



**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA MITIGAR
LOS ARMONICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE
PRESENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO DE
POTENCIA DE LA EMPRESA HPLAST.**

Autor(a): Kevin Lezama

C.I. 24.993.750

Urb. Yuma II, calle n° 3. Municipio San Diego
Teléfono (0241) 8714240 (master)-Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA MITIGAR LOS ARMONICOS DE
CORRIENTE Y VOLTAJE PRESENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO DE
POTENCIA DE LA EMPRESA HPLAST.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Autor: Lezama Piña, Kevin Omar

V – 24.993.750

Tutor: Ing. Adriana García

San diego 12, Enero



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-TG-2017-1CR-004

Valencia, 14 de Julio de 2017.

Ciudadano:

Lezama Kevin.

C.I. 24.993.750.

Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 14/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado “ **DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA MITIGAR LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE PRESENTES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EMPRESA HPLAST**”. Presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero electrónico.

Se ratifica la designación de la Ing. Adriana García C.I. 12.143.215 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutotes Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. José Gregorio Díaz,
Decano de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).
Archivo.



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Adriana García portador de la cédula de identidad N° 12.143.215, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Lezama Piña Kevin Omar, portador de la cédula de identidad N° 24.993.750, titulado **DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA MITIGAR LOS ARMONICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE PRESENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE LA EMPRESA HPLAST.** Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los dieciséis (30) días del mes de Junio del año dos mil diecisiete.

Ing. Adriana García.
C.I.: 12 143 215

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, por su apoyo incondicional en todo el desarrollo de mi carrera, fueron mis pilares en todo momento hasta la culminación de mi carrera.

A mi padre Sergio Antonio Lezama y a mis madres Tammy Piña y Nacari Capdevielli, las tres principales personas que me guiaron, dándome fortalezas y ganas para seguir adelante no importa cuanto obstáculos hayan en el camino

A mi compañeros de clase Michelle Crestani, Ivan Sandoval, Tomas Leung, Wilfredo Mendoza, Mario Pontillo y Peggy Romero. Que fueron los esenciales, para llegar estar donde hoy estoy, por su apoyo incondicional y sus constantes ganas de salir adelante que contagian y te motivan a ser una mejor persona.

A mi tutora académico Adriana Garcia, por aceptarme como desarrollador de este trabajo de investigacion y guiarme en los caminos adecuados y a mi tutor metodológico Alberto por tener la paciencia, atención y el apoyo para cuminal el desarrollo de esta investigacion.

Sin mas que decir, gracias

DEDICATORIA

A mi padre Sergio Antonio Lezama, por estar presente en toda mi vida y ser la guía, apoyo y pilar desde el principio de la carrera hasta la culminación, este logro alcanzado es gracias a ti papa.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I. EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema	5
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación de la investigación.....	5
1.5 Alcance de la investigación.....	7
1.6 Limitaciones de la investigación	7

II. MARCOTEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación	9
2.2 Bases Teóricas.....	13
2.2.1 Calidad de energía	14
2.2.2 Fenómenos que afectan la calidad de energía	15
2.2.3 Armónicos	16
2.2.4 Cargas lineales y no lineales.....	18
2.2.4.1Cargas lineales.....	18
2.2.4.2Cargas no lineales.....	19
2.2.5 Series de Fourier.....	19
2.2.6 Índices de calidad de energía bajo distorsión armónica	20

2.2.7	Cantidades de energía en situaciones no sinusoidales.....	22
2.2.8	Fuentes tradicionales de armónicos.....	23
2.2.9	Efecto sobre los banco de condensadores.....	27
2.2.10	Estandarización de niveles de armónicos	28
2.2.11	Medición de armónicos	31
2.2.12	Técnicas de filtrado de armónicos.....	35
2.2.13	Configuración de los filtros de potencia.....	35
2.2.14	Tipos de cargas armónicas.....	36
2.2.15	Filtro pasivo.....	37
2.2.16	Filtro activo	38
2.2.17	Diagrama de bloques para el control de una APF	43
2.2.18	Convertidor estático de potencia	44
2.2.19	Elementos para el almacenamiento de energía en continua	49
2.2.20	Dispositivos electrónicos de potencia.....	49
2.2.21	Conexión a la línea eléctrica.....	50
2.2.22	Enfoque teórico de filtros activos para el cálculo de la corriente de referencia para la compensación	51
2.2.23	La teoría de Akagi-Nabae.....	51
2.2.23.1	Transformada de Park.....	55
2.2.24	Control de la corriente de inyección.....	56
2.2.25	Control de la tensión continua.....	56

III MARCO METODOLÓGICO

3.1	Tipo de investigación.....	58
3.2	Nivel de la investigación.....	59
3.3	Diseño de la investigación.....	60
3.4	Población y muestra.....	61
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	61
3.6	Fases Metodológicas.....	61

IV RESULTADOS

4.1 FASE I.....	64
4.2 FASE II.....	65
4.3 FASE III.....	71
4.4 FASE IV.....	110

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	119
Recomendaciones.....	120

REFERERNCIAS

bibliográficas.....	121
---------------------	-----

ANEXO

- A.** Diagrama unifilar del tablero N. 2

LISTADO DE FIGURAS

CONTENIDO

FIGURA	Pp.
1 Onda sinusoidal periódica sin perturbaciones	15
2 Onda sinusoidal a 60 Hz y algunos armónicos.....	17
3 Onda sinusoidal distorsionada por el 3er, 5to y 7mo armónico.....	17
4 Forma de onda de voltaje de fuente y corriente en la carga a través de conmutación usando IGBT's.....	26
5 Límites de distorsión armónica de voltaje y corrienteIEEE-519 y	31
6 Topología y representación de una carga fuente de voltaje armónico.....	37
7 Topología y representación de una carga fuente de corriente armónica	38
8 Esquema general de un APF dentro de una red	39
9 Onda de corriente de una red eléctrica con carga no lineal sin APF y con APF.....	40
10 Topología y representación del filtro activo paralelo operando como fuente de corriente y de voltaje	41
11 Topología y representación del filtro activo serie operando como fuente de corriente y de voltaje	43
12 Diagrama de bloques de un APF	44
13 Inversor en fuente de tensión (VSI).....	47
14 Inversor en fuente de corriente (CSI).....	47
15 Estructura de un filtro activo con un inversor TLSC.....	49
16 Estructura de un filtro activo con un inversor FLFB.....	50
17 Compensación mediante filtro serie.....	51
18 Compensación mediante filtro paralel.....	52
19 Transformada de Clarke.....	53

20 Transformada inversa de Clarke.....	53
21 Transformada inversa de Clarke.....	53
22 Teoría PQ.....	54
23 Teoría PQ.....	55
24 Compensación de las componentes armónicas de potencia.....	55
25 Forma matricial de la corriente de compensación.....	56
26 Forma matricial de las corrientes trifásicas de compensación.....	56
27 FLUKE, modelo PowerLogger 1735.....	66
28 Tablero N. 1 (lado izquierdo) y Tablero N. 2 (lado derecho).....	66
29 Conexión en paralelo al sistema eléctrico de potencia del filtro activo.....	72
30 Puente inversor de voltaje, (“Voltage source inverter”, VSI), trifásico de tres ramas.....	73
31 FLFB – Four-Leg Full-Bridge.....	74
32 TLSC – Three-Leg Slip-Capacitor.....	74
33 Transferencia de Potencia entre Dos Puntos.....	82
34 Gráfica de la Corriente de Capacitor en el Primer Análisis.....	84
35 Gráfica de la Corriente del Capacitor en el Segundo Análisis.....	86
36 Diagrama de bloques del controlador de corriente.....	87
37 Diagrama de bloques de los 3 controles del filtro activo.....	89
38 Diagrama de bloques del controlador de corriente.....	91
39 Diagrama de bloques de inversor conectado a la red.....	91
40 Frecuencia de cruce de G_{ci}	98
41 Frecuencia de cruce de G_1	102
42 Diagrama de bloque del controlador de voltaje.....	103
43 Diagrama de bode de función de transferencia de voltaje.....	106
44 Diagrama de bode de función de transferencia de voltaje G_2	108
45 Diagrama de bode de función de transferencia de voltaje G_2	109
46 Diagrama de bloques del sistema de control del FAP paralelo trifásico.....	109
47 Diagrama de bloque del controlador de voltaje.....	110

48	Suministro eléctrico /red trifásica.....	111
49	Impedancia de enlace.....	112
50	Carga trifásica no lineal.....	112
51	Generador de corriente de referencia.....	113
52	Controlador de corriente.....	114
53	Generador de pulsos.....	115
54	Controlador de Voltaje.....	116
55	Corriente y Voltaje de la red cuando el filtro no está conectado.....	117
56	Análisis FFT con carga no lineal y sin paralelo trifásico.....	117
57	Corriente y Voltaje de la red cuando el filtro esta conectado a la red.....	118

LISTADO DE TABLAS

CONTENIDO

TABLA	Pp.
1 Informe de calidad de energía, Renova ingeniería	67
2 Informe de calidad de energía, Renova ingeniería.....	69
3 Tipos de controladores.....	99



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UN FILTRO ACTIVO PARA MITIGAR LOS ARMONICOS DE
CORRIENTE Y VOLTAJE PRESENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO DE
POTENCIA DE LA EMPRESA HPLAST.**

Autor: Lezama Kevin

Tutor: Adriana García

Fecha: Enero, 2017

RESUMEN

El presente trabajo está tipificado como un proyecto especial, conjuntamente con una investigación documental como técnica para la recopilación de información de los parámetros necesarios para diseñar un filtro activo y su funcionamiento. Igualmente este proyecto se enmarca como una investigación de campo no experimental y transversal, usando un nivel de investigación descriptivo, cuyo objetivo general es el diseño de un filtro activo para mitigar los armónicos de corriente y voltaje presentes en el sistema eléctrico de potencia de la Empresa HPLAST. El sistema de filtrado activo para mitigación de armónicos en la red se basa en una topología y un control específico con el uso de un convertidor electrónico de potencia en configuración de fuente de voltaje (Inversor a fuente de voltaje – VSI). La investigación se lleva a cabo mediante cuatro fases metodológicas directamente relacionadas con los objetivos específicos. El trabajo se presenta en cuatro capítulos donde se describen los aspectos teóricos y prácticos de los sistemas de potencia, los armónicos y los filtros activos, además de una simulación del filtro activo a través del software MATLAB R2015b. Luego, se presentan las conclusiones de la investigación donde se describe la importancia del mismo y las metas alcanzadas al desarrollar el diseño del filtro activo y por último se realiza un conjunto de recomendaciones para orientar a futuras investigaciones y mejoras que se le pueden atribuir a esta tecnología.

Descriptor: Filtro activo; armónicos de corriente y voltaje; sistema eléctrico de potencia.

INTRODUCCIÓN

La calidad de energía es primordial en toda empresa ya que es la fuente principal de alimentación de todos los equipos eléctricos y electrónicos que funcionan dentro ella. La calidad de energía debe ser una onda sinusoidal limpia de corriente y voltaje, es decir sin perturbaciones, para el óptimo funcionamiento de los equipos

La necesidad de aumentar el nivel de producción conduce al aumento de cargas no líneas como son los motores giratorios, transformadores, hornos eléctricos, lámparas florecientes, computadores, entre otros. Equipos necesarios para que la empresa crezca y exista eficiencia industrial. Toda esta implementación de estos equipos eléctricos y electrónicos anteriormente mencionados se caracteriza como cargas no lineales, que más adelante se hablara de ello. Estos dispositivos generan distorsión armónica en la red ya que están controlados por electrónica de potencia que conmutan bajo una condición preestablecida “cortando a trozos” la señal sinusoidal de corriente, esto como consecuencia afecta la forma de onda de voltaje. Esta perturbación genera un mal funcionamiento a los equipos anteriormente mencionados además de corto su vida útil.

Los filtros, son una solución para este problema de perturbación en la señal de la red de alimentación generada por cargas no lineales, debido a que un filtro según su tipo y configuración, mitiga todas aquellas señales que perturban la señal principal (armónico) a frecuencia fundamental.

El presente trabajo de grado es una investigación que tiene como propósito diseñar un filtro activo (Active Power Filter – APF) para mitigar los armónicos de corriente y voltaje presentes en el sistema eléctrico de potencia de la Empresa HPLAST. Para la investigación se define cuatro capítulos los cuales seccionan ordenadamente y se presenta de la siguiente manera:

Capítulo I: El Problema. En él se realiza el planteamiento del problema, el propósito de la investigación, los objetivos que se buscan alcanzar en el desarrollo del proyecto, la

justificación de lo que se obtendrá con la aplicación de filtros activos de potencia, el alcance y limitaciones.

Capítulo II: Marco teórico. Se describieron los antecedentes, las bases teóricas y la definición de los términos básicos referentes a la investigación.

Capítulo III: Marco metodológico. Se planteó todo lo referente al proceso de investigación, definiendo el tipo, diseño y nivel de investigación, así como la población y la muestra para la recolección de datos. Igualmente se explican cada una de las fases a realizar durante el desarrollo del trabajo.

Capítulo IV: Recursos. Para este capítulo se describirá los recursos humanos, institucionales y materiales que se necesitaran para el desarrollo de la investigación además de un cronograma de actividades.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las empresas utilizan grandes cantidades de energía eléctrica a través del sistema eléctrico de potencia, el cual se puede considerar con uno conjunto de equipos que hacen llegar la energía eléctrica desde las fuentes generadoras de energía hasta el consumidor.

Una de las definiciones de sistemas de potencia más aceptadas a escala mundial, es la establecida por el Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE – Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), este define un sistema de potencia como: *“una red formada por unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red”*(p. 81).

De acuerdo con lo anterior, el diagnóstico de calidad de energía a los sistemas eléctricos de potencia es de suma importancia para las empresas por cuanto contienen una cantidad significativa de estas cargas conectadas a la red, específicamente cargas no lineales, debido a que generan distorsión armónica de corriente y de voltaje afectando a otros equipos eléctricos o electrónicos que se encuentren conectadas a la red, reduciendo su vida útil.

Actualmente, los problemas en la calidad de la energía eléctrica se han acentuado en las instalaciones eléctricas industriales, debido a que la generación de la distorsión armónica, o de su efecto disturbador (conocido como armónico), es propio al inmenso desarrollo del control de procesos o sistemas industriales a base de electrónica de potencia, conocidas como cargas no lineales y su uso exponencial dentro de la industria, con el fin de aumentar los niveles de producción y así satisfacer la demanda que exige el mercado, específicamente, el mercado de los envases plásticos en el cual destaca la empresa HPLAST.

Los dispositivos de electrónica de potencia utilizados en el control de los procesos, tienen un comportamiento no lineal, es decir, la señal de corriente es no sinusoidal cuando se le aplica un voltaje sinusoidal, La consecuencia de esta no linealidad entre las ondas de entrada y de salida es que producen otras corrientes senoidales (a 180, 300, 420, 540, 660 hertz, entre otras), que se superponen a la onda senoidal de la fundamental a 60 hertz y, entonces, la forma de onda resultante es una deformación de la original. Dicha perturbación será más grave en cuanto haya un mayor nivel de armónicos presentes en la red eléctrica del usuario.

Debido a que la distorsión armónica aumenta la intensidad de corriente que corre por la red eléctrica, ya que, como se dijo en el párrafo anterior, las corrientes armónicas generadas se están sumando a la corriente fundamental de 60 hertz. Entonces, tanto la deformación de la onda senoidal, como las corrientes agregadas, y no considerada originalmente en la red del usuario, provocarán consecuencias que van desde errores en el funcionamiento de dispositivos hasta daños destructivos en éstos y riesgos potenciales para las personas.

Cabe agregar que los armónicos generados por cargas no lineales, son señales que distorsionan la red tanto del usuario que utiliza la energía, como el proveedor que la suministra. Por consiguiente, organizaciones técnicas nacionales e internacionales con lo son el COVENIN y la IEEE respectivamente, estas organizaciones contienen normas que deben cumplir las empresas en cuanto a porcentaje de distorsión armónica que debe de tener su sistema eléctrico de potencia en una empresa y así evitar multas o sanciones.

La búsqueda de la eficiencia energética en las industrias ha significado la implementación de tecnologías de automatización y control de procesos y considerando la relación costo-beneficio, el uso de este tipo de cargas es incuestionable, ya que proporcionan una mayor flexibilidad en el control de los procesos eléctricos incrementándose su viabilidad económica, pero, siempre que se utilicen estas tecnologías, será necesario proyectar sistemas que mitiguen las distorsiones que generen en los sistemas eléctricos de potencia.

De todo lo anteriormente planteado, se desprende la necesidad del diseño de un Diseñar un filtro activo para mitigar los armónicos de corriente y voltaje presentes en el sistema eléctrico de la empresa HPLAST, con la finalidad de mejorar la calidad de energía de su sistema eléctrico de potencia, mitigando principalmente los armónicos de corriente y voltaje con el fin evitar daños de los equipos, mantener la vida útil de los equipos y además de cumplir las normas estipuladas por organizaciones mencionadas.

1.2 Formulación del problema

De acuerdo a los planteamientos realizados anteriormente, se formula la siguiente interrogante:¿Cuáles son los parámetros necesarios para el diseño de un filtro activo para mitigar los armónicos de corriente y voltaje que perturban el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un filtro activo para mitigar los armónicos de corriente y voltaje presentes en el sistema eléctrico de la empresa HPLAST.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Ø Consultar los aspectos teóricos y prácticos asociados a los filtros activos.
- Ø Diagnosticar las condiciones de distorsión armónica que presenta el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.
- Ø Describir los parámetros necesarios para el diseño un filtro activo para el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.
- Ø Simulación del filtro activo dirigido al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST mediante el software de simulación MATLAB r2015b.

1.4 Justificación de la investigación

Con el aumento constante de las cargas no lineales conectadas al sistema de eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, aparecen muchos problemas de distorsión armónica que para el caso de esta investigación, afectan los dispositivos eléctricos y electrónicos que trabajan bajo estas condiciones no ofrecen un óptimo desempeño, reducen su vida útil y por consecuencia, la empresa pierde calidad en sus

productos. Las fallas generan paradas inesperadas en la producción con lo cual causa pérdidas económicas.

Para atacar este problema es necesario la implementación de procedimientos metodológicos para solucionar el índice armónico de corriente y voltaje presente en la red de la empresa HPLAST a través de técnicas de filtrado de señal, específicamente utilizando filtros activos de potencia, dando como justificación para mi investigación cuatro aspectos importantes que implican estos filtros.

Ü Técnico, los filtros activos tienen características ventajosas sobre los filtros pasivos, ya que estos a través de algoritmos de control, pueden adaptarse ante cualquier situación cambiante en la red contaminada con armónicos.

Ü Académico, para el área de la ingeniería electrónica el desarrollo de técnicas de filtrado en sistemas de potencia, específicamente, en banco de capacitores, es un gran aporte para el campo ya que se viendo desarrollando cada vez más dispositivos electrónicos para controlar y monitorear sistemas de potencia para calidad de energía.

Ü Seguridad, es de gran necesidad la protección de todos los dispositivos eléctricos y electrónicos operativos en la empresa, debido a que, la alta presencia de armónicos en la red pone en peligro el funcionamiento del mismo al punto de dejarlos fuera de operación.

Ü Económico, aunque el filtro activo es un dispositivo costoso, la inversión en este dispositivo mejorara la producción en la empresa debido a que los dispositivos eléctricos y electrónicos trabajaran con una señal de alimentación sin perturbaciones y gracias a esto se reducen las paradas en las líneas de la industria por factores asociados a armónicos presentes en la red.

Ü Humano, es necesario destacar la importancia que tiene para el alumnado de la Universidad José Antonio Páez, participar en dichas

soluciones, no solo como parte del cumplimiento de su plan de estudios académicos, o de su experiencia profesional, sino también el desarrollar técnicas del área de ingeniería electrónica en sistemas de potencia.

1.5 Alcance de la investigación

El alcance de investigación y desarrollo de este proyecto va dirigido a la empresa HPLAST con propósito del uso de filtros activos por la presencia de distorsión armónicas en el sistema eléctrico de potencia.

Todo el proceso anteriormente mencionado se regirá bajo normas de estandarización para el control armónico tomando en cuenta las normas nacionales dirigidas por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) y las que se emplean en todo el mundo, estas son las del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en los Estados Unidos y a la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) en la Unión Europea. La IEEE publicó la norma IEEE 519-1981 cuyo objetivo era proporcionar directrices y prácticas recomendadas para la conmutación de corriente de una fase a otra (notching), influencia telefónica, distorsión de tensión y los límites de parpadeo producidos por convertidores de potencia.

La metodología a usar en este proyecto será la metodología para el diseño, y las observaciones que se puedan llegar a obtener a través de la simulación del filtro utilizando el software MATLAB R2016b.

1.6 Limitaciones de la investigación

En este proyecto, se presentarán, simulaciones en Matlab–Simulink, del desempeño que se pueda lograr del filtro activo, mas no se realizará ningún prototipo.

La simulación del mismo se realizara de manera modular debido a que la simulación se realiza en un computador básico sin las especificaciones necesarias para una completa simulación.

Para el diseño del convertidor estatico se ha escogido componentes básicos como los switches ideales, por ello, en este trabajo se determinó el transistor

adecuado para el filtro pero no los componentes de las redes snubber debido a que no se va a implementar la investigación.

Para generar la corriente de referencia se utilizó un filtro pasa banda y pasa altos, que separa los armónicos de la corriente fundamental. Este filtro es básico en comparación a los que existen en la actualidad como por ejemplo, el filtro Kalman, PQ de Akagi, teoría de Fryze, filtro adaptativo, entre otros. Con el fin de que el diseño del filtro no sea tan complejo.

Debido a las terribles condiciones económicas en la cual se encuentra el país, una de las limitaciones en este trabajo de investigación es el factor económico, debido a que se deben de realizar un estudio financiero para asegurar que sea factible invertir en la implementación de un filtro activo para el sistema eléctrico de potencia en presencia de armónicos y que a corto o largo plazo remunere los gastos implicados en ello.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Toda investigación acepta a estar enmarcada dentro de un conjunto de conocimientos previos, que sustentan la comprensión y el abordaje del objeto de estudio. En este sentido, explican Fernández, Hernández y Baptista (2006), que el Marco Teórico (o revisión de la literatura): “Es un compendio escrito de artículos, libros y otros documentos que describen el estado pasado y actual del conocimiento sobre el problema de estudio. Nos ayuda a documentar cómo nuestra investigación agrega valor a la literatura existente” (p-64). En este sentido, en el presente capítulo, se desarrolla el sustento teórico de este estudio, a través de los antecedentes, las bases teóricas, el sistema de variables y la operacionalización de la variable

2.1 Antecedentes de la investigación

La revisión de investigaciones previas es fundamental, ante los resultados y conclusiones que se puedan obtener o que pueden aportar conocimiento al desarrollo de la que se está llevando a cabo; de acuerdo con lo anterior, Fernández y otros (op. Cit) afirman que la revisión de la literatura, consiste en: detectar, consultar y obtener la bibliografía y otros materiales útiles para los propósitos del estudio, de los cuales se extrae y recopila información relevante y necesaria para el problema de investigación (p-65). En este sentido explican los autores antes mencionados que:

Las Fuentes Primarias proporcionan datos de primera mano, pues se trata de documentos que contienen los resultados de estudios, como libros, antologías, artículos, monografías, tesis y disertaciones, documentos oficiales, reportes de asociaciones, trabajos presentados en conferencias o seminarios, artículos periodísticos, testimonios de expertos, documentales, videocintas en diferentes formatos, foros y páginas de internet, entre otros (p-66).

Asimismo, estas investigaciones hacen posible tener una visión más amplia y detallada de lo que se estudia; lo que garantiza que la información que se presenta está relacionada con el uso de filtros activos para mitigar armónicos existentes en la red de alimentación que se ha vuelto una opción común, debido al extraordinario incremento de cargas activas o pasivas que no tiene un comportamiento lineal y que a su vez incrementa la existencia de corriente no sinusoidales con alto contenido armónico, por lo que se citan los trabajos siguientes:

El Ing. Víctor F. Corasaniti (2008), En su trabajo de investigación titulado **“Filtros activos de potencia para la compensación de reactivo y armónicas en media Tensión”** como requerimiento para la obtención del grado de maestría en ingeniería electrónica en la Universidad Nacional de La Plata, en Argentina; presento la implementación de modelos de simulación y comparación en el funcionamiento, desempeño, complejidad y costos del equipamiento real de tres topologías de filtros activos para la compensación de potencia reactiva y armónicas en el nivel de media tensión de un sistema de distribución de energía eléctrica. Una de las razones por las cuales fueron desarrolladas las soluciones con filtros activos fue mitigar los problemas de los filtros pasivos. Este consistía en la instalación de filtros que se adapten a las condiciones variables de la red y la carga, con estructuras adecuadas de convertidores estáticos y algoritmos de control eficaces, y con características de compensación para las distorsiones producidas solo por las cargas conectadas a dicho punto de la red.

Cabe destacar que, puso en trabajo topologías puras e híbridas dando especial énfasis en la implementación de una topología activa y dos topologías híbridas, para comparar no sólo el funcionamiento y desempeño, sino también determinar la topología más conveniente desde el punto de vista de complejidad de implementación y costos. Para ello se implementó un modelo digital de red de distribución de energía eléctrica donde se realizan simulaciones con las tres topologías implementadas.

Dando como conclusión en lo que respecta a los filtros de armónicos que:

Ø Los filtros pasivos de armónicos de corriente, aunque no consiguen resultados óptimos, son una solución simple y económica. Su utilización debe ir acompañada de un estudio pormenorizado de la instalación, y no se puede garantizar su efectividad ante condiciones cambiantes en la estructura de la red y las cargas o ante envejecimientos de los componentes. En algunos casos particulares, la instalación de filtros pasivos puede llegar a ocasionar graves problemas en la red.

Ø Los filtros activos puros presentan excelentes prestaciones en la compensación de tensiones y corrientes. Mediante estos sistemas, no sólo se consigue reducir las perturbaciones armónicas de la red con un elevado ancho de banda y gran velocidad de respuesta, sino que también es posible actuar sobre las componentes de tensión y corriente de frecuencia fundamental, ofreciendo prestaciones adicionales como son la compensación de la potencia reactiva y el equilibrado de las fases

Ø Los filtros híbridos son una solución efectiva y relativamente económica al problema de la contaminación armónica, sobre todo en aplicaciones de gran potencia. Estos filtros aprovechan las ventajas de los filtros pasivos y activos para la compensación de armónicos, obteniéndose sistemas con una buena respuesta en frecuencia de régimen permanente y transitorio que utilizan dispositivos electrónicos de potencia convencionales y económicos.

Corasaniti estableció dentro de su trabajo de grado “estrategias de control de filtros activos” que describe métodos utilizados e implementados en los modelos de filtros activos diseñados en su trabajo, para la compensación de reactivo y armónicas en el nivel de media tensión.

Este trabajo de investigación, como anteriormente se menciona contiene tipologías puras e híbridas de los filtros activos y pasivos y tiene como principal aporte para esta investigación diferentes tipos de métodos de control para filtros armónicos de potencia haciendo énfasis al método del dominio en el tiempo.

Posteriormente, Mohamed asghaiyermohamed(2015), En su trabajo de investigación titulado **“design of shunt active powerfilter to mitigatetheharmonicscausedbynlinearloads”**, como requerimiento para la obtención del grado de maestría en ingeniería eléctrica en la universidad Tun Hussein Onn en Malaysia; el cual presento el diseño y la aplicación del filtro activo tipo shunt para sistemas trifásicos de potencia, utilizando la teoría p-q (calidad de energía) para mitigar los armónicos que son creados por cargas no lineales. Para obtener el resultado de este trabajo, se utilizaron herramientas de simulación tales como MATLAB y Simulink, para la evaluación del funcionamiento del filtro en el sistema de potencia. Los resultados obtenidos en esta investigación están dentro de la norma internacional IEEE-519 recomendada, es decir, menos del 5% y también el factor de potencia (PF) del sistema a casi la unidad.

Mohamed afirma que “El propósito del filtro activo de potencia es compensar la forma de onda de corriente de línea de utilidad de modo que se aproxima a una onda sinusoidal en fase con la tensión de línea cuando una carga no lineal está conectada al sistema. Clásicamente, el filtro activo de potencia tipo shunt, consiste en filtros de LC sintonizados y / o filtros de paso alto que se utilizan para suprimir armónicos y los condensadores de potencia se utilizan para mejorar el factor de potencia (fp) de la red eléctrica. Pero estos métodos convencionales tienen las limitaciones de la compensación fija, de gran tamaño y también puede excitar las condiciones de resonancia. Por lo tanto los filtros activos de potencia se presenta como una alternativa viable para compensar armónicos y mejorar fp”

Este antecedente proporciona gran aporte para este trabajo de investigación debido a que esta investigación contiene un conjunto de bases teóricas-prácticas en cuanto a filtros activos de potencia y sus configuraciones recalando los filtros tipo

shunt (paralelo), necesario para la investigación, además de que evaluar el comportamiento del mismo a través de herramientas de simulación dejando evidencias de lo planteado en su investigación.

Por último, Alexander Casilimas Peña (2016), En su trabajo de investigación titulado **“diseño y simulación de un filtro activo trifásico shunt usando el algoritmo $Icos(\phi)$ ”**, como requerimiento parcial para optar por el título de ingeniero electricista en la Universidad Tecnológica de Pereira, en Colombia; se muestra la implementación del

de potencia que son frecuentemente usando hoy en día, por lo tanto para tener una visión más amplia sobre la investigación, son necesarias las bases teóricas debido a que son el sustento toda investigación y sirven como punto de partida de la misma. Es importante la presentación de los conceptos y términos en los que se fundamenta el desarrollo del proyecto de manera de contextualizar adecuadamente el contenido de la misma.

2.2.1 Calidad de energía

Según Téllez en su revista “calidad de energía”, describe que la calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

Los parámetros fundamentales que determinan un suministro de energía eléctrica son: la tensión de alimentación (V) y la corriente (I). El adecuado suministro de la tensión de alimentación y la capacidad de entregar a los usuarios la energía eléctrica necesaria en un determinado momento, depende de la compañía suministradoras encargadas de distribuir la energía eléctrica

En la siguiente figura (figura 1) se puede observar la forma de onda sinusoidal limpia (sin perturbaciones) que deben distribuir las compañías suministradoras de energía.

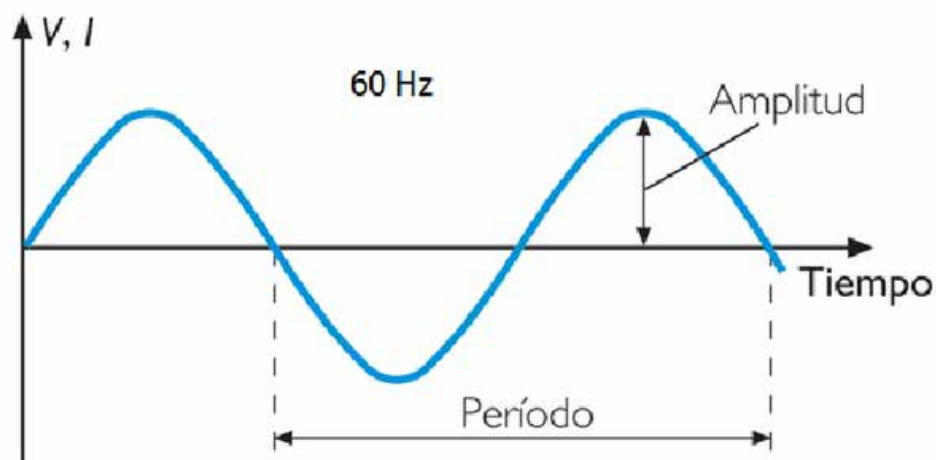


Figura 1. Onda sinusoidal periódica sin perturbaciones

Fuente: <https://www.scribd.com>

2.2.2 Fenómenos que afectan la calidad de energía

Los parámetros de amplitud, frecuencia, forma de onda y continuidad de un sistema eléctrico, electrónico o de comunicaciones, pueden verse afectados por diferentes tipos de perturbaciones que se pueden dividir de acuerdo con su duración en siete categorías (Bueno y Fajardo, 2013):

- Ø Transitorios electromagnéticos – TEM
- Ø Variaciones de tensión de corta duración – VTCD
- Ø Variaciones de tensión de larga duración – VTLD
- Ø Desbalance de tensión – DT
- Ø Fluctuaciones de tensión – FT
- Ø Variación de la frecuencia industrial – VFI
- Ø Distorsión de forma de la señal – DFS

Todas las perturbaciones a la calidad de suministro de energía anteriormente descritas son importantes, pero a partir de este momento este trabajo se centrará en el estudio de los armónicos de corriente y tensión producidos por cargas no lineales.

En los últimos años, estas perturbaciones han experimentado un fuerte incremento en industrias, oficinas y locales comerciales con la aparición una de gran cantidad de equipos electrónicos. Los efectos indeseables de dichas perturbaciones armónicas han despertado un creciente interés por el estudio de posibles soluciones al respecto (Bueno y Fajardo, 2013).

2.2.3 Armónicos

La palabra armónico se originó en el campo de la acústica y está relacionada a la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia base. Un componente armónico en un sistema AC está definido como una componente sinusoidal de una onda periódica y que tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. Las formas de onda pueden ser representadas de la siguiente manera (De La Rosa, 2006):

$$I_1 = I_{m1} \text{ sen}(wt) \quad \text{Onda sinusoidal a frecuencia fundamental}$$

$$I_3, I_5, I_7 \text{ armicos multiplos de la frecuencia fundamental}$$

$$I_3 = I_{m3} \text{ sen}(3wt) \quad (1.2)$$

$$I_5 = I_{m5} \text{ sen}(5wt) \quad (1.3)$$

$$I_7 = I_{m7} \text{ sen}(7wt) \quad (1.4)$$

Donde I_m es la corriente RMS de cada una de las componentes. En la figura 2 muestra una forma de onda sinusoidal ideal de 60 Hz con un valor pico de alrededor de 100 A (I_{m1}), que puede tomarse como una por unidad. Asimismo, también se representan formas de onda sinusoidales con amplitudes de 1/3, 1/5 y 1/7 por unidad y con frecuencias de tres, cinco y siete veces a la frecuencia fundamental, respectivamente. Este comportamiento muestra componentes armónicos de amplitud decreciente siguiendo de cerca una ley inversa con un orden de armónicos que es muy típico en sistema de potencia (De La Rosa, 2006).

La figura 3 muestra los mismos armónicos como los mostrados en la figura 2 superpuesta a la onda de corriente de frecuencia fundamental produciendo la I_{total} . Esta es la sumatoria de la corriente fundamental más los armónicos.

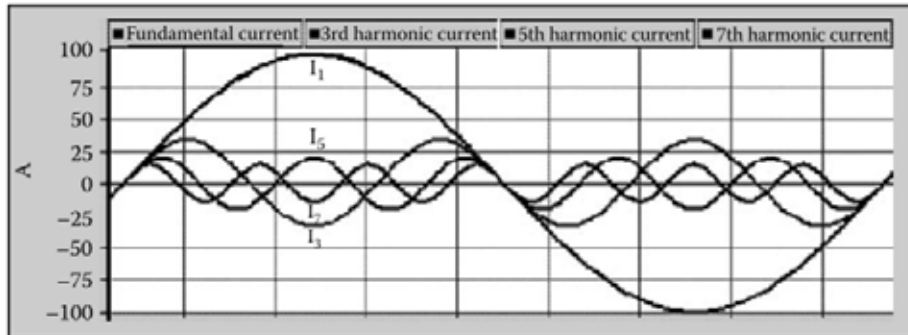


Figura 2. Onda sinusoidal a 60 Hz y algunos armónicos.

Fuente: Harmonics and powersystems

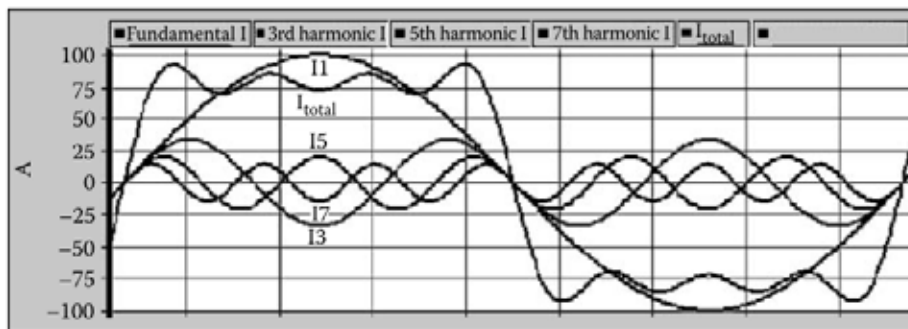


Figura 3. Onda sinusoidal distorsionada por el 3er, 5to y 7mo armónico.

Fuente: Harmonics and powersystems

La forma de onda distorsionada resultante se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_{total} = I_{m1} \sin(\omega t) + I_{m3} \sin(3\omega t) + I_{m5} \sin(5\omega t) + I_{m7} \sin(7\omega t) \quad (A) \quad (1.5)$$

En conclusión, una onda distorsionada puede ser representada como la superposición de una onda de frecuencia fundamental con otras formas ondas de diferentes frecuencias y amplitudes, llamados armónicos (De La Rosa, 2006).

2.2.4 Cargas lineales y no lineales

2.2.4.1 Cargas lineales

Según (De La Rosa, 2006, p. 4): son aquellas en las que las señales de tensión y corriente que se siguen una a la otra muy de cerca. El voltaje que se desarrolla a través de una resistencia constante, que varía como una función directa de la corriente que pasa a través de ella. Esta relación es mejor conocida como la ley de Ohm y establece que la corriente que circula a través de una resistencia alimentada por una fuente de voltaje variable alimentada es igual a la relación entre la tensión y la resistencia, tal como se describe en la siguiente ecuación:

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (1.6)$$

Esta es la razón por la que las formas de onda de tensión y corriente en circuitos eléctricos con cargas lineales se parecen. Por lo tanto, si la fuente de tensión se encuentra conectada a un circuito abierto limpio, la forma de onda actual será idéntica, sin mostrar distorsión. Circuitos con cargas lineales facilitan el cálculo de formas de onda de tensión y corriente. Las cargas lineales, bien sea si son resistiva pura, capacitiva o inductiva, éstas no dejan de ser líneas siempre y cuando no sean alimentados por convertidores de potencia tales como, drivers variadores de frecuencia o por cualquier otra forma de rectificación/inversión de la forma de onda de la corriente, debido a que incorporan pérdidas en el núcleo ferromagnético de las máquinas tales como motores eléctricos, ventiladores de conducción, bombas de agua, bombas de aceite, grúas, elevadores, etc.

Se puede producir distorsión de tensión y corriente si el equipo de núcleo ferromagnético se opere en la región de saturación, condición que puede alcanzarse, por ejemplo, cuando el equipo es operado por encima de sus valores nominales.

Una forma de onda de voltaje y corriente en un circuito con cargas lineales mostrará las dos formas de onda en fase una con otra. El voltaje y la corriente que implica los inductores hacen que el voltaje se adelante a la corriente y los circuitos que contienen capacitores para corrección de factor de potencia

hacen que la corriente supere el voltaje. Por lo tanto, en ambos casos, las dos formas de ondas estarán desfasadas entre. Sin embargo, no se producirá distorsión de forma de onda.

2.2.4.2 Cargas no lineales

son cargas en las que la forma de onda de la corriente no se asemeja a la forma de onda de la tensión aplicada debido a una serie de razones, por ejemplo, el uso de conmutadores electrónicos que conducen corriente de carga solo durante una fracción del periodo de frecuencia de potencia. Por lo tanto, podemos concebir cargas no lineales como aquellas en las que la ley de Ohm no puede describir la relación entre V y I. entre las cargas no lineales más comunes en los sistemas de potencia están, todos los tipos de dispositivos rectificadores como los que se encuentran en los convertidores de potencia, fuentes de alimentación, UPS y dispositivos de arco como hornos eléctricos y lámparas fluorescentes (De La Rosa, 2006).

2.2.5 Series de Fourier

Por definición, una función periódica, $f(t)$, es aquella en la que $f(t) = f(t + T)$. Esta función puede ser una serie de elementos que consisten en una componente de corriente continua y otros elementos con frecuencias que comprenden la componente fundamental y frecuencias múltiplos de la misma. Esto aplica si se cumplen las siguientes condiciones que estableció Dirichelet:

- Ø Si, una función discontinua, $f(t)$, tiene un número finito de discontinuidades durante el periodo T.
- Ø Si, tiene un calor medio finito durante el periodo T.
- Ø Si, $f(t)$ tiene un número finito de valores máximos positivos y negativos

La expresión de la serie trigonométrica $f(t)$ es la siguiente:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h \omega_0 t) + b_h \sin(h \omega_0 t)] \quad (1.7)$$

$$\text{donde } \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (1.8)$$

Simplificando la expresión (1.2), queda como resultado:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h \omega_0 t + \phi_h) \quad (1.9)$$

Dónde:

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, \text{ y } \theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_h}{b_h} \right) \quad (1.10)$$

La expresión (1.3) se conoce como la serie de Fourier y describe una función periódica compuesta por la contribución de funciones sinusoidales de frecuencias diferentes.

(h₀) h es el orden armónico de la señal periódica

c₀ es la magnitud de la componente DC de la señal

c_h y θ_h son la magnitud y ángulo de fase de los h componentes armónicos

La componente con h = 1 es llamada la componente fundamental. La magnitud y ángulo de fase de cada armónico la forma de onda resultante f(t).

La principal fuente de armónicos en sistemas de potencia es el convertidor estático de potencia. Bajo condiciones ideales de operación, los armónicos generados por un pulso p de un convertidor de potencia están caracterizado por:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (1.11)$$

Y

$$h = pn \pm 1 \quad (1.12)$$

Donde h representa los armónicos característicos de la carga: n = 1, 2, ...; y p es un múltiplo entero de 6 (De La Rosa, 2006).

2.2.6 Índices de calidad de energía bajo distorsión armónica

ü Distorsión Armónica Total – THD

La distorsión armónica total, conocida con sus siglas en inglés (THD), Total Harmonic Distortion, es un índice importante ampliamente utilizado para describir problemas de calidad de potencia en sistemas de transmisión y distribución. Considera la contribución de cada componente armónico individual de la señal. El THD se calcula para las señales de voltaje, respectivamente, de la siguiente manera:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1.24)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.25)$$

Esto significa que la relación entre los valores RMS de señales incluyendo armónicos y señales que consideran sólo la frecuencia fundamental definen la distorsión armónica total

Ü **Distorsión Total de la Demanda - TDD**

la distorsión armónica es más significativa cuando se controla en el punto de acoplamiento común, conocida con sus siglas en ingles(PCC), Point of CommonCoupling, generalmente se realiza la medición en el punto del cliente y según la norma IEEE-5197 para reflejar la demanda máxima del cliente la toma de la lectura debe ser de 15 a 30 min.

Las fuentes débiles con una gran corriente de demanda con relación a su corriente nominal tienden a mostrar una distorsión de forma de onda mayor. Por el contrario, las fuentes rígidas caracterizadas para operar a corrientes de baja demanda mostrarán una distorsión de forma de onda disminuida. La distorsión total de la demanda se basa en la corriente de demanda, I_L , durante el período de monitoreo:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (1.26)$$

Ü **Factor K**

Este índice es útil para cumplir con los requisitos del Código Nacional de Electricidad (NEC) y Underwriters Laboratories (UL), en lo que respecta a la capacidad de distribución y aplicación especial de transformadores en la industria para operar dentro de los límites térmicos especificados en entornos armónicos. Estos son transformadores diseñados para operar a densidades de flujo inferiores a los diseños convencionales para permitir el flujo adicional producido por corrientes armónicas. Además, para reducir las pérdidas por corriente de Foucault o de

circulación en el núcleo, se utilizan bobinados de banda, devanados de intercalación y conductores de transposición.

2.2.7 Cantidades de energía en situaciones no sinusoidales

Esta sección describe las cantidades de IEEE en situaciones no sinusoidales. Cabe destacar que todas las cantidades a las que se hace referencia en esta sección se basan en la definición trigonométrica de la serie de Fourier descritas anteriormente (sección 2.2.6) como la ecuación (1.9).

Estas cantidades se expresan de tal forma que representan la contribución de componentes de frecuencias armónicas individuales. En esta sección, $f(t)$ representa una tensión o corriente instantánea en función del tiempo y F_h es el valor máximo de la componente de señal de la frecuencia armónica h .

Ø Corriente y voltaje instantáneo

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} F_h \sin(\omega_0 t + \theta_h) \quad (1.27)$$

Donde $f(t)$ representa el valor instantáneo de voltaje o corriente en función del tiempo y F_h , es el valor máximo de la componente de señal de la frecuencia armónica h .

Ø Potencia instantánea

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (1.28)$$

Ø Valor RMS

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_h^2} \quad (1.29)$$

Ø Potencia Activa

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (1.30)$$

Ø Potencia reactiva

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sen(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (1.31)$$

Ø Potencia aparente

Se han escrito muchos argumentos sobre la forma más adecuada de expresar la potencia aparente bajo la presencia de distorsión armónica.

Una expresión generalmente aceptada por IEEE y IEC es la propuesta realizada por Budeanu, Ingeniero eléctrico rumano que contribuyó al análisis de los estados de redes eléctricas y el sistema SI de unidades.

$$S^2 = P^2 + \sum_{i=1}^n V_1 I_1 \sin(\varphi_1) + D^2 \quad (1.32)$$

2.2.8 Fuentes tradicionales de armónicos

A continuación se presentan en detalle los dispositivos eléctricos y electrónicos comunes dentro de una empresa que son generadores de armónicos.

Ü Transformadores

Según (De La Rosa, 2006) un transformador puede incurrir en condiciones de saturación de núcleo en cualquiera de los siguientes casos:

- Ø Cuando se opera por encima de la potencia nominal
- Ø Al operar por encima de la tensión nominal

La primera situación puede surgir durante los períodos de demanda de pico y el segundo caso puede ocurrir durante condiciones de carga ligera, especialmente si los bancos de condensadores de utilidad no se desconectan y, por lo tanto, la tensión de alimentación aumenta por encima de los valores nominales. Un transformador que opera en la región de saturación mostrará una corriente de magnetización no lineal, que contiene una variedad de armónicos impares, con la tercera dominante. El efecto se hará más evidente con el aumento de la carga.

Cuando se considera el efecto de histéresis en los transformadores, la corriente de magnetización no sinusoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión es típicamente debido a los armónicos triplen (múltiplos impares de tres, como son, el 3ro, 9no, 15to, etc.), pero sobre todo debido al tercer armónico. Este componente espectral se puede confinar dentro del transformador usando conexiones en delta. Esto ayudará a mantener una tensión de alimentación con una forma de onda sinusoidal razonable.

En las redes de distribución de energía eléctrica, los armónicos debido a la corriente de magnetización del transformador alcanzan su valor máximo antes del

amanecer cuando el sistema está cargado ligeramente y el nivel de voltaje es alto. Cuando un transformador está desenergizado, es posible que retenga el flujo magnético residual en el núcleo. Al volver a activar, este flujo se fusiona con el flujo de magnetización producido por la corriente de arranque, y los dos combinados pueden producir valores pico tres veces o más el flujo nominal a la carga nominal.

El efecto resultante puede hacer que el núcleo del transformador alcance niveles de saturación extremos que impliquen excesivas amperio-vueltas dentro del núcleo. En consecuencia, pueden desarrollarse corrientes de magnetización de 5 a 10 u.p. de corriente nominal (en comparación con 1 a 2% de la corriente nominal de magnetización en condiciones de funcionamiento en estado estacionario). La duración de la corriente de magnetización es principalmente función de la resistencia del devanado primario. Para transformadores grandes con gran resistencia de bobinado, esta corriente puede permanecer durante muchos segundos.

Tanto la tensión como las formas de onda de la corriente sufren de distorsión producida por las corrientes armónicas durante los fenómenos de saturación del transformador.

Ü **Maquinas rotativas**

Como resultado de pequeñas asimetrías en el estator de la máquina o ranuras del rotor o ligeras irregularidades en los patrones de devanado de un devanado trifásico de una máquina rotatoria, pueden desarrollarse corrientes armónicas. Estos armónicos inducen una fuerza electromotriz (f.e.m.) sobre los devanados del estator a una frecuencia igual a la relación de velocidad / longitud de onda. La distribución resultante de fuerzas magnéticas en la máquina produce armónicos que son función de la velocidad. Se pueden crear corrientes de armónicos adicionales tras la saturación del núcleo magnético (De La Rosa, 2006).

Ü **Convertidores de potencia**

El uso creciente de los acondicionadores de potencia en los que se varían los parámetros como el voltaje y la frecuencia para adaptarse a procesos industriales y

comerciales específicos ha convertido a los convertidores de energía en la fuente más extendida de armónicos en los sistemas de distribución.

La conmutación electrónica ayuda a la tarea a rectificar una señal alterna de frecuencia 50/60 Hz en una señal DC. En aplicaciones de corriente continua, el voltaje se varía mediante el ajuste del ángulo de conexión del dispositivo de conmutación electrónico. Básicamente, en el proceso de rectificación, se permite que la corriente pase a través de dispositivos semiconductores durante sólo una fracción del ciclo de frecuencia fundamental, para lo cual los convertidores de potencia se consideran a menudo dispositivos de ahorro de energía. Si la energía se va a utilizar como AC pero con una frecuencia diferente, la salida de DC del convertidor se pasa a través de un inversor de conmutación electrónico que devuelve la corriente continua a AC (De La Rosa, 2006).

Como ejemplo, si se utiliza un dispositivo de conmutación como un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), en el que la corriente fluye durante sólo una parte del tiempo en cada medio ciclo como se muestra en la figura 4a, se obtiene el espectro armónico actual de la figura 4b.

Ü **Variadores de frecuencia**

Los variadores de frecuencia son, en realidad, convertidores de potencia. La razón para abordarlo es porque, por sí mismos, ellos constituyen un amplio campo de aplicación utilizado en diversos y múltiples procesos industriales. En un contexto muy general, se pueden distinguir dos tipos de variadores: los que rectifican la corriente alterna y lo convierten en corriente alterna a frecuencia variable y los que rectifican la alimentación alterna y la alimentan directamente a motores de corriente continua en una serie de aplicaciones industriales.

En ambos casos, el rectificador frontal, que puede hacer uso de diodos, tiristores, IGBTs o cualquier otro conmutador semiconductor, lleva a cabo el proceso de conmutación en el que la corriente se transfiere de una fase a otra. Esta demanda de corriente "en rebanadas" produce una distorsión de corriente significativa y una muesca de tensión en el lado de la fuente, es decir, en el punto de acoplamiento

común. Las variaciones de velocidad del motor, que se consiguen mediante el control de ángulo de disparo, proporcionarán diferentes niveles de contenido armónico en las formas de onda de corriente y de tensión (De La Rosa, 2006).

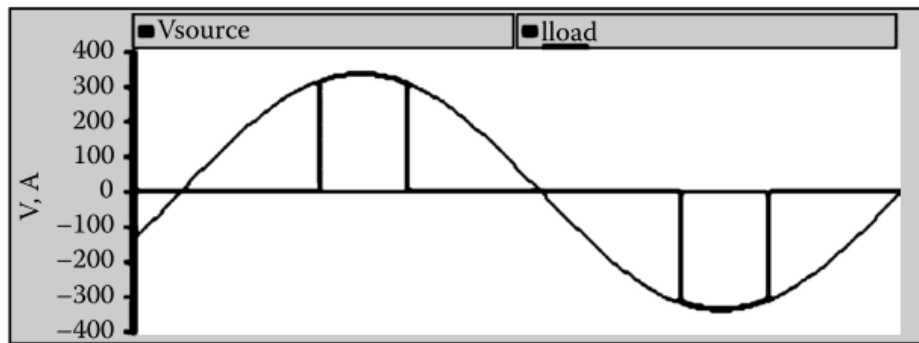


Figura 4(a). Forma de onda de voltaje de fuente y corriente en la carga a través de conmutación usando IGBT's.

Fuente: Harmonics and Power Systems.

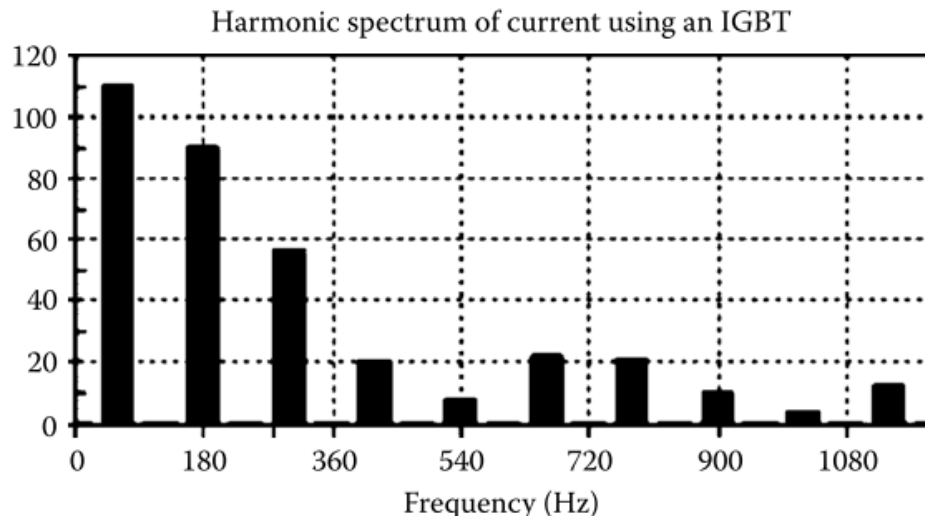


Figura 4(b). Espectro armónico de la corriente debido a conmutación usando IGBT's.

Fuente: Harmonics and Power Systems.

Ü Lámparas fluorescentes

Los tubos fluorescentes son cargas altamente no lineales en su funcionamiento y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante. Como breve descripción del funcionamiento de la lámpara fluorescente, podemos afirmar que los inductores de núcleo magnético o inductores contenidos dentro de los balastos de arranque funcionan para limitar la corriente al tubo. Asimismo, utilizan un condensador para incrementar la eficiencia del balasto aumentando su factor de potencia. Los balastos electrónicos funcionan a mayor frecuencia, lo que permite el uso de reactores y condensadores más pequeños.

El uso de frecuencias más altas les permite crear más luz para la misma entrada de energía. Esto se usa ventajosamente para reducir la potencia de entrada. En una carga trifásica de cuatro hilos, los armónicos de corriente de fase dominante de la iluminación fluorescente son el tercero, el quinto y el séptimo si utilizan un balasto magnético y el quinto con un balasto electrónico (De La Rosa, 2006).

Ü Hornos eléctricos

El proceso de fundición en hornos eléctricos industriales produce cantidades sustanciales de distorsión armónica. La introducción de la frecuencia fundamental se desarrolla a partir de una combinación del retardo en la ignición del arco eléctrico junto con su carácter de corriente-tensión altamente no lineal. Además, los cambios de tensión causados por las variaciones aleatorias del arco dan lugar a una serie de variaciones de frecuencia en el intervalo de 0,1 a 30 kHz; Cada uno tiene sus armónicos asociados. Este efecto es más evidente en la fase de fundición durante la interacción de las fuerzas electromagnéticas entre los arcos (De La Rosa, 2006).

2.2.9 Efecto sobre los banco de condensadores

Ü Sobretrabajo

El aumento de voltaje puede sobrecargar y acortar la vida útil de los bancos de condensadores. El voltaje, la temperatura y las tensiones de corriente son los factores que condicionan las condiciones del banco de condensadores, que se reducen a la

ruptura dieléctrica. La potencia reactiva de salida de un banco de condensadores varía con el cuadrado del voltaje, como se describe por:

$$VAR = \frac{V^2}{X_c} \quad (1.36)$$

La distorsión armónica es definitivamente otro factor que contribuye a imponer sobretensiones en los bancos de condensadores. Esta es una condición seria en instalaciones industriales con convertidores de gran potencia no filtrados.

Ü **Condiciones de resonancia**

Las condiciones resonantes implican la reactancia de un banco de condensadores que en algún punto en la frecuencia es igual a la reactancia inductiva del sistema de distribución, que tiene una polaridad opuesta. Estos dos elementos se combinan para producir resonancia en serie o en paralelo. En el caso de la resonancia en serie, la impedancia total a la frecuencia de resonancia se reduce exclusivamente al componente del circuito resistivo. Si este componente es pequeño, se desarrollarán grandes valores de corriente a dicha frecuencia.

En el caso de la resonancia paralela, la impedancia total en la frecuencia de resonancia es muy grande (teóricamente tiende a infinito). Esta condición puede producir una sobretensión grande entre los elementos conectados en paralelo, incluso bajo corrientes armónicas pequeñas. Si, esta frecuencia coincide con un armónico característico presente en el sitio, esa corriente verá una gran impedancia en sentido ascendente y la distorsión armónica de tensión existente se amplificará.

Por lo tanto, las condiciones de resonancia pueden representar un peligro para el aislamiento sólido en cables y devanados de transformadores y para el banco de condensadores y sus dispositivos de protección también.

2.2.10 Estandarización de niveles de armónicos

Los estándares más extendidos para el control armónico en todo el mundo se deben a IEEE en los Estados Unidos e IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) en la Unión Europea. En 1981, el IEEE publicó la Norma 519-1981, que tenía como objetivo proporcionar directrices y prácticas recomendadas para la conmutación, la

distorsión de tensión, la influencia del teléfono y los límites de flicker producidos por los convertidores de potencia. El estándar contenía efectos acumulativos, pero poco hacía para considerar la fuerte interacción entre los productores armónicos y el funcionamiento del sistema eléctrico.

El enfoque principal de la norma IEEE-519 revisada en 1992 fue una postura más adecuada en la que las limitaciones de los clientes con respecto a la cantidad máxima de corrientes armónicas en el punto de conexión (PCC) con la empresa eléctrica no representaban una amenaza para una distorsión excesiva del voltaje. Esta revisión también implicó un compromiso de las empresas eléctricas para verificar que cualquier medida correctiva adoptada por los clientes para reducir la inyección de armónicos en el sistema de distribución reduciría la distorsión del voltaje a límites tolerables.

De acuerdo con IEEE-519:1992, los límites de distorsión armónica recomendados deben ser verificados mediante la comparación con mediciones en el PCC, es decir, la interfaz entre la empresa eléctrica y el cliente. Estos límites están establecidos como función de la relación entre la corriente de cortocircuito en el PCC (I_{sc}) y la corriente media correspondiente a la demanda máxima durante un período de 12 meses (I_L).

De forma similar a IEEE-519, los estándares de armónicos de IEC establecen límites en la interfaz de utilidad-cliente; También establecen límites para el equipamiento del cliente, en una referencia clara a las instalaciones residenciales. Después de múltiples revisiones, la última norma de armónicos IEC 6100-3-2 se enfocó en limitar el consumo de armónicos en el equipo. Esta se refiere a unidades monofásicas y trifásicas con corrientes por fase de hasta 16 A. Se requieren límites de armónicos individuales para cada una de las cuatro clases diferentes de equipos considerados, clasificados de la A hasta la D. La clase D se considera como un equipo altamente generador de armónico y su contenido armónico está sujeto a una estricta corriente armónica máxima por unidad de la corriente sacada a la frecuencia principal. Estos son límites más estrictos que para las otras clases de equipos.

A diferencia del IEEE-519, la IEC considera que la evaluación de la distorsión armónica abarca los efectos a corto y largo plazo. Los primeros se denominan eventos cortos (3 s) y los últimos eventos de corta duración (10 min). Los eventos de muy corta duración están destinados a tener en cuenta los efectos perturbadores en dispositivos electrónicos que pueden ser susceptibles a niveles armónicos que pueden durar hasta 3 s, excluyendo transitorios. Los efectos a largo plazo tienen en cuenta los efectos térmicos en equipos como transformadores, motores, cables, bancos de condensadores, etc. Sin embargo, para la evaluación estadística, se recomiendan períodos de 1 semana o más.

Una cuestión importante es que los niveles pueden superar en un 50% en fase de arranque o en condiciones inusuales con duraciones inferiores a una hora. Además, recomienda el uso de funciones de distribución de probabilidad de las mediciones de campo, indicando que si los límites se exceden sólo durante un período "corto", tal condición puede considerarse aceptable.

En la Figura 5a y 5b se observan los límites recomendados por la IEEE-519 de distorsión armónica de voltaje y corriente, respectivamente.

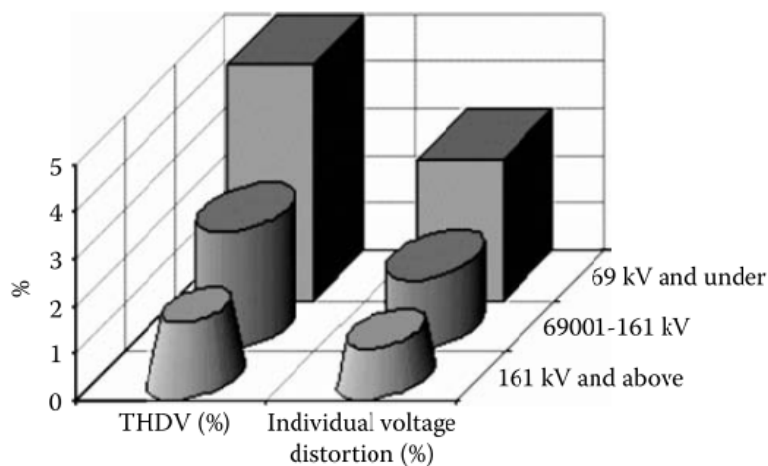


Figura 5(a). Límites de distorsión armónica de voltaje IEEE-519.

Fuente: Harmonics and Power Systems.

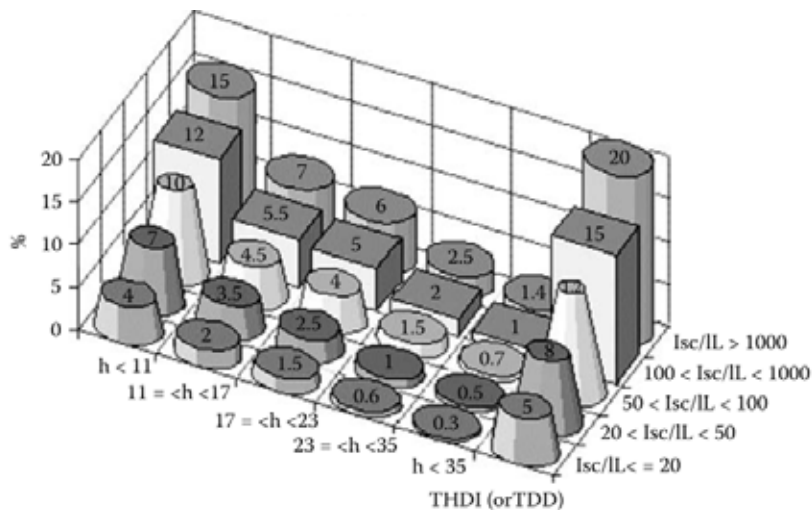


Figura 5(b). Límites de distorsión armónica de corriente IEEE-519.

Fuente: Harmonics and Power Systems.

2.2.11 Medición de armónicos

Con el aumento constante de la electrónica de estado sólido en instalaciones industriales, comerciales y residenciales, las empresas de servicios públicos se enfrentan a una tarea cada vez más difícil de llevar a cabo mediciones fiables debido a la distorsión de forma de onda en las señales de tensión y corriente. Esta carrera desleal entre los clientes de rápido crecimiento que se unen a la multitud de generadores de armónicos y los servicios públicos que luchan por adaptar los sistemas de medición adecuados pronto puede dejar a las empresas de servicios públicos muy atrás. Deben realizarse esfuerzos decisivos para controlar las corrientes armónicas dentro de los límites de la industria antes de que converjan y perturben el equipo de monitoreo de la subestación de distribución.

En localizaciones de fuentes armónicas, el problema puede ser aún peor. Los componentes de alta frecuencia no filtrados de la corriente en las cargas productoras de armónicos no sólo pueden dar lugar a inexactitudes de los equipos de medida cuando alcanzan o superan determinados umbrales. Pueden producir interferencia de

comunicación, problemas de calentamiento de equipos, disparo de dispositivos falsos de protección e incluso condiciones de inestabilidad en sistemas de regulación de tensión en generadores síncronos. Esto es particularmente cierto en las instalaciones donde los transformadores de la subestación del cliente se cargan con cargas principalmente no lineales.

A continuación se presentan los aspectos más importantes a observar con respecto a las mediciones armónicas.

Ü **¿Por qué medir la distorsión de la forma de onda?**

Desde la perspectiva de la electricidad, los objetivos generales para las mediciones pueden resumirse como sigue:

- Ø Verificar el orden y la magnitud de las corrientes armónicas en la subestación y en lugares remotos donde las fuentes armónicas del cliente pueden estar afectando instalaciones vecinas.
- Ø Para determinar la distorsión de forma de onda resultante expresada en forma de análisis espectral.
- Ø Para comparar los parámetros anteriores con los límites recomendados o la planificación niveles.
- Ø Evaluar la posibilidad de resonancia de la red que puede aumentar la distorsión armónica, particularmente en o cerca de los bancos de condensadores.
- Ø Recopilar la información necesaria para orientar a los clientes en el control de nivel de armónicos dentro de límites aceptables.
- Ø Para verificar la eficacia de los filtros armónicos implementados u otros esquemas correctivos
- Ø Determinar las tendencias en los niveles de tensión y distorsión de corriente en base diaria, semanal, mensual, etc.

Ü **¿Cómo realizar mediciones?**

Como se mencionó anteriormente en este trabajo de investigación, el estándar IEEE 519-1992 proporciona una descripción general de las

características clave a tener en cuenta al realizar mediciones armónicas. Sin embargo, no subraya otros aspectos relacionados con la duración, los tiempos de integración y el tratamiento estadístico de los datos recopilados. En su actual sección de límites de distorsión, el IEEE 519 sugiere que la demanda máxima de 15 o 30min promedio de un período de 12 meses debería ser usadautilizarse como corriente de carga, I_L , para determinar la relación I_{SC} / I_L . Este aspecto importante advierte a las empresas de servicios públicos acerca de la necesidad de mantener registros mensuales de la demanda máxima para evaluar la distorsión total de la demanda de manera adecuada.

Por otro lado, el estándar IEC61000-4-7, edición 2, considera las mediciones de voltaje y corriente para obtener un contenido espectral hasta el 40º armónico usando ventanas de medición de 200 ms. El instrumento de prueba preferido debe basarse en el cálculo RMS de cada índice de rendimiento sobre una ventana de ciclos continuos sincronizados de 12 ciclos. La ventana de 12 ciclos se ha adoptado en las normas IEC para sistemas de 60 Hz. Estos datos de 12 ciclos se pueden procesar en datos de intervalos de 3, 10 y 2 h para cada índice. Además, se tiene en cuenta que los valores del índice RMS tendrían a disminuir si son utilizados intervalos de medición mayores.

Ü **¿Quees importante medir?**

Si un ingeniero de servicios públicos necesitaba decidir los parámetros a considerar al evaluar los problemas de distorsión armónica, lo más probable es que la decisión implicara formas de onda de voltaje y corriente. Ésta es realmente la opción correcta porque otros parámetros, tales como energía real, reactiva, y total; energía; E incluso el desequilibrio, se puede calcular a partir de estas dos cantidades.

el equipo de monitoreo de la calidad de potencia está diseñado para proveer directamente valores de voltaje, corriente y potencia reales máximos y verdaderos junto con índices armónicos que comprenden distorsión armónica total e individual y factor K del transformador, entre otros.

Interarmónicos, componentes espectrales que no son múltiplos de la frecuencia fundamental, subarmónicos, y componentes espectrales con frecuencias por debajo de la frecuencia de potencia fundamental, no son fáciles de caracterizar. La norma IEC 61000-4-7 proporciona definiciones y recomendaciones de procesamiento de señales para mediciones armónicas e interharmónicas.

Ü **¿Cuánto tiempo deben durar las mediciones?**

La decisión sobre el período óptimo para realizar mediciones armónicas puede parecer algo complicada. Las razones de esto son diversas. En circuitos residenciales, debido a la similitud en los tipos de cargas electrónicas, el contenido espectral esperado puede caracterizarse fácilmente en mediciones a corto plazo. Sin embargo, se debe tener cuidado cuando el alimentador que suministra a los clientes residenciales es el mismo desde donde se sirven las grandes instalaciones comerciales / industriales.

Las instalaciones industriales, sin embargo, son un caso especial porque generalmente están compuestas por una mezcla de cargas que tienen una diversidad de contenidos espectrales, lo que puede requerir mediciones a largo plazo para caracterizar el contenido armónico. Esta necesidad puede ser más obvia si existen cargas cíclicas porque las mediciones para caracterizar los armónicos en el PCC necesitarían abarcar todos los ciclos de trabajo, o por lo menos los más significativos. Las mediciones a largo plazo también pueden ser necesarias cuando se investiga o se intenta resolver el origen de las perturbaciones sospechosas que afectan a un número de clientes.

Las pautas de IEEE 519 no especifican un período de medición definido para capturar la distorsión de la forma de onda armónica. Bajo operación de estado estacionario y donde no se producen variaciones de carga, una grabación de unos pocos minutos puede ser suficiente y un promedio de unos segundos debe satisfacer los requisitos. Sin embargo, debido a la naturaleza cambiante de las cargas en la mayoría de las situaciones, pueden ser necesarias mediciones

durante algunos días para asegurar que se consideren los patrones de variación de carga y sus efectos sobre la distorsión armónica.

2.2.12 Técnicas de filtrado de armónicos

En un contexto general, podemos referirnos a los filtros armónicos como filtros pasivos y activos. Su diferencia esencial, se basa en si proporcionan una acción de filtrado dentro de un ancho de banda seleccionado(pasiva) o como resultado de un proceso de monitoreo en tiempo real que conduce a la inyección de corrientes armónicas de cancelación en tiempo real(activo).

Uno de los métodos más comunes para el control de la distorsión armónica en la industria es el uso de técnicas de filtrado pasivo que hacen uso de filtros de paso único o de paso de banda. Los filtros armónicos pasivos se pueden diseñar como elementos de un solo tono que proporcionan una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas a una frecuencia puntual o como dispositivos de paso de banda que pueden filtrar armónicos sobre un cierto ancho de banda de frecuencia.

Los conceptos de filtrado activos más sofisticados operan en una amplia gama de frecuencias, ajustando su operación al espectro armónico resultante. De esta manera, están diseñados para inyectar corrientes armónicas para contrarrestar los componentes armónicos existentes tal como aparecen en el sistema de distribución. Los filtros activos comprenden CD, CA, series y configuraciones paralelas.

Los filtros híbridos son una combinación de esquemas de filtrados pasivos y activos. Para el cumplimiento de los objetivos de la investigación se hará énfasis con todo lo relacionado a los filtros activos de potencia.

2.2.13 Configuración de los filtros de potencia

En una primera aproximación, un filtro de armónicos se puede entender como un dispositivo que presenta una severa variación de su impedancia en función de la frecuencia. Lógicamente, la inserción de estos dispositivos en el sistema de potencia modificará la respuesta frecuencia del mismo, con lo que se podrá alterar el camino de circulación de los armónicos de corriente. En base a esta concepción, los filtros de armónicos se podrán clasificar en dos categorías fundamentales:

Ø Filtros paralelo, presentarán baja impedancia a la frecuencia de resonancia o en un determinado rango de frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en paralelo con la carga permitirá establecer un camino de baja impedancia para los armónicos de corriente seleccionados, evitándose así que éstos fluyan por el sistema.

Ø Filtros serie, que son complementarios a los anteriores, y ofrecen alta impedancia a la frecuencia de resonancia o a determinadas frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en serie con la carga aumentará la impedancia que ofrece el sistema a los armónicos seleccionados, con lo que su amplitud se verá atenuada.

2.2.14 Tipos de cargas armónicas

Para poder compensar adecuadamente los armónicos de corriente y de voltaje introducidos por cargas no lineales al sistema, es necesario clasificarlas de modo de entender su comportamiento y así utilizar la estrategia de compensación más adecuada. Dentro de las cargas identificables como fuentes armónicas existen dos tipos, los cuales serán presentados a continuación:

Ü Fuentes de voltaje armónico

Dentro de este tipo de cargas podemos encontrar una gran cantidad de equipos en cuyo lado DC del rectificador cuentan con un condensador de filtrado. Entre ellos destacan variadores de frecuencia para motores y fuentes *switching* de equipos electrónicos, cada vez más utilizadas en la actualidad. En la siguiente figura (figura 6) se observa la topología y representación de una carga fuente de voltaje armónico.

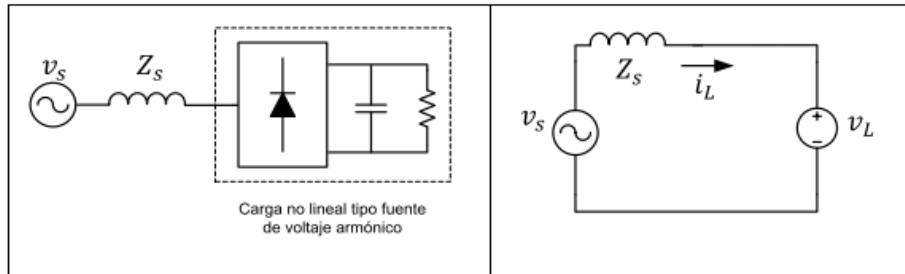


Figura 6. Topología y representación de una carga fuente de voltaje armónico

Ü Fuentes de corriente armónica

Las cargas de este tipo corresponden a convertidores que tienen una gran inductancia en el lado DC, entre ellas podemos encontrar rectificadores, tiristores y cicloconvertidores. En la siguiente figura (figura 7) se observa la topología y representación de una carga fuente de corriente armónica.

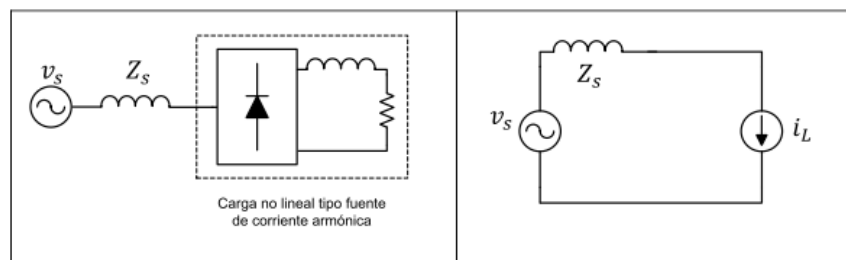


Figura 7. Topología y representación de una carga fuente de corriente armónica.

2.2.15 Filtro pasivo

Son filtros en los que sólo hay elementos pasivos (bobinas, condensadores y resistencias). Los diseños más utilizados son filtros resonantes o sintonizados y/o

amortiguados o pasa altos, conectados en paralelo con la fuente de armónicas y sintonizados a las armónicas de interés presentes en la red, permitiendo una instalación sencilla, y resultando más robustos y económicos que otras opciones más avanzadas.

El filtro pasivo más popular consiste en un circuito LC serie sintonizado a una determinada frecuencia de resonancia. Este filtro se conecta en paralelo con la red y absorbe armónicos a dicha frecuencia de resonancia.

Los filtros series presentan ciertas desventajas con respecto a los filtros paralelos como ser:

- Ø La corriente que circula por el filtro es la corriente total de la carga y deben estar aislados del potencial de tierra. Esto incrementa su costo.
- Ø Su comportamiento a la frecuencia fundamental o industrial es inductivo, por lo que consume potencia reactiva del sistema.

Esto conduce a que en la mayoría de los casos se usan filtros paralelos, quedando reducido el uso de filtros series a casos particulares como por ejemplo en filtros de bloqueo en sistemas de control de ripple.

2.2.16 Filtro activo

Los filtros activos de potencia (Active PowerFilter – APF) son dispositivos que actúan, mediante algoritmos de control apropiados, como fuente de corriente o de voltaje, con el fin de mitigar la circulación de corrientes armónicas hacia la red y por ende mejorar la calidad del suministro eléctrico. Para entregar la corriente o voltaje de compensación necesario, utilizan un convertidor estático de potencia acompañado de un elemento almacenador de energía, ya sea un inductivo o capacitivo.

Los filtros activos se clasifican en tres tipos: paralelo, serie e híbrido, estando compuestos los dos primero sólo por elementos activos, mientras que la última cuenta además con una sección pasiva. En la siguiente figura (figura 8) se observa el esquema general de un APF dentro de una red.



Figura 8. Esquema general de un APF dentro de una red.

Ü Principio de funcionamiento de un APF

Debido a los impredecibles cambios de carga y a las apariciones de resonancias no deseadas entre el filtro pasivo instalado y la impedancia de línea, es necesaria la implementación de un filtro activo que se adapte a estos cambios variantes en el tiempo, ya que este posee un estructura de convertidor estático conectado a un elemento de almacenamiento de energía en continua y un algoritmo de control para dicho convertidor.

El principio de funcionamiento de un filtro activo se basa en su estructura de convertidor de potencia (inversor), la cual está conformada por elementos de conmutación que permiten el paso de las señales hacia la red y que contrarrestan a los armónicos presentes en dicha red, permitiendo que la señal de corriente sea lo más sinusoidal posible y sin distorsiones. En la figura 9 se observa una onda de corriente de una red eléctrica con carga no lineal. En la parte superior se observa la onda sin APF y en la parte inferior se observa la onda con APF.

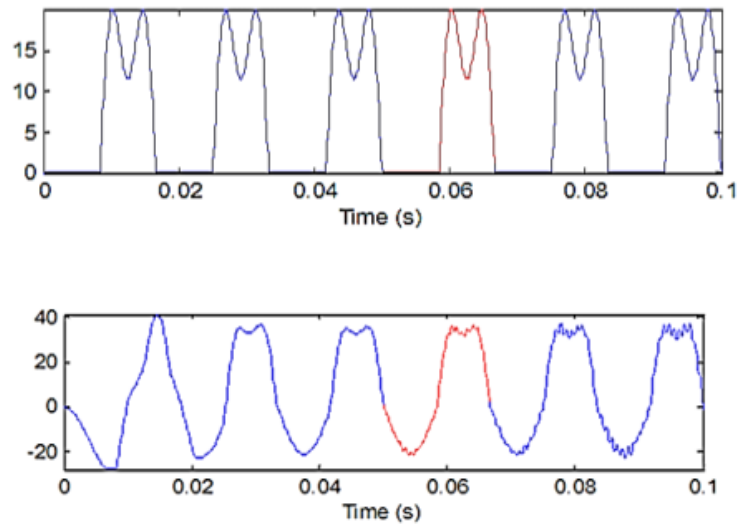


Figura 9. Onda de corriente de una red eléctrica con carga no lineal sin APF y con APF.

Un filtro activo además de la mitigación de armónicos en la red son capaces de realizar otras funciones correctivas dentro del sistema eléctrico. Entre las funciones de un APF están la eliminación de corriente en el neutro, la eliminación de armónicos de tensión en los puntos de conexión de la carga, la corrección del factor de potencia, la compensación total o parcial de la energía reactiva, entre otras.

Ü **Filtros activos paralelos**

Los filtros activos paralelos pueden actuar como fuente de corriente o de voltaje. En el primer caso, el filtro inyecta una corriente de compensación armónica en paralelo a la carga, de modo que la corriente que circule hacia la red sea sinusoidal pura y las armónicas circulen sólo entre la carga y el filtro. En el segundo caso, el filtro genera un voltaje sinusoidal, de manera que la caída de tensión en la impedancia de línea sea sinusoidal y así la corriente de línea también lo sea. En la siguiente figura (figura 10) se observa la topología y representación del filtro activo paralelo operando como fuente de corriente y de voltaje.

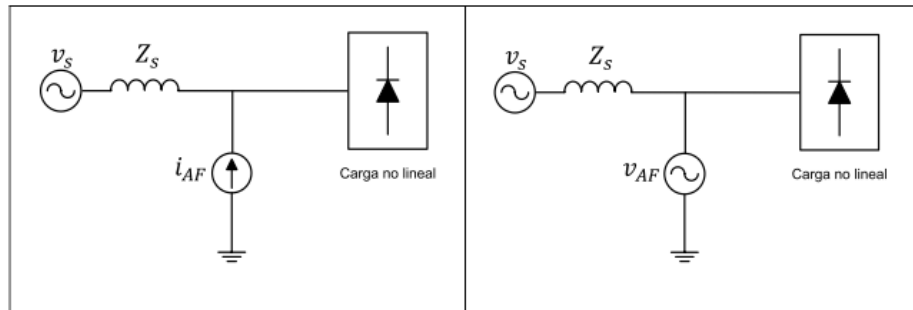


Figura 10. Topología y representación del filtro activo paralelo operando como fuente de corriente y de voltaje.

A continuación se detallan las características del filtro activo paralelo:

- ✓ Tipos de carga: cargas en fuente de corriente.
- ✓ Fuentes adicionales: puede compensar la reactiva, desequilibrios de corriente entre fases y armónicos homopolares si el inversor lo permite.
- ✓ Ventajas: muy bueno para compensar perturbaciones de corriente.
- ✓ Inconvenientes: el inversor tiene que soportar toda la tensión de red y subbus de continua debe ser de una tensión superior a la de pico de la red. También tiene que soportar la corriente armónica máxima, la debida a la compensación de potencia reactiva de frecuencia fundamental y la debida a otras perturbaciones que se deseen filtrar. Exige un control complicado para una correcta eliminación de los armónicos de corriente, con lo que su coste total resulta elevado.

Ü Filtro activo serie

Al igual que los filtros activos paralelos, los filtros activos serie pueden operar como fuente de corriente o de voltaje. En la figura 11 se observa que en el primer

recuadro operacomo una fuente sinusoidal de corriente y el segundo generando un voltaje proporcional al contenido armónico de la corriente de línea, de modo que el filtro presente una alta impedancia a las armónicas, impidiendo su paso hacia la carga. La conexión del filtro a la red se suele hacer a través de un transformador que actúa como sistema de aislamiento. La correcta selección de la relación de transformación en este transformador permite optimizar la tensión necesaria en el bus de continua para compensar las perturbaciones de la tensión de red que se deseen filtrar. La inductancia de dispersión de este transformador se utiliza como bobina de alisado de la corriente a la frecuencia de conmutación.

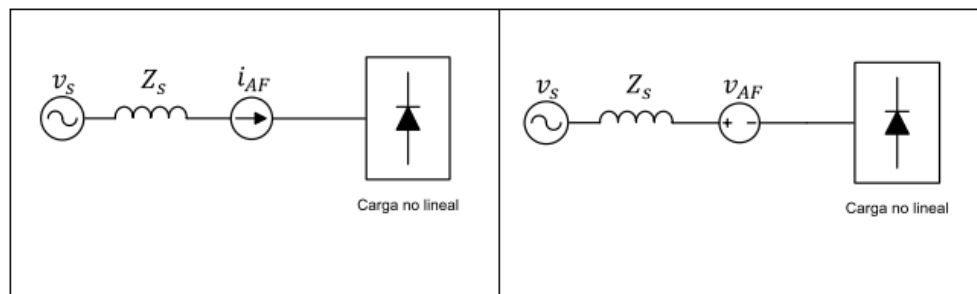


Figura 11. Topología y representación del filtro activo serie operando como fuente de corriente y de voltaje.

A continuación se detallan las características del filtro activo serie:

- ✓ Tipo de carga: cargas en fuente de tensión
- ✓ Funciones adicionales: además de aislar los armónicos de tensión en la red, este filtro permite regular y equilibrar parcialmente las tensiones en la carga. Obviamente, a mayor grado de regulación de tensión, mayor será la potencia del filtro y por tanto su coste.
- ✓ Ventajas: bloqueo de todo el espectro armónico de tensión deseado.

- ∨ Inconvenientes: el inversor de un filtro serie, además de suministrar latencia armónica de compensación, debe soportar toda la corriente de la carga. Este inversor también tiene que soportar, o estar protegido, contra cortocircuitos en el lado de carga. Ambos factores hacen que este inversor tenga un coste elevado y por tanto el filtro activo serie está menos extendido que el filtro activo paralelo.

2.2.17 Diagrama de bloques para el control de una APF

Básicamente un APF está formado, como anteriormente se mencionó, por un convertidor estático (normalmente un inversor de tensión VSI), un elemento de almacenamiento de energía (habitualmente un condensador), unos circuitos de medida de las tensiones y corrientes, y un circuito de control que se encarga de la obtención de consignas, el control y la generación de las señales moduladas que actúan sobre el convertidor. Además el APF puede contar con transformadores y o bobinas para su conexión a la red. Entrando más en detalle en la estructura del APF, el bloque de control se puede descomponer, a su vez en dos bloques básicos, el control propiamente dicho y el circuito de modulación, tal como se muestra en la siguiente figura (figura 12).

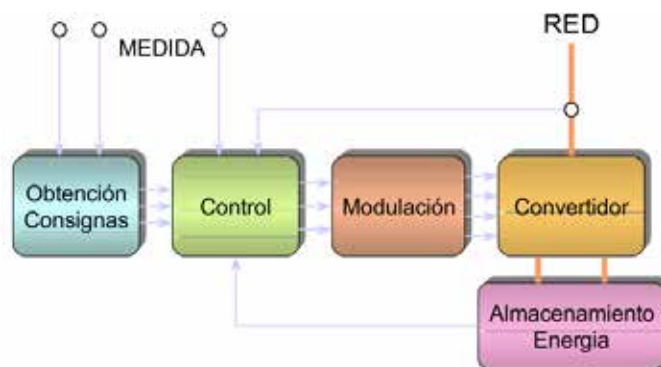


Figura 12. Diagrama de bloques de un APF.

Fuente: <http://www.jcee.upc.edu>.

El bloque de obtención de Consignas, es el encargado de separar la componente fundamental y los armónicos de la corriente que absorbe la carga. Estos armónicos son los que forman la consigna aplicada al control del APF. El bloque de control debe actuar sobre el convertidor para que las corrientes que absorbe el filtro (armónicos) coincidan con las consignas anteriores.

La función del bloque de modulación es la de transformar unas señales de tensión, variables en amplitud, procedentes del control, en los tiempos de encendido y apagado de cada uno de los interruptores del convertidor estático.

En ciertos casos, dependiendo del tipo de control utilizado los bloques de control y modulación no son separables. Por ejemplo cuando se utiliza un control de corriente por banda de histéresis. A pesar que la potencia media consumida por un APF, en un periodo de red, debe ser nula (salvo pérdidas); es necesario un elemento que almacene energía, ya que la potencia instantánea no es nula.

Habitualmente energía se almacena en condensadores que alimentan un bus de continua (DC). Si se debe conectar este filtro directamente a la red (sin utilizar transformador de acoplamiento), la tensión del bus de continua debe ser superior a la tensión de pico de la red; por lo tanto los interruptores del convertidor (usualmente IGBT) deben soportar tensiones más elevadas que en el caso de los inversores aplicados por ejemplo al control de motores.

2.2.18 Convertidor estático de potencia

En filtro activo de potencia el convertidor estático es el dispositivo que realiza de la inyección de las corrientes de compensación en la red. Este convertidor siempre irá acompañado de un sistema de control que garantice que la corriente realmente inyectada en la red sigue fielmente las señales aportadas como referencia.

Desde un punto de vista ideal, el conjunto formado por el convertidor más el controlador de corriente, debería comportarse como una fuente lineal capaz de inyectar en todo momento las corrientes de compensación que se le aporten como referencia. Lógicamente, debido a las características intrínsecas del convertidor y del controlador, este comportamiento será inalcanzable, y sólo existirá un determinado

rango de operación en el cual la respuesta del sistema podrá ser considerada como lineal.

Un factor primordial que hará que la respuesta del sistema convertidor-control difiera del comportamiento ideal estriba en que el convertidor estático es un sistema no lineal de estructura variable. En este sistema no lineal, el control de la corriente inyectada se realizará mediante el cambio del estado del convertidor, es decir, mediante la conmutación de los diferentes transistores que constituyen el mismo. Por tanto, la corriente de salida presentará un valor medio, que deberá coincidir con el valor aportado como referencia, más un rizado, que resulta de la sucesión de los diferentes estados de conmutación que atraviesa el convertidor. Según esto, para minimizar la amplitud de este rizado de corriente, sería deseable que la frecuencia de conmutación del convertidor fuese lo más elevada posible.

El convertidor estático de un SAPF enlaza con la red de potencia mediante elementos reactivos. Así mismo, el convertidor acumula energía en su lado de continua mediante otro elemento reactivo. La correcta elección de los valores y parámetros de trabajo de dichos elementos reactivos condicionará en gran medida la respuesta estática y dinámica del sistema resultante, determinando finalmente el ancho de banda de la hipotética fuente de corriente.

Ü Tipos del convertidor estático

De manera general, el convertidor estático de un filtro activo se puede implementar mediante un inversor en fuente de tensión (VSI – VoltageSourceInverter), o un inversor en fuente de corriente (CSI – CurrentSourceInverter). En las siguientes figuras (Figura 13 y Figura 14) se muestra la estructura de ambos inversores para sistemas trifásicos de tres hilos. En esta figura, también se ha representado el filtro pasivo (elemento de enlace a la red) destinado a la atenuación de las componentes de alta frecuencia a la salida del inversor. El inversor en fuente de corriente resulta ser más robusto, aunque también es más caro

de implementar, el inversor en fuente de tensión presenta menores pérdidas de energía y es más económico.

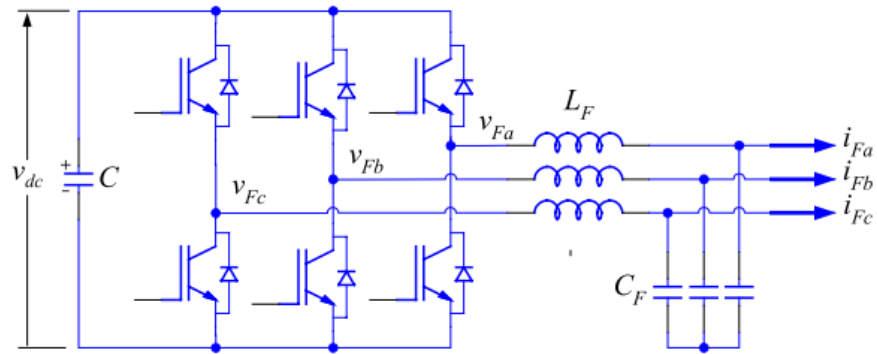


Figura 13. Inversor en fuente de tensión (VSI).

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

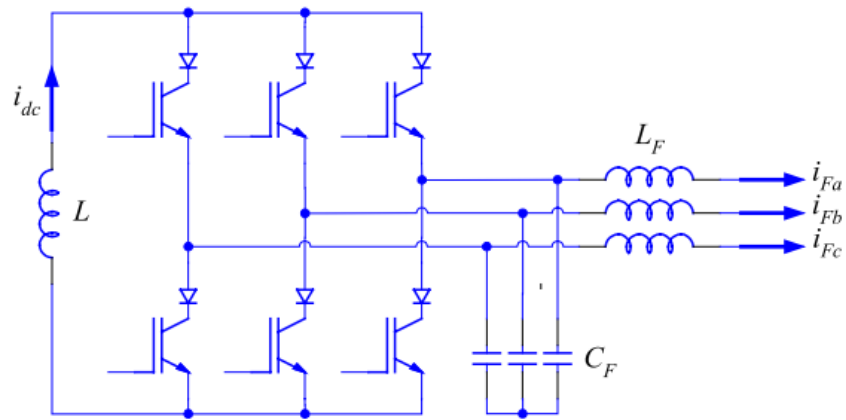


Figura 14. Inversor en fuente de corriente (CSI).

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

Ü Topología del convertidor estático

El inversor en fuente de tensión es el dispositivo que presenta menos pérdidas de energía, es más económico y es el más desarrollado en equipos comerciales, el estudio que se realiza hoy en día se centran en los inversores en fuente de tensión.

El inversor mostrado en la siguiente figura (figura 12) recibe el nombre de “inversor de tres ramas en puente completo” (TLFB – Three-Leg Full-Bridge) y su aplicación en el filtrado activo de corriente en redes trifásicas de tres hilos fue presentada por Akagi en 1984, convirtiéndose en un clásico dentro de este tipo de aplicaciones, y apareciendo multitud de nuevas aportaciones desde entonces. Mediante el inversor TLFB resulta imposible inyectar corrientes homopolares en la red, utilizándose para acondicionar las corrientes consumidas por cargas trifásicas sin neutro.

En sistemas trifásicos de cuatro hilos, de media y baja potencia, es habitual la existencia de cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro. En estos casos, se hace necesaria la utilización de otras topologías en el convertidor estático del filtro activo que permitan la inyección de corrientes de secuencia homopolar en la red. La solución más simple en este tipo de casos consiste en la topología mostrada en la Figura 15. Este inversor recibe el nombre de “inversor de tres ramas con condensador repartido” (TLSC – Three-Leg Split-Capacitor).

Cuando el nivel de corriente de secuencia homopolar que se debe compensar llega a ser considerable, el convertidor mostrado en la Figura 16 ofrece mejores prestaciones que el inversor TLSC. Este inversor es conocido como “inversor de cuatro ramas en puente completo” (FLFB – Four-Leg Full-Bridge). En esta topología, la rama conectada al neutro puede controlar la tensión media que existe entre este conductor de neutro y el bus de continua.

Por tanto, si las tres ramas de las fases se dedican a generar únicamente tensiones de secuencia positiva y negativa en la salida, la tensión generada por la rama del neutro determinará la componente homopolar de salida.

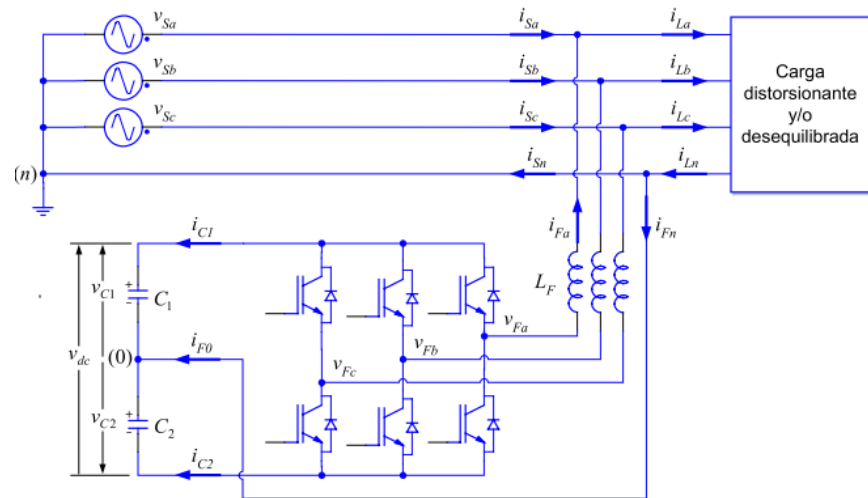


Figura 15. Estructura de un filtro activo con un inversor TLSC.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

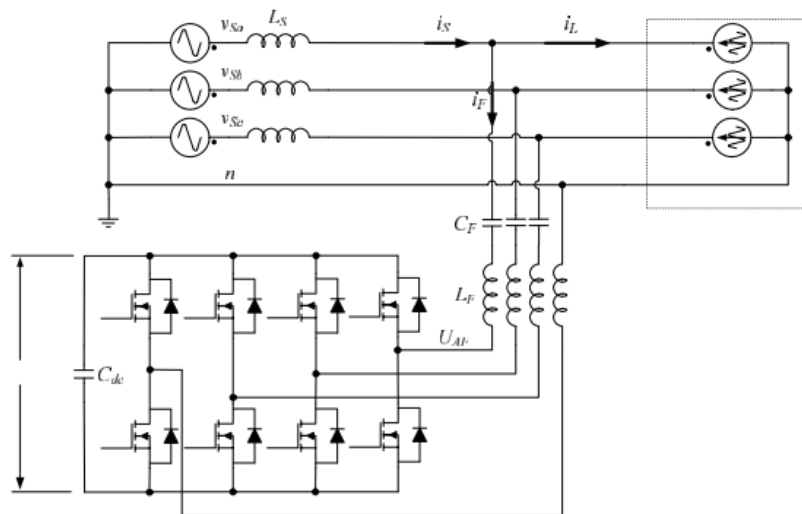


Figura 16. Estructura de un filtro activo con un inversor FLFB.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

2.2.19 Elementos para el almacenamiento de energía en continua

Las configuraciones del filtro activo mostradas en las figuras anteriores disponen de elementos almacenadores de energía de tipo capacitivo. En este caso la energía disponible para la compensación se almacena en un condensador, pudiéndose establecer el nivel de energía del filtro activo mediante la medida de la tensión de continua. El tipo de elemento almacenador de energía empleado determina las características de compensación del filtro. Aunque la gran mayoría de los FAP utiliza condensadores también es posible el empleo de bobinas. En este caso el nivel de energía del filtro activo se puede obtener mediante la medición de la corriente en la bobina de continua.

2.2.20 Dispositivos electrónicos de potencia

Los dispositivos semiconductores empleados por un filtro activo pueden ser de diversos tipos si bien los más utilizados en la actualidad son los transistores bipolares con puerta aislada (IGBTs, Isolated Gate Bipolar Transistors) y los tiristores

controlados de puerta aislada (IGCTs, IsolatedGateControlledThyristors). Desde el punto de vista de su integración en un filtro deben considerarse características como el elemento almacenador de energía empleado, la frecuencia de conmutación máxima de trabajo y los valores máximos de dV/dt y dI/dt durante la compensación. Estas condiciones de trabajo del filtro determinaran las características de los dispositivos electrónicos de potencia empleados: curva de operación segura (SOA, SafeOperationArea) de cada uno de ellos, las tensiones y corrientes máximas tanto en bloqueo como en saturación y las características del circuito de control (HVICD, High VoltageIntegratedCircuit Drive) que debe emplearse para que estos elementos operen correctamente en el filtro.

2.2.21 Conexión a la línea eléctrica

La conexión del filtro a la línea donde se pretende realizar la compensación se puede llevar acabo de dos formas: en serie (Figura 17) o en paralelo (Figura 18). La utilización de una u otra conexión dependerá de si es permisible que toda la corriente de carga atraviese o no el enlace de corriente del filtro. Habitualmente se emplea la topología paralela ya que permite construir un FAP empleando dispositivos semiconductores y elementos pasivos que operaran con menores niveles de potencia.

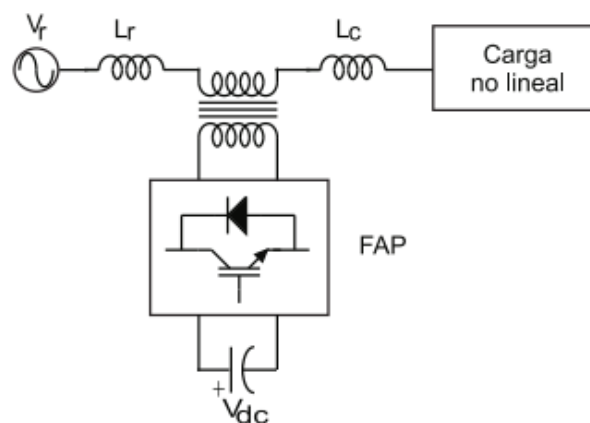


Figura 17. Compensación mediante filtro serie

Fuente: <https://www.google.co.ve>

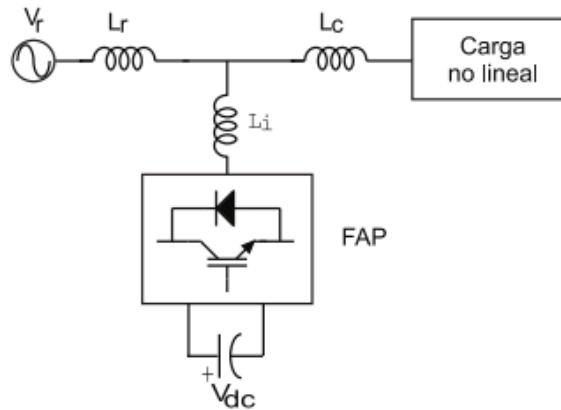


Figura 18.Compensación mediante filtro paralelo.

Fuente: <https://www.google.co.ve>

2.2.22 Enfoque teórico de filtros activos para el cálculo de la corriente de referencia para la compensación

2.2.23 La teoría de Akagi-Nabae

La teoría de la potencia instantánea en circuitos trifásicos se denomina “Akagi-Nabaetheory” (Akagi et al., 1983; Akagi et al., 1984). Esta teoría es uno de los primeros esquemas de compensación. La primera publicación en inglés es el trabajo realizado por Akagi, Kanazawa y Nabae en 1983. De acuerdo a esta teoría las corrientes del filtro activo se obtienen de la potencia activa y reactiva de la carga no lineal mediante cálculos previos que relacionan los voltajes y corrientes de carga en un marco de referencia estacionario.

la Transformada de Clarke. Las corrientes y tensiones instantáneas se transforman al sistema de (α, β) se observan las transformadas, donde v_a , v_b y v_c son los voltajes de fase e i_a , i_b e i_c son las corrientes de línea.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Figura 19. Transformada de Clarke.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

La transformada inversa de la teoría PQ está dada en la figura 20 donde se lleva de un sistema :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Figura 20. Transformada inversa de Clarke.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

En coordenadas a-b-c: los ejes a,b,c están fijos en el mismo plano separados $\frac{2\pi}{3}$. En coordenadas $\alpha-\beta-0$: los ejes $\alpha, \beta, 0$ son ortogonales entre sí. Una ventaja de aplicar la transformación $\alpha-\beta-0$, es que separa las componentes de frecuencia

cero al ubicarlas en el eje de secuencia cero. Si el sistema es de tres hilos (no tiene conductor de neutro) no se tiene entonces componentes de secuencia cero, por lo que la corriente i_0 , y el voltaje v_0 , se pueden eliminar de las ecuaciones anteriores. En este caso las componentes $v_\alpha, v_\beta, i_\alpha, i_\beta$ se expresan como se observa en la figura (Figura 21).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Figura 21. Transformación de voltajes

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

Después de la transformación de voltajes sigue el cálculo de los componentes de potencia instantánea de la teoría PQ,

$p_0 = v_0 i_0$; Potencia instantánea de secuencia cero

$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$; Potencia real instantánea

$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$; Potencia imaginaria instantánea (por definición)

Las componentes p y q se relacionan con los

Se pueden escribir juntos como se observa en la siguiente figura (Figura 22):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Figura 22. Teoría PQ.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

donde p es la potencia real instantánea y representa la energía total por unidad de tiempo que pasa por el sistema de tres hilos, mientras que q es la potencia imaginaria instantánea y da la medida de la cantidad de corriente o potencia que fluye en cada fase sin transportar energía en ningún instante. En el caso de un sistema cuya fuente de tensión es de secuencia positiva y en el que la carga es balanceada (inductiva o capacitiva), la potencia reactiva definida en (1.6) tendrá el mismo signo y la misma magnitud que la potencia calculada usando la definición clásica de potencia

imaginaria pueden dividirse en componentes medios (\bar{p} y \bar{q}) y oscilatorios (\tilde{p} y \tilde{q}) El componente medio o DC representa la potencia fundamental mientras que la componente oscilatoria se relaciona con la potencia armónica. Se observa la forma matricial en la figura 23.

Para obtener una corriente sinusoidal se debe compensar las componentes armónicas de las potencias como se observa en la figura 24 y las corrientes de compensación de coordenadas se observan en la figura 25.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

Figura 23. Teoría PQ.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

$$p_c = \tilde{p} \quad ; \quad q_c = \tilde{q}$$

Figura 24. Compensación de las componentes armónicas de potencia.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{-1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} -v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_c \\ Q_c \end{bmatrix}$$

Figura 25. Forma matricial de la corriente de compensación.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

Aplicando la transformada inversa, las corrientes trifásicas de compensación como se observa en la figura 26

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}$$

Figura 26. Forma matricial de las corrientes trifásicas de compensación.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

2.2.23.1 Transformada de Park

La Transformación de Park permite expresar las magnitudes trifásicas en un sistema de referencia ortogonal y giratorio (móvil). También es conocida como transformación *dq* o síncrona. Si bien la Transformación de Clarke permite reducir el número de variables, Park permite además, ver magnitudes trifásicas que varían sinusoidalmente en el tiempo, como constantes, siempre y cuando la frecuencia de la señal coincida con la frecuencia de giro de los ejes de referencia dq. Naturalmente, es más fácil trabajar con valores de magnitudes constantes que con variaciones

sinusoidales. No obstante, si las magnitudes contienen armónicos, las magnitudes transformadas se verán variables en el tiempo, ya que contiene frecuencias distintas y en general superiores a la fundamental.

2.2.24 Control de la corriente de inyección

El controlador de corriente del filtro activo de potencia tiene por objetivo conseguir que las corrientes de salida del inversor sigan fielmente las corrientes de referencia obtenidas mediante la estrategia de compensación de armónicos. Una variedad de enfoques para el control de corriente se han reportado en la literatura, empleando técnicas como: control lineal PWM, por histéresis, técnica dead-beat, modo deslizante, control predictivo, lógica Fuzzy o control vectorial.

2.2.25 Control de la tensión continua

La función de este elemento del controlador es mantener constante el valor de la tensión en el condensador del lado de continua. Mediante una señal que proviene de un control tipo proporcional incrementa el valor de la potencia o corriente de pérdidas en el método de la teoría de la potencia reactiva o del sistema de referencia síncrono respectivamente.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Toda investigación se basa en un marco metodológico, el cual detalla las estrategias y los procedimientos a utilizar durante la investigación, así como los métodos, técnicas e instrumentos de recolección de la información y datos necesarios para soportarla. Al respecto Arias (2006), define el marco metodológico como el “Conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas” (p.16).

De igual manera Balestrini (2006) define marco metodológico “...como la instancia referida a los métodos, las diversas reglas, registros, técnicas y protocolos con los cuales una teoría y su método calculan las magnitudes de lo real” (p.125). De esta manera se describen a continuación las estrategias y pasos a seguir para el desarrollo del presente trabajo.

3.1 Tipo de investigación

Arias (2006), señala que en un estudio pueden identificarse diversos tipos de investigación, existiendo muchos modelos y diversas clasificaciones, sin embargo, independientemente de la clasificación utilizada “todos son tipos de investigación, y al no ser excluyentes, un estudio puede ubicarse en más de una clase” (p.23).

Esta investigación entra en el marco de un proyecto especial debido a que se propone el diseño de un producto tecnológico, el cual es un filtro activo de potencia que mitigue los armónicos de corriente y de voltaje presentes en el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, que tiene vinculación con el perfil de competencias profesionales establecidas en el diseño curricular de la carrera de ingeniería electrónica.

En ese mismo sentido, un proyecto especial de acuerdo a Villegas (2016) cita:

Son las propuestas tangibles sistemáticamente elaboradas con base en conocimientos preestablecidos y valiéndose de procesos imaginativos y de herramientas del diseño y de la planificación para ser presentadas como

soluciones novedosas y creativas ante necesidades o problemas determinados, que hacen posibles mejores condiciones para los seres humanos. Equivale a decir que son intervenciones que independientemente de su grado de complejidad tienen como propósito específico o especial resolver aquellos problemas que surgen en cualquier ámbito del desempeño humano, con el uso de los conocimientos existentes (p.1).

Del mismo modo, la investigación se apoya en una investigación de tipodocumental la cual según los autores Santa Paellay FelibertoMartins (2010), “Seconcreta exclusivamente en la recopilación de información en diversas fuentes. Indaga sobre un tema en documentos escritos u orales” (pag.90).

3.2 Nivel de la investigación

El nivel de investigación fue descriptivo; al respecto Hernández, Fernández y Baptista (2004), manifiestan que “los estudios descriptivos miden de manera más bien independiente los conceptos o variables a las que se refieren”. Según Fidias G. Arias (2012), define:

Consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere (p. 24).

El objetivo de la investigación descriptiva consiste en llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos y personas. Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables.

Los investigadores no son tabuladores, sino que recogen los datos sobre la base de una hipótesis o teoría, exponen y resumen la información de manera cuidadosa y luego analizan minuciosamente los resultados, a fin de extraer generalizaciones significativas que contribuyan al conocimiento. la presente investigación se catalogó como descriptiva ya que su objetivo es el desarrollar y describir detalladamente el diseño de un filtro activo de

potencia para mitigar armónicos de corrientes y tensión en sistemas eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

3.3 Diseño de la investigación

Según Kerlinger y Lee (2001) el diseño de investigación: “constituye el plan y la estructura de la investigación, y se concibe de determinada manera para obtener respuesta a la pregunta de investigación” (P. 403). De aquí que el diseño se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio.

Del mismo modo Balestrini (2006) se define como: “Un plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto, técnicas de recogida de datos a utilizar, análisis previstos y objetivos..., dar de una manera clara y no ambigua respuestas a las preguntas planteadas” (p. 131).

La presente investigación se caracteriza por ser una investigación de campo, no experimental y transversal. Es de campo pues según Arias (2006) “...consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna” (p.31). Es así, que el investigador obtendrá los datos necesarios para sustentar el desarrollo del proyecto, directamente de la realidad bajo estudio, a través de los instrumentos requeridos.

Es del tipo no experimental, transversal porque la información será tomada del contexto real y se recopilara solo una vez, según Santa Palella y FelibertoMartins (2010), definen el diseño no experimental como:

El que se realiza sin manipular en forma deliberada ninguna variable. El investigador no sustituye intencionalmente las variables independientes. Se observan los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto en este diseño no se construye una situación específica si no que se observa las que existen (p.87).

3.4 Población y muestra

Para el caso de esta investigación de campo, los conceptos de población y muestra no son aplicables debido a que el desarrollo de esta investigación va dirigido directamente al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, con el fin de mitigar armónicos en la red a través de filtros activos de potencia. Esta empresa está ubicada en San Vicente, Aragua, y se dedica a la inyección de plástico (moldeo por inyección).

3.5 Técnicas e instrumentación de recolección de datos

Se procederá a realizar las mediciones de tensión, corriente y potencia en la empresa HPLAST ubicada en la localidad de San Vicente, estado Aragua, en donde se instalará un equipo registrador Marca FLUKE Modelo PowerLogger 1735, en el lado de baja tensión del transformador de la subestación de operación regular de dicha empresa, el registrador hará mediciones en intervalos de 1 min en registro de parámetros de potencia eléctrica, durante un periodo de 1 día.

Este estudio podrá determinar posibles problemas como la distorsión armónica de tensión, la distorsión armónica de corriente, fluctuaciones de tensión de corta y larga duración, además de otras mediciones.

3.6 Fases metodológicas

Las fases metodológicas constituyen un seguimiento detallado de los objetivos específicos planteados anteriormente, que servirán de guía en el cumplimiento del objetivo general, el cual es la meta principal de esta investigación.: primero se analizarán todos los aspectos teóricos y técnicos al igual que las normas vigentes a cerca de calidad de energía y mitigación de armónicos a través de filtros activos de potencia, para después poder determinar las condiciones actuales de la empresa HPLAST. Una vez hecho esto se planteará una posible solución a los problemas de calidad de energía que pudiesen tener. Una vez realizado esto, se estructurará una metodología de trabajo para solventar todo tipo de problemas de calidad de energía en empresas como HPLAST o cualquier otra. A continuación se describirán las fases metodológicas:

FASE I. Analizar los aspectos teóricos y prácticos asociados a los filtros activos.

En esta fase se planea llevar a cabo una revisión bibliográfica de documentos, guías, páginas web, trabajos anteriores y otros medios de información a los que se les puedan extraer información de interés a cerca de calidad de energía. Donde se dirigirá la búsqueda hacia aspectos claves como lo son: las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión, efectos de las cargas no lineales en la red eléctrica, perturbaciones armónicas, entre otros. Sumado a esto se realizara un estudio de dispositivos que resuelvan o mejoren las perturbaciones eléctricas, como lo son filtros para armónicos, baterías de condensadores, etc. Vale la pena mencionar que también se estudiara la función de cada uno de estos aparatos y dispositivos y su función dentro de la red del sistema eléctrico, lo cual dará una visión específica o particular de la red eléctrica que se estudie. Luego se integrara a este trabajo un estudio de las normativas vigentes de suministro eléctrico, normas tales como las COVENIN, la cuales son las normas venezolanas de control de armónicos, al igual que los estándares internacionales como la IEEE 519-1992 y la IEC, las cuales son las recomendaciones prácticas para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Todas estas normas son esenciales para este trabajo ya que muestran los estándares que debe tener cualquier empresa para funcionar de manera óptima y segura o para no incurrir en posibles sanciones debido al mal uso del servicio eléctrico

FASE II. Evaluar y diagnosticar las condiciones de distorsión armónica que presenta el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

En esta fase, se realizara un estudio del sistema de potencia en la empresa HPLAST, dicho estudio evaluara factores como los parámetros de tensión, parámetros de corriente, parámetros de factor de potencia parámetros de distorsión de onda, entre otros, todo esto dentro del sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST. A todo esto se sumara una representación gráfica de las cargas eléctricas y de sus niveles de tensión y corriente que consumen dichas cargas.

FASE III.Describir los parámetros necesarios para el diseño un filtro activo para el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

Una vez hecho el análisis de la situación actual del sistema eléctrico dentro de la empresa HPLAST y habiendo analizado la teoría concerniente a calidad de energía y a distorsión armónica. Se plantea describir los parámetros necesarios para el diseño del filtro activo de potencia (APF) para mitigar los armónicos presentes en la red de alimentación esto quiere decir, tipo de filtro necesario, tipo de topología a usar, diseño de convertidores de potencia y todos los cálculos necesarios para el control del mismo.

FASE IV.Simulación del filtro activo dirigido al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST mediante el software de simulación MATLAB r2015b.

Planteado el diseño del filtro se procederá a simular el comportamiento que se pueda lograr obtener del filtro activo a través del software MATLAB r2015b con la opinión de expertos en el área. Todo esto se hará con el fin de observar como se presenta la distorsión armónica en el sistema eléctrico de potencia y las partes que conforman el filtro activo y como sería su conexión a la red.

CAPITULO IV RESULTADOS

Para dar cumplimiento a los objetivos establecidos y las fases planteadas en capítulo anterior, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de grado.

4.1 Fase I: Analizar los aspectos teóricos y prácticos asociados a los filtros activos.

Tal como se mencionó en capítulos anteriores, la presencia de componentes armónicos tanto en la señal de corriente como en la señal de voltaje, genera que se presenten efectos no deseados en el sistema eléctrico de potencia que afecta los equipos eléctricos y electrónicos de la empresa. Para la solución de la misma se empleó el uso de un FAP para mitigar los armónicos de corriente y de voltaje, es por ello para en la primera fase se analizaron los aspectos teóricos y prácticos asociados a los filtros activos, teniendo como punto partida de esta investigación se basa en el principio de los armónicos, investigando a través de bibliografías y consultas por la web, como están matemáticamente constituidos, que los generan y los daños que implica operar bajo condiciones donde un sistema eléctrico de potencia se encuentre en presencia de armónicos. Una vez conocido el daño que genera los armónicos, en un sistema eléctrico es necesario mantener las componentes armónicas dentro de unos límites establecidos, por lo tanto, se hizo un revisión de las normas establecidas por diferentes organizaciones técnicas nacionales e internacionales, como lo son COVENIN, en su norma COVENIN PROYECTO 11:7-001, es la norma venezolana de control de armónicos en sistemas eléctricos y la IEEE e IEC (ver Capítulo III, sección 2.2.9), respectivamente.

Continuando con la investigación, ya estudiado el fenómeno armónicos se escogió el método de filtrado activo de armónicos de corriente para solución del problema presente en el sistema eléctrico de potencia. Se consultaron diferentes trabajos de grados, trabajos de

doctorado y maestrías, así como revistas informativas y contribuciones de diferentes universidades, profesores e instituciones que estudian los filtros armónicos para obtener

suficiente bases para teóricas y prácticas de los métodos, cálculos y pasos para llegar a diseñar un filtro activo dirigido a un sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

4.2 Fase II: Evaluar y diagnosticar las condiciones de distorsión armónica que presenta el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

En la segunda fase se evaluó y diagnosticó las condiciones de distorsión armónica que presenta el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

La empresa HPLAST, se encuentra ubicada en la Zona Industrial San Vicente, Edo Aragua. Esta alimentada a partir de la empresa eléctrica de suministro, mediante un único circuito en 13,8 KV, a través de dos bancos de transformadores, cada uno de 3x167 KVA.

Este diagnóstico se realizó en conjunto con la empresa Renova Ingeniería expertos en diagnóstico de calidad de energía en sistemas de potencia quienes facilitaron el equipo registrador Marca FLUKE, modelo PowerLogger 1735 con certificado de calibración emitido según normas de calidad ISO 9001 (figura 27). Esta herramienta para la medición evaluó diferentes parámetros como los son: tensión de suministro según niveles de tensión normalizados, frecuencia de desviación, desbalance de tensión y distorsión armónica de la onda. Corriente de suministro, desbalance entre corriente y nivel de distorsión armónica a través de pinzas de tensión y corriente originales del equipo.

El equipo registrador se instaló en el lado de baja tensión, durante la operación regular del establecimiento, en intervalos de medición de 1 min en registro de parámetros de potencia eléctrica, durante un periodo de 2 días en cada tablero (figura 28)

Para fines de esta investigación solo se tomaron en cuenta los resultados arrojados en cuanto al diagnóstico de contenido armónico en el sistema de eléctrico de potencia, ya que el objetivo principal de este trabajo de grado es mitigar los armónicos. Otros inconvenientes que no tengan que ver con armónicos pueden ser solucionados a través de usos de FAP comerciales desarrollados por fabricantes del mismo.



Figura 27.FLUKE, modelo PowerLogger 1735.

Fuente: <https://www.google.co.ve>



Figura 28. Tablero N. 1 (lado izquierdo) y Tablero N. 2 (lado derecho).

Fuente: Informe de calidad de energía, Renova Ingeniería.

Ü Resultados en el punto de medición 1: Tablero N. 1

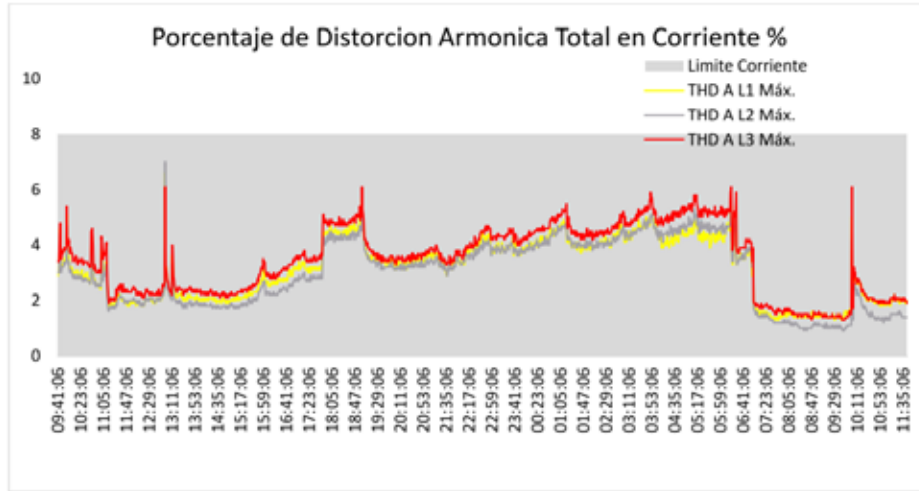
A continuación se muestran una serie de cuadros y gráficos relacionados con las mediciones efectuadas en el tablero 1.

Tasa de Distorsión Armónica en Corriente (Norma IEEE 519)				
	THD I _a	THD I _b	THD I _c	THD I _n
Valor Maximo	6,60%	7,00%	6,10%	99,90%
Valor Promedio	3,13%	2,99%	3,46%	53,52%
Valor Normalizado	8,00%	8,00%	8,00%	
Tasa de Distorsión Armónica en Tensión Norma IEEE 519)				
	THD V _a	THD V _b	THD V _c	
Valor Maximo	5,00%	5,30%	4,50%	
Valor Promedio	2,07%	2,12%	2,22%	
Valor Normalizado	5,00%	5,00%	5,00%	

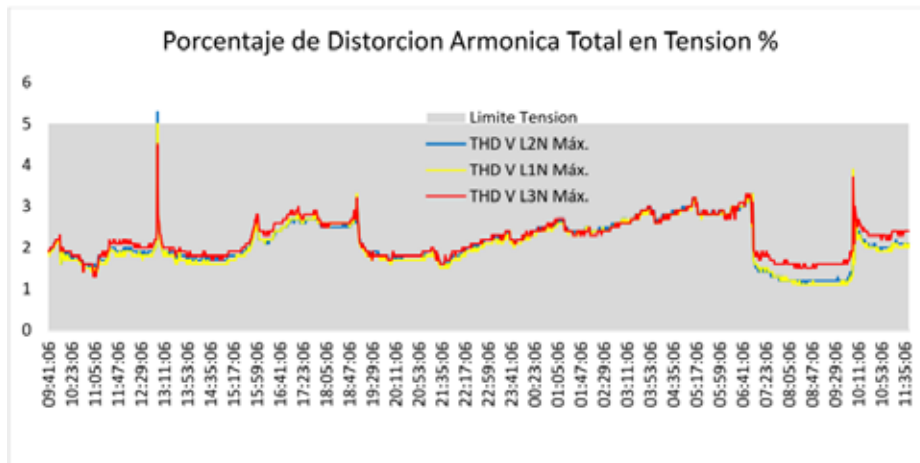
Fuente: informe de calidad de energía, Renova ingeniería (tabla 1).

Como se observa en la tabla (tabla 1) el instrumento de medición arroja porcentajes de distorsión armónica (THD) de corriente y de tensión presentes en cada línea del sistema eléctrico de potencia, donde los valores máximos no son mayores al 2% para la corriente y para la tensión se mantiene en el límite estipulado según la norma internacional IEEE 519, estos valores máximos se consideran tolerables dentro de la norma.

En los siguientes gráficos (grafico 1 y grafico 2) se observan el aumento de corriente y voltaje armónico en porcentaje de cada línea de alimentación, donde cabe destacar que la tensión armónica superan los límites establecidos una sola vez por día a una hora específica, lo que quiere decir que cierta carga, se acciona y genera distorsión armónica solo en ese momento, a fines de la norma IEE 519 también son funcionamientos cotidianos y tolerables, ya que la carga no genera distorsión armónica continua.



Fuente: informe de calidad de energía, Renova ingeniería (grafico 1).



Fuente: informe de calidad de energía, Renova ingeniería (grafico 2).

Ü Resultado en el punto de medición 2: Tablero N. 2

A continuación se muestran una serie de cuadros y gráficos relacionados con las mediciones efectuadas en el tablero 2.

Tasa de Distorsion Armonica en Corriente (Norma IEEE 519)				
	THD I _a	THD I _b	THD I _c	THD I _n
Valor Maximo	10,90%	11,40%	12,30%	4,50%
Valor Promedio	6,02%	6,01%	6,60%	0,15%
Valor Normalizado	8,00%	8,00%	8,00%	
Tasa de Distorsion Armonica en Tension Norma IEEE 519)				
	THD V _a	THD V _b	THD V _c	
Valor Maximo	3,70%	3,70%	3,50%	
Valor Promedio	2,50%	2,44%	2,40%	
Valor Normalizado	5,00%	5,00%	5,00%	

Fuente: informe de calidad de energía, Renova ingeniería (tabla 2).

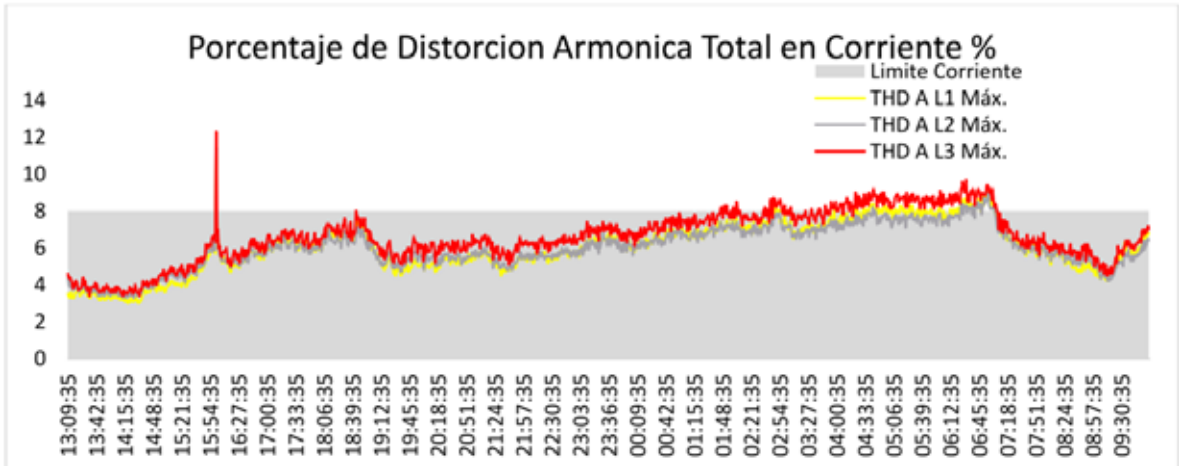
En el tablero N. 2 se detectó presencia de armónicos de corriente de un 5% por encima de la norma IEEE 519 pero sin presencia de armónicos de tensión. Esta detección de armónicos de corriente indica que en este tablero N 2 se encuentra conectadas cargas no lineales que distorsionan la red de alimentación.

Cabe destacar que debido a que las cargas no lineales distorsionan la onda sinusoidal de corriente, en la mayoría de los casos siempre se presentaran altos THD de corriente y que en un PCC distorsionan la onda de tensión como registró el equipo de medición en el tablero N. 1

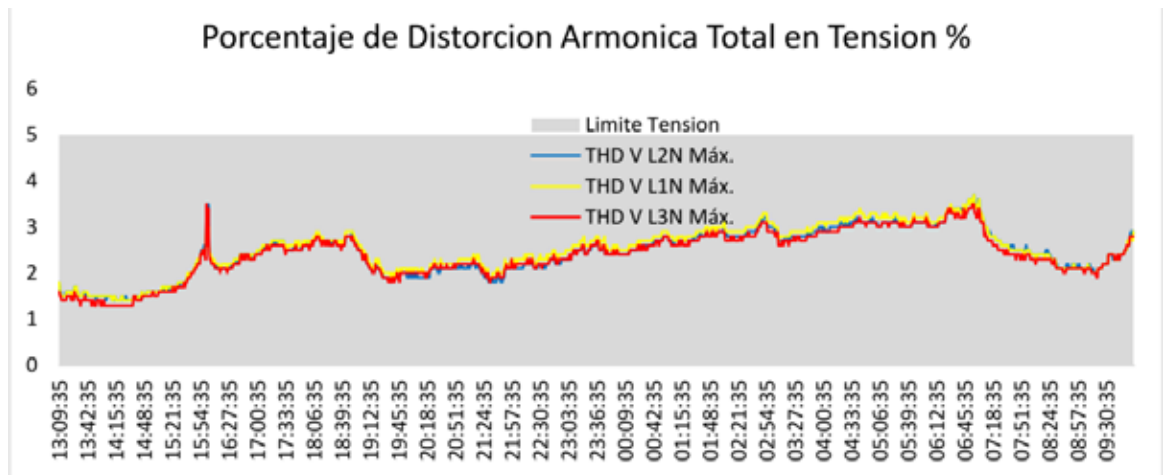
En el grafico 3 se observan el aumento de corriente armónica en cada línea de alimentación, la distorsión es fija en el tiempo y sobre los limites estipulados por la norma IEEE 519 con se mencionó anteriormente.

El grafico 4 muestra la distorsión armónica de tensión de las líneas en valores estables y sin superar en ningún momento la norma.

Analizado el diagnostico que se realizo a sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, se concluye, la presencia de armónicos de corriente en el tablero N.2, donde se evidencia en la tabla 2. Al ser este tablero N.2 el punto donde mas se presentadistorsionarmonica de corriente, según las mediciones (tabla 2), el filtro activo se diseñara en función de ser conectado aguas arribas del tablero 2 (ver diagrama unifilar, Anexo A).



Fuente: informe de calidad de energía, Renova ingeniería (grafico 3).



Fuente: informe de calidad de energía, Renova Ingeniería (grafico 4).

4.3 Fase III: Describir los parámetros necesarios para el diseño un filtro activo para el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST.

Para el desarrollo del diseño del filtro activo para el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, es necesario obtener un conjunto de parámetros que tiene el sistema eléctrico de potencia para desarrollar paso a paso el filtro activo.

El diseño de un filtro activo de potencia para cualquier carga puede ser un trabajo laborioso, ya que éste debe compensar cualquier carga no lineal, y así mismo mantener el sistema estable y operativo; por ese motivo, en este capítulo se presentan métodos para el dimensionamiento de los elementos del mismo.

Para ello, primero se debe determinar el suministro eléctrico al cual será conectado el filtro y la carga, luego se realiza la selección del voltaje del enlace DC, y con estos datos establecidos, se procede a dimensionar los elementos, los cuales, son los siguientes: la Impedancia de enlace con la red y el enlace DC, además del diseño de controladores de corriente y de voltaje.

Es de suma importancia recalcar que las ecuaciones, formulas y metodos de cálculos para el diseño del filtro fueron obtenidas de fuentes documentales los cuales contienen evidencia de funcionamientos de filtros activos y seleccionando así criterios y teoremas necesarios para el diseñar el filtro en función al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, utilizando los cálculos implementados a continuación:

Ü Suministro eléctrico

En el apartado anterior se observa en el diagnostico de calidad de enegria, que la presencia de distorsionarmonica esta presenta en la red de baja tensión(Tablero N.2). En el presente trabajo, el filtro se dimensionó para cargas de baja tensión y por ello, el suministro eléctrico es una red trifásica de 120[Vrms] desfasados 120° en cada fase y su neutro.

Ü Conexión al Suministro electrico

Según la conexión al sistema eléctrico existe conexión serie, paralelo y mixta. En el presente trabajo, se utiliza conexión en paralelo.

El filtro activo de potencia trifásico, se conecta en paralelo con el sistema de distribución como se observa en la Figura 29, para suministrar una corriente de compensación de igual magnitud pero de sentido opuesto en la punto de conexión comun, el cual, cancela la corriente armónica en el lado de alterna de una carga no lineal.

Por sus características de funcionamiento, esto es, por inyectar corrientes, el filtro activo paralelo es el adecuado para la compensación de cargas que generan corrientes armónicas debido a que el tablero N.2 según el diagnostico de calidad de energía es el que presenta distorción armónica de corriente por encima de la norma.

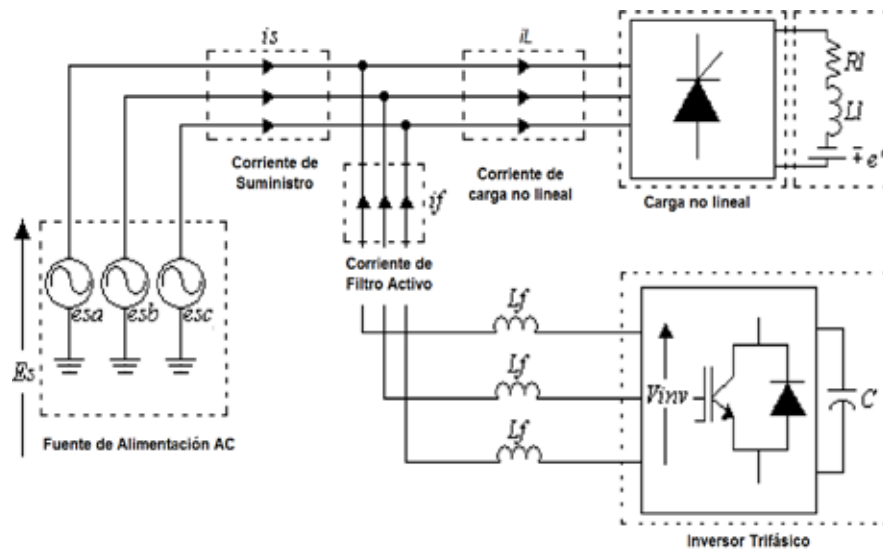


Figura 29. Conexión en paralelo al sistema eléctrico de potencia del filtro activo.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

Ü Convertidor estatico de potencia

Como se planteo en el capitulo anterior el convertidor estático es el dispositivo que realiza la inyección de las corrientes de compensación en la red. Este convertidor

siempre irá acompañado de un sistema de control que garantice que la corriente realmente inyectada en la red sigue fielmente las señales aportadas como referencia. Se planteo un filtro activo de potencia paralelo trifásico, debido a que la perturbación a compensar en el presente trabajo, corresponde a los armónicos de corriente (como se presentan en el Table N. 2) que se generan por las cargas no lineales.

El sistema a compensar, en nuestro caso, se trata de un sistema trifásico. Para un sistema trifásico equilibrado sin conductor de neutro, se suele utilizar un filtro en cuya etapa de potencia tenga un puente inversor de voltaje, (“Voltage source inverter”, VSI), trifásico de tres ramas, Figura 30.

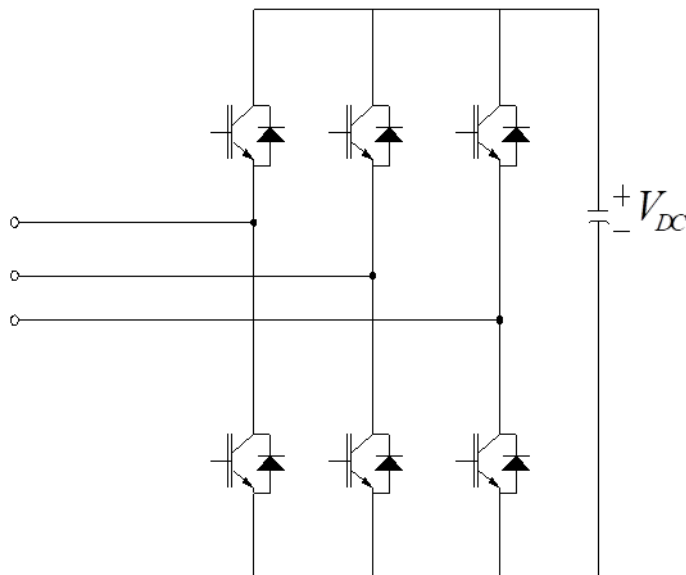


Figura 30. Puente inversor de voltaje, (“Voltage source inverter”, VSI), trifásico de tres ramas.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

Sin embargo, si el sistema tiene conductor neutro como ya sea porque existe desequilibrio o no, se suele utilizar un inversor de cuatro ramas, Figura 31; o de tres ramas en caso de ser posible una conexión al punto medio de la batería de condensadores, Figura 32.

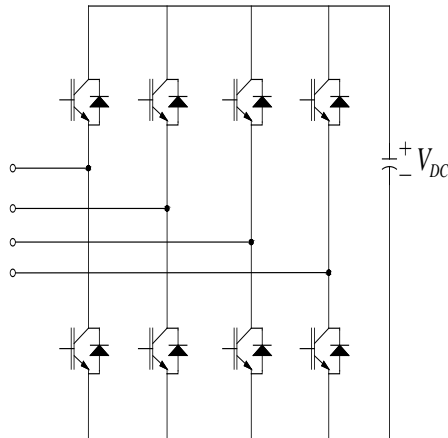


Figura 31.FLFB – Four-Leg Full-Bridge.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

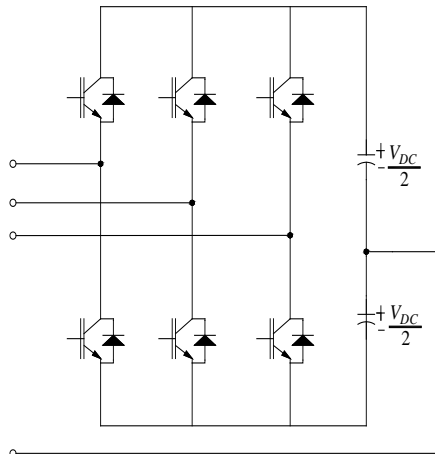


Figura 32.TLSC – Three-Leg Slip-Capacitor.

Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co>

En el presente trabajo se utiliza el filtro activo trifásico de cuatro ramas y cuatro hilos debido a que asista constituido el sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST para la cual este trabajo va dirigido, esta topología de inversor es conocido como “inversor de cuatro ramas en puente completo” (FLFB – Four-Leg Full-Bridge).

Con lo anteriormente planteado, el inversor que se planteo para la inyección de corriente es un “Inversor en fuente de voltaje” (VSI – VoltageSourceInverter) también conocido como un convertidor de tensión (acumulador capacitivo) como se observa en la figura 29, este exige la presencia de elementos inductivos para el acoplamiento con el sistema eléctrico de potencia. La selección del elemento a utilizar como interruptor depende de la capacidad de corte de corriente, de la frecuencia de conmutación y del nivel de aislamiento en tensión. Y dado que estos elementos tienen la característica de ser rápidos a costa de un menor dimensionamiento en tensión y/o corriente, se debe buscar un compromiso entre las frecuencias de conmutación a utilizar y la capacidad de corte y de aislamiento que se quiera.

En el presente trabajo, no presentamos el semiconductor elegido, debido a que no se implementará el filtro. Sin embargo, podemos decir que, lo anterior se logra con la tecnología IGBTs (InsulatedGate Bipolar Transistors), y para poder realizar el control del encendido y apagado de los semiconductores se utiliza señales de control por PWM.

Ü **Modulacion PWM**

El control de voltaje de salida de los inversores se logra mediante el control de la ganancia aplicando una modulación de ancho de pulso, PWM, en los inversores.

Existen técnicas de modulación como:

- Ø Modulación por ancho de un solo pulso.
- Ø Modulación por ancho de pulsos múltiples.
- Ø Modulación por ancho de pulso sinusoidal.
- Ø Modulación por ancho de pulso.

Ø Control por desplazamiento de fase.

La técnica usada para éste trabajo va a ser, la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM), la elección de este tipo de PWM es debido a que va de la mano con el desarrollo y funcionamiento del controlador lineal de corriente el cual se describe mas adelante.

Esta técnica consiste en generar pulsos de frecuencia determinados y hacer variar el ciclo de trabajo. La forma de onda se obtiene debido a una comparación entre una señal portadora a alta frecuencia de tensión continua usualmente triangular con una señal moduladora sinusoidal, cuya frecuencia sea menor a la portadora e igual a la frecuencia fundamental del voltaje de salida, la cantidad de pulsos por medio ciclo dependerá de la frecuencia de la portadora; la tensión que se obtendrá será también sinusoidal con mayor o menor contenido de armónicos de alta frecuencia.

Para poder realizar la modulación SPWM se debe tener en cuenta la modulación por amplitud y la modulación de frecuencia.

Se define modulación de amplitud como la relación de amplitudes de la señal sinusoidal y de la triangular.

$$m_a = \frac{V_{\sin}}{V_{tri}} \quad (1.37)$$

Se considera que la modulación de amplitud es igual a 0.8.

Y se define la modulación de frecuencia como la relación de la frecuencia de la señal triangular con la frecuencia de la señal sinusoidal.

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{sin}} \quad (1.38)$$

Se debe asegurar que el índice de modulación sea menor a 1 para un control modulado sinusoidal, caso contrario ocurre la sobre modulación.

El valor del índice de frecuencia también debe ser analizado ya que al aumentar la frecuencia de la portadora aumentan las frecuencias a las que se producen armónicos.

Ü **Determinación del Voltaje del Enlace DC**

Para la selección del voltaje se ha considerado lo siguiente:

Ø Voltaje DC, V_{dc} , debe ser mayor al pico de voltaje AC del FAP, aproximadamente mayor que el voltaje pico-pico de la red, $V_{grid_pp} = 340[V_{rms}]$.

Ø Voltaje DC, V_{DC} , debe tener un valor suficientemente alto para considerar los picos de voltaje de la conmutación, caso contrario, si el voltaje DC es menor al nivel de voltaje requerido en los instantes de conmutación, se perderá el control en el seguimiento de la corriente de referencia y el filtro se volverá inestable.

A continuación, se obtiene el valor del voltaje DC del filtro, a partir de la siguiente ecuación

$$\overline{V_{an}} = m \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.39)$$

Mediante la ecuación (1.39), donde, $\overline{V_{an}}$, es igual al voltaje de salida del convertidor, tenemos que:

$$\overline{V_{an}} = V_{conv} = m \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.40)$$

Bajo las consideraciones anteriores, se evalúa la ecuación (1.40), para cuando la red tenga un voltaje $V_{grid_rms} = 120[V_{rms}]$ y el índice de modulación sea de $m=0.85$. Con estos valores se obtiene que $V_{DC} = 400[V]$. Por lo tanto, el valor que el capacitor tendrá cargado inicialmente es de $400[V]$.

Ü **Inductor de Enlace con la Red**

El inductor de enlace, es el filtro inductivo que se coloca entre el inversor alimentado por voltaje (VSI) y la red de distribución de suministro. El valor de esta inductancia es fundamental debido que permite que el filtro activo de potencia paralelo trifásico tenga un buen filtrado de armónicos de corriente, absorbiendo el voltaje pulsante del convertidor.

La inductancia fue escogida bajo los siguientes criterios:

- Ø La pendiente de la onda de corriente que circula por la inductancia debe ser igual o menor a la pendiente de la onda triangular, cuya pendiente está definida por:

$$4 fs \quad (1.41)$$

- Ø La máxima pendiente de la corriente del inductor es:

$$\frac{d_{iL}}{d_t} = \frac{V_{an} - 0.5V_{DC}}{L} \quad (1.42)$$

Ø El voltaje de caída en los terminales de la inductancia de enlace debe ser lo menor posible, se recomienda que sea menor que un 2% del voltaje de fase, 120[V_{rms}].

Entonces, despejando las ecuaciones anteriores (1.41) y (1.42) tenemos que el valor de la inductancia está definido por:

$$L = \frac{V_{an} \cdot 0.5V_{DC}}{4 f_s} \quad (1.43)$$

donde:

- L: Valor de la inductancia.
- V_{an}: Voltaje pico de línea – neutro de la red.
- V_{DC}: Voltaje DC del Enlace DC
- : Amplitud de la Señal Portadora.
- f_s: Frecuencia de Conmutación del Inversor.

Entonces para:

$$\begin{aligned} V_{an} &= 170 \text{ [V]} \\ V_{DC} &= 400 \text{ [V]} \\ &= 1 \\ f_s &= 40000 \text{ [Hz]} \end{aligned}$$

El valor de la inductancia es $L = 2.3125 \text{ [mH]}$ Por lo tanto, la reactancia inductiva queda definida por:

$$X_L = L \cdot 2 f \quad (1.44)$$

donde:

ω : Frecuencia Angular
 f : Frecuencia de la Red

El valor de la reactancia inductiva es $X_L = 0.872$

Ü Capacitor del Enlace DC

El capacitor es el elemento que fija voltaje en el enlace DC limitando sus variaciones y provee energía durante los transientes. Es importante, dimensionarlo correctamente debido a que la potencia instantánea absorbida por la carga en los cambios transitorios, genera fluctuaciones de corriente en los terminales del capacitor y así las fluctuaciones del voltaje pueden ser minimizadas.

Para encontrar el capacitor, partimos de la ecuación (1.45), del voltaje del capacitor:

$$V_{\max} = \frac{1}{C_{\min}} \int_{t_1}^{t_2} ic(t)dt \quad (1.45)$$

Donde al despejar el capacitor tenemos que:

$$C_{\min} = \frac{1}{V_{\max}} \int_{t_1}^{t_2} ic(t)dt \quad (1.46)$$

En el presente trabajo, se calcula el capacitor de manera gráfica, y como es de conocimiento, la integral de una función, es igual al área bajo la curva, por la tanto, la ecuación final quedaría de la siguiente forma:

$$C_{\min} = \frac{1}{V_{\max}} b * h \quad (1.47)$$

Donde, La base (b), es igual al tiempo de carga. La altura (h), es igual a la amplitud de la corriente del capacitor. Y V , es igual al 1% del V_{DC} , este valor

indica el máximo rizado que puede tener el voltaje del capacitor. En este caso es de 4[V].

Como se desconoce el valor del capacitor, se utilizo una fuente ideal de 400[V], en lugar del capacitor. Ahora bien, la determinación del capacitor, se la realizó en base a dos casos.

Al ser nuestro dispositivo encargado de eliminar los armónicos de corriente, se analizoel primer caso, en el cual, se inyecta únicamente potencia activa y en el segundo caso se inyecta potencia reactiva. Esto dependerá de la carga conectada a la red. Para poder analizar ambos casos extremos, se debe conocer la potencia que suministra o recibe el filtro y así mismo la red. Para ello se utilizo el concepto de Transferencia de Potencia para hallar incógnitas respectivas que faciliten nuestro proyecto.

La transferencia de potencia, nos indica que la potencia activa transmitida entre dos puntos es igual a la ecuación (1.48). Y la potencia reactiva entre los dos puntos es igual a la ecuación (1.49).

$$P_1 - P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \quad (1.48)$$

$$Q_1 - Q_2 = \frac{V_2 [V_2 - V_1 \cos \theta]}{X} \quad (1.49)$$

donde,

- P_1 : Potencia Activa del Convertidor
- P_2 : Potencia Activa de la Red
- Q_1 : Potencia Reactiva del Convertidor
- Q_2 : Potencia Reactiva de la Red
- V_1 : V_{conv_rms}

$$V_2 : V_{grid_rms}$$

La visualización de la potencia que se entrega entre los puntos, tanto activa como reactiva, se observa en la figura 33.

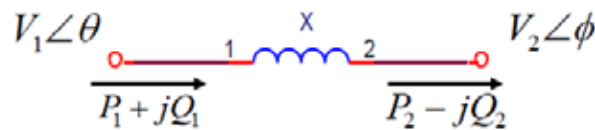


Figura 33.Transferencia de Potencia entre Dos Puntos.

Fuente: <https://www.dspace.espol.edu.ec>

Basados en la transferencia de potencia, se determina la máxima corriente que el filtro puede entregar y así mismo su potencia aparente, esto permitirá hallar el valor de la capacitancia.

En el orden de las ideas anteriores se idealiza que el filtro entrega únicamente potencia activa, para ello, el ángulo entre la red y el convertidor debe ser 90° . Basados en la ecuación (1.48), y conociendo el valor de cada una de sus variables, tenemos que:

$$P_1 = V_{conv_rms} * I_{conv_rms} * \cos(\) \quad (1.49)$$

$$V_{conv_rms} * I_{conv_rms} * \cos(\) = \frac{V_{conv_rms} * V_{grid_rms}}{X_L} \sin \quad (1.50)$$

donde,

$$\begin{aligned}
 V_{conv_rms} &= 120[V_{rms}] \\
 V_{grid_rms} &= 120[V_{rms}] \\
 X_L &= 0.872[ohmios] \\
 &= 0^\circ \\
 &= 90^\circ
 \end{aligned}$$

El valor de X_L , es la reactancia inductiva entre el convertidor y la red, la cual se halló en la sección anterior. Por lo tanto, la corriente que entrega el FAP paralelo trifásico es $I_{conv_rms} = 137.6$ A y la potencia del filtro es $S = 16512$ VA determinada en base a la ecuación:

$$S = V_{conv_rms} * I_{conv_rms} \quad (1.51)$$

Es importante mencionar que el índice de modulación m , debió ser igual a 0.85 para que el V_{conv_rms} sea igual a 120Vrms, valor obtenido de la ecuación (1.39). Simulando en Matlab anteriormente planteado, el modelo del Inversor, sólo que en lugar de utilizar un capacitor, se colocará una fuente de 400[V].

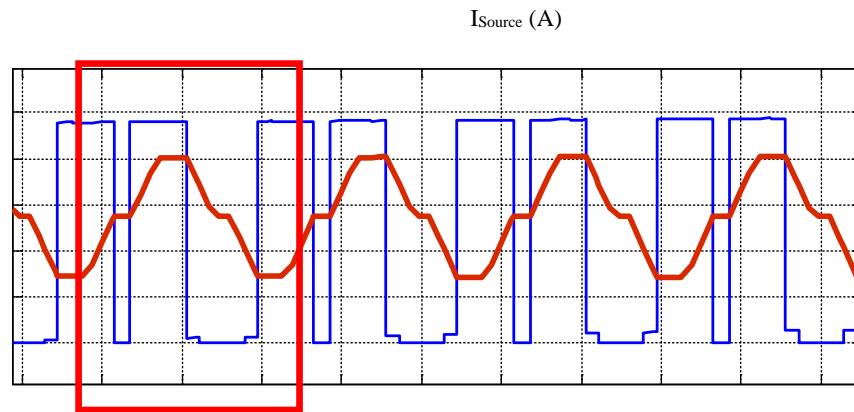


Figura 34. Gráfica de la Corriente de Capacitor en el Primer Análisis.

Fuente: KevinLezam 2017.

De la Figura 3.5, podemos ver que:

$$b = 33.33 \cdot 10^{-6} [\text{seg}]$$

$$h = 125 [\text{A}]$$

$$V = 1\% V_{DC} = 4 [\text{V}]$$

Aplicando la ecuación (1.46) tenemos que el valor del capacitor es $C = 520.78 [\mu F]$, pero se fija un valor comercial, así que el resultado sería $C = 525 [\mu F]$.

El dimensionamiento de los elementos del filtro activo de potencia paralelo trifásico de tensión, van dirigido a un red de baja potencia como se menciono anteriormente por lo cual el capacitor $C=525\mu F$ es el adecuado para este caso.

Se analiza el segundo caso, donde la potencia reactiva es máxima, para ello el desfase entre el convertidor y la red debe ser de cero, y el voltaje entre ellos debe ser diferente para un intercambio de potencia reactiva máximo.

Antes de analizar la gráfica de la corriente de la fuente que reemplaza al capacitor, se debe encontrar el voltaje de diferencia entre el convertidor y la red, para el cual la potencia reactiva es máxima. Mediante la ecuación (3.15), determinamos que:

$$Q = V_{conv_rms} * I_{conv_rms} * \text{Sen}(\theta) \quad (1.52)$$

$$Q = \frac{V_{grid_rms} [V_{grid_rms} - V_{conv_rms} * \text{Cos}(\theta)]}{X_L} \quad (1.53)$$

donde:

$$I_{conv_rms} = 136.7[A]$$

$$V_{grid_rms} = 120[V_{rms}]$$

$$X_L = 0.872[ohmios]$$

$$\theta = 90^\circ$$

$$\theta = 0^\circ$$

Igualando la ecuación (1.52) y (1.53), se obtiene que $V_{conv_rms} = 60[V_{rms}]$. Recordar que para que lo anterior se cumpla, es necesario que se cumpla la ecuación (1.54), asimilando para nuestro caso tenemos que:

$$V_{conv_rms} = m \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.54)$$

dado que,

$$V_{DC} = 400[V]$$

El valor de m es $m=0.424$.

Con los valores obtenidos, se procede a realizar la simulación en Matlab y los resultados de la gráfica se muestran en la Figura 35.

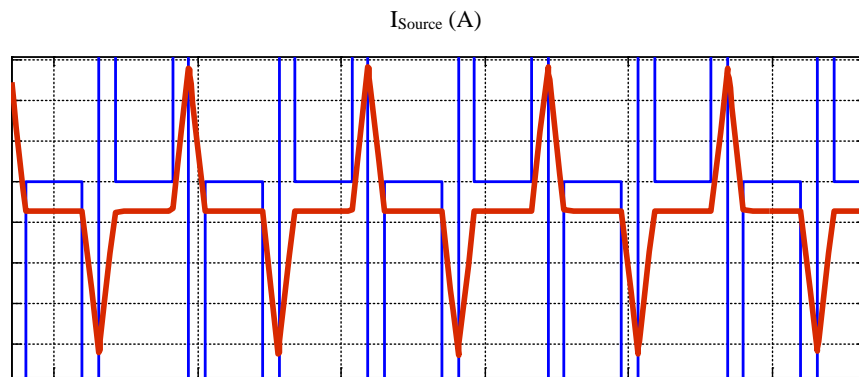


Figura 35. Gráfica de la Corriente del Capacitor en el Segundo Análisis.

Fuente: KevinLezam 2017.

$$b = 1.25 * 10^{-5} [seg]$$

$$h = 14[A]$$

$$V = 1\%V_{DC} = 4[V]$$

Aplicando la ecuación (1.46), tenemos que el valor del capacitor es $C = 21.87[\mu F]$. De los resultados obtenidos en ambos casos, se escoge el capacitor mayor, debido a que cumple con el requisito de mayor exigencia.

4.3.1 Control del filtro activo de potencia trifásico paralelo

Con el fin de reducir la inyección de corrientes no sinusoidales, los filtros activos, se conectan en paralelo con las cargas perturbadoras o no lineales (ver equivalente monofásico y forma de funcionamiento en la Figura 36).

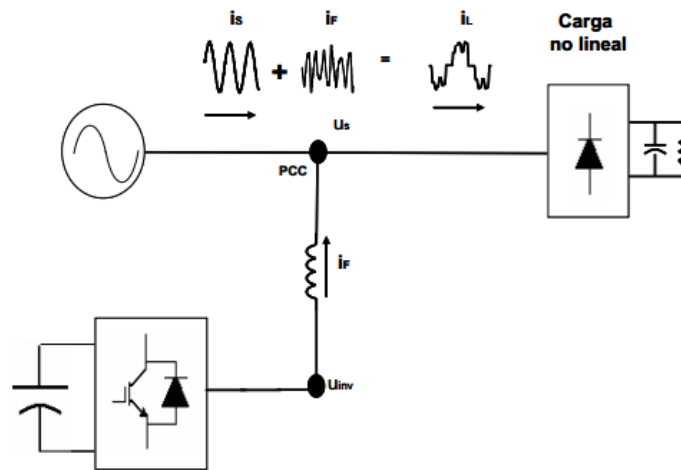


Figura 36.Diagrama de bloques del controlador de corriente.

Fuente: Lozano 2011.

El principal componente del filtro activo es un puente inversor con fuente de tensión (VSI en la literatura inglesa) y su conexión al Punto de Conexión Común (PCC) se hace por medio de una inductancia o de un transformador de potencia como se mencionó anteriormente. Para controlar un filtro activo se necesitan tres lazos de control muy relacionados entre sí. El primero, se utiliza para calcular la corriente de referencia que debe inyectar el filtro, el segundo es para mantener la tensión del bus de continua en un valor predeterminado y el tercero se utiliza para garantizar que el filtro siga la referencia deseada mediante las señales de disparo a los semiconductores utilizados en el puente inversor. Por lo anterior, el control contaría de las siguientes partes:

- ∅ Generación de la corriente de referencia o de compensación.
- ∅ Control de tensión.
- ∅ Control de corriente.

En función de la tarea a desarrollar (ver Figura 37), el primer control, es decir, el que calcula la corriente de referencia, puede ser dividido en las siguientes categorías: algoritmos basados en teorías de potencia y algoritmos basados en una fuente de corriente sinusoidal.

Dentro de los primeros algoritmos están los que buscan que el sistema eléctrico vea la carga no lineal como una carga lineal y resistiva pura, logrando que la corriente suministrada esté en fase y tenga la misma forma de onda que la tensión aplicada; la teoría PQ de Akagi y la teoría de Fryze corresponden a esta categoría.

Por otro lado, el segundo tipo de algoritmo busca que el sistema eléctrico suministre una corriente sinusoidal pura para cualquier tipo de tensión aplicada, para ello elimina de la señal de corriente todas las componentes distintas a la frecuencia fundamental; el algoritmo de Fourier, filtros resonantes, filtros adaptativos, etc.

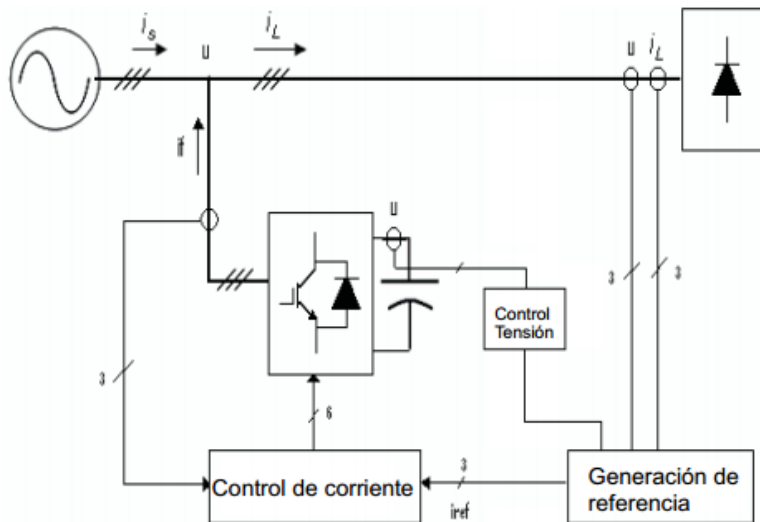


Figura 37.Diagrama de bloques de los 3 controles del filtro activo.

Fuente: Lozano 2011.

En consecuencia y dado que el objetivo central es eliminar los armónicos del sistema eléctrico, este trabajo de investigación se centrara en este segundo tipo de algoritmos utilizando filtros esta técnica es usada en diseños con fin de ser simulados.

El estudio de los del primer control para algoritmos basados en potencias requiere de especialización o maestrías en el área de potencia, para así, llegar a implementar el filtro activo.

En cuanto al segundo control, control de tensión, en caso de ser necesario, actualmente se suele utilizar un control PI (Control Proporcional-Integral) para generar una corriente de referencia que sumada a la del primer control se convierte en una nueva señal de referencia. A esta señal se le conoce con el nombre de corriente de referencia i_{ref} .

En cuanto al tercer control, control de corriente, las señales de disparo a los IGBTs se calculan para que el filtro inyecte la corriente necesaria para compensar los armónicos de la carga y mantener constante la tensión del bus de continua. Para lograr esto, el sistema de control calcula la corriente de referencia que el filtro debe seguir y estima la corriente que debe inyectar el filtro en el instante de actuación de los IGBTs. A

ciencia cierta aún no se tiene el controlador más eficiente para esta nueva tecnología debido a que actualmente se continúan desarrollando nuevas formas de controlar la corriente en lo que respecta a filtros activos.

Ya que el retardo ocasionado debido a los tiempos de adquisición y procesamiento de las señales y a la sincronización de los controles puede ser perjudicial, por lo tanto, el controlador actual más capacitado para las exigentes cargas que se encuentran hoy en día en las empresas es el control predictivo. Para este trabajo de investigación se aplicará el control lineal PWM.

Ü Controlador lineal de Corriente

En este control al ser uno de los más sencillos e ideales para sistemas de baja potencia, las corrientes de salida del inversor son medidas y comparadas con las corrientes de referencia. Las señales de error generadas son comparadas con una onda triangular de frecuencia y amplitud fijas. Si la señal de error de corriente es positiva y mayor que la onda triangular, los dispositivos de conmutación se activan y la tensión de la salida del inversor es positiva. Sin embargo, si la señal de error de corriente es positiva y menor que la triangular, los dispositivos de conmutación se activan para suministrar una tensión negativa a la salida del inversor.

El controlador lineal de corriente es un sistema de modulación por anchura de pulsos (PWM, pulse width modulated) estándar. La onda triangular es la señal portadora, mientras que la señal de error de corriente es la onda moduladora.

El lazo de control de corriente del FAP paralelo trifásico como se observa en la figura 38, permite obtener la corriente que va a compensar los armónicos de la carga, esto lo logra mediante el filtro, el cual se encarga de obtener las corrientes con armónicos de la carga, las cuales, van a ser la referencia para el controlador de corriente

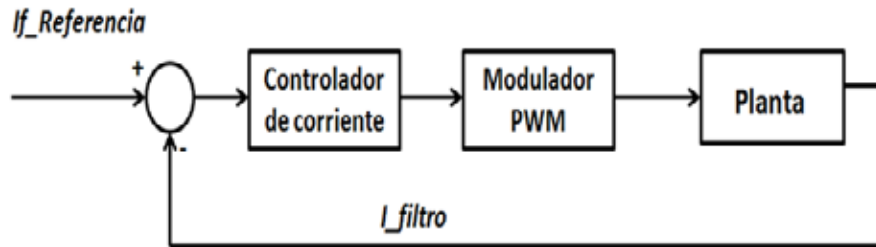


Figura 38.Diagrama de bloques del controlador de corriente.

Fuente: Muñoz y Pasmay 2012.

Para el diseño del lazo de control de corriente se obtuvo la función de transferencia de corriente de la planta. Mediante el análisis del gráfico de la Figura (Figura 39), se obtiene dicha función.

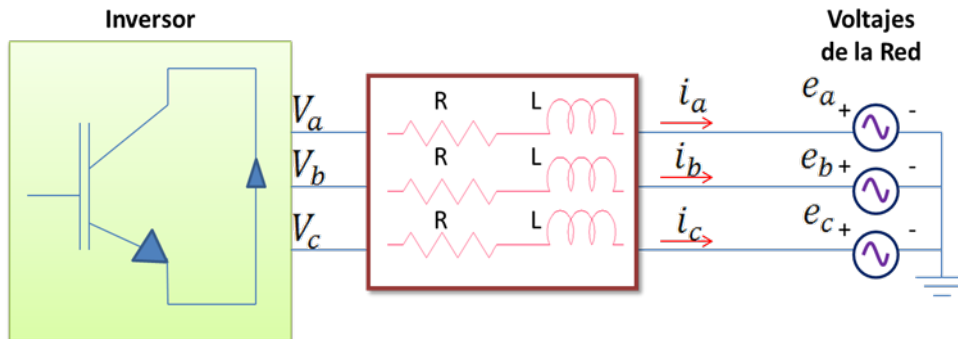


Figura 39.Diagrama de bloques de inversor conectado a la red.

Fuente: Muñoz y Pasmay 2012.

Se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = e_a \quad (1.55)$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = e_b \quad (1.56)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = e_c \quad (1.57)$$

Donde se tuvo lo siguiente:

$$\bar{V} = \begin{matrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{matrix} \quad (1.58)$$

$$\bar{i} = \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} \quad (1.59)$$

$$\bar{e} = \begin{matrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{matrix} \quad (1.60)$$

Entonces, tuvo la siguiente ecuación.

$$\bar{V} = R\bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt} = \bar{e} \quad (1.61)$$

Para poder analizar el sistema trifásico se usó la técnica y herramienta matemática, la transformada de Park, la cual convierte un sistema trifásico estacionario, en uno ortogonal que gira en sincronismo con la red. Esta técnica ha sido ampliamente usada para modelar sistemas eléctricos bajo operación balanceada y desbalanceada, analizar transitorios, dinámica de la planta y armónicos.

Con la transformada de Park obtenemos vectores fijos en el tiempo en un sistema de referencia. La matriz de transformación se expresa en la ecuación (1.62).

$$\bar{T} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2/3) & \cos(\omega t - 4/3) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2/3) & \sin(\omega t - 4/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1.62)$$

La matriz de transformación del sistema de referencia síncrono o dq0 al sistema abc es la inversa de \bar{T} , ecuación (1.63).

$$\bar{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - 2/3) & -\sin(\omega t - 2/3) & 1 \\ \cos(\omega t - 4/3) & -\sin(\omega t - 4/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

Se realizó la transformación de ejes a un sistema dq0 multiplicando por la transformada \bar{T} a la ecuación (1.58).

$$\bar{T}\bar{V} = R\bar{T}\bar{i} + L\bar{T}\frac{d\bar{i}}{dt} \quad \bar{T}\bar{e} \quad (1.64)$$

Según la transformada de Park, se conoce lo siguiente:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} \quad (1.65)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \bar{T} \frac{d\bar{i}}{dt} + \frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} \quad (1.66)$$

Entonces;

$$\bar{T} \frac{d\bar{i}}{dt} = \begin{bmatrix} id \\ iq \\ i0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} \quad (1.67)$$

Quedando;

$$L\bar{T} \frac{d\bar{i}}{dt} = L \begin{bmatrix} id \\ iq \\ i0 \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} \quad (1.68)$$

Al resolver la expresión (1.68) se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos(wt) & \cos(wt - 2/3) & \cos(wt - 4/3) \\ \sin(wt) & \sin(wt - 2/3) & \sin(wt - 4/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1.69)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} = w \begin{bmatrix} \sin(wt) & \sin(wt - 2/3) & \sin(wt - 4/3) \\ \cos(wt) & \cos(wt - 2/3) & \cos(wt - 4/3) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{i} \quad (1.70)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{T}\bar{i} = w \begin{bmatrix} iq \\ id \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.71)$$

$$L\bar{T} \frac{d\bar{i}}{dt} = L \begin{bmatrix} id & iq \\ iq & id \\ i0 & 0 \end{bmatrix} = wL \begin{bmatrix} id & iq \\ iq & id \\ i0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.72)$$

Al reemplazar la ecuación (1.72) en (1.64) se obtiene:

$$\begin{array}{rcccccc}
 Vd & id & id & iq & ed \\
 Vq & R iq & L \frac{d}{dt} iq & wL id & eq \\
 V0 & i0 & i0 & 0 & e0
 \end{array} \quad (1.73)$$

Entonces se tuvo a V_d , y V_a y V_0 .

$$Vd \quad Rid \quad L \frac{d}{dt} id \quad wLiq \quad ed \quad (1.74)$$

$$Vq \quad Riq \quad L \frac{d}{dt} iq \quad wLid \quad eq \quad (1.75)$$

$$V0 \quad Ri0 \quad L \frac{d}{dt} i0 \quad e0 \quad (1.76)$$

Despejando

$$L \frac{d}{dt} id \quad Vd \quad Rid \quad ed \quad wLiq \quad (1.77)$$

$$L \frac{d}{dt} iq \quad Vq \quad Riq \quad eq \quad wLid \quad (1.78)$$

$$L \frac{d}{dt} i0 \quad V0 \quad Ri0 \quad e0 \quad (1.79)$$

Aplicando Laplace:

$$LSId(s) \quad Vd(s) \quad RId(s) \quad ed(s) \quad (1.80)$$

$$LSIq(s) \quad Vq(s) \quad RIq(s) \quad eq(s) \quad (1.81)$$

$$LSI0(s) \quad V0(s) \quad RI0(s) \quad e0(s) \quad (1.82)$$

De esta manera se desarrollo la función de transferencia de la planta tanto para el eje d como el eje q y 0.

$$\frac{Id(s)}{Vd(s)} = \frac{1}{LS + R} \quad (1.83)$$

$$\frac{Iq(s)}{Vq(s)} = \frac{1}{LS + R} \quad (1.84)$$

$$\frac{IO(s)}{VO(s)} = \frac{1}{LS + R} \quad (1.85)$$

Mediante la siguiente función de transferencia de la planta

$$Gpi(s) = \frac{1}{2.3125 \cdot 10^{-3} s + 0.1} \quad (1.86)$$

Una vez obtenida la función de transferencia se diseñó el controlador PI. La función de transferencia de este controlador está dada por (1.86), donde kp y ki corresponden a la ganancia proporcional e integral respectivamente.

$$PI_{dc} = kp (1 + ki \cdot 1 / s) \quad (1.87)$$

La planta utilizada en el diseño del controlador PI está definida por (1.86). Para definir los parámetros del controlador se utilizaron los métodos de cohen – coon y los de Ziegler-nichols. Con ayuda del simulador Matlab se observó que por estos métodos el controlador PI no arroja la respuesta necesaria para obtener los parámetros necesarios para su estabilidad, por lo se procede a diseñar el controlador a través del método del factor K.

El controlador se diseñó a un determinado margen de fase y frecuencia de cruce, pero para esto necesitamos el margen de fase de la planta a esa frecuencia. Para determinar el controlador usamos la siguiente ecuación:

$$PM_{deseado} = 90 - \text{margen de fase del sistema} \quad (1.88)$$

Donde,

$PM_{deseado}$: Margen de fase deseado.

$\text{margen de fase del sistema}$: Margen de fase del sistema a la frecuencia de cruce.

El $\text{margen de fase del sistema}$, como se observa en la figura (figura 40), se lo obtuvo mediante diagrama de bode de la función de transferencia de la planta obtenida, ecuación (1.86), a la frecuencia de cruce de 4[KHz].

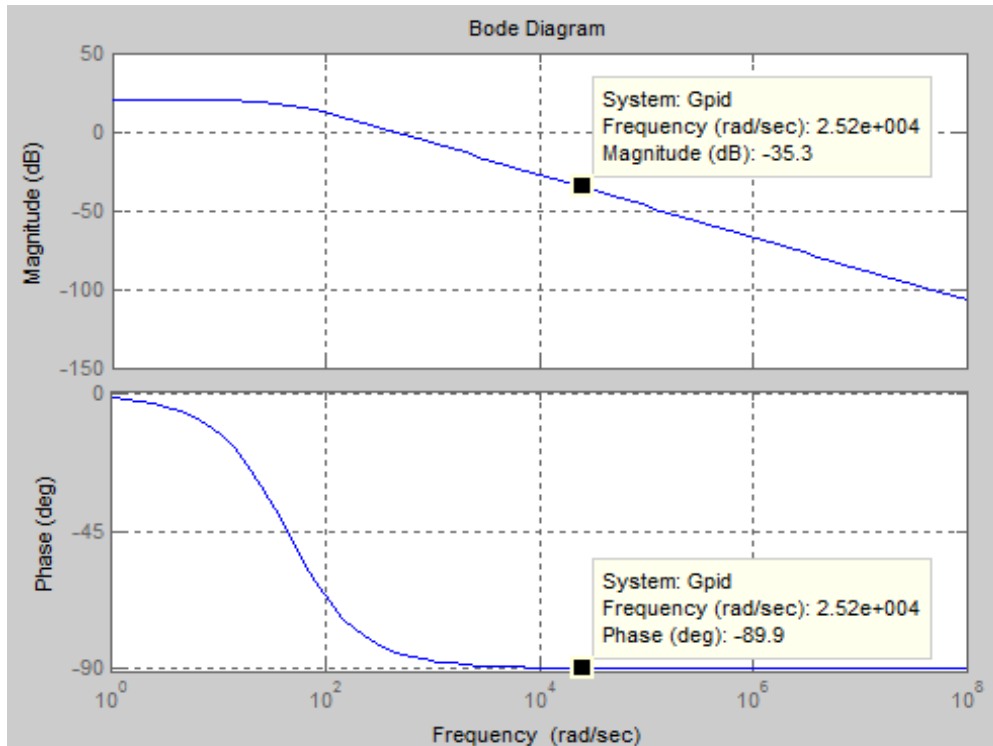


Figura 40. Frecuencia de cruce de G_{ci}

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Como en Matlab la frecuencia está en [rad/seg], transformamos la frecuencia a esas unidades, nuestra frecuencia de cruce es 2.5132×10^4 [rad/seg].

La fase de nuestro sistema es de -89.9° y la ganancia de -35.28 , como se puede observar en la figura anterior.

Reemplazamos el valor obtenido de $\varphi_{sistema} = 89.9^\circ$ en la ecuación (1.88).

$$boost \quad 60 \quad (89.9) \quad 90 \quad (1.89)$$

Obteniendo un $\varphi_{boost} = 59.9^\circ$. Siguiendo la referencia en la siguiente tabla podemos determinar qué tipo de controlador es el que vamos a utilizar.

φ_{boost}	Tipo de controlador
0°	Tipo I
$<90^\circ$	Tipo II
$>90^\circ$	Tipo III

Fuente: Kevin Lezama 2017 (Tabla 3).

Tipo I: Posee un polo en el origen y una constante de proporcionalidad.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{s} \quad (1.90)$$

Tipo II: Posee un polo en el origen, un cero y un polo complejo conjugado y una constante de proporcionalidad.

$$G_c(s) = \frac{K_c (w_z - s)}{s (w_p - s)} \quad (1.91)$$

Tipo III: Posee un polo en el origen dos ceros y dos polos complejos conjugados y una constante de proporcionalidad.

$$G_c(s) = \frac{K_c (w_z - s)^2}{s (w_p - s)^2} \quad (1.92)$$

Como el φ_{boost} obtenido es de un valor menor a 90° , el controlador para la planta es el tipo 2 como se observa en la ecuación (1.91) donde:

K_c : Magnitud de la ganancia del sistema.

w_z : Valor de frecuencia que aporta un cero.

w_p : Valor de frecuencia que aporta un polo.

Luego de conocer el tipo de controlador a utilizar se procede a encontrar los valores del controlador.

Primero, el valor de k , constante proporcional.

$$k = \tan\left(\frac{\varphi_{boost}}{2} - 45^\circ\right) = 3.719 \quad (1.93)$$

Segundo se obtuvieron los valores de la frecuencia natural aportada por el cero y el polo, la frecuencia de corte w_c como se mencionó anteriormente es de 4[KHz], que debe coincidir en la media geométrica entre w_z y w_p .

$$w_z = \frac{w_c}{k} \quad (1.94)$$

$$w_p = w_c * k \quad (1.95)$$

Reemplazando (1.94) y (1.95)

$$w_z = \frac{2 * 4000}{3.719} = 6757.93[\text{rad} / \text{seg}] \quad (1.96)$$

$$w_p = 2 * 4000 * 3.719 = 93468.66[\text{rad} / \text{seg}] \quad (1.97)$$

Para obtener la ganancia K_c del sistema se realizó lo siguiente: A K_c le damos un valor de 1 y al reemplazar en (1.91) obtenemos la función de transferencia del controlador:

$$G_{ci} = \frac{1 (6757.93 - s)}{s (93468.66 - s)} \quad (1.98)$$

Se multiplica $G_c(s)$ y $G_p(s)$ para obtener la ecuación 1.99 y se observa su diagrama de bode a través del simulador Matlab como se observa en la figura 41.

$$G_1 = G_{ci} * G_{pi} = \frac{s - 6758}{0.002312s^3 - 216.2s^2 - 9347s} \quad (1.99)$$

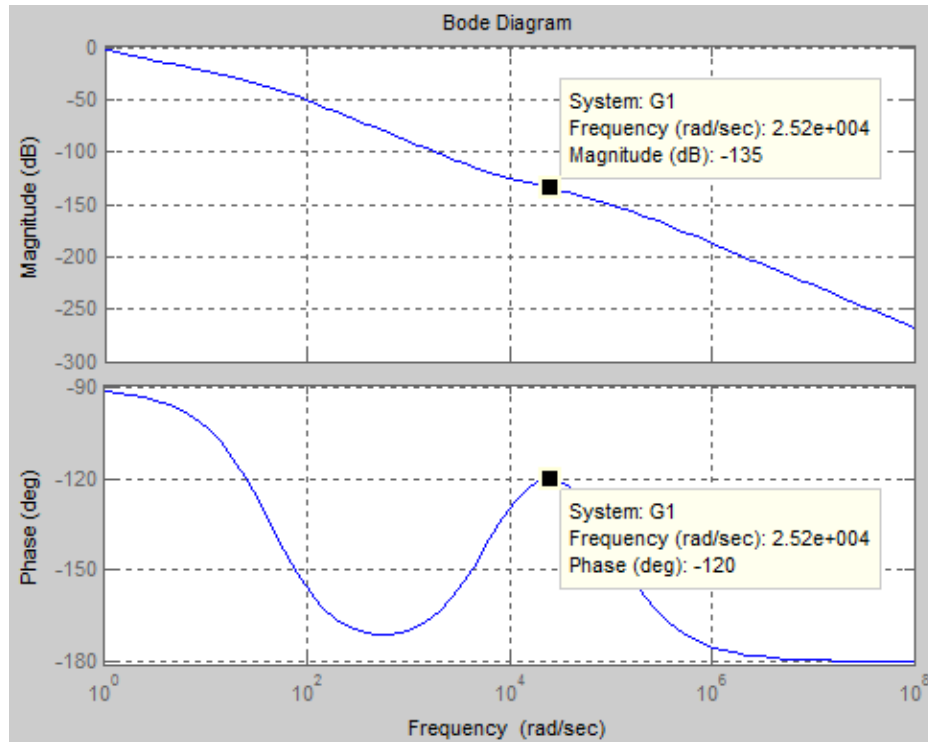


Figura 41.Frecuencia de cruce de G1

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Dando como resultado que a la frecuencia de 25132,741 [rad/seg] obtenemos un margen de fase de -120 y una ganancia de -134.69 [dB], aproximadamente -135[dB]; con la siguiente ecuación se obtiene el valor de magnitud de la ganancia.

$$Mag[dB] = 20 * \log_{10}(Mag) \quad (2.0)$$

Despejando Mag dio un resultado de $1.8408 * 10^{-7}$. Se calculando la inversa de este valor y se obtuvo la ganancia $K_c = 5.4324 * 10^6$ del controlador tipo II.

Por lo tanto, se obtuvo que el controlador es el siguiente:

$$G_{cif} = \frac{5.4324 * 10^6}{s} \frac{(6757.93 \text{ s})}{(93468.66 \text{ s})} \quad (2.1)$$

Al parametrizar la ecuación 2.1, obtenemos el controlador final

$$G_{cif}(s) = \frac{58.12s \quad 3.9275 * 10^5}{1.069e - 5s^2 \quad s} \quad (2.2)$$

Ü Controlador de Voltaje

El lazo de control de voltaje DC (Figura 42), tiene como función, mantener el voltaje del capacitor, igual o aproximadamente al voltaje de referencia, ya que éste se encarga, de proporcionar la corriente DC, que se convertirá en AC.

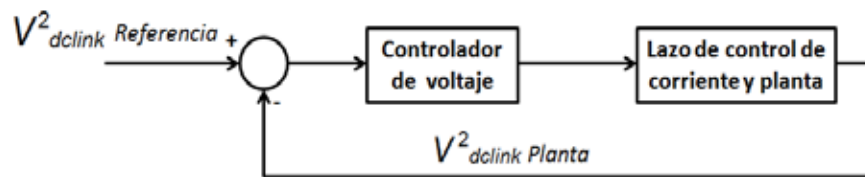


Figura 42.Diagrama de bloque del controlador de voltaje

Fuente: Muñoz y Pasmay 2012.

Como se explicó anteriormente, el lazo de control de voltaje, está sincronizada con el generador de corriente de referencia; esto lo hace con el objetivo de consumir potencia activa, en caso de necesitarla, para poder mantener el voltaje del capacitor que para nuestro caso es de 400 [V].

El análisis para el diseño del lazo de control, se basó en la energía del capacitor. Para obtener la función de transferencia de la planta con respecto al voltaje de la red, V_{grid} .

La energía disponible para la compensación se establece mediante la medida de la tensión del enlace DC (DC-Link) de entrada del capacitor. La energía de un condensador está expresada por la siguiente ecuación.

$$E = \frac{1}{2} C * V_{DC}^2 \quad (2.3)$$

La potencia activa, P , que se transfiere entre el inversor y la red, V_{grid} , con el sistema de referencia escogido, viene dado por la ecuación (2.4) y se expresa además la energía del capacitor como la ecuación (2.5)

$$P = \frac{3}{2} I_{fd} * V_{grid} \quad (2.4)$$

$$E_{DC} = P * dt \quad (2.5)$$

Reemplazando la ecuación 2.4, en la ecuación 2.5 se obtiene la ecuación 2.6
 Aplicando la transformada de Laplace, a ésta última, se obtiene finalmente la
 ecuación (2.7).

$$E_{DC} = \frac{3}{2} I_{fd} * V_{grid} \quad (2.6)$$

$$E_{DC} = \frac{1}{s} \frac{3}{2} I_{fd} * V_{grid} \quad (2.7)$$

De lo anterior, se tiene que la función de transferencia de voltaje de la planta queda
 definida como, ecuación (2.8)

$$G_{pv} = \frac{E_{DC}(s)}{I_{fd}(s)} = \frac{3}{2} \frac{V_{grid}}{s} \quad (2.8)$$

Para el desarrollo de este controlador también se aplicara el uso de un
 controlador PI. El fin de este es con

Una vez determinada la planta, y aplicando la técnica del factor K, explicada anteriormente, se halló el controlador. Por lo tanto, obteniendo el diagrama de bode a través del simulador Matlab, se tiene que el valor de $\phi_{\text{sistema}} = -90^\circ$, esto es debido a que tiene un polo en el origen, (Figura 43).

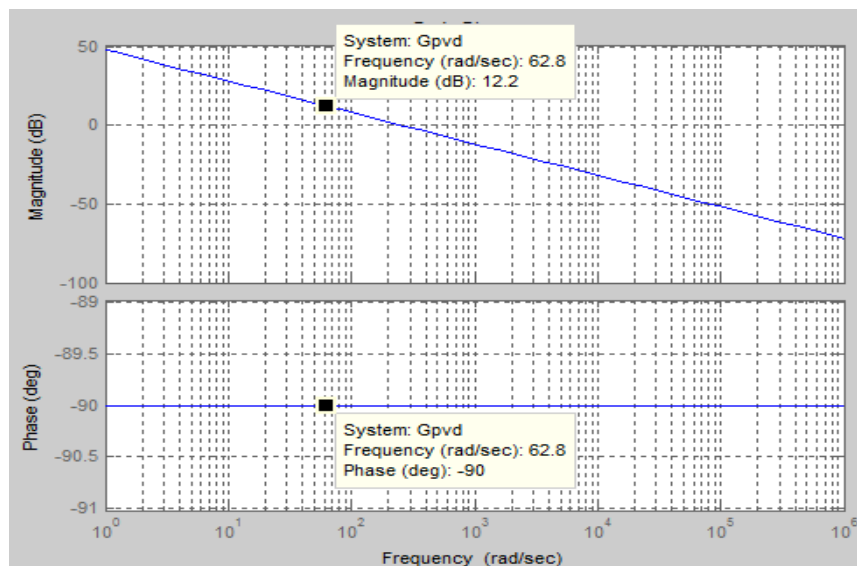


Figura 43. Diagrama de bode de función de transferencia de voltaje

Fuente: Kevin Lezama.

Reemplazando en la ecuación (1.8), determinamos que el ϕ_{boost} da un valor de 60° , el cual es un valor menor a 90° y de acuerdo a la Tabla 3, el tipo de controlador a usar es el tipo II. A diferencia del controlador de corriente, el ancho de banda debe ser por lo menos, una década antes, esto es debido a que el tiempo de respuesta del lazo de control de tensión debe ser más lento que el de corriente, pues el último debe ser lo suficientemente rápido para seguir la señal de referencia de la corriente.

En base a un análisis previo realizado, se determinó que el tercer armónico oscilaba a una frecuencia de 333[Hz], es por eso, que el ancho de banda, tentativo era de 33[Hz], sin embargo, después de varias pruebas realizadas, se determinó que el ancho de banda adecuado era de 10[Hz], debido a que el sistema sigue mucho mejor la referencia, bajo éste valor.

Es decir que, $f_{BW} = 10[Hz]$.

Según las ecuaciones (1.93), (1.94) y (1.95) obtenemos los siguientes valores.

$$k = 3.732 ; \quad \omega_z = 16.84 ; \quad \omega_p = 234.48 ;$$

Con el valor de $K_c=1$, obtenemos el controlador de voltaje.

$$G_{cv} = \frac{1 (16.84 \text{ s})}{s (234.48 \text{ s})} \quad (2.9)$$

Al multiplicar la función del controlador con la función de transferencia de la planta obtenemos lo siguiente.

$$G_2 = G_{pv} * G_{cv} = \frac{255s - 4294.2}{s^3 - 234.48s^2} \quad (2.10)$$

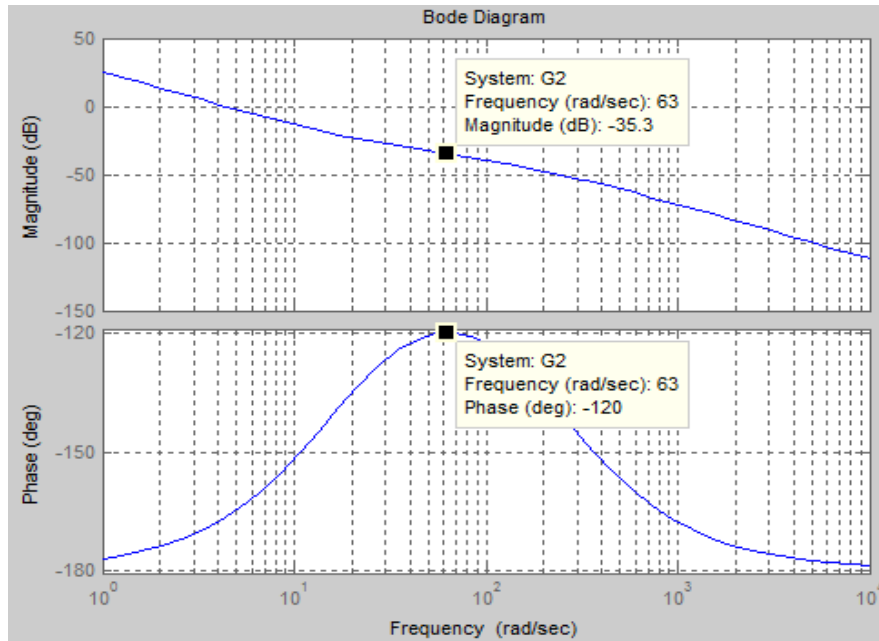


Figura 44.Diagrama de bode de función de transferencia de voltaje G2

Fuente: Kevin Lezama.

Al aplicar la fórmula (2.0) obtenemos el valor de la ganancia de 0.0173, al aplicarle la inversa a esta ganancia obtenemos el valor de K_c siendo igual a 57.77. Reemplazando en la ecuación (1.92) obtenemos la función de transferencia del controlador de voltaje G_{cvf} .

$$G_{cvf} = \frac{0.2464s + 4.148}{0.004265s^2 + s} \quad (2.11)$$

El signo negativo del controlador, se debe a que, en esta parte, el FAP paralelo trifásico, no está entregando potencia, sino más bien, la está consumiendo. En la Figura 45, se ilustra el consumo y entrega de potencias del filtro paralelo trifásico.

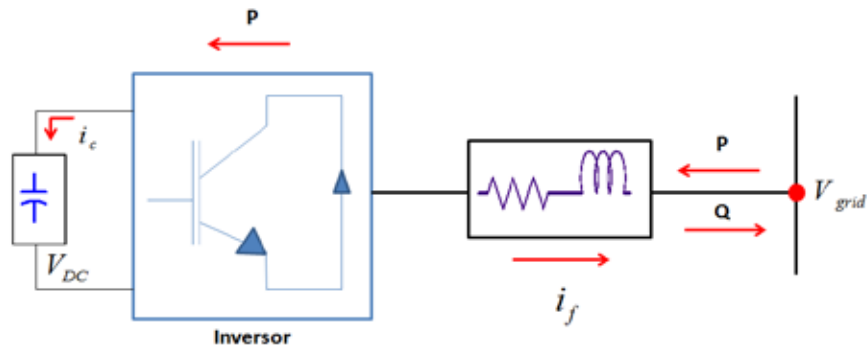


Figura 45.Esquema de la potencia entregada y consumida por el inversor.

Fuente: Kevin Lezama.

Una vez obtenido, el lazo de corriente y el lazo de voltaje, podemos simular el sistema completo. En la Figura 46, observamos el sistema de control del filtro activo de potencia trifásico.

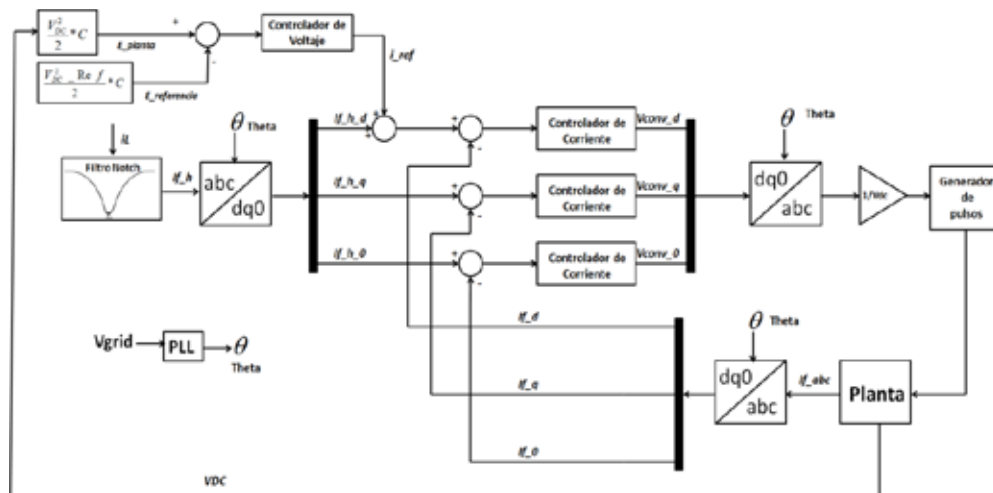


Figura 46.Diagrama de bloques del sistema de control del FAP paralelo trifásico

Fuente: Kevin Lezama

4.4 Fase IV: Simulación del filtro activo dirigido al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST mediante el software de simulación MATLAB r2015b.

En los capítulos anteriores se describió el dimensionamiento de cada uno de los elementos del filtro, así mismo, su sistema de control. En este capítulo, se unificarán ambas partes, para mostrar el modelo del cual se ha estado tratando.

4.4.1 Etapa de potencia

Ü Inversor Trifásico

El inversor trifásico, Figura 47, está formado por switches ideales, por lo cual no ha habido necesidad de colocar redes snubber; tiene además un capacitor, de una capacitancia de 525 [uF], el cual, está inicialmente cargado con un valor de 400V_{DC}, necesario para el arranque del sistema. En la práctica sería necesario utilizar un circuito auxiliar para la precarga del capacitor.

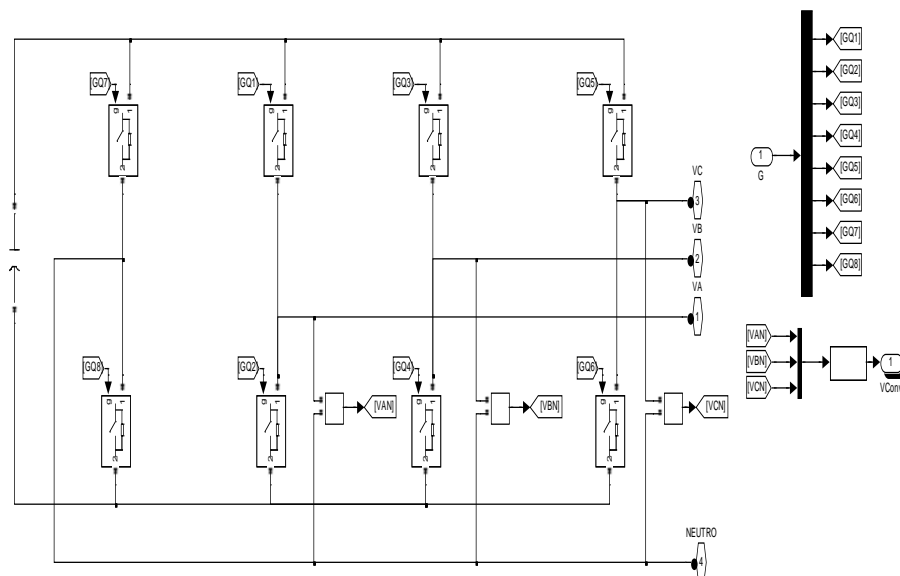


Figura 47. Diagrama de bloque del controlador de voltaje

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Ü Red Trifásica

La red trifásica, Figura 48, está formada por un sistema que forman la señal trifásica, desfasada 120° .

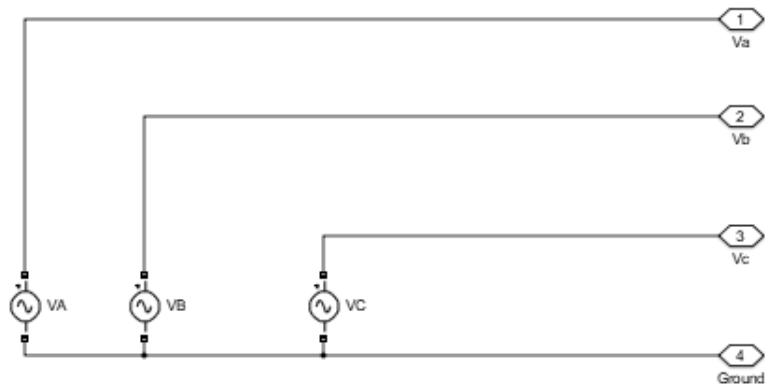


Figura 48. Suministro eléctrico /red trifásica

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Ü Impedancia de Enlace

La impedancia de enlace, Figura 49, permite el enlace con la red, donde, la inductancia filtra la corriente que el convertidor inyecta a la red y absorbe la diferencia de voltaje entre los mismos; la resistencia amortigua la señal, dando estabilidad a la corriente de salida del convertidor. Las variables en Matlab, para la inductancia es L , y para la resistencia es R_L , sus valores son $L=2.3125$ [mH] y $R_L=0.1$ [Ω].

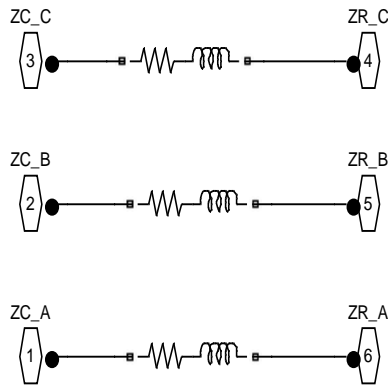


Figura 49. Impedancia de enlace

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Ü Cargas Trifásicas

La carga trifásica, Figura 50, presentada en este trabajo, está formada por una carga no lineal, que para el caso de esta simulacion es un rectificador trifásico no controlado. Esta carga, generara armónicos de corrientes los cuales se observaran mas adelante.

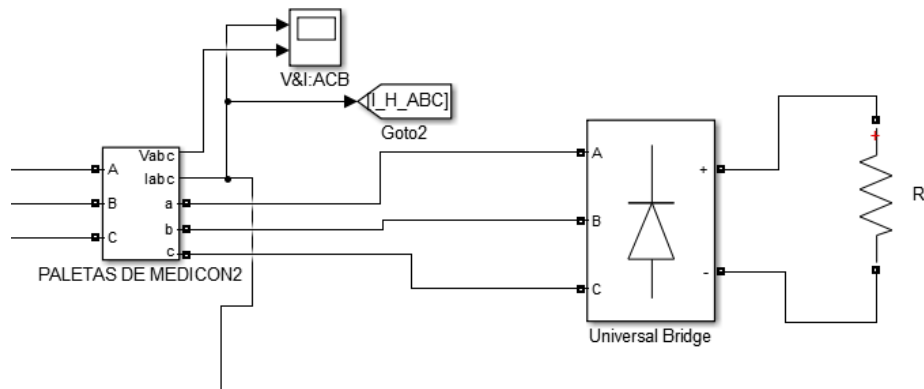


Figura 50. Carga trifásica no lineal

Fuente: Kevin Lezama 2017

4.4.2 Etapa de control

Ü **Generador de corriente de referencia**

El generador de la corriente de referencia, Figura 51, se encarga de obtener la corriente que el filtro debería inyectar. Esto lo hace, mediante un filtro pasa altos, que permite el paso de los armónicos y atenúa la frecuencia fundamental. Ahora bien, dependiendo de cuan eficiente sea el generador de corriente de referencia, el funcionamiento del FAP paralelo trifásico, será óptimo.

Ü **Controlador de corriente**

El controlador de corriente, Figura 52, toma la corriente de referencia y la compara constantemente con la de la planta, es decir, con la del filtro y verifica que se mantenga aproximadamente igual a los armónicos de la carga.

Antes de realizar, el respectivo control, se transforman las señales trifásicas en un sistema de dos coordenadas dq0, y así mismo, se vuelven a transformar sus respectivas salidas abc.

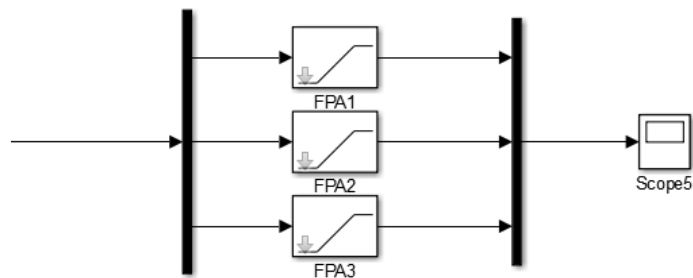


Figura 51.Generador de corriente de referencia.

Fuente: Kevin Lezama 2017

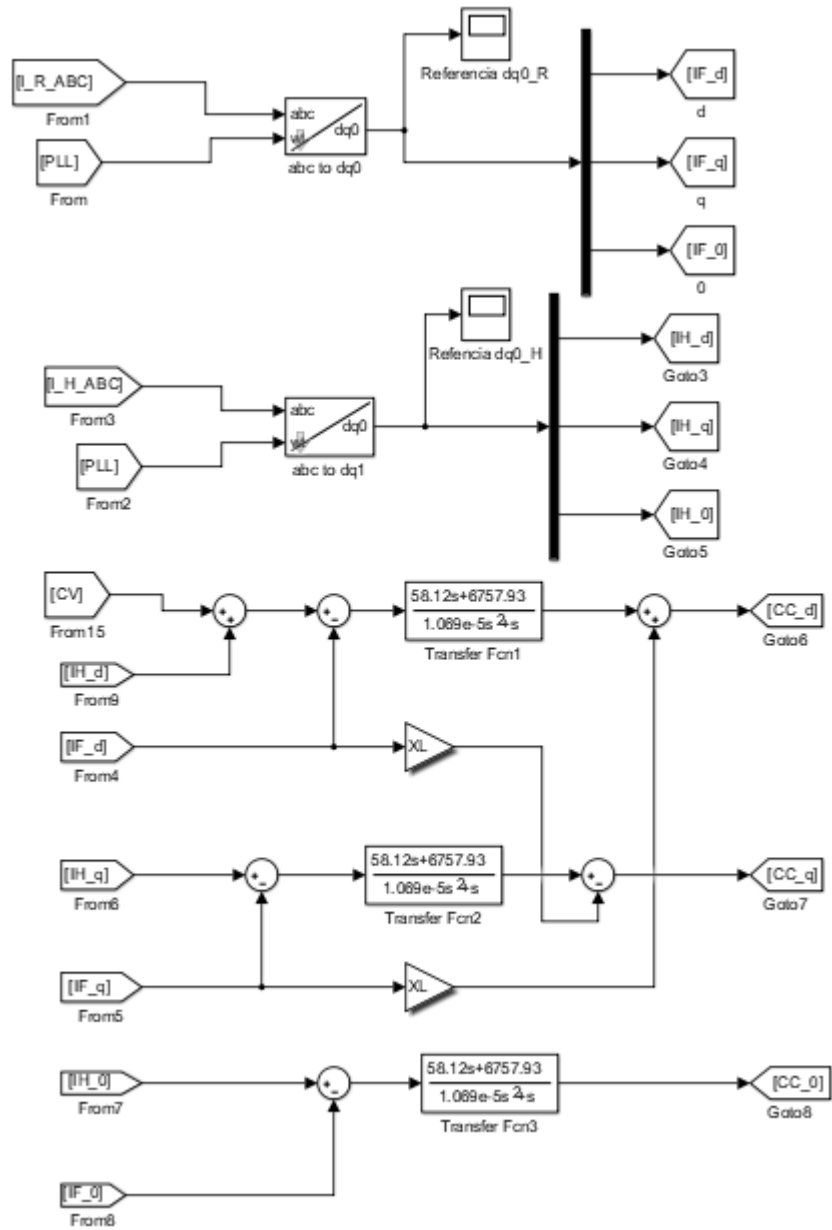


Figura 52.Controlador de corriente

Fuente: Kevin Lezama 2017

Ü Generador de pulsos

El generador de disparo, Figura 53. Su funcionamiento se basa en la comparación de las señales moduladoras que se obtuvieron del controlador de corriente, con una señal portadora triangular, donde dependiendo del resultado, se dará o no la activación de los tiristores del inversor, para la generación de la corriente de compensación

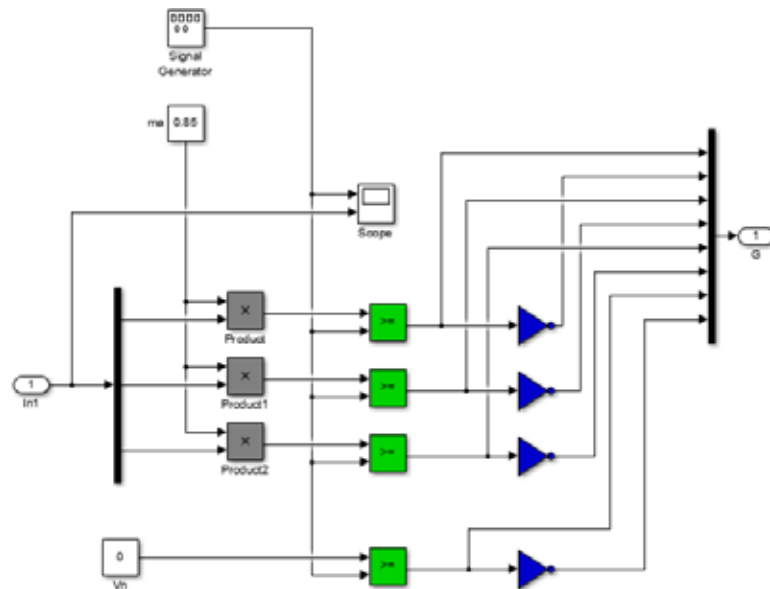


Figura 53.Generador de pulsos

Fuente: Kevin Lezama 2017.

Ü Controlador del voltaje

El controlador de voltaje, Figura 54, como se menciono anteriormente, permite mantener el voltaje Vdc, del capacitor. Esto lo realiza, mediante la comparación entre el voltaje de referencia y el voltaje medido del capacitor.

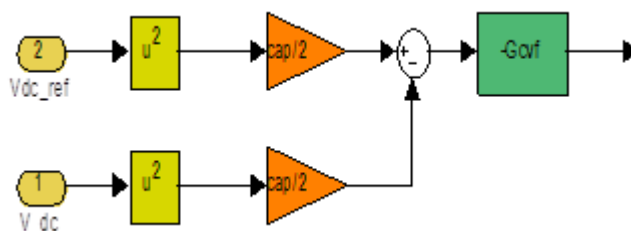


Figura 54.Controlador de Voltaje

Fuente: Kevin Lezama 2017.

4.4.3 Simulación del Tablero N.2 con una carga No Lineal conectada a la red, sin el uso del Filtro Activo de Potencia Paralelo Trifásico

En la Figura 55, se observa que la I_{abc} , está totalmente distorsionada, debido a que no se lo está utilizando el filtro y la V_{abc} no presenta distorsión armónica debido a que la simulación es un aproximación a lo que sucede en el Tablero N.2

En la figura 56, se observa el análisis de Fourier, que nos indica que el THDi= 30.7%, el cual, supera totalmente, el valor permitido por la norma de la IEEE.

Aunque el diagnóstico indicó una distorsión armónica no mayor al 12%, esta simulación arrojó mayor

X

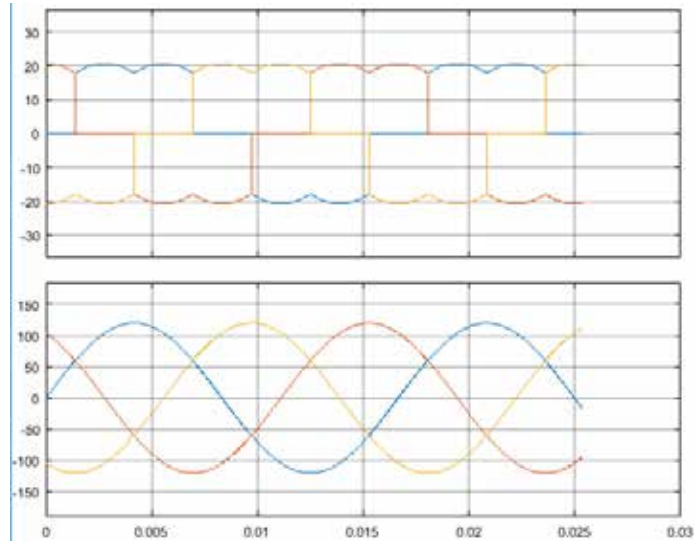


Figura 55. Corriente y Voltaje de la red cuando el filtro no esta conectado.

Fuente: Kevin Lezama 2017

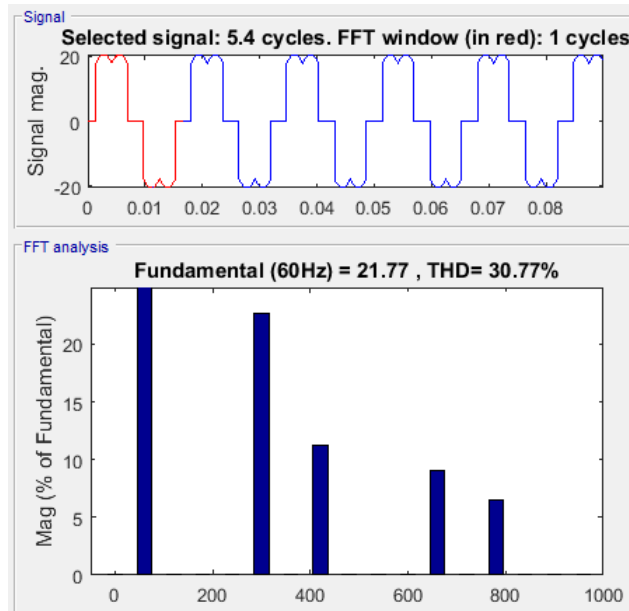


Figura 56. Análisis FFT con carga no lineal y sin paralelo trifásico.

Fuente: Kevin Lezama 2017

4.4.4 Simulación de una carga No Lineal conectada a la red, utilizando el Filtro Activo de Potencia Paralelo Trifásico

En la Figura 57, se observa que la I_{abc} , está relativamente tomando la forma de onda sinusoidal que debería tener. Se observa una distorsión en la onda debido a dos factores:

La generación de corrientes de referencia, no fue completamente lineal debido a que en la simulación, el bloque que filtra la señal fundamental de los armónicos entra en conflicto después del 5to armónico, aun así hasta donde logra obtener las referencias, los otros componentes del filtro logran funcionar y simulan la señal senoidal (figura 57, arriba). La V_{abc} sigue sin presentar distorsión armónica.

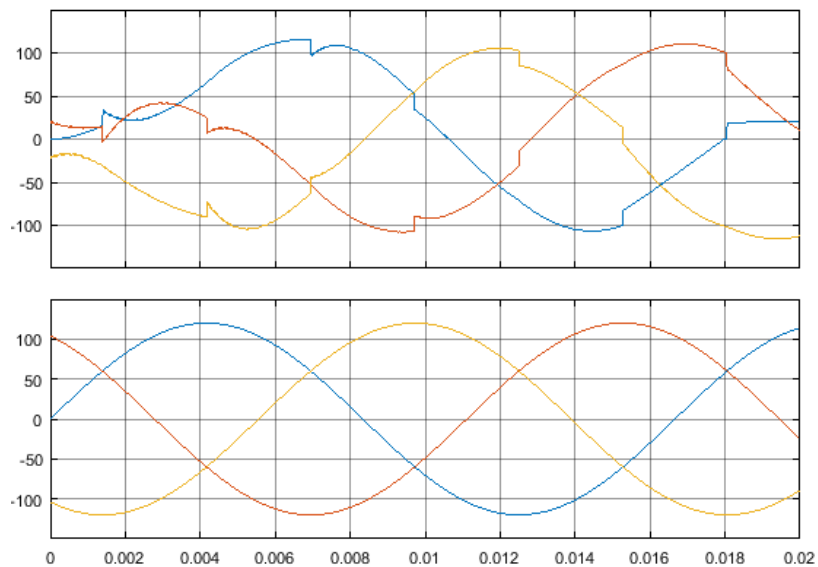


Figura 57. Corriente y Voltaje de la red cuando el filtro está conectado a la red.

Fuente: Kevin Lezama 2017

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue el diseño de los parámetros necesarios de un filtro activo de potencia dirigido al sistema eléctrico de potencia de la empresa HPLAST, mediante la técnica y herramienta matemática, la transformada de Park, para modelar sistemas eléctricos bajo operación balanceada y desbalanceada, analizar transitorios, dinámica de la planta y armónicos. para compensar el contenido armónico causados por cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico. Se han investigado las principales técnicas de control, tanto para la generación de la corriente de referencia como para el control de corriente.

También se han investigado las diversas topologías y formas de conexión del filtro a la red. los resultados son los siguientes:

Para el caso de un filtro activo trifásico, se ha seleccionado la topología de un inversor de tres ramas para la tres fases y un neutro.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que utilizar un filtro activo de corriente en un sistema eléctrico industrial donde se tengan problemas de calidad de la energía por cargas no lineales es una excelente opción, ya que permite mejorar la calidad en la señales de corriente y voltaje y esto atribuye a mejorar la eficiencia en la industria.

Aunque existieron complicaciones en la simulación, se logro observar como el filtro con los elemento dimensionados se pudo obtener a manera de simulación un funcionamiento básico del filtro eliminando la distorsion en las ondas de corriente.

Es importante mencionar que el comportamiento del filtro activo puede variar de acuerdo a la configuración del sistema eléctrico y sus cargas, por lo cual, durante el dimensionamiento del filtro se deben de tomar en cuenta las características propias de la instalación.

RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta las experiencias obtenidas desarrollando este trabajo de investigación, se realizan algunas recomendaciones, las cuales son:

En la simulación del filtro se observó que para una mejor generación de corrientes de referencia es necesario el desarrollo de filtros digitales avanzados (como el filtro predictivo) o el uso de teorías de potencia para futuras investigaciones.

Aunque el desarrollo de controladores de corriente y voltaje no es extenso para esta tecnología, otra recomendación sería aplicar el controlador más desarrollado recientemente como controladores predictivos o de lógica difusa para obtener la mejor respuesta del sistema, ya que el buen funcionamiento de este equipo se basa en la respuesta de sus controladores.

Y como recomendación final, si se llegase a implementar este dispositivo, realizar simulaciones no solo con armónicos presentes en el sistema eléctrico de potencia sino que además con otros fenómenos que afecten la calidad de energía como fluctuaciones de tensión, huecos, y desbalances para analizar el comportamiento del filtro y obtener un dispositivo más completo capaz de responder ante distintas adversidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaris y Robles, (2005): **Topologías y algoritmos de control para filtros activos aplicados a la mejora de la calidad de suministro eléctrico**, Universidad Carlos III de Madrid.
- Arias, F. (2006). **El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica**, Quinta edición. Caracas: Editorial Episteme
- Balestrini, M. (2006). **Como se elabora el proyecto de investigación**, Caracas: Editorial BL Consultores Asociados.
- Bueno y Fajardo, (2013): **Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos de una red bifásica residencial**, Universidad Politécnica Salesiana.
- Candela (2009): **Aportaciones al filtrado híbrido paralelo en redes trifásicas de cuatro hilos**, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Corasaniti, (2008): **Filtros activos de potencia para la compensación de reactivos y armónicos en media tensión**, Universidad Nacional de la Plata.
- Cruz, Vaca y Falcones (2014): **Diseño y Simulación del Control de un Filtro Activo Monofásico Paralelo**, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- H. Dean Venable (1983): **The K Factor: A New Mathematical Tool for stability and synthesis**, Venable Industries, Inc.
- De la Rosa, (2006): **Harmonics and Power Systems**, Boca Raton: CRC Press.
- Esparza, Mata y Castañeda (2012): **Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones**, Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
- Grigsby, (2006): **Power Systems**, Boca Raton: CRC Press.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista P. (2006). **Metodología de Investigación**, México: McGraw-Hill.

- Kennedy, (2000): **Power Quality Primer**, USA: McGraw-Hill.
- Kerlinger, F. (2002) **Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento**, México: Editorial Mc Graw Hill.
- Lamich, (2013): **Filtros activos de Potencia**, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Lopez, (2010): **Filtro activo paralelo para compensación de factor de potencia y distorsionarmónica en aplicaciones industriales**, Universidad Nacional de Colombia.
- Lozano, (2011): **Control de un filtro activo para compensación de armónicos y desbalances de corriente mediante DPC**, Universidad SimonBolivar.
- Moran, Dixon y Wallace (1995): **A Three phase Active Power Filter Operating with Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation**,University of Concepcion.
- María Teresa Hernández, (2002): **Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales**, Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- Martinez y Davila, (2015): **Simulacion y Analisis de un Inversor Trifásico PWM con carga Resistiva**, Universidad Autonoma de Occidente
- Mohamed, (2015): **Desing of shunt active power filter to mitigate the harmonics caused by nolinear loads**, University Thun Hussein Onn.
- Núñez, Soto y Moreno, (2005): **Filtro Activo de Potencia Bajo Diferentes Tipos de Cargas**, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Palella, S; Martins F. (2010): **Metodología de la investigación cualitativa**, Caracas: Editorial Fedupel.
- Petit, (2005): **Topologías y algoritmos de control para filtros activos aplicados a la mejora de la calidad de suministro eléctrico**, Universidad Carlos III de Madrid.
- Raja Ayyanar, (2011): **K-factor Approach**
- Sabino C. (1986):**El proceso de investigación**. Caracas: Editorial Humanitas.

Shah, (2013): **Harmonics in power systems**, Simemens Industry, Inc.

Singhai y Dewani (2013): **PLL based shunt active harmonics filter to compensate multiple non-linear loads**, International Journal of Engineering and Communiation engineering & Technology (IJETT).

Siva y Bhavani (2013): **Mitigation of harmonics by shunt active power filters using synchronous detection method**, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT).

Varschavsky (2008): **Diseño e implementación de un filtro activo hibrido-serie multietapas de 9 niveles**, Pontificia Universidad Católica de Chile.

