

El control por histéresis se utiliza ampliamente en el campo del filtrado activo de corriente. Se caracteriza principalmente porque la generación de la señal de referencia y su modulación se realiza simultáneamente, lo cual hace que tenga una respuesta rápida. Las principales ventajas de esta técnica de control son su sencilla estructura, la estabilidad ante variaciones en la carga y la simplicidad en la implementación. Por otro lado la principal desventaja es que la frecuencia de conmutación varía durante cierto periodo de la fundamental, lo que provoca en ciertas ocasiones una operación irregular del inversor y aumentando las pérdidas por conmutación [20].

En el control por histéresis, las corrientes que el convertidor inyecta al sistema de potencia son medidas y comparadas de forma instantánea con las corrientes de referencia, a partir de esto se obtiene una señal de error, dicha señal es aplicada a un circuito comparador de histéresis, el cual dependiendo del ancho de la banda de histéresis y del valor instantáneo de la señal de error, genera pulsos de activación de los dispositivos semiconductores del inversor. Por lo tanto, mientras que la desviación de la corriente inyectada en el sistema, respecto a la corriente de referencia no supere el ancho de la banda de histéresis, el inversor mantiene el estado de conmutación. Para este control el modelo matemático está dado por [20].

$$i_{up} = i_{ref} + HB \quad (2.11)$$

$$i_{lo} = i_{ref} - HB \quad (2.12)$$

$$AB = i_{up} - i_{lo} = 2HB \quad (2.13)$$

Donde:

i_{up} : es la banda o límite superior.

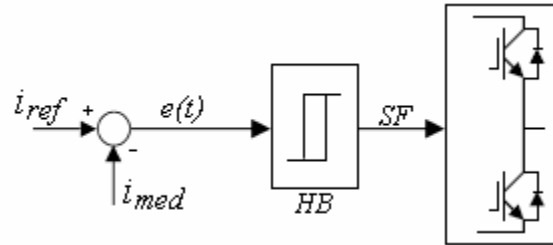
i_{lo} : es la banda o límite inferior.

i_{ref} : es la corriente de referencia o de compensación.

AB : es el ancho de banda.

En la figura 2-4 se puede observar el esquema de control por banda de histéresis.

Figura 2-4: Esquema de control por histéresis [20].



En este control se puede decir que:

Si:

$$i_{medida} < (i_{ref} - HB)$$

$$SF = 1$$

O si:

$$i_{medida} > (i_{ref} + HB)$$

$$SF = 0$$

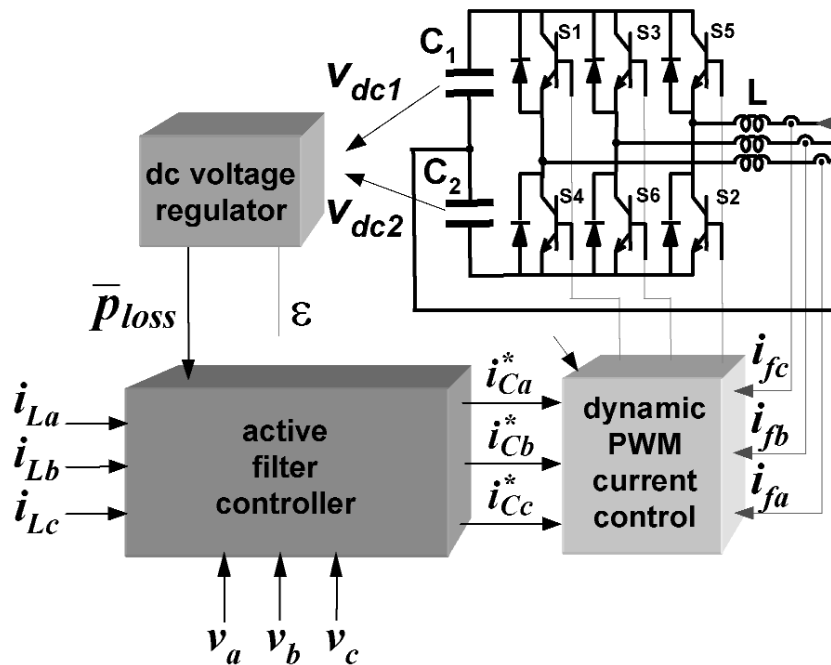
Lo que sucede a través de este control es que cuando SF es igual a uno, el interruptor superior se activa y simultáneamente se desactiva el interruptor inferior, y cuando SF es igual a cero, el interruptor inferior es activado y el superior desactivado [20].

2.2 Control de filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar.

El control de un filtro activo trifásico tetrafilar es similar al control del caso anterior, como se observa en la figura 2-5 consta de un regulador de voltaje, un controlador de filtro activo (en el cual se realiza el proceso de la teoría P-Q y se calculan la potencias instantáneas,

las potencias de compensación y las corrientes de referencia) y un control de corriente que puede ser por PWM o como en el caso de este proyecto por banda de histéresis, además es importante recalcar que el regulador de voltaje es igual al del caso anterior, tipo proporcional, y el control por banda de histéresis es exactamente igual que en el filtro activo trifásico trifilar por lo cual no es necesario volver a explicarlas, como si lo es en el caso de la teoría de la potencia instantánea que para este tipo de filtro es diferente [13].

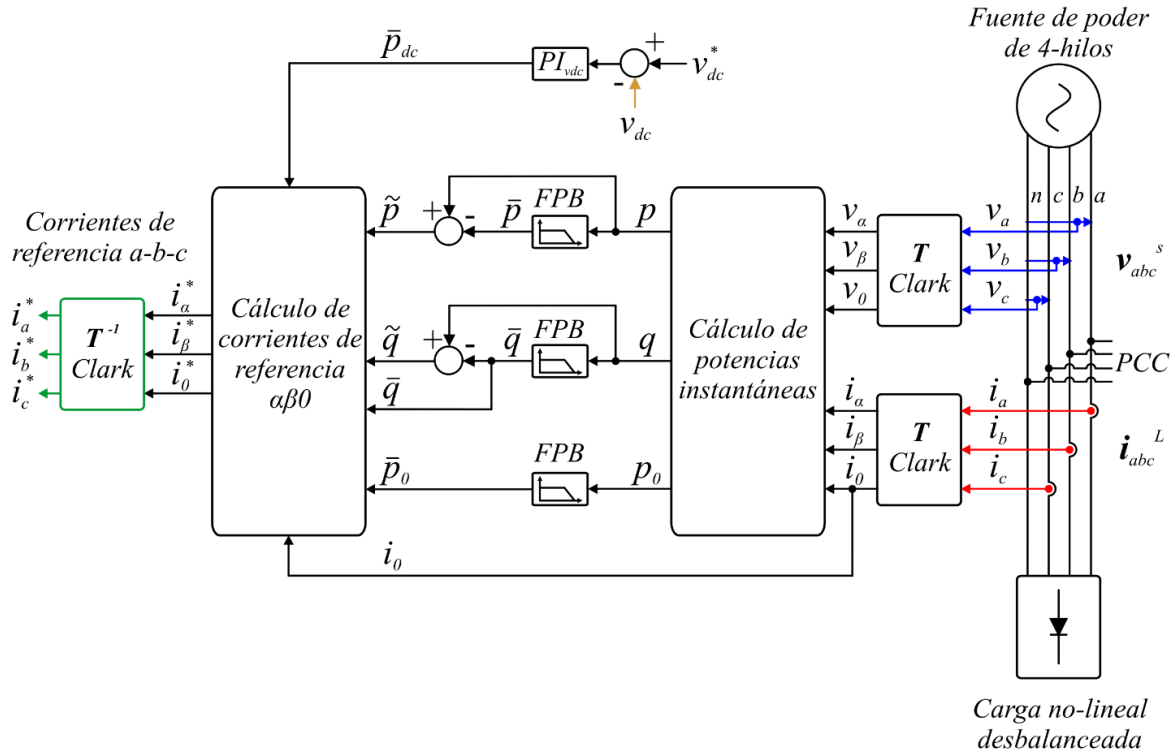
Figura 2-5: Control de un filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar [13].



2.2.1 Teoría de la potencia instantánea para un filtro activo en paralelo trifásico tetrafilar.

Para este caso la teoría de la potencia instantánea realiza la misma función que en el caso anterior, en la figura 2-6 se puede observar el proceso para determinar las corrientes de compensación, en primer lugar se deben determinar las potencias instantáneas, para lo cual es necesario realizar una transformación de coordenadas como se hizo en el filtro trifilar, aunque en este caso la transformada de Clarke es diferente debido a que este filtro es tetrafilar, una vez obtenidas las potencias instantáneas se determinan las potencias de compensación y con estas las corrientes de referencia [23].

Figura 2-6: Cálculo de las corrientes de compensación usando la teoría p-q [23].



Para la primera parte, el proceso de la transformación de Clarke para sistemas tetrafilares se puede observar en las siguientes ecuaciones [13]:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Para la determinación de las potencias instantáneas Akagi propone la siguiente ecuación para un sistema trifásico con neutro [13]:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Donde:

p_0 : es la potencia de secuencia cero.

El siguiente paso es determinar las potencias de compensación, al igual que en el caso anterior las potencias instantáneas tienen componentes constantes y oscilantes, y al igual que antes se debe compensar toda la potencia imaginaria, mientras que solo se compensa la componente oscilante de la potencia real que es la causada por los armónicos, además a esta potencia se le resta la p_{FAP} que es igual que en el caso trifilar, y en este caso además según Akagi se le resta la componente constante de la potencia homopolar [13].

Basado en lo anterior las corrientes de referencia se determinan a partir de la siguiente ecuación [13]:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tilde{p} - \overline{\Delta p} \\ q \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Cabe resaltar que la corriente i_0 calculada anteriormente es la misma corriente de referencia en coordenadas ortogonales, y que Δp hace referencia a la suma de p_{FAP} y de la componente constante de la potencia homopolar [13].

Para finalizar, una vez determinadas las corrientes de compensación en el plano complejo se transforman a corrientes de línea a través de la transformada inversa de Clarke, como se plantea en la siguiente ecuación [13]:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{ca}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

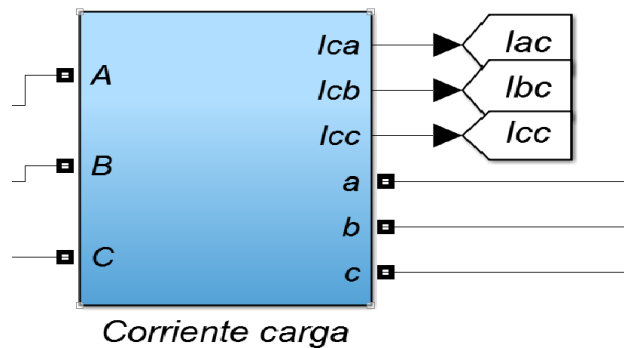
Una vez determinadas estas corrientes de referencia se debe garantizar que el filtro aporte estas corrientes a la red, esto se logra mediante el método de control de banda de histéresis que como se indicó es el mismo que en el caso del filtro trifilar.

2.3 Programación de algoritmos de control de filtro activo trifásico trifilar en Simulink-Matlab.

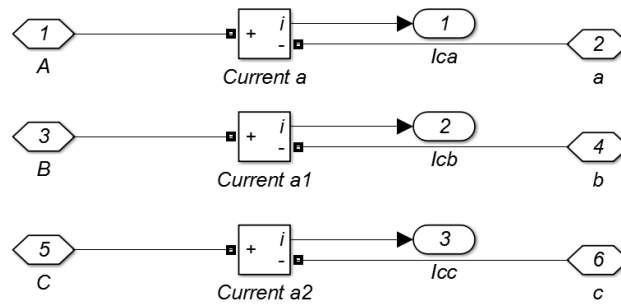
Para la programación del control simplemente se aplicó el proceso que se observó anteriormente para un filtro activo en paralelo trifásico trifilar; para empezar, inicialmente se deben conocer las corrientes y los voltajes de la carga para poder realizar el control y determinar las corrientes de compensación.

Para conocer la corriente de la carga se creó en Simulink un subsistema que se encarga de censar la corriente que alimenta a la carga, como el que se observa en la figura 2-7.

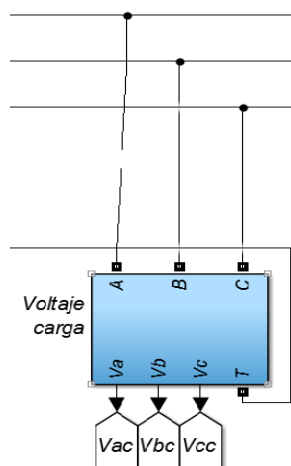
Figura 2-7: Subsistema medidor de corriente.



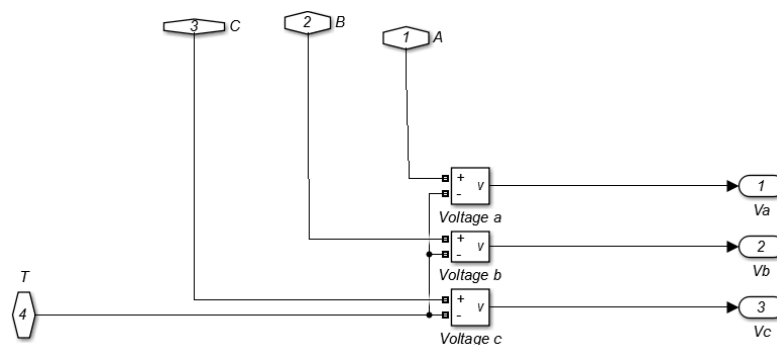
Dentro de este subsistema se encuentran medidores de corriente que miden la corriente de cada línea como se observa en la figura 2-8.

Figura 2-8: Medidores de corriente.

Para el voltaje se realizó el mismo proceso y se crea un subsistema similar al anterior que se encarga de medir el voltaje, como el observado a continuación.

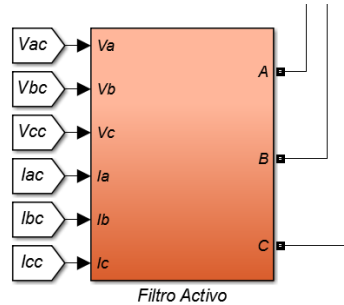
Figura 2-9: Subsistema medidor de tensión.

En este subsistema se encuentran medidores de tensión que miden el voltaje entre cada fase y la tierra como se observa en la figura 2-10.

Figura 2-10: Medidores de tensión.

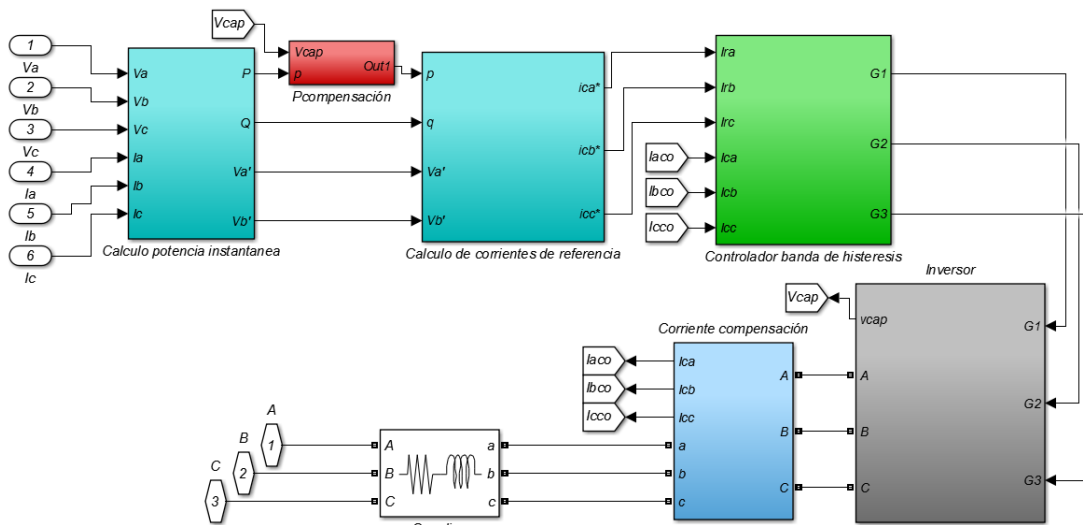
Estas medidas de corriente y tensión realizadas en la carga son las que se tiene en cuenta para la determinación las corrientes de referencia del filtro activo, el cual en este proyecto se encuentra en un subsistema como el que se observa en la figura 2-11, y que tiene como entradas los valores de las mediciones que se realizan en los medidores de voltaje y corriente de la carga y las tres fases del sistema en este caso que es trifilar.

Figura 2-11: Filtro activo.



Dentro de este subsistema se encuentra la parte del control y la parte eléctrica del filtro activo en paralelo como se observa en la figura 2-12, en este capítulo solo se abarca el control, la parte eléctrica se expone en el siguiente.

Figura 2-12: Interior del filtro activo.



En la primera parte de este diseño se ubicó un subsistema llamado cálculo de la potencia instantánea, en ese bloque se efectúa el proceso matemático para la determinación de las potencias instantáneas, en primer lugar se realiza la transformada de Clarke para

transformar las corrientes y los voltajes medidos anteriormente en coordenadas del plano complejo $\alpha\beta$ como se observa en la figura 2-13, y en segundo lugar con los voltajes y corrientes determinados se calculan las potencias instantáneas como se observa en la figura 2-14.

Figura 2-13: Transformada de Clarke.

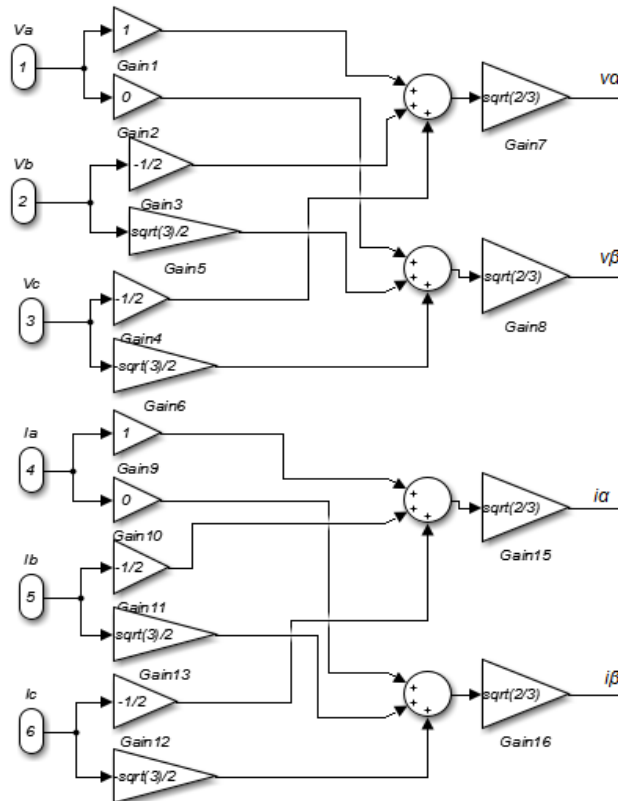
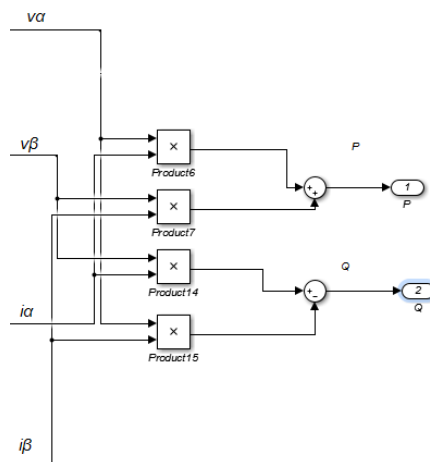
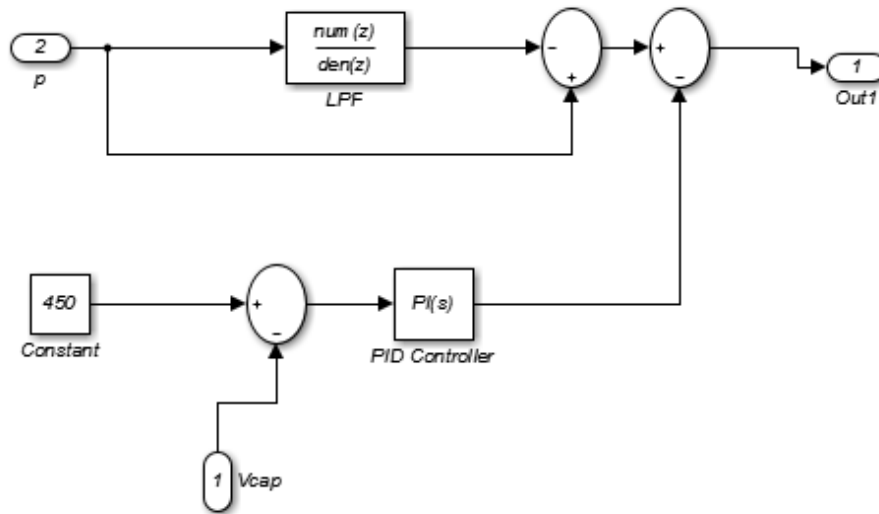


Figura 2-14: Calculo de las potencias instantáneas.



Siguiendo el proceso de control que se explicó anteriormente, sigue la determinación de las potencias de compensación, como se mencionó se compensa toda la potencia imaginaria, mientras que solo se compensa la componente oscilante de la potencia real, en el subsistema llamado *Pcompensación* que se puede observar en la figura 2-12 se realiza la determinación de la potencia real a compensar como se observa en la figura 2-15, donde inicialmente en la parte superior la potencia real instantánea se divide en la potencia real completa y la potencia real constante que se obtiene al pasar la totalidad de la potencia por un filtro pasabaja, y se restan estas dos potencias dando como resultado la potencia oscilante, por otro lado se determina la potencia p_{FAP} que se establece a partir del regulador de voltaje tipo integral que en este caso es un controlador PI que opera a partir de la diferencia entre el voltaje de referencia y el voltaje medido en el capacitor del inversor, dicho controlador se sintonizó como se plantea en el anexo A.

Figura 2-15: Determinación de la potencia real de compensación.



Una vez determinadas las potencias de compensación, se procede al cálculo de las corrientes de referencia a través del subsistema del mismo nombre que se observa en la figura 2-12; en este bloque, inicialmente, a partir de las potencias de compensación y los voltajes en coordenadas ortogonales determinados en el subsistema de "cálculo de potencia instantánea" en la figura 2-13 se determinan las corrientes de compensación en coordenadas del plano $\alpha\beta$ como se observa en la figura 2-16 y luego mediante la inversa de la transformada de Clarke se determinan las corrientes de referencia de línea como se observa en la figura 2-17.

Figura 2-16: Cálculo de corriente de referencia.

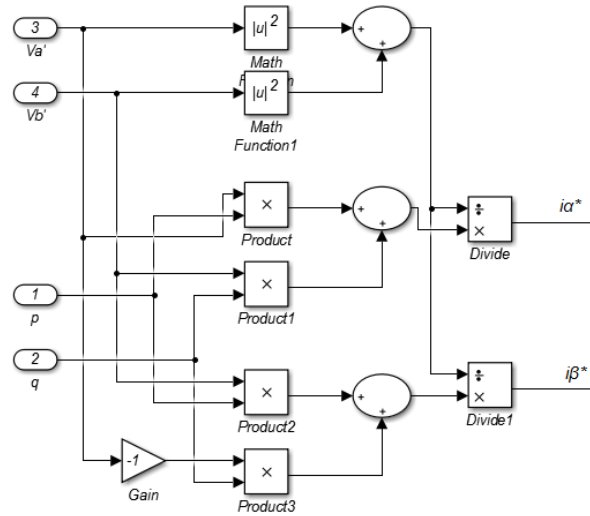
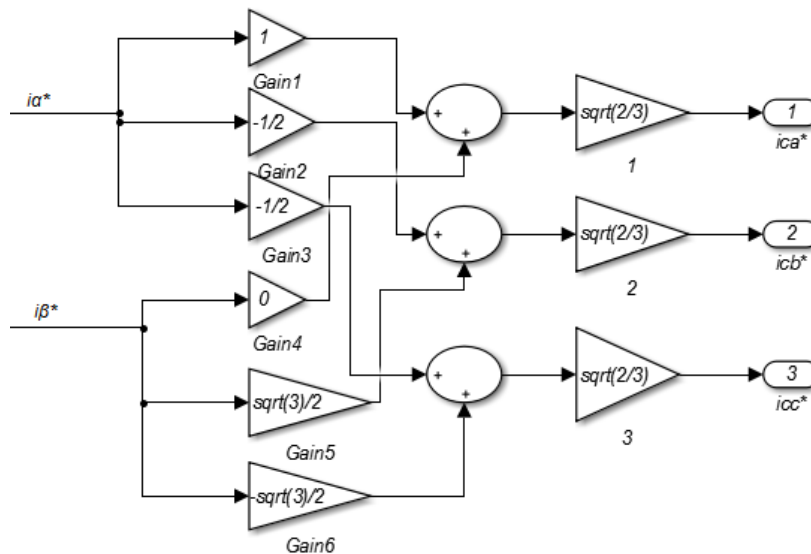
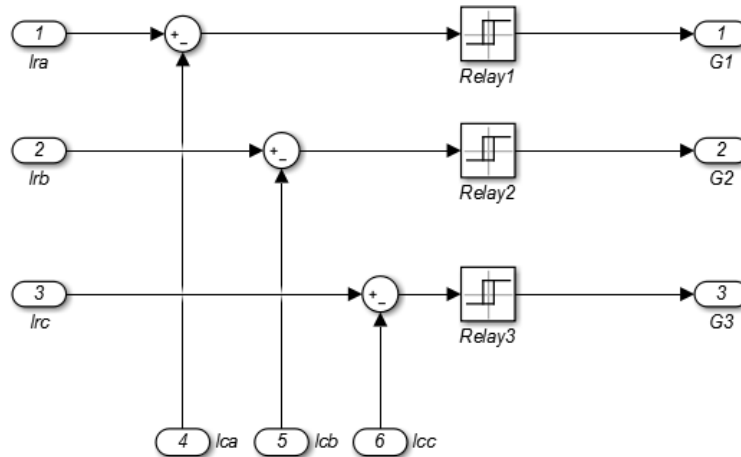


Figura 2-17: Inversa de la transformada de Clarke.



A partir de este punto empieza a actuar el controlador de banda de histéresis, el cual se observa también en la figura 2-12, este subsistema tiene como entradas las corrientes de referencia determinadas en la figura 2-17 y las corrientes medidas a la salida del inversor, a partir de la comparación entre estas dos corrientes se determinan los pulsos de la salida los cuales activan los elementos electrónicos del convertidor, a partir de esto se garantiza que la corriente que salga del filtro sea la misma que la de referencia y pueda compensar los armónicos de la carga. En la figura 2-18 se puede observar la composición del subsistema mencionado.

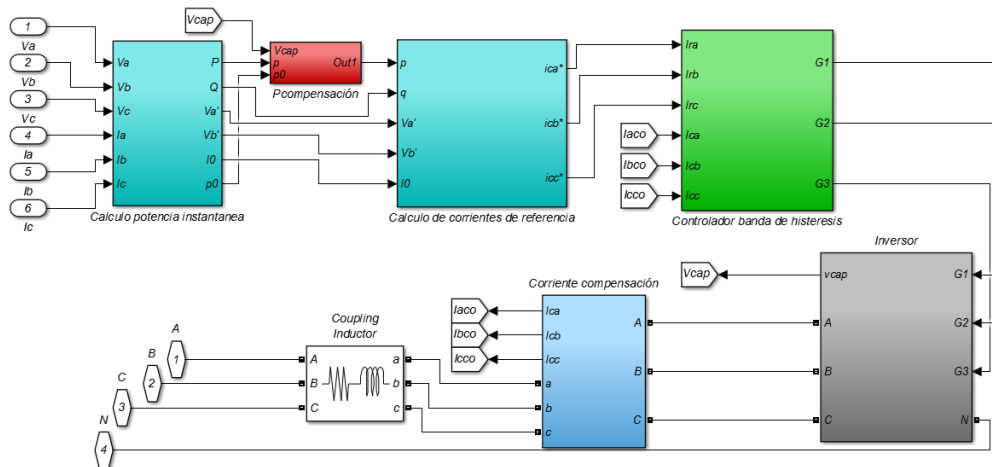
Figura 2-18: Controlador de banda de histéresis.

2.4 Programación de algoritmos de control del filtro activo trifásico tetrafilar en Simulink-Matlab.

Este proceso es similar en varios aspectos al anterior, en este inicialmente también hay que medir las corrientes de las líneas que alimentan la carga, el proceso en la medición de las corrientes es igual al del caso anterior como en la figura 2-8, por otro lado la medición del voltaje también es muy similar, la diferencia radica en que en el caso anterior la tensión se medía respecto a tierra, mientras que en este caso se mide respecto al neutro, pero el proceso es parecido al de la figura 2-10, solo se debe cambiar la tierra por el neutro.

Igual que en el caso anterior el filtro activo es un subsistema como el de la figura 2-11, aunque en este caso también va conectado al neutro, es decir que las entradas de dicho subsistema son las mediciones de las corrientes y tensiones, las tres fases y el neutro. La composición interna del filtro no cambia mucho, los bloques siguen siendo los mismos como se observa en la figura 2-19, aunque algunos cambian en su interior, como en el caso anterior en esta sección solo se habla de la parte del control ya que de la parte eléctrica se expone en el siguiente capítulo.

Figura 2-19: Interior del filtro activo tetrafilar.



Para empezar a describir la parte del control es necesario como en el caso anterior iniciar con el bloque de “cálculo de potencia instantánea”, en este bloque a partir de las señales de las corrientes y tensiones medidas en la carga se determinan las potencias instantáneas, por lo cual este bloque consta de dos etapas, una en la cual se realizan las transformaciones de Clarke de los voltajes y las corrientes como se observa en las figuras 2-20 y 2-21 respectivamente y otra etapa en la cual se obtienen las potencias instantáneas en base a las tensiones y corrientes determinadas en la etapa anterior como se puede apreciar en la figura 2-22.

Figura 2-20: Transformada de Clarke del voltaje.

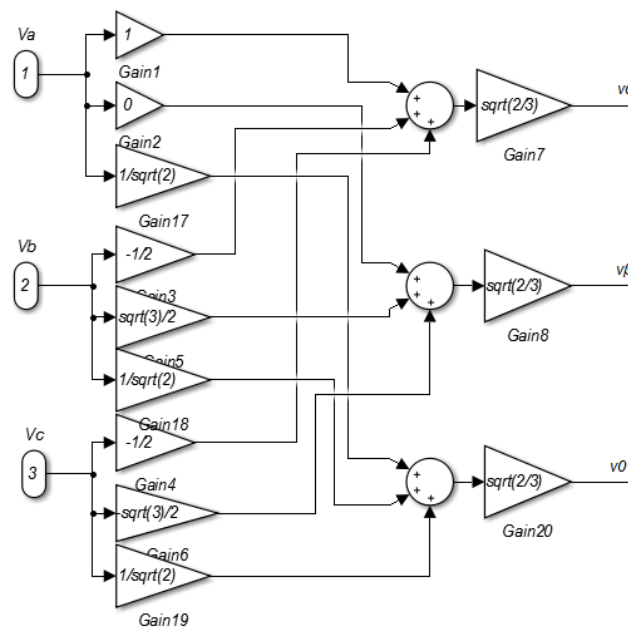
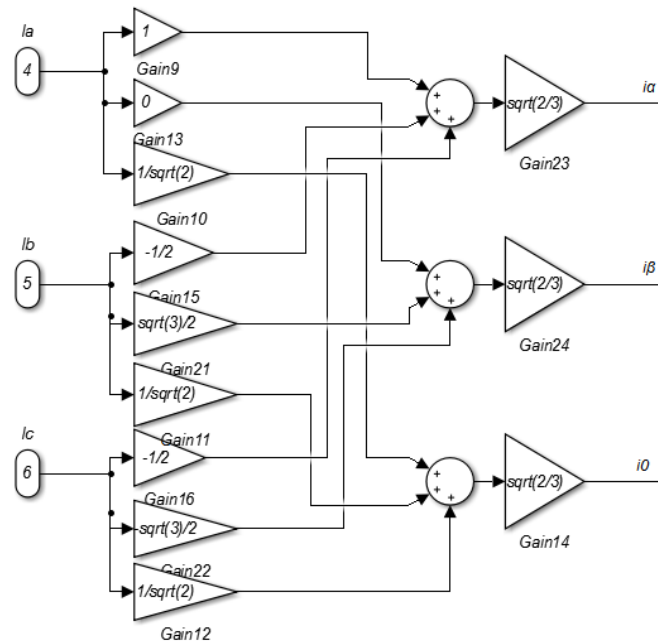
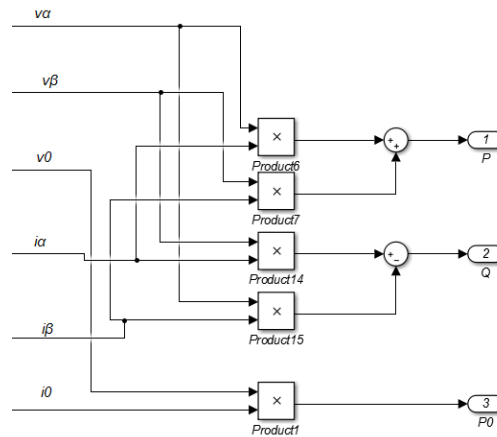
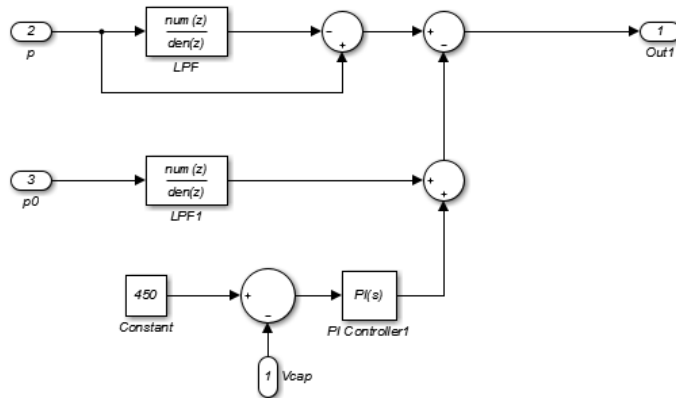


Figura 2-21: Transformada de Clarke de la corriente.**Figura 2-22:** Cálculo de las potencias instantáneas.

Una vez determinadas las potencias instantáneas, se procede a determinar las potencias de compensación, para lo cual se debe tener claro lo que se dijo anteriormente acerca de que se debe compensar toda la potencia imaginaria, por lo cual se deja igual, en cambio se debe hacer el proceso que se explicó en la sección 2.2.1 con las potencias real y homopolar, proceso que en el programa se lleva a cabo en el bloque "Pcompensación" que se observa en la figura 2-19; este proceso se puede ver en la figura 2-23 que es la parte interior del bloque "Pcompensación" y en él se observan varias etapas, primero como en el caso del trifilar se obtiene la potencia real oscilante como se explicó en la sección

anterior, segundo se obtiene la potencia homopolar constante mediante un filtro pasabaja y se suma con p_{FAP} la cual se obtiene como en el caso del filtro activo trifasico trifilar, y la suma de estas dos se restan de la potencia real oscilante.

Figura 2-23: Determinación de la potencia real de compensación.



A partir de este proceso para determinar la potencia real de compensación se llega al bloque llamado “cálculo de corrientes de referencia”, que se observa en la figura 2-19, este subsistema tiene como entradas la potencia de compensación real, la potencia imaginaria, los voltajes alfa y beta y la corriente homopolar, en este subsistema se realizan dos procesos, el primero que se aprecia en la figura 2-24 es el cálculo de las corrientes de compensación en el plano complejo este cálculo se realiza a partir de las ecuaciones planteadas en la sección 2.2.1, y el segundo proceso que se puede ver en la figura 2-25 es la transformación de estas corrientes calculas y la corriente homopolar a valores de corrientes de línea a través de la inversa de la transformada de Clarke.

Figura 2-24: Cálculo de las corrientes de compensación en el plano complejo.

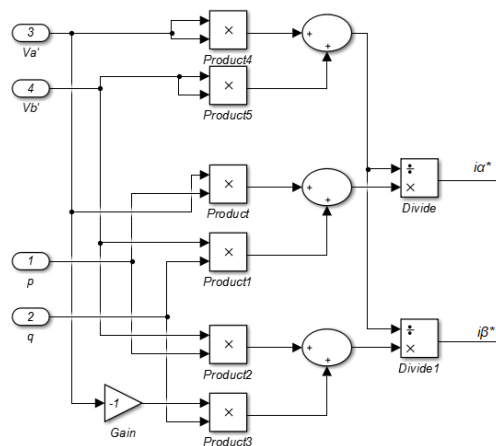
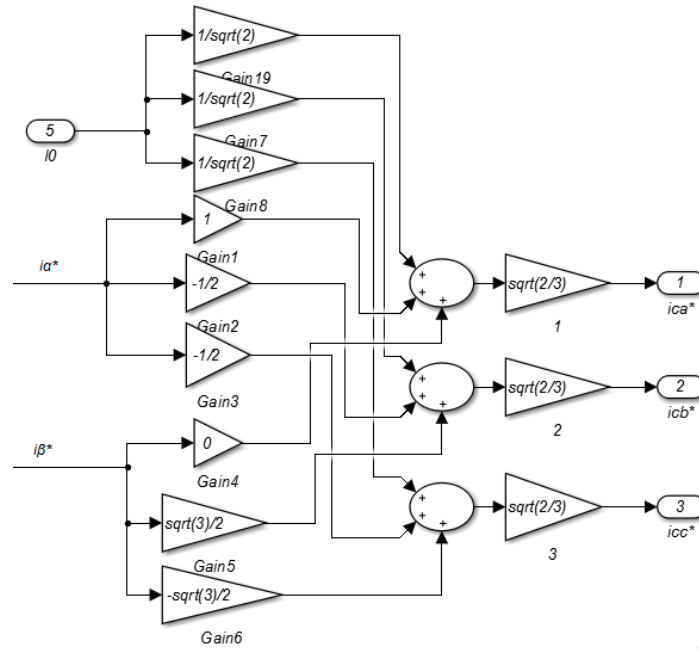


Figura 2-25: Inversa de la transformada de Clarke para las corrientes.



Una vez determinadas las corrientes de referencia, entra en juego la última etapa del control, el controlador de banda de histéresis, pero este funciona igual que el del filtro trifilar, para su operación requiere las corrientes de referencia y las corrientes medidas a la salida del inversor, pero interiormente el controlador es igual que el de la sección anterior, por lo no es necesario explicarlo nuevamente.

3. Escenarios de simulación y parámetros eléctricos del filtro activo en paralelo.

En este capítulo se abarcan los temas relacionados con el tercer objetivo, en primer lugar se plantean dos sistemas con cargas no lineales, uno trifásico trifilar y otro tetrafilar, estos sistemas son casi idénticos, la diferencia radica en el número de conductores, en segundo lugar se determinan los parámetros eléctricos de algunos elementos de la topología del filtro activo y por último se programan tanto el sistema planteado como la parte eléctrica del filtro en Simulink, ya que la parte del control se programó anteriormente.

3.1 Planteamiento de escenarios eléctricos.

La definición de la red eléctrica en la que se va a aplicar el filtro activo es importante, ya que de esta dependen los parámetros eléctricos del filtro, en este proyecto se trabajó en baja tensión centrado en dos casos, el primero, un sistema eléctrico trifásico trifilar y el segundo con las conexiones trifásico tetrafilar, pero para facilidad de cálculo en los parámetros de los filtros los parámetros de las redes son muy similares.

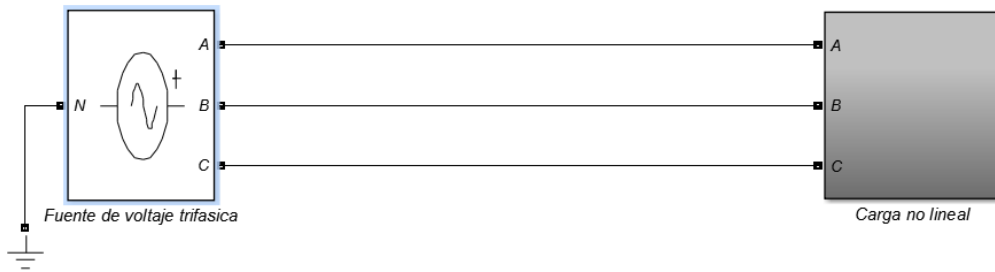
En primer lugar se definieron los parámetros eléctricos de la red, para el primer caso se planteó una red trifásica trifilar en secuencia positiva de 120v RMS balanceada, esta red funciona a una frecuencia 60Hz pues esa es la frecuencia que se maneja en este País, para el otro caso se planteó una red trifásica con neutro, donde los valores de voltaje y frecuencia será los mismos que los del primer caso.

Una vez definidas las redes se plantearon las cargas del sistema, estas cargas debían ser no lineales para que produjeran armónicos, y poder poner a prueba los filtros activos; un ejemplo de estas cargas no lineales que producen armónicos son los convertidores, tanto monofásicos como trifásicos [24].

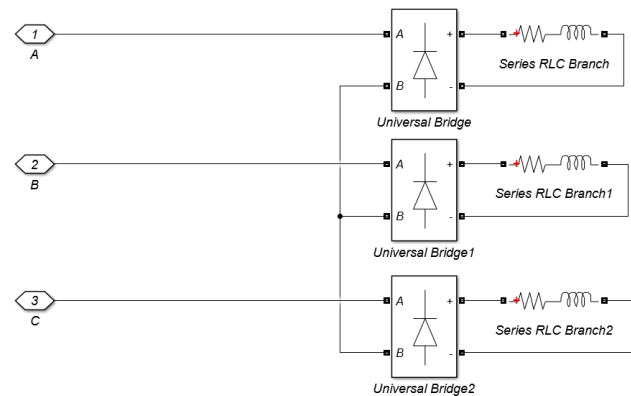
Basado en lo anterior, se plantearon tres convertidores monofásicos conectados cada uno a una fase por un lado y por el otro conectados entre sí, para el primer caso, estos convertidores son ideales y constan de cuatro diodos conectados en una configuración de puente, a la salida de estos convertidores se conectaron unas cargas RL que son iguales para los tres casos, y cuyos valores se definieron en la herramienta de Simulink, probando varios valores y observando el contenido armónico que toman las corrientes con ellos; de esta forma se optó por los valores de R y L que al autor le parecieran más idóneos. Para el segundo caso el planteamiento fue prácticamente igual, la diferencia radicó en que en este caso los convertidores se conectaron a una fase y el neutro cada uno.

3.2 Planteamiento de escenarios eléctricos en Simulink.

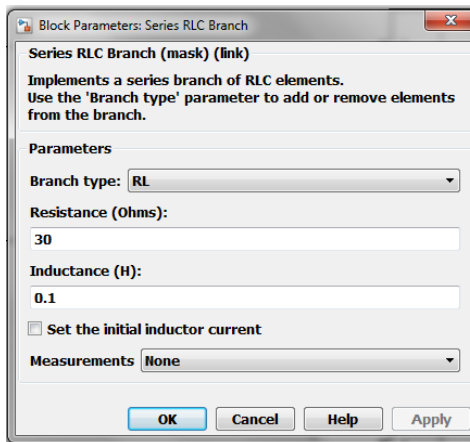
Para el planteamiento de los escenarios eléctricos en Simulink se debieron realizar dos etapas, una en la que se diseñó la red, y otro en la que se planteó la carga, para el caso de la red trifásica de tres hilos la red se diseñó mediante una fuente de voltaje trifásica, el punto común de esta fuente se aterrizó debido a que el sistema es trifilar, de esta fuente salen los tres conductores de la red que tienen un voltaje de fase de 120v a una frecuencia de 60Hz y están en secuencia ABC, estos conductores van conectados la carga. En la figura 3-1 se puede ver el sistema planteado, el bloque llamado “carga no lineal” es un subsistema y dentro de él se encuentra planteada la carga.

Figura 3-1: Sistema eléctrico con carga trifásica trifilar no lineal.

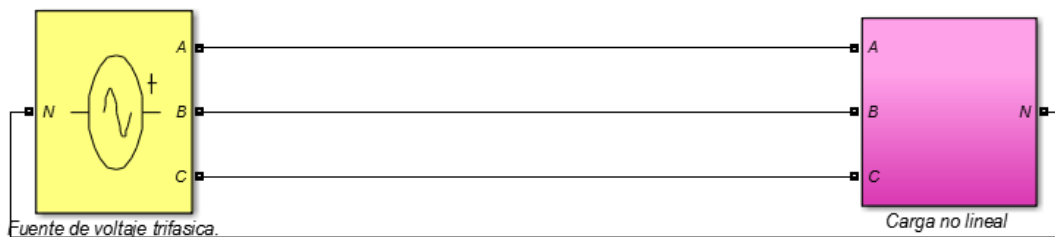
Para el planteamiento de la carga se aplicó lo descrito en la sección 3.1, se propusieron ser convertidores formados por diodos, que se conectaron a cada fase y entre sí en forma de estrella, y a la salida fueron conectados a una impedancia, esto se puede apreciar en la figura 3-2.

Figura 3-2: Carga trifásica trifilar no lineal.

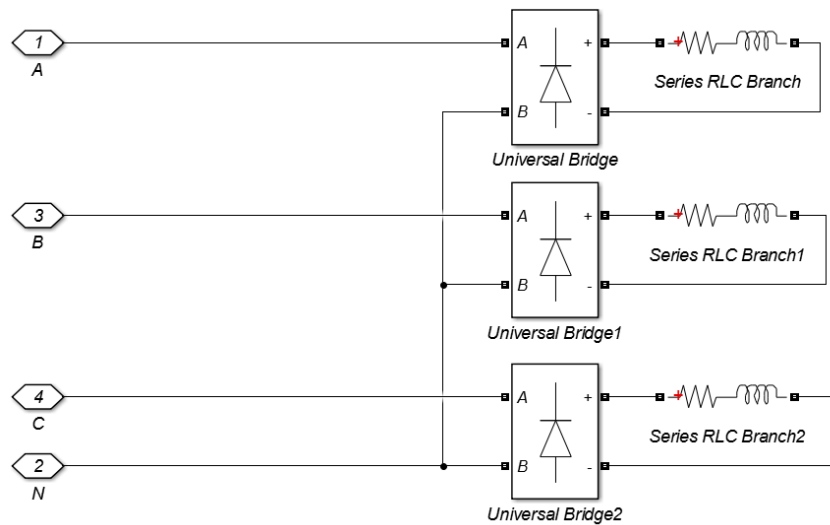
Como se indicó anterior los convertidores son ideales, por lo cual no se modifican de como los plantea el programa, por otro lado para la determinación de los valores de la resistencia y la inductancia, se hicieron varias simulaciones en Simulink con valores diferentes, en las simulaciones se observó el contenido armónico de la corriente mediante el bloque THD del programa, y se optó por uno de estos valores, que en este caso son los que se observan en la figura 3-3, los valores de impedancias son iguales para los tres ramales, con estos valores de R y L la corriente tiene un contenido armónico del 16.52%.

Figura 3-3: Parámetros de la impedancia de la carga.

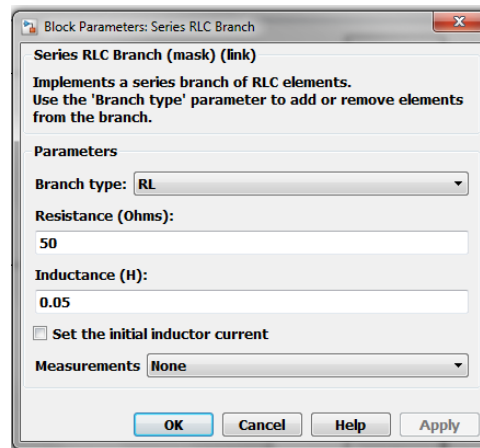
Para el caso de la red trifásica con cuatro hilos, el proceso fue similar, para simular la red se planteó una fuente trifásica, pero en este caso, el punto común de la fuente se conectó al neutro, y los valores de dicha fuente son los mismos que en el caso anterior, además en este caso los conductores de la fuente, cuatro en este caso, también se conectaron a un subsistema que representa la carga no lineal como se observa en la figura 3-4.

Figura 3-4: Sistema eléctrico con carga trifásica tetrafilar no lineal.

En la figura 3-5 se observa la carga planteada para el caso del sistema eléctrico trifásico tetrafilar, como se dijo anteriormente las cargas son casi iguales, la diferencia se encuentra en que cada convertidor se conecta a una fase y el neutro.

Figura 3-5: Carga trifásica tetrafilar no lineal.

En este caso los convertidores también son ideales, y las impedancias se determinaron mediante varias simulaciones de prueba igual que en el caso anterior, en este caso se escogieron los valores que se observan en la imagen 3-6, con los cuales las corrientes de la red tienen un THD del 18,36%.

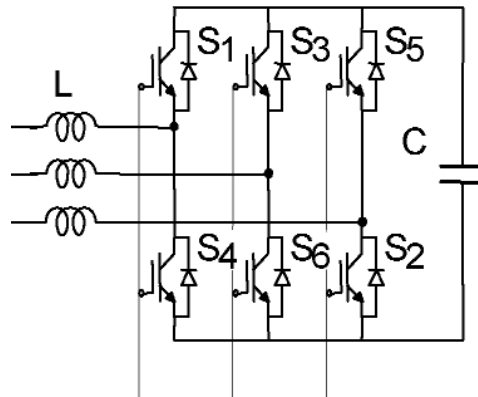
Figura 3-6: Parámetros de la impedancia de la carga.

3.3 Parámetros eléctricos del filtro activo en paralelo.

Para determinar los parámetros eléctricos del filtro activo primero fue necesario definir la topología del convertidor, ya que ésta es la parte eléctrica del filtro, lo demás es el control;

en este proyecto la topología será la de un inversor de fuente de tensión, debido a que es una de las más comunes, en la actualidad la mayoría de los filtros activos en derivación en operación comercial utilizan esta topología; en la figura 3-7 se observa la topología del convertidor que se utilizó para el filtro activo trifásico trifilar [13].

Figura 3-7: Convertidor para filtro activo en paralelo [13].



Para este caso solo hubo que determinar los parámetros eléctricos de los interruptores, el capacitor y las inductancias, sin embargo es necesario recalcar que en el caso de los interruptores, como se hizo anteriormente con los convertidores en la carga, se trabajó con dispositivos ideales, es decir se utilizaron IGBT's con diodos antiparalelos pero sus parámetros son ideales, por lo que en cuanto a parámetros eléctricos del filtro solo se hizo necesarios los de la inductancia y el condensador.

Para la determinación del condensador inicialmente se tuvo que determinar el voltaje en DC, que en este caso es el mismo voltaje del capacitor, para determinar este voltaje en DC se debían cumplir ciertas condiciones [25], [26], [27]:

- El voltaje en el lado de DC debe ser mayor al pico de voltaje del lado de AC del FAP, aproximadamente mayor que el voltaje pico-pico de la red.
- Variación del voltaje de alimentación en un 20 %. Es decir $V_s = 120 \pm 20\% V_{rms}$.

El siguiente parámetro a determinar fue la capacitancia del condensador, para lo que se debió tener en cuenta que: "durante la compensación, el voltaje del capacitor fluctúa, esta fluctuación es en función de la capacitancia y del voltaje del lado DC de referencia, además es importante saber que las fluctuaciones más altas degradarán el rendimiento de la compensación, mientras que las fluctuaciones más bajas requieren una mayor capacidad,

lo que aumenta el tamaño y el costo". Basado en lo anterior se hizo necesario limitar la capacitancia a un valor específico, el cual se pudo determinar como [28]:

$$C \geq \frac{3E_m I_m}{2\varepsilon\omega V_{dc}^2} \quad (3.1)$$

Donde:

E_m : es el voltaje pico de la red.

I_m : es la corriente nominal de salida.

ε : es el porcentaje de fluctuación de voltaje de DC.

ω : es la frecuencia angular de la red.

V_{dc} : es el voltaje del lado de DC.

Finalmente se procedió a determinar la inductancia que está a la salida del filtro y se encuentra entre este y la red de alimentación, el valor de esta inductancia es fundamental debido que permite que el FAP paralelo trifásico tenga un buen filtrado de armónicos de corriente, absorbiendo el voltaje pulsante del convertidor [27].

Para determinar esta inductancia, se consideró el método de diseño de la inductancia del lado AC que se plantea en [29], [30]. "Basado en la estructura de topología de tres fases e ignorando la resistencia del lado de CA, el rango apropiado de la inductancia del lado de CA que satisface el rendimiento de rastreo instantáneo es" [31], [30], [29]:

$$L < \frac{AV_{dc}}{h\omega I_m} \quad (3.2)$$

Donde:

I_m : es la corriente del sistema de potencia.

V_{dc} : es el voltaje del lado de DC del inversor.

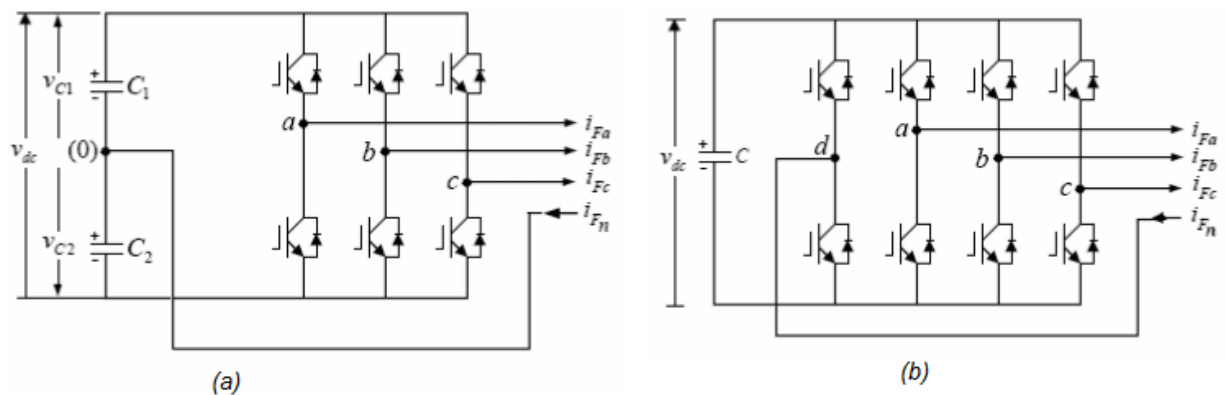
ω : es la velocidad angular frecuencia fundamental.

A : es la sensibilidad la cual recomendada por los autores debe ser 0.2.

h : es el armónico más representativo, en [30] indican que normalmente es 3.

La explicación de la determinación de los parámetros hasta el momento son para el filtro trifilar, para el filtro tetrafilar existen dos topologías de inversor de fuente de voltaje que se observan en la figura 3-8 para este proyecto se utilizó la topología (a), por otro lado como los parámetros del sistema son prácticamente iguales, los cálculos de los parámetros de los dos filtros también lo son, ya que tanto el voltaje de DC y los IGBT's son idénticos, la diferencia radicó en la inductancia a la salida del filtro y en la capacitancia de los capacitores, ya que en este caso se utilizan dos y en el anterior solo uno, y además la potencia de los filtros es diferente, sin embargo las ecuaciones son las mismas.

Figura 3-8: Topologías de inversor de fuente de tensión [20].



3.4 Circuito eléctrico del filtro activo en paralelo en Simulink.

Para el planteamiento del circuito eléctrico del filtro en el programa, fue necesario tener claro los parámetros eléctricos de los dispositivos, una vez claro esto se planteó en Simulink la topología a utilizar, en este proyecto son dos, una para el filtro activo trifásico trifilar como la que se observa en la figura 3-9 y otra para el tetrafilar como la de la figura 3-10.

Figura 3-9: Parte eléctrica del filtro trifilar.

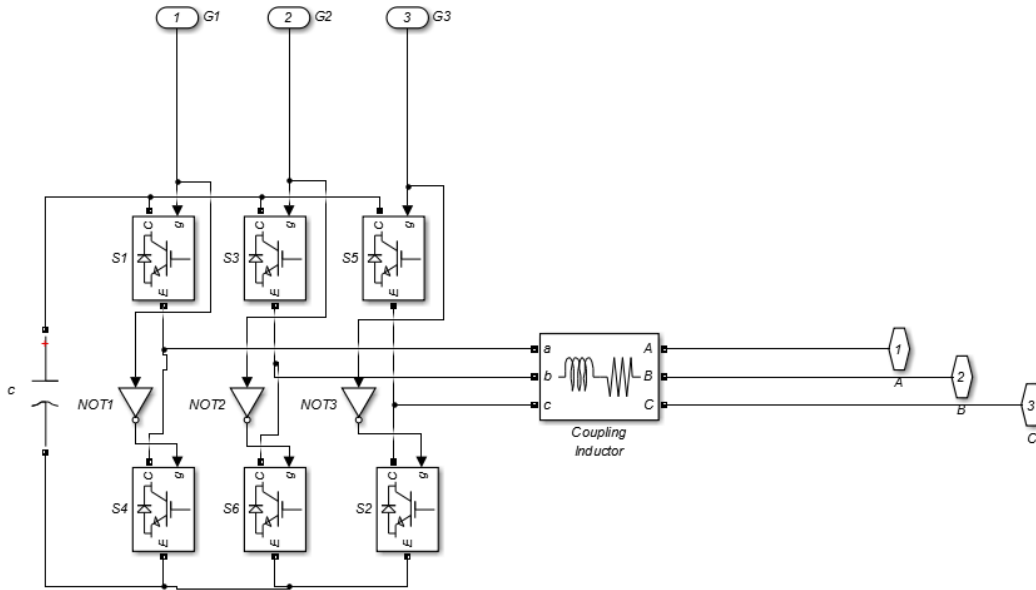
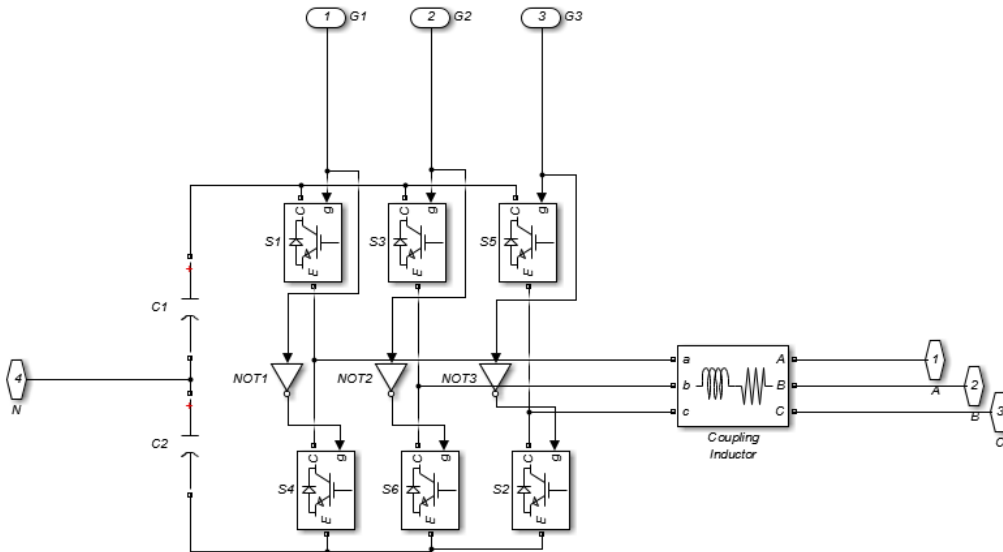


Figura 3-10: Parte eléctrica del filtro tetrafilar.



Como se planteó en la sección anterior, los IGBT's son ideales, por lo cual se dejaron tal cual como los planteó el programa, por otro lado la tensión del bus de DC se determinó a partir de las condiciones mencionadas, para esto en primer lugar se observó el voltaje pico-pico, pero se debió tener en cuenta la segunda recomendación, se tuvo que elevar el valor RMS un 20%, lo que significa que el valor pico también se elevó, en este caso el valor RMS es de 120v, el cual elevado un 20% es de 144v, por lo tanto el valor pico-pico de este valor es de 408v, lo que quiere decir que el voltaje de DC tiene que ser mayor que dicho

valor, por lo cual el voltaje que se estableció como referencia en el bus de DC fue de 450v en ambos sistemas, tanto trifilar como tetrafilar.

Por otro lado es importante resaltar que los capacitores deben estar cargados inicialmente para que el filtro compense casi instantáneamente una vez entre en operación, por lo que en el caso del sistema trifilar el capacitor está cargado inicialmente con 450v y en el otro caso cada capacitor está cargado con 225v.

Para determinar el valor de la capacitancia se debió aplicar la ecuación 3.1, para esto fue necesario determinar todos los parámetros de la ecuación, en primer lugar el voltaje pico es de 170v ya que el voltaje de fase RMS es de 120v, el voltaje de DC como se indicó anteriormente es de 450v, la frecuencia angular de la red es de $2\pi 60$ ya que la frecuencia de la red es de 60Hz, finalmente para determinar la corriente nominal de salida del filtro fue necesario conocer la potencia del filtro, la cual es de 700VA, ya que la potencia reactiva máxima de la carga es de aproximadamente 600Var y esa es prácticamente la potencia que debe compensar el filtro, a partir de dicha potencia del filtro y del voltaje de línea de la red, 208v, se pudo determinar la corriente la cual fue de 1,943A; reemplazando todos estos valores en 3.1 se puede determinar el rango del valor del capacitor.

$$C \geq \frac{3(170)(1,943)}{2(2\%)(2\pi 60)(450)^2}$$

$$C \geq 324,509\mu F$$

La única diferencia que hubo con el filtro activo trifásico tetrafilar fue la corriente, debido a que la potencia del filtro para la red de 4 hilos es de 300VA, debido a que la potencia reactiva de la carga es de 200Var aproximadamente, por lo cual al hacer el cálculo que se hizo en el caso trifilar la corriente fue de 0,832A, por lo que si se reemplaza la corriente en la ecuación 3.1:

$$C \geq \frac{3(170)(0,832)}{2(2\%)(2\pi 60)(450)^2}$$

$$C \geq 138,956\mu F$$

Basado en el rango obtenido de la capacitancia, el capacitor del filtro activo trifásico trifilar se planteó con un valor de 500 microfaradios, en el caso del filtro activo trifásico tetrafilar la capacitancia seleccionada total del capacitor escogida fue de 500 microfaradios, por lo tanto lo tanto los valores de los condensadores del filtro tetrafilar son del doble ya que están en serie, por lo cual son de 1milifaradio cada uno.

El ultimo parámetro para determinar fue la inductancia que se encuentra a la salida del filtro, para determinar el valor de esta se utilizó la ecuación 3.2, para ello se debieron determinar los valores que conforman dicha ecuación, sin embargo estos valores ya se determinaron anteriormente para calcular la capacitancia, por lo cual simplemente hay que reemplazarlos en la ecuación:

$$L < \frac{0,2(450)}{3(2\pi 60)(1,943)}$$

$$L < 40,955mH$$

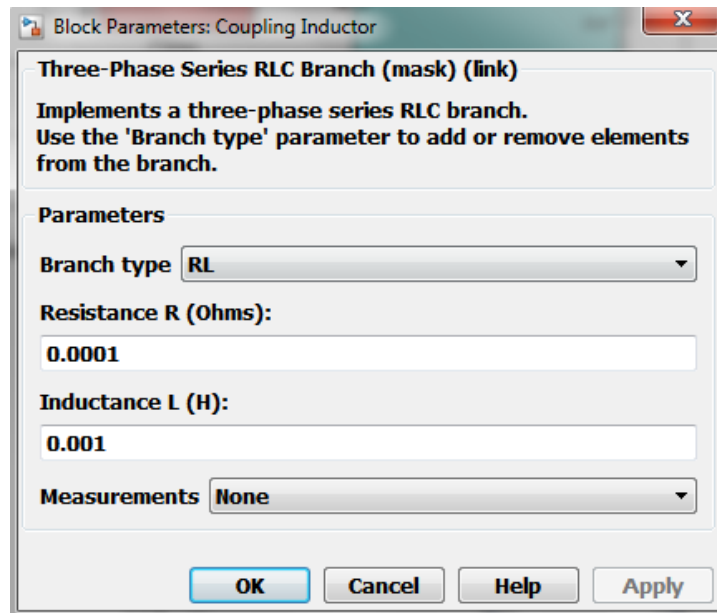
Para el caso tetrafilar se aplicó la misma ecuación con la una única diferencia de la corriente, por lo cual el rango de inductancia es:

$$L < \frac{0,2(450)}{3(2\pi 60)(0,832)}$$

$$L < 95,645mH$$

A partir de estos rangos se escogió el valor que se ve en la figura 3-11, el valor es el mismo para los dos casos, también se puede notar que en la figura aparece el valor de una resistencia, dicha resistencia se le atribuye a la resistencia del cobre en los dos casos.

Figura 3-11: Valor de la inductancia del filtro activo.



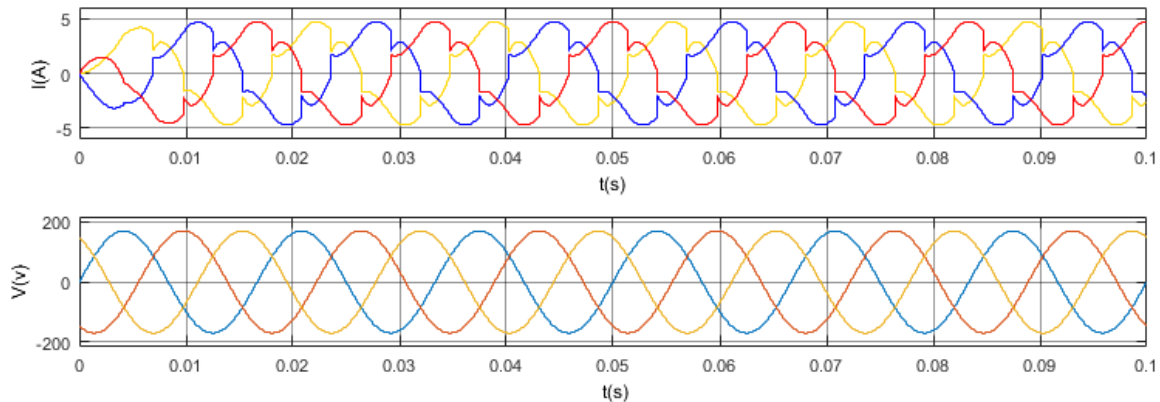
4. Simulación del filtro activo.

En este capítulo se simularon y observaron los distintos escenarios planteados anteriormente; por un lado se simularon las redes planteadas con sus cargas tanto trifilar como tetrafilar y se observaron las corrientes que generan estas cargas y son entregadas a la red, así como las potencias que consumen, por otro lado se acoplaron la parte de control con la parte eléctrica de cada filtro y se conectaron a la red, luego se simuló esto en conjunto y analizó la tarea que realiza el filtro al compensar armónicos y reactivos.

4.1 Escenario trifilar.

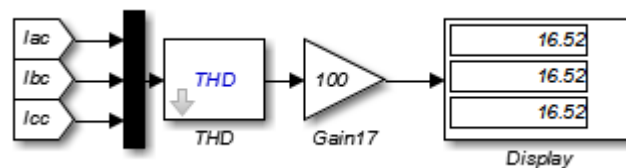
Para este caso como se observó anteriormente se creó una red con una carga no lineal potencial generadora de armónicos y se programaron unas estrategias de control y un circuito eléctrico que hacen parte del filtro activo para la compensación de armónicos, a continuación se observa la simulación, en primer lugar del sistema sin filtro, dicho sistema es el observado en la figura 3-1, a continuación en la figura 4-1 se pueden observar las corrientes y tensiones de la carga las cuales se obtuvieron al simular el programa.

Figura 4-1: Corrientes y tensiones de la carga trifilar.



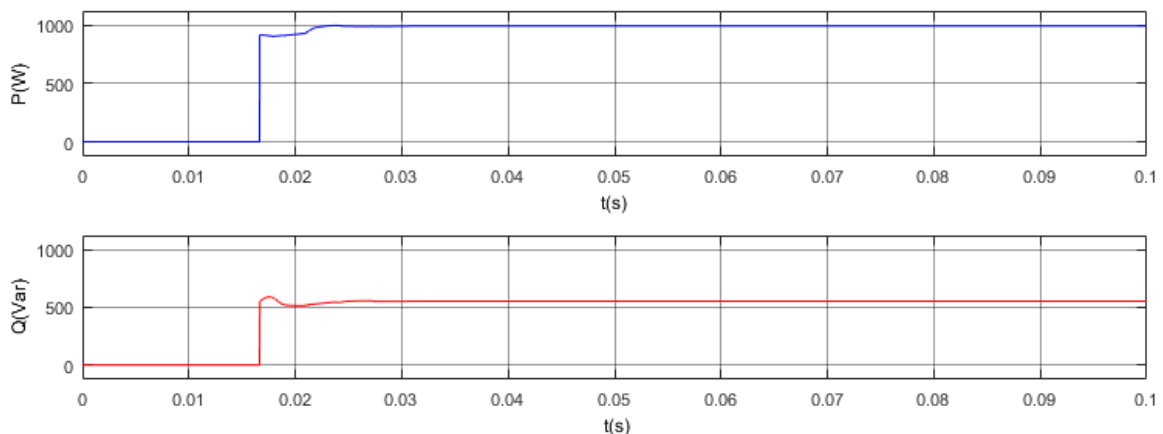
Como se puede ver en la figura anterior en la parte superior están las ondas de las corrientes, las cuales son periódicas, sin embargo no son puramente senoidales, esto es debido a los armónicos que genera la carga, ya que esta genera un gran contenido armónico como el que se observa en la figura 4-2, por otro lado en la parte inferior de la figura anterior se observan los voltajes de la carga los cuales no se ven afectados por los armónicos.

Figura 4-2: Contenido armónico de las corrientes de la carga trifilar.



En la imagen anterior se observa el contenido armónico de la carga que como se había indicado anteriormente es de 16,52%, por lo cual la onda de la corriente esta distorsionada y no es sinoidal pura; en la figura 4-3 se observan las gráficas de las potencias que consume la carga, en la parte superior esta la potencia activa y en la parte inferior la reactiva.

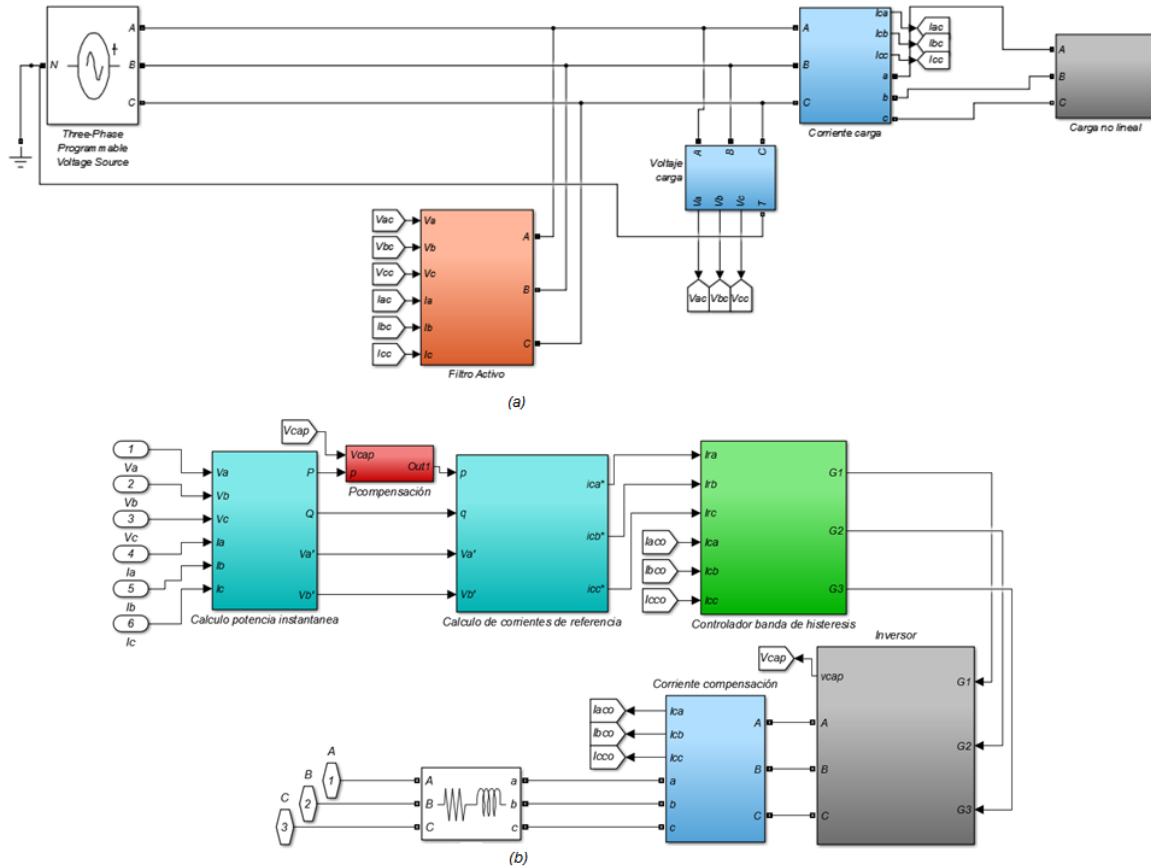
Figura 4-3: Potencias de la carga trifilar.



Una vez observadas las corrientes del sistema debidas a la carga no lineal, se procedió a probar el filtro activo en paralelo, este se puede observar en la figura 2-11, este filtro se conectó a la red, en paralelo a la carga como se observa en la parte (a) de la figura 4-4, además de dicho filtro, también se ubican medidores de voltaje y corriente para la carga,

ya que a partir de estas medidas se controla el filtro, en la parte (b) de la figura 4-4 también se puede ver el interior del filtro.

Figura 4-4: Conexión del filtro activo al sistema trifilar.

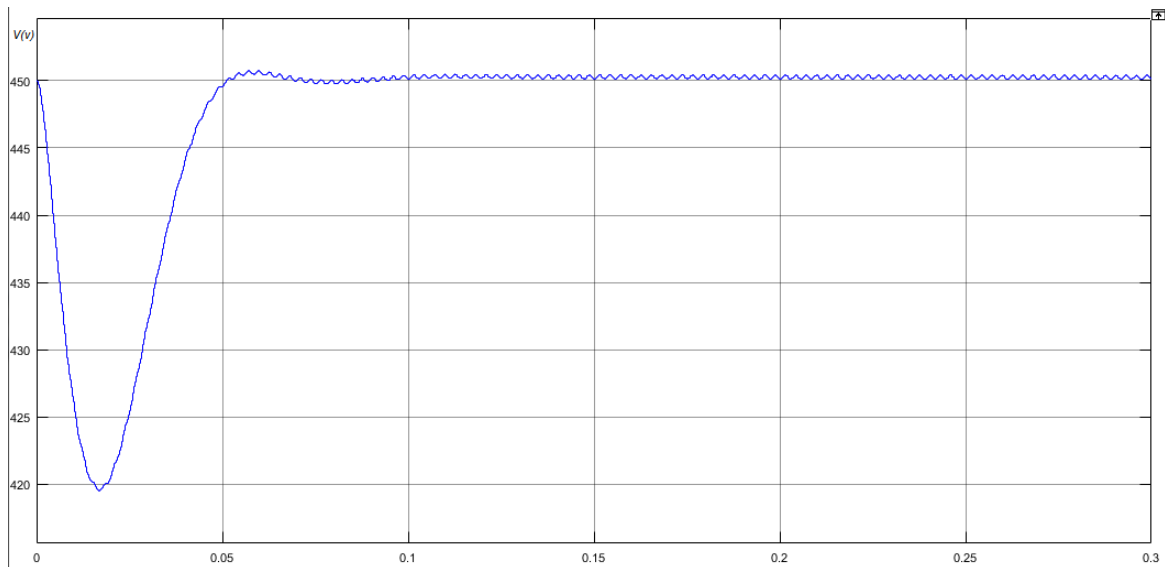


Una vez conectado todo, se procedió a simular el sistema completo para observar la funcionalidad del filtro y ver la compensación de armónicos y reactivos que realiza, también se observó la operación del capacitor, para analizar si el controlador PI si cumple bien su función y mantiene el voltaje del condensador en el valor de referencia, otro detalle que es importante ver es lo que pasa en el filtro pasabaja, para observar si también cumple su tarea.

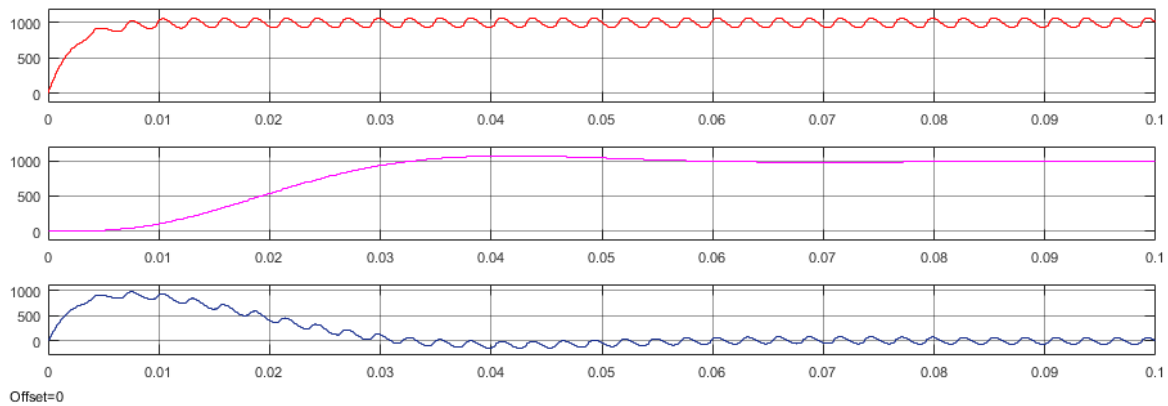
Dicho lo anterior lo primero que se visualizó fue el voltaje del capacitor, teniendo en cuenta que como se indicó anteriormente el voltaje de DC se debe mantener idealmente constante en 450v, de esto se debe encargar el controlador PI del que se trató en el capítulo 2, este se sintonizó mediante el programa para las características del

condensador, en la figura 4-5 se observa el voltaje de DC, que en este caso es el mismo del capacitor, y se observa que el controlador cumple su función y mantiene el voltaje prácticamente constante, inicialmente tiene una caída pero eso se debe al tiempo de respuesta del controlador que es relativamente rápido, y luego el voltaje vuelve a subir al valor de referencia, donde se mantiene y tiene un pequeño rizado que es menor al 2%, ya que al calcular la capacitancia se tuvo en cuenta ese porcentaje.

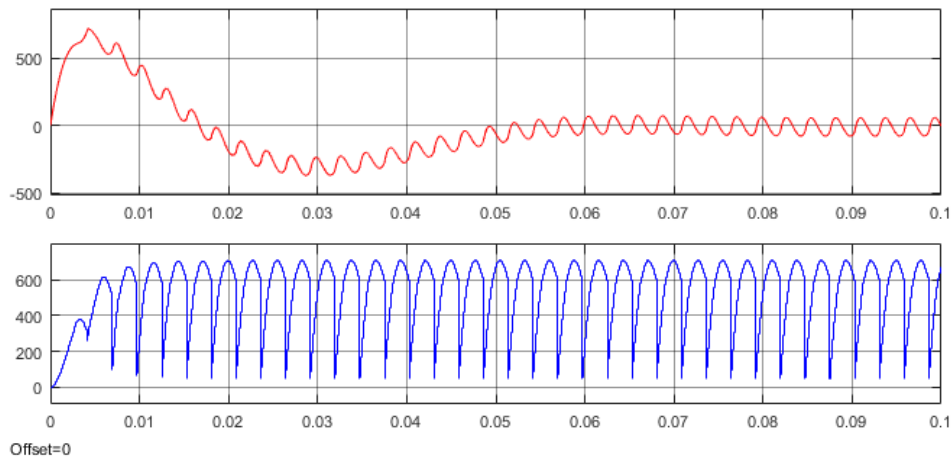
Figura 4-5: Voltaje de DC del inversor trifilar.



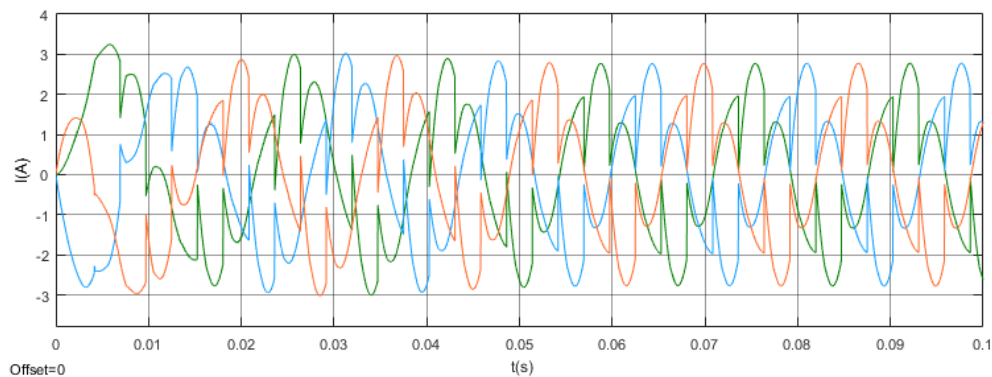
Lo siguiente que se observó en la simulación fue la parte del filtro pasabaja, en la figura 4-6 se observan tres potencias, en la parte superior se observa la potencia real instantánea total calculada, formada por su componente oscilante y su componente constante, en el medio se encuentra la componente constante de la potencia real, la cual se obtuvo a través del filtro pasabaja, y se puede notar que el filtro si cumple su función y elimina la parte oscilante de la potencia, y en la parte inferior se observa la componente oscilante de la potencia real la cual como se mencionó anteriormente se obtiene de la diferencia de la potencia total y la componente constante.

Figura 4-6: Potencia real instantánea y sus componentes.

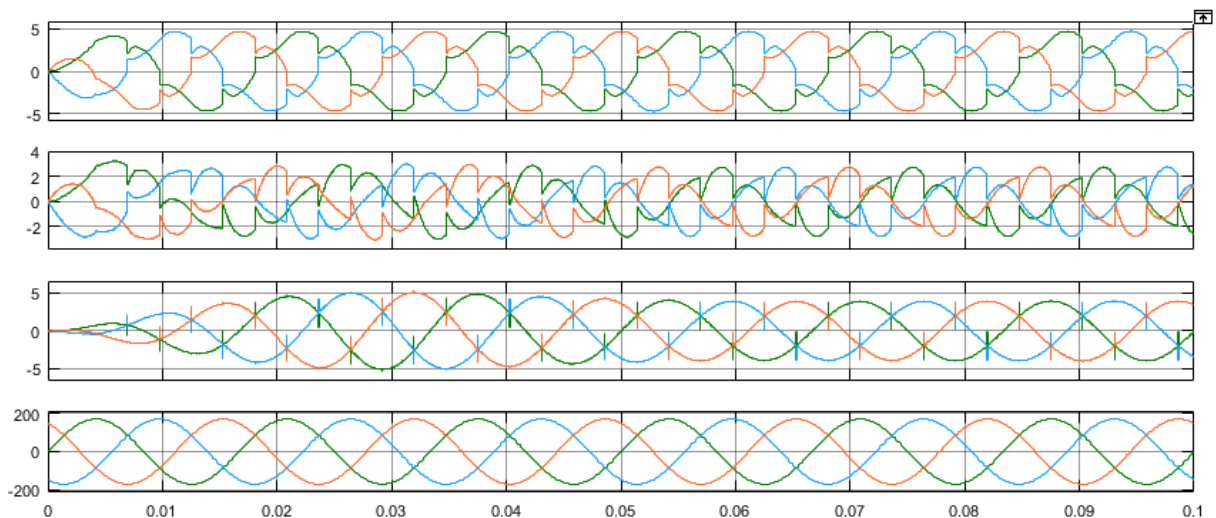
Por otro lado en la figura 4-7 se observan las potencias a compensar, en primer lugar se advierte el resultado de la diferencia de la componente oscilante de la potencia instantánea real observada en la figura 4-6 y las pérdidas que presenta el convertidor de potencia que se obtuvieron mediante el controlador PI, en segundo lugar se observa la potencia instantánea imaginaria total que como se indicó anteriormente se debe compensar toda.

Figura 4-7: Potencias de compensación de filtro trifilar.

Una vez observadas las potencias de compensación, lo siguiente que se contempló fueron las corrientes de referencia, las cuales se calcularon en el método de control, estas se observan en la figura 4-8 y a partir de ellas se realiza el control por banda de histéresis que las compara con las corrientes que salen del inversor.

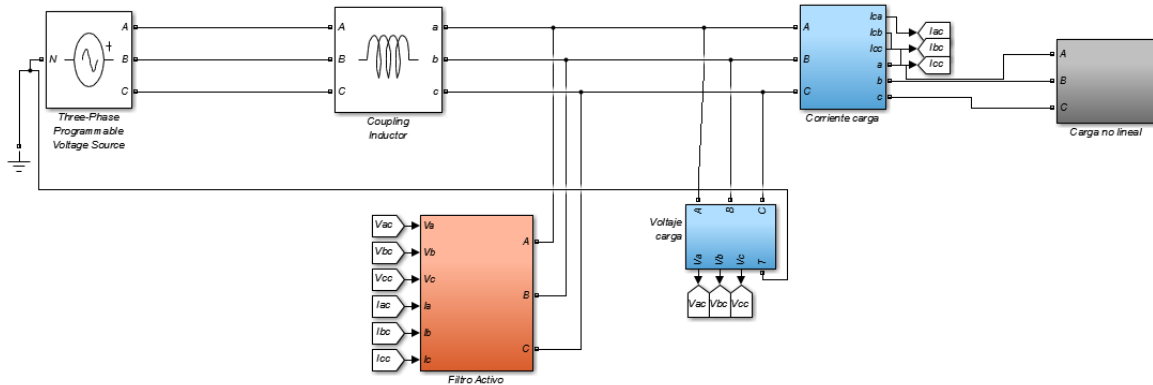
Figura 4-8: Corrientes de referencia del filtro trifilar.

Observadas todas estas graficas que hacen parte del control, es hora de observar los resultados, los cuales se aprecian en la figura 4-9, en la cual se pueden advertir, en primer lugar las corrientes de la carga, las cuales ya se habían visto anteriormente, en segundo lugar se observan las corrientes de compensación las cuales son generadas por el filtro y comparadas con las corrientes de referencia en el controlador de banda de histéresis, en tercer lugar se observan las corrientes de la red, las cuales como se puede advertir son senoidales y prácticamente puras, es decir que el filtro activo si está cumpliendo bien su función respecto a compensar armónicos, pero las corrientes de la red no son 100% puras debido a los picos que presentan las ondas, los cuales se deben al switcheo del condensador, y en último lugar se observan las tensiones de la carga que son las mismas de la red y que como se plasmó anteriormente no están afectadas por armónicos.

Figura 4-9: Corrientes y voltajes del sistema trifilar.

Para eliminar los picos que se observaron en las corrientes, en este proyecto se usó un filtro extra formado por una inductancia muy pequeña que se insertó en la red como se observa en la figura 4-10.

Figura 4-10: Inserción de filtro extra al sistema trifilar.



Al simular el sistema con la inductancia insertada en la red, se puede notar que la corriente es prácticamente sinusoidal pura, esto se puede ver en la figura 4-11, con esto se puede decir que se eliminaron los armónicos de la red trifilar debidos a la carga planteada, para corroborar esto se midió el contenido armónico de la red y el resultado se aprecia en la figura 4-12 donde se advierte que el contenido armónico se redujo significativamente.

Figura 4-11: Corrientes de la red trifilar.

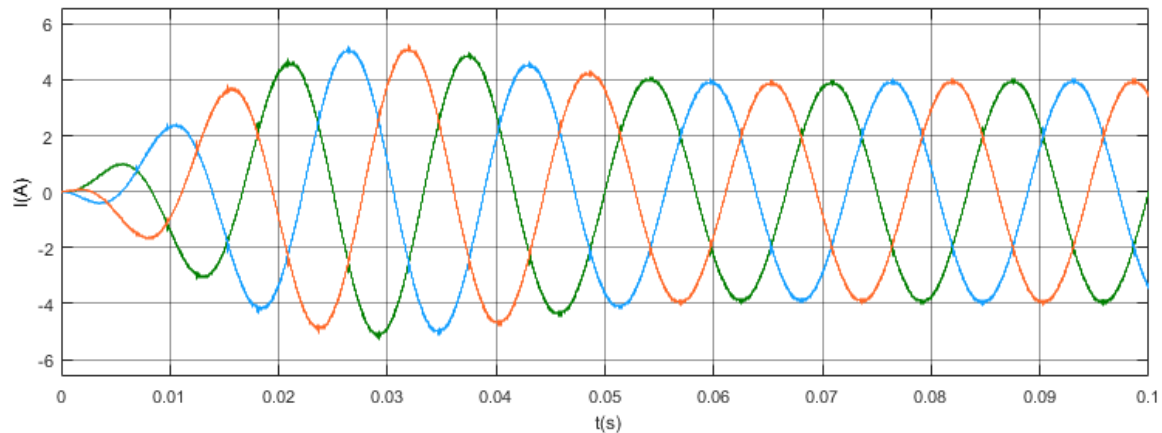
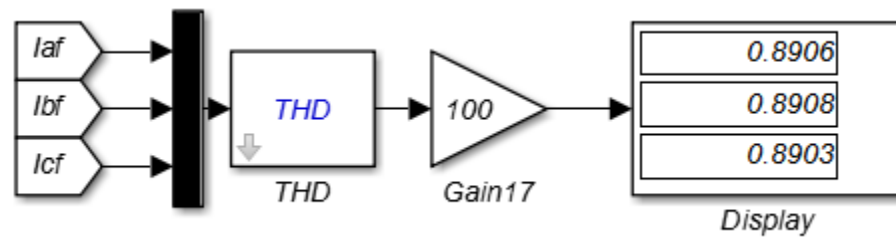
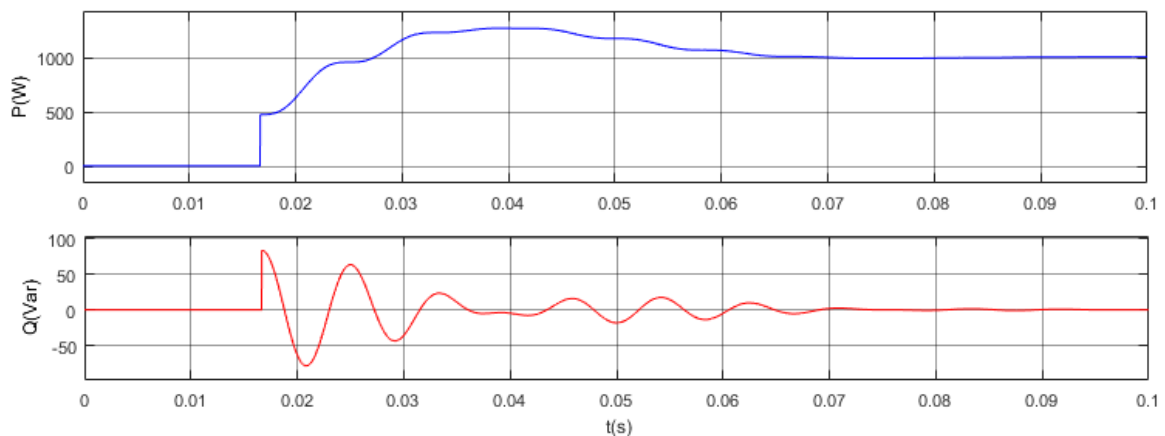


Figura 4-12: Contenido armónico de las corrientes de la red trifilar.

Lo último a analizar es si el filtro está compensando reactivos o no, para esto se miden las potencias en la red, las cuales se pueden apreciar en la figura 4-13, donde, en la parte superior se ubica la potencia activa y en la parte inferior la potencia reactiva, esta última se compara con la de la carga la cual se observa en la figura 4-3, y se puede notar que la de la red es mucho menor lo que quiere decir que el filtro activo está compensando los reactivos de la carga.

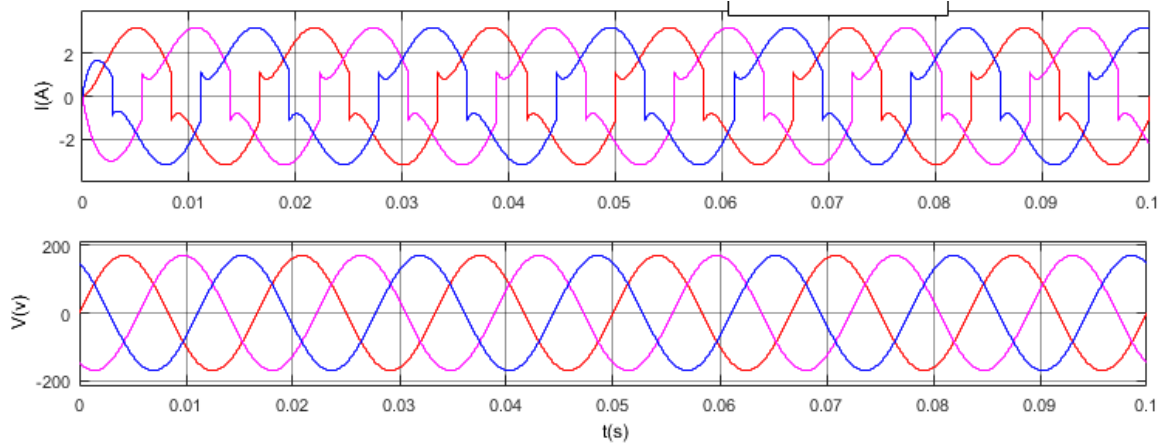
Figura 4-13: Potencias de la red trifilar.

4.2 Escenario tetrafilar

En este caso al igual que en el anterior, se simularon dos escenarios, el primero del sistema sin el filtro y el segundo con el filtro, en el primero como se hizo anteriormente primero se visualizan las corrientes de la carga, las cuales son las mismas de la red y se observan en la figura 4-14, estas corrientes están deformadas periódicamente debido a los armónicos

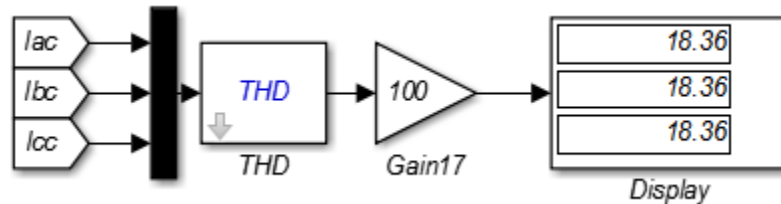
que genera la carga, además en figura también se pueden observar los voltajes de la carga que también son los mismos de la red y estos no se ven afectados por los armónicos.

Figura 4-14: Corrientes y tensiones de la carga tetrafilar.

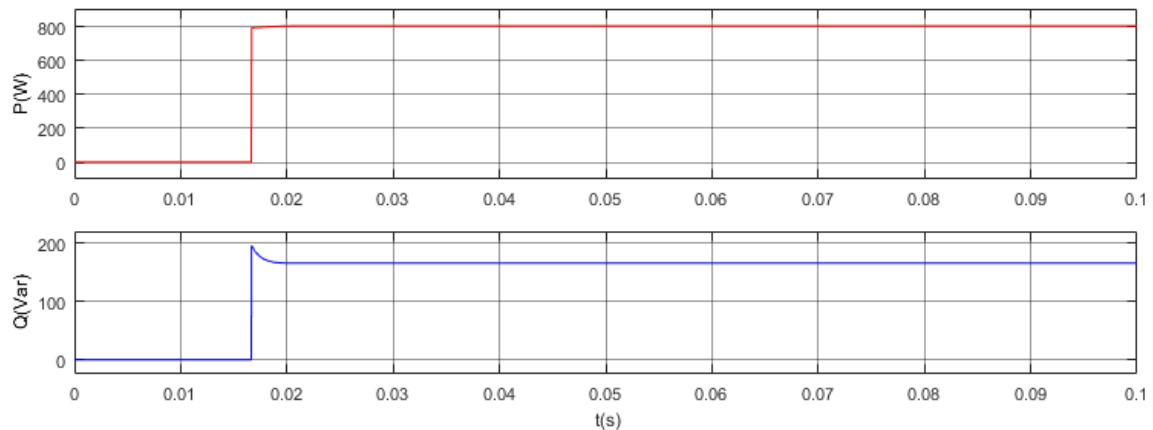


Para verificar que las ondas de corriente si tienen armónicos, se realizó el mismo proceso y se midió el contenido armónico de dichas corrientes, el cual se observa en la figura 4-15 y es de 18,36%.

Figura 4-15: Contenido armónico de las corrientes de la carga tetrafilar.



Como se observó en la figura anterior la red si tiene armónicos, por lo cual es necesario la intervención del filtro activo para compensarlos, además de esto también se midieron las potencias de la carga para analizar si el filtro debe compensar reactivos o no, las potencias de la carga se contemplan en la figura 4-16, en la parte superior esta la potencia activa que consume la carga y en la inferior la reactiva, basado en lo que de observa en la imagen se puede afirmar que el filtro debe compensar también reactivos.

Figura 4-16: Potencias de la carga tetrafilar.

Al igual que en el caso del filtro activo trifásico trifilar para simular el segundo escenario se debió conectar el filtro activo a la red en paralelo a la carga como se visualiza en la parte (a) de la figura 4-17, la composición interna de este filtro ya se observó y analizó anteriormente en la figura 2-19, pero también se puede observar en la parte (b) de la figura 4-17.

Al simularlo, inicialmente se observó lo que pasa en el control y finalmente se los resultados, como en el inciso anterior primero se visualizara el voltaje de DC que en este caso es la suma del voltaje de los dos capacitores, lo ideal de dicho voltaje es que se mantenga en 450v ya que ese es el voltaje de referencia, como ocurrió en el caso anterior en los primeros instantes tiene una caída de tensión pero esto es debido al tiempo de respuesta del controlador PI, pero luego vuelve y retoma el valor que debe tener, el cual presenta un pequeño rizado que es menor al 2% ya que en base a eso se determinaron las capacitancias de los capacitores, la tensión de DC se observa en la figura 4-18.

Figura 4-17: Conexión del filtro activo al sistema tetrafilar.

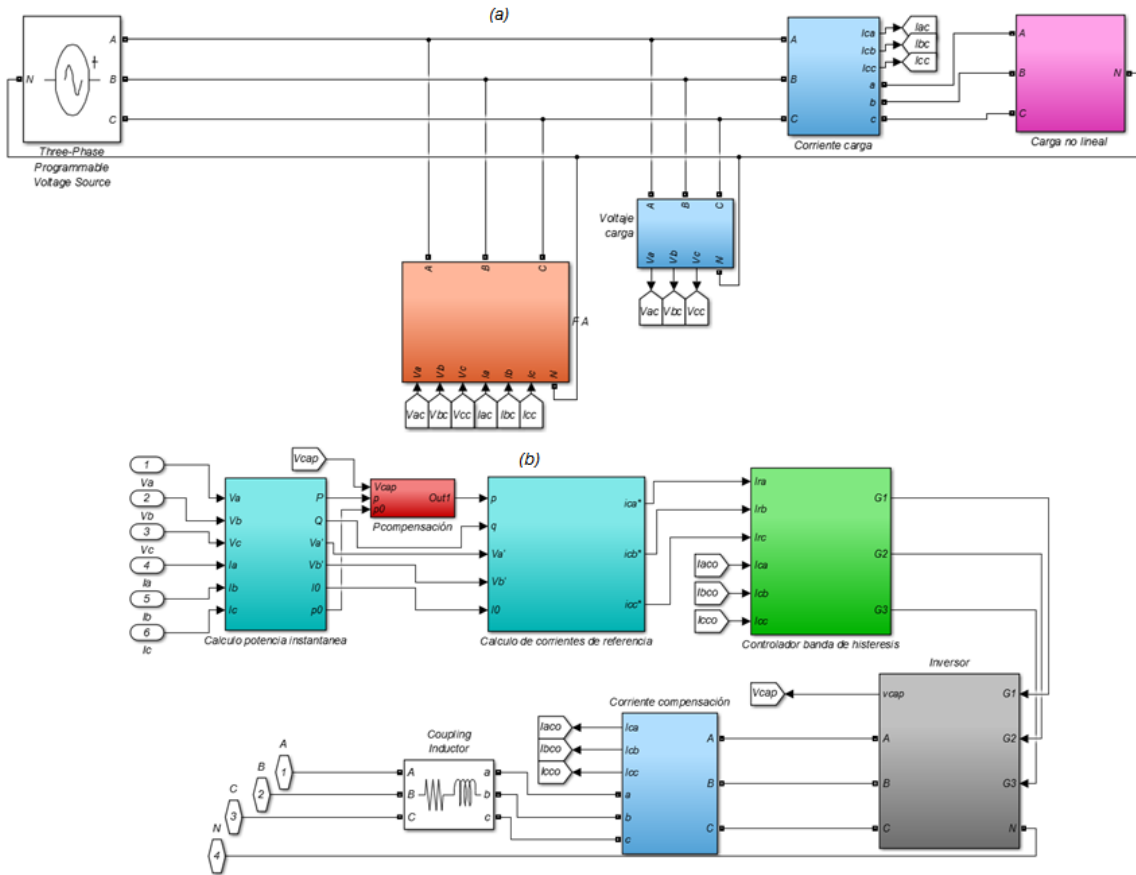
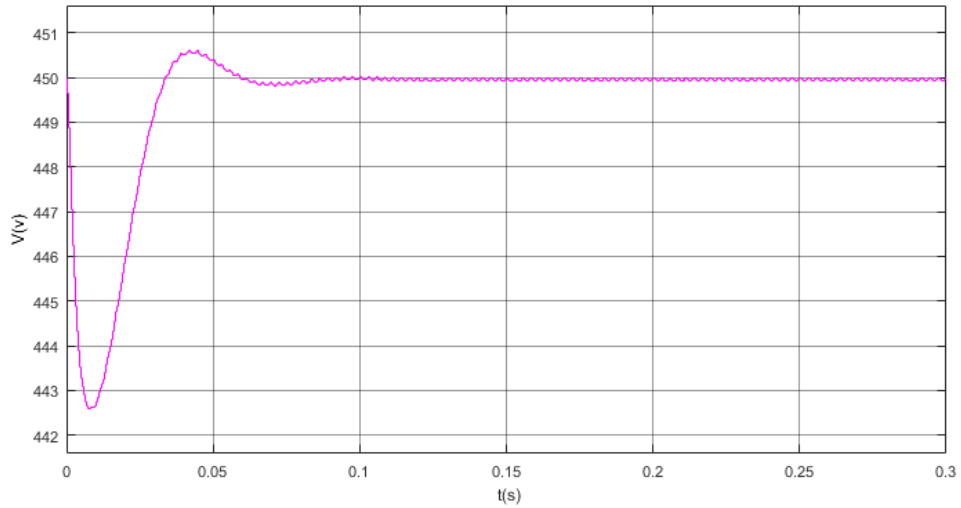


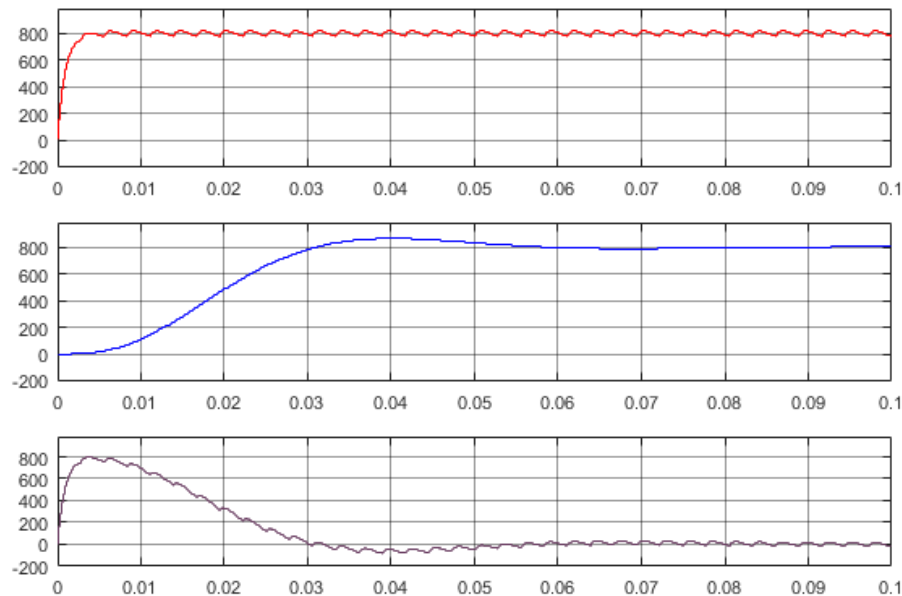
Figura 4-18: Voltaje de DC del inversor tetrafilar.



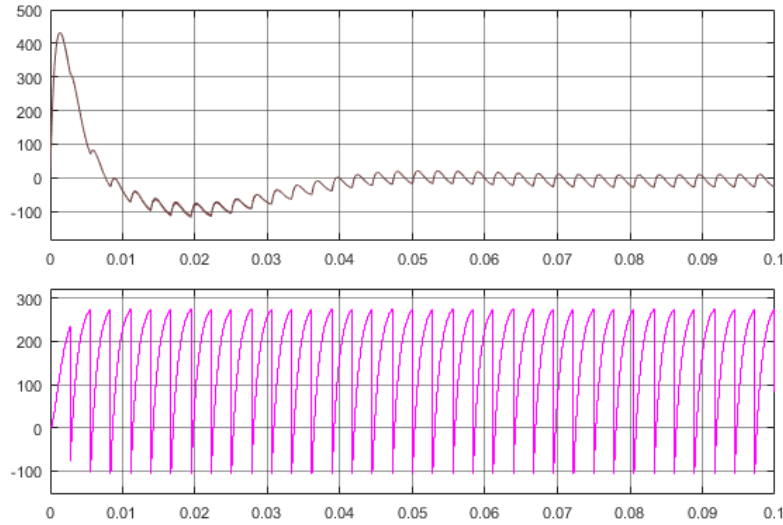
Lo siguiente que se observa, como en el caso anterior son las potencias calculadas por el método de control de la teoría de las potencias instantáneas, en primer lugar en la figura

4-19 se observa la potencia real instantánea en la parte superior de la figura, la potencia instantánea imaginaria se observa en la figura 4-20 en la parte inferior, en la figura 2-19 aparte de la potencia real instantánea total también se observan la componente constante y oscilante de esta potencia respectivamente, la primera se determina mediante el filtro pasabaja del que se expuso anteriormente y la segunda se obtiene como la diferencia de la potencia real instantáneas y la componente constante.

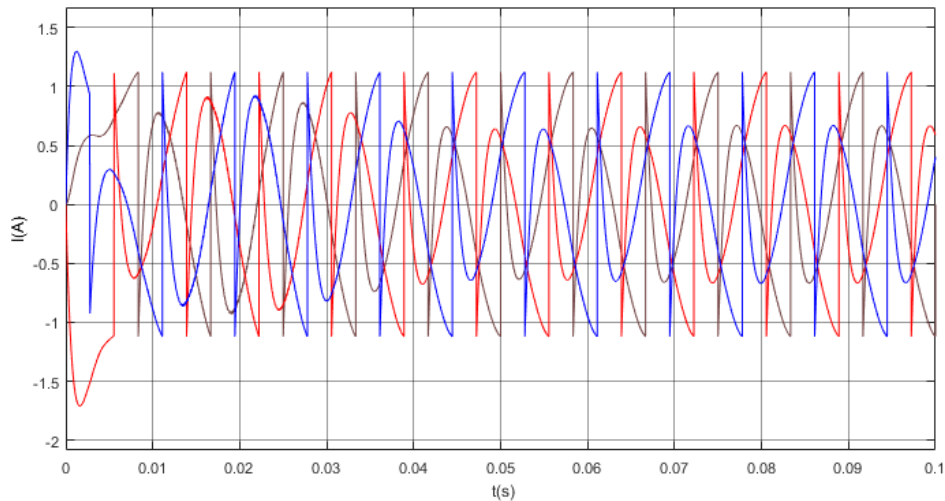
Figura 4-19: Potencia instantánea real y sus componentes.



En la figura 4-20 se observan las potencias de compensación, en la parte inferior como se dijo anteriormente se advierte la potencia instantánea imaginaria total, la cual se calculó mediante el método de control y se debe compensar toda, en la parte superior se observa la potencia real instantánea a compensar, la cual se obtiene como se dijo anteriormente de la diferencia de la componente oscilante de la potencia real instantánea, y la suma de la componente constante de la potencia homopolar y las pérdidas del convertidor que se obtienen mediante el controlador PI.

Figura 4-20: Potencias de compensación de filtro tetrafilar.

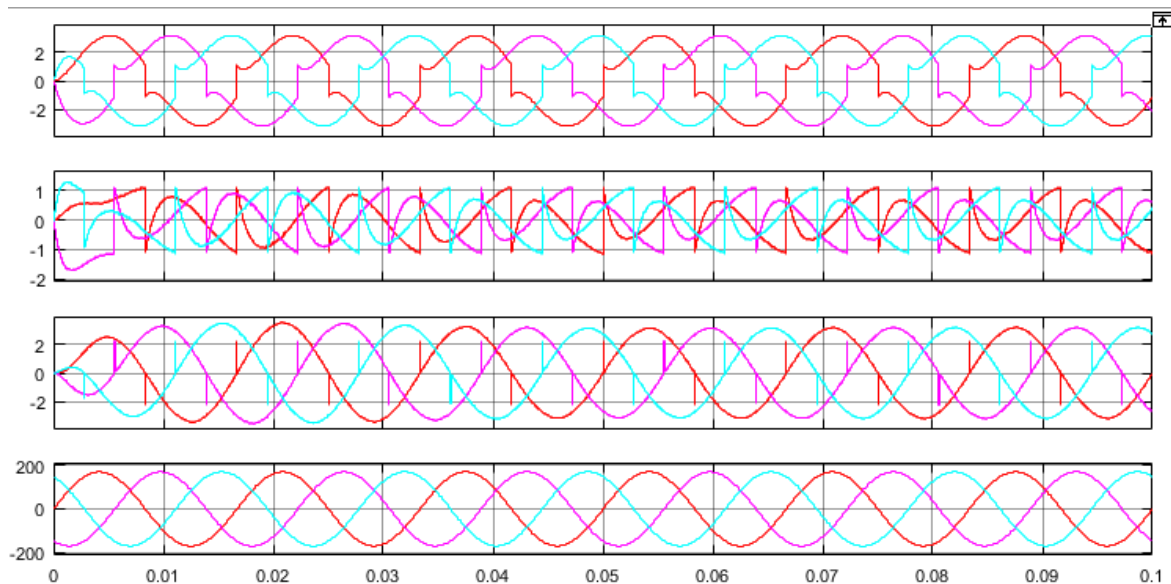
Siguiendo el método de control a partir de estas potencias de determinan las corrientes de referencia, las cuales se comparan en el controlador de banda de histéresis con las corrientes de compensación que salen del filtro, estas corrientes de referencia determinadas por el método de la teoría de la potencia instantánea se observan en la figura 4-21.

Figura 4-21: Corrientes de referencia del filtro tetrafilar.

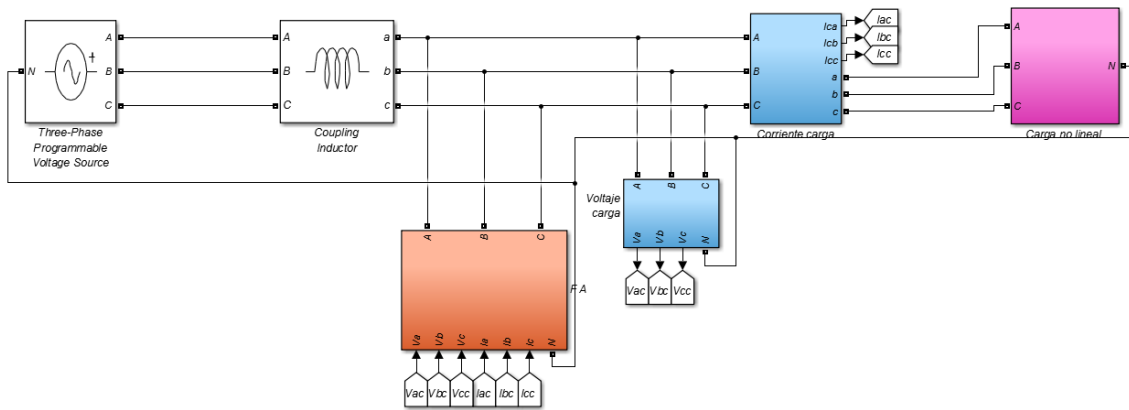
Una vez visualizado lo ocurrido en el control se procede a contemplar los resultados, lo primero es visualizar si los armónicos fueron eliminados ya que esa es la función principal del filtro, esto se puede analizar en la figura 4-22 en la cual se observan 4 graficas, tres de

corriente y una de voltaje, la primera de arriba hacia abajo muestra las ondas de corriente de la carga, las cuales ya se visualizaron en la figura 4-14 y están deformadas periódicamente por los armónicos, la segunda ilustra las ondas de corriente de compensación medidas a la salida del inversor, estas corrientes se usan en el controlador de banda de histéresis y son entregadas a la red, ya que al sumarse con la corriente de la carga elimina los armónicos, la tercera permite contemplar las ondas de corriente de la red, las cuales como de advierte son prácticamente senoidales, aunque presentan unos ligeros picos debidos a lo mismo que en el caso anterior y para los cuales se aplica la misma solución, en la última se observan las ondas del voltaje que son los mismos tanto para la carga como para la red, ya que el filtro no lo afecta porque está en paralelo.

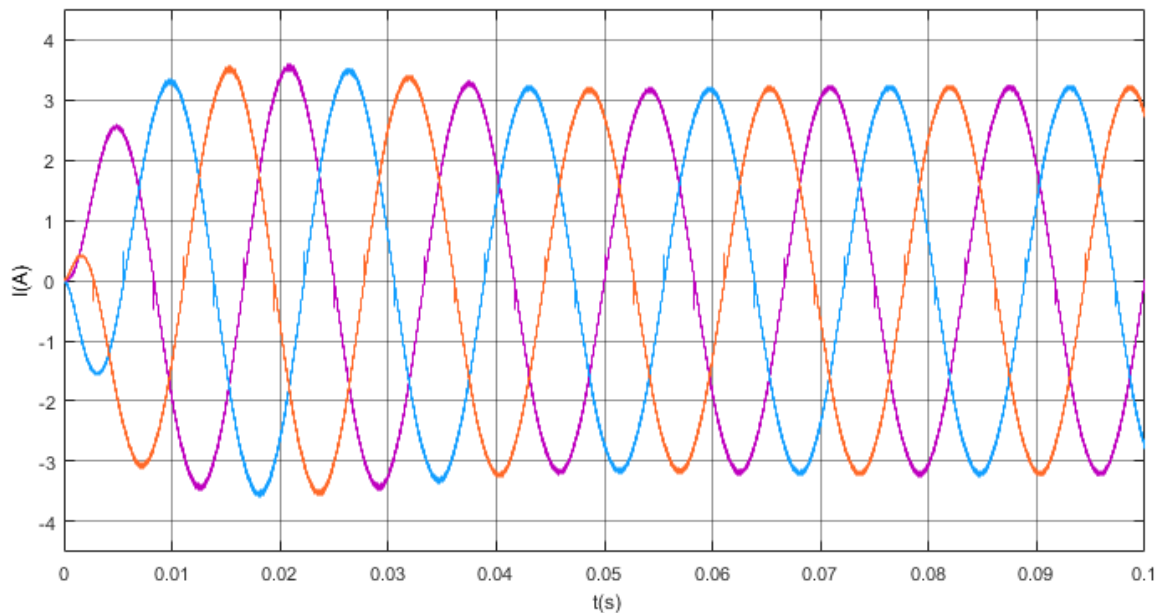
Figura 4-22: Corrientes y voltajes del sistema tetrafilar.



Como ya se mencionó, para suprimir los picos que presentan las ondas de corriente de la red se utilizara un filtro extra compuesto por inductancias como en el caso del filtro trifilar, la inserción de esta inductancia al sistema se observa en la figura 4-23.

Figura 4-23: Inserción de filtro extra al sistema tetrafilar.

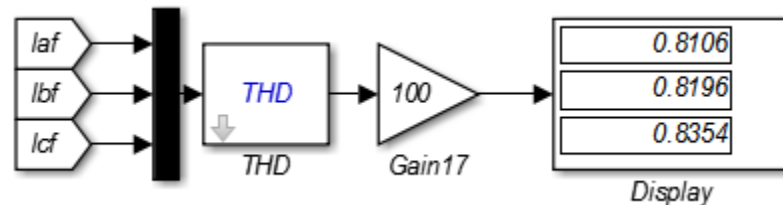
Una vez agregado el filtro extra, se vuelve a simular el sistema para comprobar si los picos en las ondas de corriente de la red fueron eliminados, en la figura 4-24 se observan las ondas de la corriente de la red tras la nueva simulación, y efectivamente los picos que presentaban las ondas fueron suprimidos casi totalmente, por lo cual se puede decir que las ondas de la corriente son prácticamente senoidales puras.

Figura 4-24: Corrientes de la red tetrafilar.

Por otro lado para comprobar la funcionalidad del filtro activo respecto a la compensación de armónicos, como en el caso anterior se mide el contenido armónico total de las ondas de corriente de la red, los resultados de esta medición se pueden ver en la figura 4-25, y a

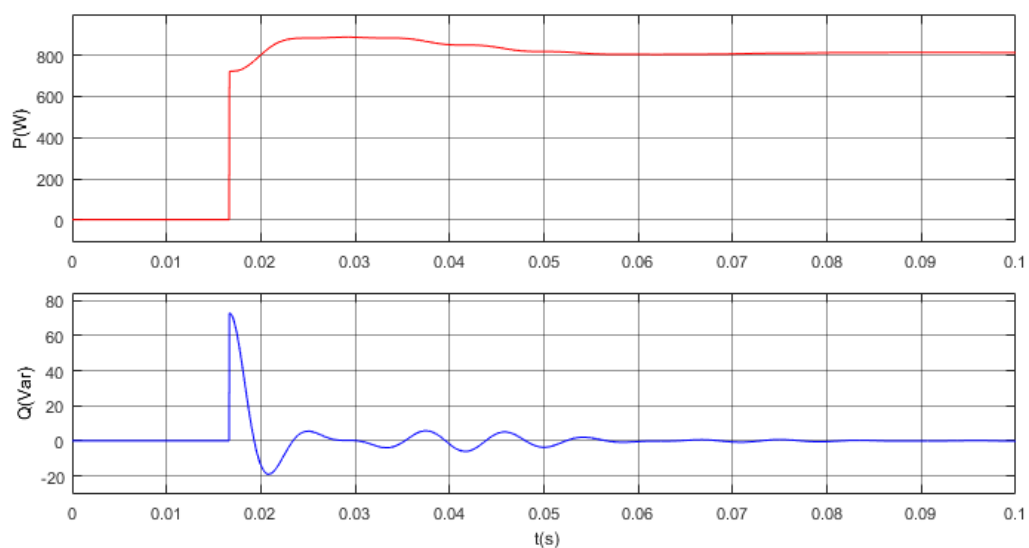
partir de ellos se puede concluir que el filtro activo está cumpliendo bien su función de compensar armónicos ya que redujo el contenido armónico de las corrientes de la red de un 18,36% a un 0,81%.

Figura 4-25: Contenido armónico de las corrientes de la red tetrafilar.



Como se observó previamente el filtro activo si está compensando armónicos, ahora lo que sigue es saber si está compensando reactivos o no, para esto se realizaron mediciones de la potencia de la red una vez implementado el filtro activo, el resultado de estas mediciones se observa en la figura 4-26, en la parte superior se visualiza la potencia activa, la cual es un poco diferente a la observada anteriormente en la figura 4-16 por un breve lapso de tiempo, esto debido al transitorio producido cuando se conecta el filtro, por otro lado en la parte inferior se observa la potencia reactiva de la red, la cual comparada con la vista en la figura 4-16 es muy pequeña, lo que quiere decir que el filtro activo está compensando reactivos y está cumpliendo bien las dos funciones para las que fue diseñado.

Figura 4-26: Potencias de la red tetrafilar.



Conclusiones

Para concluir este proyecto hay que analizar diferentes puntos, el primero como indica el capítulo uno existen diferentes tipos de topologías para filtros activos combinados con múltiples estrategias de control, entre las topologías para la compensación de armónicos en la corriente, los más usados son los filtros en paralelo ya que estos operan como fuente de corriente y además, a diferencia de los híbridos pueden cumplir más funciones para el acondicionamiento de la energía, por otro lado en las estrategias de control, las del dominio del tiempo son simples de implementar, entre ellas destaca la teoría de la potencia instantánea que es la más utilizada y además de compensar armónicos también compensa reactivos.

En segundo lugar, para programar las estrategias de control, primero fue necesario estudiar arduamente estos métodos teóricamente, como el proyecto se encamino hacia el diseño de dos filtros en lugar de uno, se hizo inevitable analizar la estrategia escogida para cada tipo de filtro, en base a toda la teoría estudiada se programó minuciosamente el método en Simulink, esto no fue tan complicado debido a que solo se trataba de traspasar una estrategia de control ya existente a Simulink.

En tercer lugar, los diseño de los escenarios en los que se probaron los filtros activos diseñados tiene parámetros eléctricos similares facilitando la comparación y realización de los cálculos, ya que los parámetros eléctricos de los filtros dependen en medida de los de la red, además en este proyecto se escogió la potencia de los filtros en base a la potencia reactiva de la carga, por lo cual se puede decir que los filtros de este proyecto están diseñados para los escenarios simulados específicamente, y que si quisiera probar en un escenario alterno con características totalmente diferentes se debería realizar nuevamente los cálculos de los parámetros eléctricos.

En cuarto lugar, al analizar las simulaciones se puede notar que cada parte de los filtros está cumpliendo su función, los filtros pasabaja permiten discriminar los componentes constante y oscilante, los controladores PI mantienen el voltaje de DC en el valor de referencia, los controladores de banda de histéresis están logrando que las corrientes de compensación que salen de los filtros sean iguales a las de referencia calculadas, y principalmente los filtros si están compensando armónicos y reactivos aunque las ondas de corriente no son senoidales puras los filtros si están cumpliendo su función.

Por último, es importante recalcar que se logró cumplir el objetivo principal, ya que los dos filtros diseñados cumplen correctamente sus funciones de compensar armónicos, además como función extra estos filtros también están compensando reactivos; por lo que se puede decir que las topologías y estrategias de control escogidas fueron acertadas y que la programación de dichas estrategias y cálculos de parámetros eléctricos del filtro fueron exitosos.

Bibliografía

- [1] M. A. Toledo Orozco y C. G. Jimenez Ochoa, *Análisis y propuestas para la mitigación de la contaminación armónica en las subestaciones de la empresa eléctrica regional Centrosur C.A., Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2010.*
- [2] J. C. Durán, D. Raggio, H. P. Socolovsky, M. Videla y J. Plá, «Evaluación de la calidad de la energía en dos casos de estudio: distorsión armónica inyectada por un sistema fotovoltaico de 40 kw y emitida por las cargas de una vivienda unifamiliar.,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 20, pp. 13.01-13.12, 2016.
- [3] J. D. Arcila, «Armónicos en sistemas eléctricos,» *IEB S.A.*, pp. 1-26.
- [4] J. Hafner, M. Aredes y K. Heumann, «A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, nº 1, pp. 266-272, 1997.
- [5] J. Hafner, M. Aredes y K. Heumann, «Three-phase four-wire shunt active filter control strategies,» *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 12, nº 2, pp. 311-318, 1997.
- [6] V. Kumar, A. Shankar y N. Senthil, «Implementation of Shunt Active Filter for Harmonic Compensation in a 3 Phase 3 Wire Distribution Network,» *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 172-179, 2017.
- [7] I. Maurya, S. Gupta y P. Maurya, «An efficient harmonic detection approach for shunt active filter based on wavelet transform,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, nº 4, p. 2833, 2018.
- [8] S. Mahaboob, S. Kumar Ajithan y S. Jayaraman, «Optimal design of shunt active power filter for power quality enhancement using predator-prey based firefly optimization,» *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 44, pp. 522-533, 2019.
- [9] M. A. Bernal Piñeros y S. D. Garcia Ramirez, *Reducción de contenido armónico usando un filtro activo de potencia tipo serie*, Pereira: Universidad Tecnológica De Pereira, 2013.
- [10] A. Casilimas Peña, *Diseño y simulación de un filtro activo trifásico shunt usando el algoritmo Icos(ϕ)*, Pereira: Universidad Tecnológica De Pereira, 2016.
- [11] M. A. Sánchez Cortés, *Calidad de la Energía Eléctrica*, Puebla: Instituto Tecnológico de Puebla, 2009.

- [12] A. A. Couoh, *Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*, México: Universidad Nacional Autónoma De México, 2016.
- [13] H. Akagi, E. H. Watanabe y M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, 2007.
- [14] F. Jiménez López y P. F. Cárdenas, «Design and implementation of antialiasing filters for voltage and current harmonics acquisition in a fap,» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, nº 18, pp. 10-17, 2011.
- [15] B. J. Villatoro Martínez, *Teorías de diseño de filtros activos para mitigación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia*, Guatemala: Universidad De San Carlos De Guatemala, 2009.
- [16] M. R. Lumbreras, *Filtros activos de potencia para la compensación instantánea de armónicos.*, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- [17] A. Alzate Gómez, D. Murillo Yarce y R. L. Silva Cárdenas, «Prototype for harmonic compensation in three phase systems,» *Revista Tecnura*, vol. 20, nº 50, pp. 96-105, 2016.
- [18] P. Cardenas, D. Morales y F. Jiménez, «Consideraciones matemáticas para el modelamiento y control de un filtro activo de potencia en paralelo,» *Revista internacional ALAMMI*, vol. 1, pp. 1-9, 2009.
- [19] L. S. Czarnecki, «Instantaneous reactive power p-q theory and power properties of three-phase systems,» *IEEE transactions on power delivery*, vol. 21, nº 1, pp. 362-367, 2006.
- [20] J. J. Marulanda Durango y J. Cadavid Rodríguez, *Control por histéresis de la corriente en los filtros activos de potencia*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [21] Y. S. Prabhu, A. A. Dharme y D. B. Talange, «A three phase shunt active power filter based on instantaneous reactive power theory.,» de *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Pune (India), 2014.
- [22] V. Soares, P. Verdelho y G. D. Marques, «An instantaneous active and reactive current component method for active filters,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, nº 4, pp. 660-669, 2000.

- [23] C. J. Hernández Carimán, *Control de un filtro activo paralelo basado en un convertidor fuente de voltaje de 4-piernas aplicado a sistemas de distribución de 4-hilos*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2016.
- [24] J. M. Ruiz Vallejo y F. H. Ortíz Quintero, *Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos.*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [25] P. F. Cárdenas, F. Jimenez y C. A. Peña Cortes, «Shunt active power filter: analysis and desing,» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, nº 14, pp. 17-25, 2009.
- [26] F. Jiménez López, P. F. Cárdenas Herrera y D. L. Morales, «Diseño y simulación de un filtro activo de potencia para la eliminación de armónicos,» *In Vestigium Ire*, vol. 1, nº 3, pp. 47-67, 2010.
- [27] A. Y. Muñoz Jadán y P. I. Pasmay Bohórquez, *Diseño y simulación del control de un filtro activo de potencia paralelo trifásico.*, Guayaquil: Escuela superior politécnica del litoral, 2012.
- [28] M. Kashif, M. Hossain, F. Zhuo y S. Gautam, «Design and implementation of a three-level active power filter for harmonic,» *Electric Power Systems Research*, vol. 165, pp. 144-156, 2018.
- [29] Y. Zhang, X. Cheng, X. Zong, Y. Wei, Y. Li y Q. Zhao, «A Design Method of AC-Side Inductance for Shunt Active Power Filter: A Switched,» de *Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Nanjing, China, 2010.
- [30] N.-Y. Dai y M.-C. Wong, «Design considerations of coupling inductance for active power filters,» de *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011.
- [31] F. E. Rojas Romero, *Diseño e implementación de un filtro activo de potencia mediante filtros adaptativos para la reducción de armónicos de corriente ante variaciones de la frecuencia fundamental*, Bogota: Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2016.

Anexo A: Sintonización del controlador

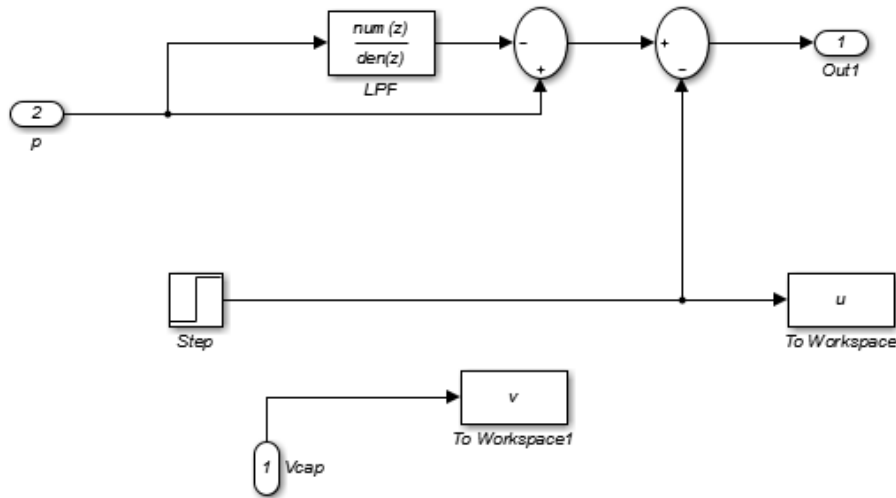
PI

Como se planteó en el capítulo 2, en el control de los filtros activos en paralelo a diseñar se requiere el uso de controladores PI, ya que con estos se mantienen los voltajes de DC en los valores de referencia, además en los lazos de control de las potencias de compensación determinan las pérdidas en el inversor que son aquellas que se dan, debido a la potencia que consume el condensador para mantener el voltaje de DC en el valor de referencia.

En este anexo, en primer lugar se plantea el diseño del controlador del filtro activo trifásico trifilar, para diseñar este controlador, se hizo necesario conocer dos parámetros, el primero fue el del voltaje de referencia, el cual se determinó en el capítulo 3, y el segundo fue la medición del voltaje de DC, el cual se obtuvo mediante un medidor de voltaje en la simulación que fue requerida para la sintonización de dicho controlador.

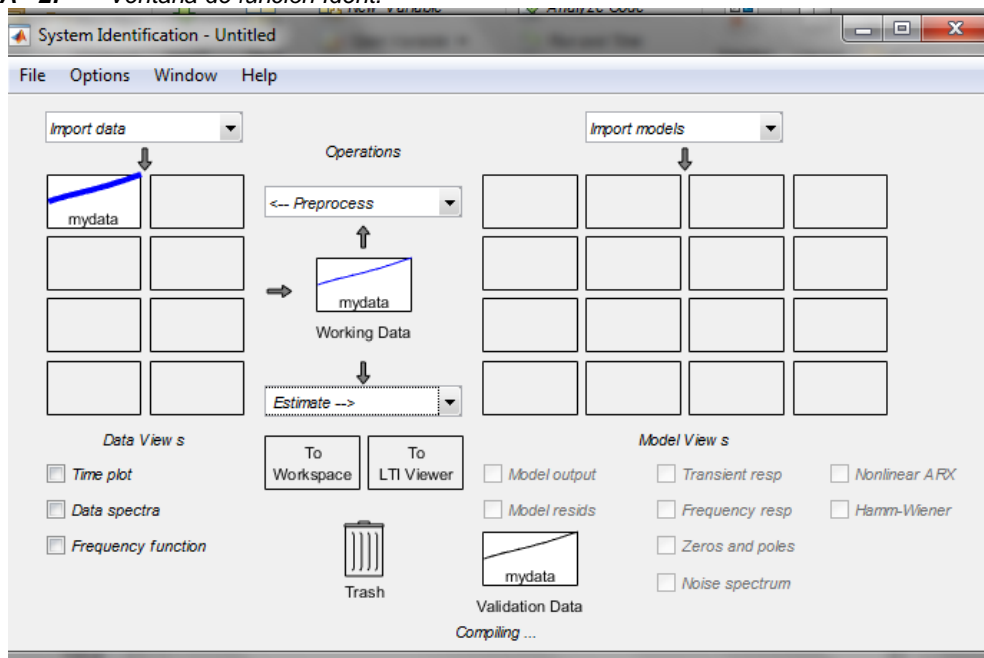
En la simulación para la sintonización del controlador, el voltaje de referencia se produjo mediante el bloque Step del programa, y el voltaje de DC como se indicó anteriormente se midió del inversor con un medidor de voltaje, estos dos valores se ingresaron en un bloque llamado "To workspace" como se observa en la figura A-1, a través de dicho bloque se guardaron los valores de los voltajes en el workspace de Matlab como variables.

Figura A - 1: Ingreso de señales de voltajes a Workspace.



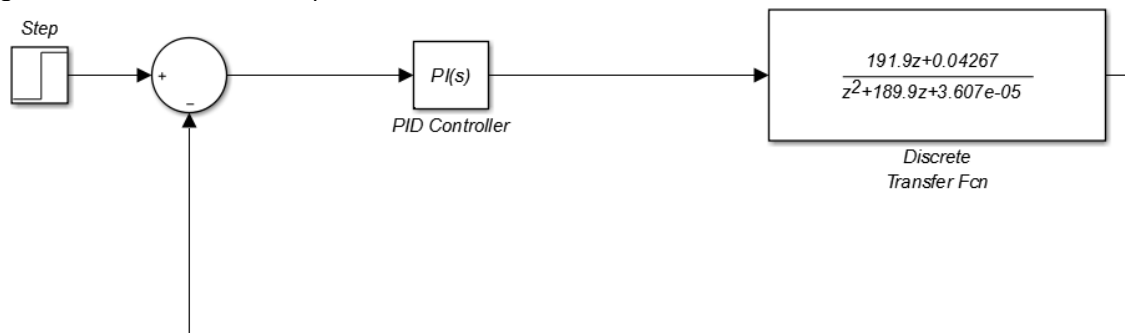
Una vez definidas dichas variables en el workspace, se utilizó la función `Ident` en Matlab, esta función generó una ventana, la cual se observa en la figura A-2 y en ella se importaron los datos de las variables en el dominio del tiempo, ya que en la simulación se guardaron varios datos de los voltajes en el tiempo en el bloque "To workspace", una vez importados los datos se estimó la función de transferencia.

Figura A - 2: Ventana de función `Ident`.



Con la función de transferencia determinada se creó un lazo cerrado, en el cual se ubicaron los bloques que se observan en la figura A-3, el bloque "Step" es el mismo que se utilizó al inicio del proceso, en el bloque "Discrete Transfer Fcn" se ingresaron los datos de la función de transferencia, y el bloque "PID Controller" es el controlador que se usa en el filtro activo, para determinar los valores de P e I se simuló el lazo cerrado y luego en el bloque del controlador se utilizó la opción "Tune" y a través de esta se determinaron los valores de PI.

Figura A - 3: Lazo cerrado para determinación de PI.



El controlador determinado en el lazo de control es el mismo que se utiliza en el filtro activo, lo que quiere decir que una vez realizado el proceso anterior se terminó el diseño del controlador PI del filtro activo trifásico trifilar, para el otro filtro, se decidió utilizar el mismo controlador ya que los dos voltajes de referencia son iguales según lo determinado en el capítulo 3, además el voltaje de DC en ambos se comporta similar.