UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del Título de: INGENIERO ELÉCTRICO

TITULO

"DISEÑO DE UN FILTRO TRIFASICO MULTINIVEL DE DOS ETAPAS PARA LA INDUSTRIA EN CUENCA"

AUTORES

FABRICIO ISRAEL GORDILLO PIÑA RAFAEL ADRIAN PEÑAFIEL BERMEO

DIRECTOR

ING. FLAVIO QUIZHPI

CUENCA, AGOSTO DEL 2012

Ing. Flavio Quizhpi

CERTIFICA

Haber dirigido y revisado el proyecto de tesis titulado: "DISEÑO DE UN FILTRO TRIFASICO MULTINIVEL DE DOS ETAPAS PARA LA INDUSTRIA EN CUENCA", realizado por los señores: Fabricio Israel Gordillo Piña, Rafael Adrián Peñafiel Bermeo. Por cumplir con todos los requisitos, autorizo su presentación.

Cuenca, 28 de agosto del 2012

Ing. Flavio Quizhpi

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros: Fabricio Israel Gordillo Piña y Rafael Adrian Peñafiel Bermeo, autores del presente trabajo de tesis: **DISEÑO DE UN FILTRO TRIFASICO MULTINIVEL DE DOS ETAPAS PARA LA INDUSTRIA EN CUENCA** declaramos que:

Los conceptos desarrollados, análisis y conclusiones descritas en este trabajo son de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que, hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Además se autoriza a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma para fines académicos.

Cuenca a 28 de Agosto de 2012.

Fabricio I. Gordillo P.

Rafael A. Peñafiel B.

ÍNDICE

1	PARÁMETROS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA
CARTOPEL	- CUENCA L1
1.1	Calidad de la Energía e Impacto en la Industria
Loca	1
1.1.1	Regulación de la calidad de la energía eléctrica en el país5
1.2	Parámetros para la medición de la Calidad de la Energía6
1.2.1	Mediciones de las perturbaciones en la red según la REGULACION
No. CONELI	EC – 004/017
1.2.1.1	Nivel de Voltaje7
1.2.1.2	Parpadeo (Flicker)8
1.2.1.3	Armónicos9
1.2.2	Instrumento de Medida10
1.2.2.1	Fluke 435 (Three Phase Power Quality Analyzer)10
1.2.2.2	Modos de medida para examinar en detalle12
1.2.2.3	Mediciones de Armónicos13
1.3	Perturbaciones en la Red15
1.3.1	Nivel de Voltaje15
1.3.2	Parpadeo (Flicker)16
1.3.3	Transitorio17
1.3.3.1	Impulso transitorio17
1.3.3.2	Oscilación transitoria18
1.3.4	Variaciones de corta duración19
1.3.4.1	Instantáneas19
1.3.5	Variaciones de larga duración20
1.3.5.1	Interrupciones Sostenidas21
1.3.5.2	Subvoltajes21
1.3.5.3	Sobrevoltajes21
1.3.6	Desbalance de Voltaje21
1.3.7	Distorsión en la forma de Onda22
1.3.7.1	Ruido (noise)

1.3.7.2	Muesca (notch)
1.3.7.3	Cargas no lineales23
1.4	Armónicos24
1.4.1	Perturbaciones Armónicas26
1.4.2	Factores de distorsión Armónica31
1.4.3	Efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos33
1.4.4	Interarmónicos
1.5	Recopilación de datos obtenidos en el Grupo Cartopel – Cuenca36
1.5.1	Monitoreo en la Barra Principal de QAC137
1.5.2	Análisis de Voltaje38
1.5.4	Armónico de Voltaje38
1.5.5	Armónicos de Corriente
1.5.6	Resultados40
2.	FILTROS MULTINIVEL42
2.1	Generalidades42
2.2	Convertidor Multinivel en CA42
2.2.1	Elementos para el almacenamiento de energía en continua43
2.2.2	Dispositivos electrónicos de potencia43
2.3	Características de los Convertidores Multinivel44
2.3.1	Topologías Multinivel44
2.3.1.1	Inversores44
2.3.1.2	Inversores Multinivel45
2.3.1.2.1	Inversores Multinivel de Diodos de Enclavamiento (DCMLI)47
2.3.1.2.2	Inversores Multinivel de Condensadores flotantes (FCMLI)50
2.3.1.2.3	Inversores Multinivel de Inversores en cascada (CMLI)54
2.3.1.3	Aplicaciones de los Inversores Multinivel56
2.3.1.4	Técnicas de Modulación57
2.3.1.4.1	Técnica de frecuencia fundamental58
2.3.1.4.2	Técnica PWM vectorial59
2.3.1.4.3	Técnica PWM multiportadoras60
2.3.1.4.4	Técnica PWM programado61

2.4	Análisis de los Filtros Multinivel61
2.4.1	Filtros Activos
2.4.1.1	Por el tipo de Convertidor62
2.4.1.2	Por la Topología63
2.4.1.2.1	Filtro activo conexión paralelo63
2.4.1.2.2	Filtro activo conexión serie64
2.4.1.2.3	Filtro activo conexión serie paralelo65
2.4.1.3	Por el Número de Fases66
2.4.1.3.1	Filtro Activo Monofásico66
2.4.1.3.2	Filtro Activo Trifásico67
2.4.2	Control de un Filtro Activo en Paralelo68
2.4.2.1	Estimación de la corriente de referencia70
2.4.2.2	Control de la tensión del bus de continua71
2.4.2.3	Calculo de la corriente de referencia72
2.4.2.3.1	Transformada de Fourier73
2.4.2.4	Control de la Corriente de Inyección74
2.4.2.4.1	Control por Histéresis74
2.4.2.4.2	Control Proporcional-Integral PI75
2.4.2.4.3	Control de Tiempo de Establecimiento finito o de tiempo muerto
(Deatbeat)	
2.4.2.4.4	Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea PQ76
3	DISEÑO DEL FILTRO MULTINIVEL79
3.1	Selección del modelo basado en los datos obtenidos del Grupo
Cartopel-Cu	enca79
3.2	Diseño del Filtro79
3.2.1	Software de Simulación79
3.2.2	Modelo del Sistema de Potencia80
3.2.2.1	Estructura de la Red Monofásica80
3.2.2.1.1	Generación de la Corriente de Referencia81
3.2.2.1.1.1	Obtención de la Corriente Fundamental82
3.2.2.1.2	Calculo de la Inductancia de Acoplamiento84

3.2.2.1.3	Calculo de la Tensión en los Condensadores85
3.2.2.1.4	Calculo de la Corriente de Compensación87
3.2.2.2	Conmutación para los Estados Posibles del FAP87
3.2.2.1	Uso de un Puente IGBT89
3.2.2.2.2	Estructura de la Carga90
3.2.3	Control de la Corriente de Inyección91
3.2.3.1	Control por Histéresis de Corriente91
3.2.3.2	Control PI93
3.2.3.3	Control PWM94
3.3	Simulación y Resultados94
3.3.1	Etapa de Potencia del FAP98
3.3.2	Sistema de Control98
3.3.3	Representación de la Carga no Lineal99
3.3.4	Simulaciones del Filtro Activo de Potencia para un Sistema
Monofásico	
3.3.4.1	Seguimiento de la Corriente de Referencia101
3.3.4.2	Control de Carga de los Condensadores101
3.3.5	Compensación de la Corriente103
3.3.5.1	Corriente de Compensación del FAP103
3.3.5.2	Compensación de los Armónicos de Corriente105
3.3.6	Red Trifásica106
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS108
4.1	Análisis de Resultados Obtenidos en Base al modelo de
Simulación	
4.1.1	Descripción de Cargas a Simular108
4.1.2	Simulación de Cargas no Lineales sin Filtro108
4.1.2.1	Convertidor Trifásico de Media Onda108
4.1.2.1.1	Simulación de Carga no Lineal 1 a 45°109
4.1.2.1.2	Simulación de Carga no Lineal 1 a 90°110
4.1.2.1.3	Simulación de Carga no Lineal 1 a 135°112
4.1.2.2	Semiconvertidor Trifásico113

4.1.2.2.1	Simulación de Carga no Lineal 2 a 45°114
4.1.2.2.2	Simulación de Carga no Lineal 2 a 90°116
4.1.2.2.3	Simulación de Carga no Lineal 2 a 135°117
4.1.2.3	Convertidor Trifásico Completo118
4.1.2.3.1	Simulación de Carga no Lineal 3 a 30°119
4.1.2.3.2	Simulación de Carga no Lineal 3 a 60°120
4.1.2.3.3	Simulación de Carga no Lineal 3 a 90°122
4.1.3	Simulación de Cargas no Lineales con Filtro123
4.1.3.1	Aplicación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico de Media
Onda	
4.1.3.1.1	Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 45°, 90° y 135°124
4.1.3.1.1.1	Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A124
4.1.3.1.1.2	Corriente de Salida, de Compensación y de Carga ante la Variación
del Ángulo d	e Disparo125
4.1.3.1.1.3	Curvas de Carga de Condensadores127
4.1.3.1.1.4	Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido
Armónico	
4.1.3.1.1.5	Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo129
4.1.3.2	Aplicación del Filtro Activo a un Semiconvertidor Trifásico130
4.1.3.2.1	Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 45°, 90° y 135°131
4.1.3.2.1.1	Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A131
4.1.3.2.1.2	Corriente de Salida, de Compensación y de Carga ante la Variación
del Ángulo d	e Disparo133
4.1.3.2.1.3	Curvas de Carga de Condensadores134
4.1.3.2.1.4	Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido
Armónico	

4.1.3.2.1.5	Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo136
4.1.3.3	Aplicación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico
Completo	
4.1.3.3.1	Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 30°, 60° y 90°138
4.1.3.3.1.1	Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A138
4.1.3.3.1.2	Corriente de salida, de Compensación y de Carga ante la Variación
del Ángulo de	e Disparo139
4.1.3.3.1.3	Curvas de Carga de Condensadores140
4.1.3.3.1.4	Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido
Armónico	
4.1.3.3.1.5	Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo143
4.2	Ventajas y Desventajas de la utilización de un filtro multinivel de dos
etapas	
4.2.1	Comparación entre Utilizar una Etapa y dos Etapas144
4.2.1.1	Simulación de Convertidor Trifásico de Media Onda Aplicando una
y dos Etapas.	
4.2.1.2	Simulación del Semiconvertidor Trifásico aplicando una y dos
Etapas	
4.2.1.3	Simulación del Convertidor Trifásico completo aplicando una y dos
Etapas	
4.2.2	Medición del Factor de Potencia en Cargas No Lineales con y sin
Filtro	
4.2.2.1	Factor de Potencia obtenido para el Convertido Trifásico de Media
Onda con y s	in Filtro148
4.2.2.2	Factor de Potencia obtenido para el Semiconvertidor Trifásico con y
sin Filtro	
4.2.2.3	Factor de Potencia obtenido para el Convertidor Trifásico Completo
con y sin Filt	ro151
4.3	Conclusiones y Recomendaciones152
ANEXO A	
BIBLIOGRA	.FÍA157

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, a Dios ya que sin él no estuviera consiguiendo mis metas y a las personas que siempre han estado a mi lado apoyándome en todo momento, a mi papa Jorge por todo su sacrificio y por ensenarme a ser la persona que soy, a mi mama Esperanza por su apoyo incondicional, por ser mi amiga y siempre estar a mi lado en todo momento, a mis hermanos Lariza y Jorge con los que hemos compartido mis buenos y malos momentos y a mis tíos Bolívar y Elsa que siempre han estado a mi lado para apoyarme.

Fabricio Israel Gordillo Piña

Sin lugar a duda este logro se lo dedico a Dios, que sin él no escribiera estás líneas, y luego sin lugar a duda a toda mi familia, a mi Rosita querida que es mi razón de vivir, la que todas las mañanas me levanta con su singular cariño y ha sido mi compañera en todo este largo camino, a mi único jefe Vicente el que con mano dura ha sabido aconsejarme y estar siempre a mi lado sin importarle las más feas adversidades por las que hemos pasado, y a mis hermanos José y Juan para quienes va este trabajo, que aprendan que nada en la vida es imposible cuando luchas todos los días por conseguirlo, y nunca recibes un no por respuesta.

Rafael Adrián Peñafiel Bermeo

AGRADECIMIENTOS

Todo este trabajo no se hubiese podido ser realizado sin la ayuda de un gran número de personas, a las cuales les estoy sinceramente agradecido. A nuestro director de tesis Flavio por toda su ayuda y apoyo incondicional. A toda mi familia a mis amigos que todo el tiempo han estado a mi lado para apoyarme y darme ánimos en todo momento para poder llegar a buen fin este proyecto. A mi compañero Adrián y a toda su familia por abrirme las puertas de su casa y apoyarme y soportar todas mis irresponsabilidades en todo momento. Y por ultimo agradecer a Juan Andrés Valverde ya que sin el este proyecto no hubiese llegado a buen fin.

Fabricio Israel Gordillo Piña.

Un tema de tesis se pensaría que es algo sencillo, pero siendo de la Politécnica Salesiana tengo el orgullo de decir que no lo fue, que me costó mucho esfuerzo llegar hoy a escribir esto, y tengo que agradecer a mi gran amigo Juanito V. quien tuvo un papel muy importante en este proyecto, a mi compañero Israel con quien a pesar de tantas peleas supimos sacar adelante esta tesis, a todos mis amigos que no puedo nombrarlos pues faltarían hojas porque son muchos, que tuvieron esas palabras de aliento en todo este año, y sin lugar a duda te agradezco a ti mi dedito por compartir conmigo buenos y malos momentos, formando sin duda una parte muy importante en mi vida, gracias por existir.

Rafael Adrián Peñafiel Bermeo.

Introducción.

La permanente optimización de las instalaciones eléctricas orientadas a obtener el máximo rendimiento, conlleva el empleo con más frecuencia de cargas no lineales. Al mismo tiempo, el empleo de equipos electrónicos más sensibles a las perturbaciones hace necesario la implementación de equipos de compensación que tomen en consideración factores que hasta ahora no eran relevantes en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

En función de la naturaleza de los diferentes equipos eléctricos utilizados en los diversos procesos de producción de la industria, se pueden generar dentro de la instalación diferentes tipos de perturbaciones que se deben conocer.

Por este motivo se hace necesario evaluar el nivel de calidad de la energía eléctrica de la instalación, y esta evaluación consiste en cuantificar los fenómenos electromagnéticos súbitos o generados que pueden llegar a perturbar la forma, la continuidad, el equilibrio o la estabilidad del voltaje y de la corriente.

La industria Cuencana actualmente vive un proceso de renovación y automatización por lo que la utilización de cargas no lineales se vuelve imprescindible, y su vez la presencia de armónicos y sus efectos se incluyen en el proceso, motivo por el cual el interés del estudio de este tema te tesis.

Como respuesta a esta problemática, en este trabajo de investigación se presenta un filtro activo en paralelo trifásico como alternativa de solución para cancelar las corrientes armónicas que demandan cargas no lineales en la red eléctrica.

En el capítulo 1 se detalla información sobre la calidad de la energía en la red eléctrica, las perturbaciones eléctricas más comunes, así como sus niveles permitidos regulados en normas del Conelec. También se agrega una recopilación de datos tomados en una barra del cuadro QAC1 del grupo Cartopel Cuenca, para entender los problemas de calidad que posee una parte de la industria Cuencana. En el capítulo 2 se sintetiza los conceptos de los filtros multinivel existentes, al igual que sus diferentes configuraciones dependiendo de las necesidades del sistema, características de los convertidores multinivel y técnicas de control.

En el capítulo 3 se realizó el diseño del filtro en una primera etapa considerando el impacto monofásico, poniendo a prueba el desempeño del mismo ante una carga no lineal. Se aplico un controlador por histéresis. Con el fin de determinar su nivel de aplicabilidad se considero para el análisis los valores del porcentaje armónico que introduce a la red (THD), y el porcentaje al que disminuye una vez que se aplica el filtro monofásico.

En el capítulo 4 se simuló la versión final del sistema trifásico aplicando tres cargas no lineales (sistemas de rectificación controlada) disparadas a 3 diferentes ángulos para saber el contenido armónico que inyectan a la red; luego se simulo las mismas cargas poniendo en funcionamiento el filtro activo y su sistema de control por histéresis. De igual manera se probó el filtro aplicando una y dos etapas comprobando la mayor eficiencia y rapidez al momento de generar la corriente de compensación. Las curvas obtenidas y el análisis del espectro armónico denotan una disminución del THD general comprobando la eficiencia del filtro activo de potencia.

Finalmente se hace un resumen de resultados, y recomendaciones para futuras líneas de investigación.

CAPITULO 1

1. PARÁMETROS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA CARTOPEL - CUENCA

1.1 Calidad de la Energía e impacto en la Industria local.

En la actualidad con la gran competitividad que existe entre las distintas industrias, y que cada vez se exigen productos de mayor calidad, ha hecho que se busque que las industrias encuentren medidas que puedan ayudar a este crecimiento.

Asimismo se ha determinado que uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas es la calidad de esta, pues influye en la eficiencia de los equipos eléctricos que la usan.

Cualquier incidente resulta en una detención temporaria de los procesos y puede representar pérdidas significativas de producción y descartes de materiales debido a la necesidad de limpiar las máquinas, reiniciar el proceso en la secuencia que se encontraba y recalibrar las líneas de producción de acuerdo a las especificaciones de proceso requeridas.

Día a día, tanto para consumidores como para las compañías suministradoras de energía eléctrica, el concepto de "Calidad de la Energía eléctrica" adquiere mas relevancia. El término "Calidad de la Energía Eléctrica" (Power Quality) se ha convertido en una de las frases modernas más escuchadas en la industria. Este concepto incluye todo lo relacionado con una gran variedad de disturbios que se generan en los sistemas eléctricos y que causan desviaciones de las condiciones adecuadas de tensión, corriente o frecuencia, resultando en fallas de los sistemas o en operaciones erráticas de los equipos. Los problemas asociados a la calidad de la energía eléctrica no son necesariamente nuevos. Lo que es nuevo es que ahora los usuarios están más conscientes de las consecuencias de estos fenómenos y que las técnicas para su detección y corrección son más accesibles que en años pasados.

Es por eso que la industria ve a la energía eléctrica como uno de sus insumos vitales e importantes para su proceso productivo. Como tal, este insumo debe de estar sujeto a requerimientos de control de calidad, confiabilidad en el suministro, etc. A estos requerimientos los estaremos llamando "CALIDAD DE LA ENERGÍA".

Con el fin de lograr una mayor calidad de sus productos las industrias se han visto en la necesidad de introducir dispositivos que en su mayoría son de índole electrónico los que son muy sensibles a los cambios en la calidad del suministro, además de esto la introducción de cargas no lineales en las mismas, han tenido como consecuencia que la calidad en la energía cada vez se vea mas alterada.

Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles, definidas como no lineales, en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Podemos decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios; asimismo cuando ocurre alguna interrupción del flujo de energía eléctrica.

Los efectos asociados a problemas de calidad de la energía son:

- Daños en los equipos
- Reducción en la confiabilidad
- Disminución en la producción
- Penalizaciones y multas por parte de la distribuidora de energía, que en las empresas del país consideran solo el parámetro del factor de potencia.

Pero no solo es importante tener una buena calidad de la energía dentro de la industria por sus procesos productivos, además de ello hay que tener muy en cuenta las especificaciones que se manejan dentro de las empresas distribuidoras de energía eléctrica, ya que estas también se puede ver afectada por los distintos factores que están interfiriendo dentro de las industrias y que son transferidas a las redes principales de suministro de energía eléctrica.

Sin embargo, el problema no es solo la afectación en la variación de la tensión.

Resulta interesante mencionar que los sistemas basados en electrónica de potencia no solo son sensibles a las variaciones de la tensión, sino que también causan perturbaciones que afectan a la red eléctrica

Por lo que las empresas tanto de generación como de distribución tienen que afrontar nuevos retos para poder mitigar la deficiencia que se produce en el suministro eléctrico.

Por tanto las empresas distribuidoras como las de generación han tenido que también afrontar los perjuicios que se dan cuando se tiene una mala calidad de la energía dentro de un determinado punto.

Hay que tener en cuenta que como calidad de energía se puede entender que es cuando el total de la energía eléctrica suministrada a un consumidor, le permite al ocuparla en dispositivos y equipos de tal manera que estos mantengan sus condiciones y características adecuadas para un optimo desempeño con la continuidad requerida.

Para lograr esto tienen que esforzarme mayormente para cumplir con las exigencias de sus clientes, y afrontar los siguientes retos:

- a. Tener la capacidad de aumentar su generación y transporte de energía eléctrica para suministrar la totalidad de la demanda creciente, requerida por los distintos usuarios.
- El poder brindar una excelente calidad de energía eléctrica a sus distintos clientes, y de esta manera asegurar un correcto funcionamiento de los distintos equipos que puedan llegar a estar conectados a la red.

La calidad de la energía como tal no tiene una definición que esté completamente aceptada por lo que se emplean estándares internacionales como son:

- El estándar IEC 61000-4-30 que define a la calidad de la energía eléctrica como características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia [4]
- El estándar IEEE 1159-1995 que define la calidad de la energía eléctrica como una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y un punto determinado de la red eléctrica [9]

Por lo que se puede decir que la calidad del suministro eléctrico no es otra cosa que la combinación de la disponibilidad del suministro de energía eléctrica conjuntamente con la calidad en tensión y corriente que están siendo suministradas, teniendo en cuenta que la falta de calidad en estos parámetros se da cuando tenemos alteraciones en tales magnitudes de su forma ideal, por lo que cualquier cambio en su forma ideal es considerado como una perturbación llegando a ser una perdida en la calidad del suministro.

Los problemas en la calidad de la energía eléctrica son muy distintos al que se presenta en otros productos, esto es debido a que el problema en la calidad se produce cuando la misma esta siendo utilizada por el consumidor final. La calidad de la energía puede ser vista bajo diferentes perspectivas.

- La del consumidor viendo la afectación de las variaciones de la tensión eléctrica en sus equipos [3].
- La del fabricante de equipos determinando una tolerancia en sus equipos para evitar daños permanentes [3].
- La del suministrador viendo las características de las corrientes consumidas por sus clientes y las posibles afectaciones a la red derivado de la "calidad del consumo" [3].

Con la perspectiva de competencia y mejora continua es necesario entender los requerimientos de los clientes y en conjunto tener las mismas perspectivas en torno a la calidad de suministro eléctrico.

1.1.1 Regulación de la calidad de la energía eléctrica en el país.

Dentro de nuestro país el ente regulador de los parámetros de la energía eléctrica, donde también se incluye a la calidad de la energía eléctrica es el CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), el cual normaliza y regula a la misma.

El Art. 1, inciso segundo del Reglamento de Suministro del Servicio de Electricidad, establece que las disposiciones de dicho instrumento serán complementadas con regulaciones aprobadas por el CONELEC y por instructivos y procedimientos dictados por los distribuidores de conformidad con este Reglamento.

El mismo tiene como objetivo el garantizar a los Consumidores un suministro eléctrico continuo y confiable, para ello se busca dictar las Regulaciones relacionadas con los estándares mínimos de calidad y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que deben someterse las Empresas Distribuidoras del Servicio Eléctrico.

1.2 Parámetros para la medición de la Calidad de la Energía.

En general, un sistema de medición de la calidad de la energía consiste en tres componentes básicos que son:

- a) Transformador de medida
- b) Canal de información
- c) Equipos analizadores

El primer paso para resolver los problemas de la calidad de la energía, es realizar las mediciones utilizando equipos analizadores, los cuales nos ayudaran a resolver fácilmente y en forma segura, problemas de armónicos, calidad de voltaje y consumo de energía.

Para esto se requieren los siguientes recursos:

- d) Equipos analizadores de potencia
- e) Accesorios para la medicion
- f) Equipos de seguridad contra riesgo electrico
- g) Computadoras

Hay que tomar en cuenta que las mediciones de la calidad de la energía nos proporcionan información como:

a) Información detallada del comportamiento eléctrico.

- b) Información para planificar las redes y optimizar las instalaciones en las plantas industriales.
- c) Realizar un análisis de los resultados obtenidos
- d) Caracterizar los comportamientos de los parámetros eléctricos.

Las Empresas Distribuidoras tienen la responsabilidad de prestar el servicio eléctrico a los Consumidores ubicados en su zona de Concesión, dentro de los niveles de calidad establecidos, en virtud de lo que señala la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, los Reglamentos aplicables, el Contrato de Concesión y las Regulaciones correspondientes.

1.2.1 Mediciones de las perturbaciones en la red según la REGULACION No. CONELEC – 004/01

1.2.1.1 Nivel de Voltaje

La calidad de voltaje se determina como las variaciones de los valores eficaces (rms) medidos cada 10 minutos, con relación al voltaje nominal en los diferentes niveles.

El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

Un registro de voltaje en cada uno de los siguientes puntos de medición:

- a) 20% de las barras de salida de subestaciones de distribución AV/MV, no menos de 3.
- b) 0,15% de los transformadores de distribución, no menos de 5.
- c) 0,01 % de los Consumidores de Bajo Voltaje del área de concesión, no menos de 10.

Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema [11]. Una vez realizada la selección de los puntos,

la Empresa Distribuidora debe notificar al CONELEC, por lo menos 2 meses antes de efectuar las mediciones.

Simultáneamente con el registro del voltaje se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.

Para cada mes, el registro en cada punto de medición se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

1.2.1.2 Parpadeo (Flicker)

El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

- a) Un registro en cada uno de los puntos de medición, en un número equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menos de 5.
- b) Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema.
- c) Simultáneamente con este registro se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.
- d) Para cada mes, el registro en cada punto de medición se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones se deben realizar con un medidor de efecto "Flicker" para intervalos de 10 minutos y de acuerdo a los procedimientos especificados en la norma IEC 60868.

Con la finalidad de ubicar de una manera más eficiente los medidores de flicker, se efectuarán mediciones de monitoreo de flicker, de manera simultánea con las mediciones de voltaje indicadas anteriormente; por lo que los medidores de voltaje deberán estar equipados para realizar tales mediciones de monitoreo.

1.2.1.3 Armónicos

El Distribuidor deberá realizar mensualmente lo siguiente:

- a) Un registro en cada uno de los puntos de medición, en un número equivalente al 0,15% de los transformadores de distribución, en los bornes de bajo voltaje, no menos de 5.
- b) Para la selección de los puntos se considerarán los niveles de voltaje, el tipo de zona (urbana, rural), y la topología de la red, a fin de que las mediciones sean representativas de todo el sistema.
- c) Simultáneamente con este registro se deberá medir la energía entregada a efectos de conocer la que resulta suministrada en malas condiciones de calidad.
- d) En cada punto de medición, para cada mes, el registro se efectuará durante un período no inferior a 7 días continuos, en intervalos de medición de 10 minutos.

Las mediciones se deben realizar con un medidor de distorsiones armónicas de voltaje de acuerdo a los procedimientos especificados en la norma IEC 61000-4-7.

Con la finalidad de ubicar de una manera más eficiente los medidores de distorsiones armónicas, se efectuarán mediciones de monitoreo de armónicas, de manera simultánea con las mediciones de voltaje indicadas anteriormente; por lo que los medidores de voltaje deberán estar equipados para realizar tales mediciones de monitoreo.

1.2.2 Instrumento de Medida

Para realizar un estudio de la calidad de la energía, de cualquier red eléctrica, es necesario disponer de instrumentos capaces de medir y registrar los principales parámetros de la misma.

La gama de instrumento es varia pero para objetos de nuestro estudio describiremos el equipo a ser usado

1.2.2.1 Fluke 435 (Three Phase Power Quality Analyzer)

Este Instrumento es completo para la solución de problemas en sistemas trifásicos: mide prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico, como tensión, corriente, potencia, consumo (energía), desequilibrio, flicker, armónicos e interarmónicos. Captura eventos como fluctuaciones, transitorios, interrupciones y cambios rápidos de tensión.

Registrador: registra todos los datos que necesita detallar. El registro detallado de datos de larga duración configurable por el usuario proporciona lecturas de valores mínimos, máximos y promedios de hasta 100 parámetros distintos en las tres fases y el neutro, con un tiempo medio de medida ajustable hasta a 0,5 segundos.

Cumple la más estricta normativa de seguridad 600 V CAT IV, 1000 V CAT III necesaria para realizar medidas en la entrada de servicio.

Cumple todos los requisitos de medida del estándar CEI 61000-4-30.

El analizador ofrece una completa serie de potentes funciones para la comprobación de sistemas de distribución eléctrica. Algunas de estas funciones le permiten obtener una visión general del funcionamiento del sistema eléctrico, mientras que otras le sirven para examinar detalles específicos.

El analizador Fluke 435 dispone de funciones adicionales, como transmisión de señales, registro, precisión de entrada de tensión de 0,1% conforme a la norma IEC61000-4-30 2003 Clase A, memoria adicional para almacenar datos de registro, software de registro de potencia, pinzas amperimétricas flexibles y un maletín con ruedas de alta resistencia.

El analizador presenta los resultados de las medidas de forma totalmente eficaz en cinco pantallas diferentes.

Los analizadores de calidad eléctrica Fluke 435 cumplen con las normas:

- IEC/EN61010-1-2001,
- CAN/CSA C22.2 Nº 61010-1-04,
- UL std N° 61010-1,

El analizador hace uso de los siguientes símbolos internacionales:

Â	Consulte la explicación que figura en el manual		Doble aislamiento (Clase de protección)	×	Información para la eliminación de residuos
<u> </u>	Tierra		Información sobre reciclaje	Œ	Conformidad europea
===	Corriente directa	\checkmark	Corriente alterna		Homologación de seguridad
\otimes	No aplicar ni retirar de conductores con tensión peligrosos.				

Figura. 1.1 Símbolos utilizados en el Fluke 435

1.2.2.2 Modos de medida para examinar en detalle

- Tensiones de fase. Deben ser similares al valor nominal. Las formas de onda de tensión deben ser del tipo sinusoidal, es decir, suavizadas y sin distorsiones. Compruébelo con la función de osciloscopio. Se utiliza el modo Fluctuaciones para registrar cambios repentinos de tensión. Capture anomalías de la tensión con el modo Transitorios.
- Corrientes de fase. Utilice Volt./Amp./Hz. y Fluctuaciones para comprobar las relaciones de corriente/tensión. Se utiliza Corriente de arranque para registrar aumentos repentinos de la corriente como la corriente de arranque de motores.
- Factor de cresta. Un factor de cresta de 1,8 o superior supone una distorsión notable en la forma de onda. Compruebe la distorsión en la pantalla de osciloscopio. Se utiliza el modo Armónicos para identificar armónicos y la distorsión armónica total (THD)
- Armónicos. Utilice el modo Armónicos para comprobar armónicos de tensión y corriente, y la THD por fases. Se utiliza la tendencia para el registro de armónicos a lo largo del tiempo.
- Flicker (Parpadeo). El modo Parpadeo le permite comprobar los parpadeos de tensión a corto y largo plazo, así como otros datos relacionados por fases. Se utiliza la tendencia para el registro de estos valores a lo largo del tiempo.
- **Fluctuaciones.** Se utiliza el modo Fluctuaciones para registrar cambios repentinos de tensión como de corto y medio ciclo.

- Frecuencia. La frecuencia debe ser similar al valor nominal. Por lo general, se trata de un factor bastante estable. Seleccione Volt./Amp./Hz. para mostrar la frecuencia. La variación de la frecuencia durante un período determinado se registra en la pantalla de tendencias.
- Desequilibrio. La tensión de cada fase no debe diferir más de un 1% de la media obtenida a partir de las tres, y el desequilibrio de corriente no debe ser superior al 10%. Se utiliza el modo Osciloscopio para examinar los desequilibrios en un diagrama fasorial, o bien el modo Desequilibrio.
- Transmisión de señales. Se puede utilizar para analizar el nivel de señales de control remotas que con frecuencia se encuentran en los sistemas de alimentación eléctrica.
- Registrador. Permite almacenar varias lecturas de alta resolución en la memoria.

1.2.2.3 Mediciones de Armónicos

La pantalla Armónicos mide y graba los armónicos e interarmónicos hasta el 50°.

También mide los datos relacionados, como los componentes CC, la THD (distorsión armónica total) y el factor K. Los armónicos son distorsiones periódicas de la tensión, corriente o las ondas sinusoidales de energía. Una forma de onda se puede considerar como una combinación de varias ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y magnitudes.

Asimismo, también se mide la contribución de cada uno de estos componentes a la señal completa. Las lecturas pueden mostrarse como porcentaje del fundamental o como porcentaje de todos los armónicos combinados (valor rms). Los resultados se pueden visualizar en una pantalla de gráfico de barras, una pantalla de multímetro o una pantalla de tendencias.



Figura. 1.2 Forma de acceder a la pantalla de gráfico de barras de armónicos

La pantalla de gráfico de barras muestra el porcentaje de contribución de cada uno de los componentes a la señal completa. Una señal sin distorsión debería mostrar un primer

armónico (es decir, el fundamental) al 100 %, mientras que el resto debería estar a cero: sin embargo, esto no ocurrirá en la práctica, ya que siempre hay una cierta cantidad de distorsión que produce armónicos más altos.

Una onda sinusoidal pura se distorsiona al añadirle componentes con una mayor frecuencia. La distorsión se representa mediante el porcentaje THD. La pantalla también muestra el porcentaje del componente CC y el factor K. El factor K es un número que cuantifica las pérdidas potenciales en transformadores debidas a las corrientes armónicas.

Los armónicos de orden superior tienen mayor influencia sobre el factor K que los armónicos de orden inferior.

1.3 Perturbaciones en la Red.

Los aspectos de calidad del producto técnico que se controlarán son el nivel de voltaje, las perturbaciones y el factor de potencia, siendo el Distribuidor responsable de efectuar las mediciones correspondientes, el procesamiento de los datos levantados, la determinación de las compensaciones que pudieran corresponder a los consumidores afectados y su pago a los mismos. Toda la información deberá estar a disposición del CONELEC al momento que se le requiera.

1.3.1 Nivel de Voltaje

La regulación del CONELEC, en lo referente al nivel de voltaje establece el índice de calidad a ser aplicado, el cual es determinado utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \qquad Ecuation 1.1$$

En donde:

 ΔV_k : Variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos

 V_k : Variación eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos

 V_n : Voltaje nominal en el punto de medición.

El Distribuidor no cumple con el nivel de voltaje en el punto de medición respectivo, cuando durante un 5% o más del período de medición de 7 días continuos, en cada mes, el servicio lo suministra incumpliendo los límites de voltaje.

1.3.2 Parpadeo (Flicker)

Para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al Flicker, se considerará el Indicé de Severidad por Flicker de Corta Duración (P_{st}), en intervalos de medición de 10 minutos, definida de acuerdo a las normas IEC; misma que es determinado mediante la siguiente expresión:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \qquad Ecuacion \ 1.2$$

Donde:

 P_{st} : Indice de severidad de flicker de corta duración.

 $P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} : Niveles de efecto "flicker" que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del periodo de observación.

El índice de severidad del Flicker (P_{st}) en el punto de medición respectivo, no debe superar la unidad. Se considera el límite $P_{st} = 1$ como el tope de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede soportar sin molestia el ojo humano en una muestra específica de población.

Se considerará que el suministro de electricidad no cumple con el límite admisible arriba señalado, en cada punto de medición, si las perturbaciones se encuentran fuera del rango de tolerancia establecido en este numeral, por un tiempo superior al 5 % del período de medición de 7 días continuos [3].

1.3.3 Transitorio

Un disturbio que ocurre en la forma de onda de CA con una duración inferior a medio ciclo y que es evidente por la abrupta discontinuidad que presenta.

Puede ser de cualquier polaridad y puede ser aditiva o substractiva a la onda nominal.

1.3.3.1 Impulso transitorio

Un impulso transitorio es un cambio súbito de la frecuencia en la condición de estado estable del voltaje, corriente o de ambas magnitudes; éste cambio es unidireccional en polaridad pudiendo ser positivo o negativo. Este fenómeno es normalmente caracterizado por sus tiempos de levantamiento y decaimiento, además también por su contenido espectral [4]. La causa más común de los impulsos transitorios son las descargas atmosféricas, en la siguiente figura se puede observar un ejemplo de impulso transitorio.



Figura. 131 Ejemplo de impulso transitorio.

1.3.3.2 Oscilación transitoria

Una oscilación transitoria hace referencia a un voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente; las oscilaciones son caracterizadas por su contenido espectral, duración y magnitud.

Las oscilaciones transitorias con una componente de frecuencia primaria de más de 500Khz son consideradas oscilaciones transitorias de alta frecuencia, éstos transitorios son casi siempre debido a algún tipo de conmutación, las oscilaciones transitorias de alta frecuencia son a menudo el resultado de la respuesta de un sistema local a un impulso transitorio. Un transitorio con componente de frecuencia primaria entre 5 y 500Khz con una duración estimada de 10 microsegundos o varios ciclos de frecuencia fundamental se clasifica como transitorio de frecuencia media, mientras que las oscilaciones con frecuencias primarias por debajo de los 5Khz y con una duración de 0.3 a 50ms son consideradas de baja frecuencia [11]. Las oscilaciones transitorias de distribución; éstas oscilaciones generalmente se asocian con la ferroresonancia y la energización de transformadores. Como en el caso de los impulsos, las oscilaciones transitorias pueden ser cuantificadas con o sin incluir la componente de frecuencia fundamental; pero cuando se caracteriza el transitorio, es importante indicar la magnitud con y sin la componente fundamental.



Figura.1.4 Oscilación transitoria de baja frecuencia

1.3.4 Variaciones de corta duración

Se clasifican en instantáneas, momentáneas o temporales, según su duración, son causadas por condiciones de falla, energización de cargas grandes que requieren altas corrientes de inicio o a conexiones flojas en el cableado del sistema. Dependiendo de la localización de la falla y las condiciones del sistema, se pueden ser:

1.3.4.1 Instantáneas

Las interrupciones ocurren cuando el voltaje entregado o la corriente de la carga disminuye a menos de 0.1 pu por un periodo de tiempo menor a 1 minuto.

Pueden ser el resultado de fallas en los sistemas o equipos, y malfuncionamiento de controles. La magnitud del voltaje durante una interrupción es un 10% del voltaje nominal y su duración depende del tiempo de operación de los dispositivos de protección utilizados en el sistema.

Dentro de estas se encuentra los llamados Sag y swell.

Sag: La definición que hace el IEEE a cerca del sag dice: "Es un descenso del valor rms de voltaje o corriente a una magnitud comprendida entre 0.1 y 0.9pu a frecuencia de red y con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto".



Figura.1.5 Ejemplo de sag instantáneo de voltaje causado por una falla eléctrica

Swell: Son un incremento en el valor rms ya sea del voltaje o de la corriente a frecuencia de red, con duraciones que van desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto con una magnitud típica de entre 1.1 a 1.8pu.

Al igual que los sag, los swells son asociados con fallas en el sistema pero son mucho menos frecuentes que los primeros; las causas que comúnmente generan swells son fallas entre fase y tierra las cuales provocan incrementos de voltaje en las otras fases, también entre las causas están la desconexión de grandes cargas o la conexión de grandes bancos de condensadores.



Figura.1.6 Ejemplo de un voltaje swell causado por una falla entre fase y tierra

1.3.5 Variaciones de larga duración

Son variaciones rms en la frecuencia del sistema cuya duración es mayor a 1 minuto. Pueden ser sobre tensiones, bajas tensiones o interrupciones sostenidas, que por lo general son causadas por variaciones en las cargas del sistema y operaciones de conmutación en los sistemas.

1.3.5.1 Interrupciones Sostenidas

Dentro de esta denominación se consideran los descensos a cero del voltaje durante un periodo de tiempo que excede el minuto de duración.

Las interrupciones sostenidas se presentan comúnmente como resultado de fallas eléctricas permanentes que no han podido ser despejadas por los dispositivos de protección; éstas fallas, dados el diseño y a la filosofía de protección aplicada por la empresa de distribución, tienden a ser aisladas del resto del sistema y con ello se suspende el suministro de energía hacia el área en donde se originó el problema.

1.3.5.2 Subvoltajes

Son descensos del nivel nominal de voltaje rms con valores típicos que pueden alcanzar magnitudes que están entre 0.8 y 0.9pu.

Los subvoltajes son provocados generalmente por la conexión de grandes cargas al sistema o por la desconexión de bancos de condensadores, así como también por circuitos sobrecargados.

1.3.5.3 Sobrevoltajes

El término sobrevoltaje es usado para describir un incremento en el valor nominal rms del voltaje en el orden de entre 1.1 y 1.2pu. Los sobrevoltajes pueden ser el resultado de la desconexión de carga en el sistema, o de variaciones en el sistema de compensación reactiva, así como también pueden ser provocados por una deficiente capacidad de control y regulación de voltaje o por una inadecuada selección de taps en los transformadores.

1.3.6 Desbalance de Voltaje

El desbalance de voltaje se define como la razón entre las componentes de secuencia negativa o secuencia cero, y las componentes de secuencia positiva. Los

voltajes de secuencia negativa o cero en un sistema eléctrico de potencia generalmente son el resultado de cargas desequilibradas que causan un flujo de corriente negativo o cero.

Desbalanceo entre las fases de un sistema polifásico causado principalmente por la operación de cargas monofásicas desiguales que afectan principalmente a máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos.



Figura.1. 7 Desbalance de Voltaje

1.3.7 Distorsión en la forma de Onda

1.3.7.1 Ruido (noise)

Se considera como ruido las señales eléctricas no deseadas que producen efectos indeseables en los circuitos de control en los que se presentan y que incluyen el equipo electrónico sensible en su totalidad o en alguna de sus partes.



Figura.1.8 Ruido Eléctrico

1.3.7.2 Muesca (notch)

Una conmutación u otro disturbio en la forma de onda de voltaje del sistema con duración menor a medio ciclo la cual es inicialmente opuesta en polaridad a la forma de onda normal, siendo por lo tanto substractiva en términos de la amplitud. Incluye la pérdida completa de voltaje por medio ciclo.



Figura. 1.9 Muesca (notch)

1.3.7.3 Cargas no lineales

Las cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo j
respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión).

1.4 Armónicos.

Con la finalidad de ubicar de una manera más eficiente los medidores de distorsiones armónicas, se efectuarán mediciones de monitoreo de armónicas, de manera simultánea con las mediciones de voltaje indicadas anteriormente; por lo que los medidores de voltaje deberán estar equipados para realizar tales mediciones de monitoreo.

$$V_i' = \left(\frac{V_i}{V_n}\right) * 100$$
 Ecuacion 1.3

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n}\right) * 100 \qquad Ecuacion 1.4$$

Donde:

 V'_i = factor de distorsión armónica individual de voltaje.

THD = factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje

 V_i = valor eficaz (rms) del voltaje armónico "i" (para i = 2... 40) expresado en voltios.

 V_n = voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios.

Los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') señalados a continuación. Para efectos de esta regulación se consideran los armónicos comprendidos entre la segunda y la cuadragésima, ambas inclusive [9].

	TOLERANCIA V _i ´ o THD´ (% respecto al voltaje nominal del punto de				
ORDEN (n) DE LA					
ARMONICA V THD	medición)				
	V > 40 kV	$V \le 40 \text{ kV}$			
	(otros puntos)	(trafos de distribución)			
Impares no múltiplos de 3					
5	2.0	6.0			
7	2.0	5.0			
11	1.5	3.5			
13	1.5	3.0			
17	1.0	2.0			
19	1.0	1.5			
23	0.7	1.5			
25	0.7	1.5			
> 25	0.1 + 0.6*25/n	0.2 + 1.3*25/n			
Impares múltiplos de tres					
3	1.5	5.0			
9	1.0	1.5			
15	0.3	0.3			
21	0.2	0.2			
Mayores de 21	0.2	0.2			
Pares					
2	1.5	2.0			
4	1.0	1.0			

Tabla 1.1 Regulación de los Armónicos dada por el CONELEC

6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

1.4.1 Perturbaciones Armónicas

Los armónicos han sido históricamente la perturbación más estudiada ya que su existencia se conoce desde los comienzos de la distribución de la energía eléctrica. Su estudio y la evolución de las técnicas de medida han sido en gran parte los generadores del interés en otros aspectos de la calidad de la energía eléctrica hasta llegar a la situación actual.

Los armónicos son señales de voltaje o corriente que contienen frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental (en este caso 60Hz), situación que desemboca en una deformación de la señal senoidal de voltaje.

Desde un punto de vista técnico resultan de mayor interés los estándares y normas que debe cumplir la señal de la red, los límites de armónicos de tensión y de corriente, como deben ser medidos, etc. Estos estándares provienen de diferentes fuentes de la que destacaremos dos: IEEE e IEC. El Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, es de origen norteamericano. La International Electrotechnical Commission, IEC, es de origen europeo.

Según el estándar IEEE Std 519-1992 los armónicos son "Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental."

La norma IEC 61000-2-1 define como "los armónicos de frecuencia de la tensión y la corriente de la red de alimentación, pueden observar otras frecuencias que no son múltiplo entero de la fundamental. Estas frecuencias pueden aparecer como frecuencias discretas o como un espectro de banda ancha"

Existen dos categorías generadoras de armónicos.

La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia.

Estas componentes armónicas se producen por la conexión de cargas no lineales a la red. Estas cargas absorben corrientes no lineales que al circular por las impedancias del sistema producen caídas de tensión no lineales que modifican la forma de onda de la tensión suministrada [12].



Figura. 1.10 Onda deformada compuesta por la superposición de la señal fundamental y los armónicos de tercer y quinto orden

El uso masivo de cargas no lineales y cargas no pulsantes con la frecuencia fundamental está aumentando el nivel de los armónicos en las redes de distribución eléctrica y está dando origen a la existencia cada vez mayor de otras componentes no armónicas de la señal. Para ello se utiliza el análisis de Fourier para la medida de este tipo de señales.

Como se sabe, una señal periódica no senoidal (dado que la onda se halla deformada) puede ser expresada por un número infinito de términos senoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental utilizando series de Fourier.

$$v(t) = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_o t) + b_n \sin(nw_o t)] \qquad Ecuation 1.5$$

En donde

 V_o = componente continua de la señal a_n, b_n = coeficientes de la señal (coeficientes de la serie de Fourier) n= orden de la componente armónica de la señal, n=1, 2, 3..... w_o = frecuencia fundamental de la señal

Entonces con lo anterior se puede deducir que cualquier señal periódica no senoidal puede ser expresada como la sumatoria de señales componentes, la primera de ellas con una frecuencia w_o llamada fundamental, una segunda componente de frecuencia $2w_o$ llamada segunda armónica, una tercera componente con frecuencia $3w_o$ que seria la tercera armónica y así sucesivamente además de contar con un término que es denominado como componente continua y que es constante.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir 3 * 60 Hz = 180 Hz.

El origen de los armónicos está en diversos equipos y dispositivos eléctricos y/o electrónicos que tienen un consumo de energía no lineal, es decir, que la corriente que absorben no está en proporción lineal con la caída de tensión que provocan [4]. Este fenómeno puede extenderse más allá del sistema en que es iniciado y propagarse hacia otros sistemas y afectar a usuarios que se hallan conectados la misma red de suministro público, ejemplos comunes de éstas cargas se detallan a continuación:

- Saturación de transformadores.
- Corrientes de energización de transformadores.
- Conexiones al neutro de transformadores.
- Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna.
- Hornos de arco eléctrico.
- Lámparas fluorescentes.
- Fuentes reguladas por conmutación.
- Cargadores de baterías.
- Variadores de frecuencia para motores ("driver"), inversores.
- Convertidores de estado sólido.

Los armónicos se dividen en dos tipos: armónicos característicos y armónicos no característicos. Los primeros se presentan por la presencia de cargas no lineales en el sistema, mientras que los segundos se deben a ciertos fenómenos que ocurren en el sistema.

Por otro lado dependiendo de si la carga productora de armónicos es variable o constante se dividen en: armónicos fluctuantes y armónicos no fluctuantes.

Los problemas relacionados con la distorsión armónica son varios y afectan tanto a los consumidores como también a las empresas de distribución eléctrica, pero las razones básicas por las cuales se ha hecho necesario corregir este fenómeno son tres:

- El uso extendido de convertidores estáticos de potencia.
- El aumento de resonancias en las redes eléctricas.
- Las cargas de sistema cada vez son más susceptibles a la distorsión armónica.

En el caso de los convertidores estáticos de potencia, su uso en la mayoría de equipos y maquinaria que posean un control electrónico ha significado un aumento en la eficiencia y confiabilidad de los mismos pero también ha llevado a una proliferación de los armónicos en los sistemas eléctricos.

Estas perturbaciones se traducen en costos que difícilmente podemos apreciar o valorar. Estos costos podemos diferenciarlos como:

- a) Costos Técnicos
- b) Costos Económicos

a) Costos Técnicos

Los costos técnicos son todos aquellos que comportan una pérdida de rendimiento de nuestra instalación [3].

Es decir:

- Pérdida de capacidad en líneas de distribución de energía
- Sobrecarga de transformadores
- Sobrecarga de conductores
- Caídas de tensión

- Descalificación de los máquinas eléctricas.
- Perdidas por efecto Joule en líneas y maquinas
- Perdidas magnéticas en maquinas eléctricas

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

b) Costos Económicos

Los costos económicos son aquellos que podemos cuantificar económicamente, aunque en algunos casos puede ser difícil. Estos costos los podemos dividir en costos visibles y costos ocultos [3].

- Costos visibles: estos se reflejan en Mayor consumo eléctrico, Puntas de consumo eléctrico y Recargo o pago de energía reactiva.
- Costos ocultos: estos se dan por Perdidas de distribución, Perdidas de potencia y energía (por efecto Joule y magnéticas), Ampliación de instalaciones y Paradas de procesos productivos

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

1.4.2 Factores de distorsión Armónica

Los armónicos frecuentemente se hallan caracterizados por algunos factores que indican el nivel de deformación de la señal, estos factores se encuentran expresados en forma porcentual y son los siguientes:

- a) Factor de distorsión individual de voltaje (D_{VH}) .
- b) Factor de distorsión total de voltaje (THD_V).

- c) Factor de distorsión individual de corriente (D_{IH}) .
- d) Factor de distorsión total de corriente (THDI).

h) Factor de distorsión individual de voltaje (D_{VH}) .

Se define como la relación entre el valor eficaz de voltaje de un armónico dado y el valor eficaz de la componente fundamental e indica qué tan grande o pequeño es una armónico con respecto a la componente fundamental.

Y esta dado por la siguiente expresión:

$$D_{VH} = \frac{V_h}{V_f} * 100\% \qquad Ecuacion \ 1.6$$

Donde

 V_h = Amplitud o valor efectivo del armónico h-esimo de voltaje.

 V_f = Amplitud o valor efectivo de la fundamental de voltaje.

i) Factor de distorsión total de voltaje (THD_V) .

Se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de los componentes armónicos de voltaje al cuadrado, desde el armónico de orden 2 hasta el infinito, dividida para el valor eficaz de la componente fundamental, cabe mencionar que se excluyen la componente fundamental y la componente continua.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2}}{V_f} * 100 \qquad Ecuacion \ 1.7$$

j) Factor de distorsión individual de corriente (D_{IH})

Se define como la relación entre el valor eficaz de corriente de un armónico dado y el valor eficaz de la componente fundamental. Nos indica que tan grande o pequeño es un armónico con respecto a la componente fundamental.

Y esta dado por la siguiente expresión:

$$D_{IH} = \frac{I_h}{I_f} * 100\% \qquad Ecuacion \ 1.8$$

 I_h = Amplitud o valor efectivo del armónico h-esimo de corriente. I_f = Amplitud o valor efectivo de la fundamental de corriente.

k) Factor de distorsión total de corriente (*THD*_{*I*}).

Se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de los componentes armónicos de corriente al cuadrado, desde el armónico de orden 2 hasta el infinito, divido para el valor eficaz de la componente fundamental,

El THD_I es igual al valor eficaz de la forma de onda de corriente, excluyendo de la original la componente fundamental y la componente de corriente continúa, este factor se determina a través de la siguiente ecuación:

$$THD_{I} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_{h})^{2}}}{I_{f}} * 100\% \qquad Ecuacion 1.9$$

1.4.3 Efectos de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos

Los armónicos y la distorsión que provoca en la forma de onda es el fenómeno de calidad de energía que más problemas causa en el funcionamiento de equipos y

maquinaria eléctrica, principalmente por su característica de propagarse a través de la red eléctrica y afectar a otras cargas conectadas a la misma.

Los armónicos pueden provocar desde daños en elementos eléctricos y/o electrónicos hasta interferencias en equipos de comunicación; a continuación se describirá algunos de sus principales efectos sobre elementos, máquinas y equipos de un sistema eléctrico [11].

- a) Efectos de los armónicos en cables y conductores: Al circular corrientes armónicas por un conductor, la alta frecuencia de éstas provoca un incremento de la resistencia efectiva del conductor debido a una disminución del área por donde circula la corriente puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.
- b) Efectos de los armónicos en transformadores: En este tipo de máquinas eléctricas los armónicos provocan principalmente un aumento de la temperatura del transformador debido a calentamientos en sus partes estructurales, estos calentamientos sumados a los efectos de las pérdidas I^2R en los conductores hacen que la temperatura de los devanados crezca más allá de la proyectada.
- c) Efectos de los armónicos en barras de neutro: El efecto de las corrientes armónicas en las barras de neutro es el de provocar su sobrecarga, esto debido al efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores neutros que sirven a diferentes cargas. Si las cargas conectadas al sistema producen una mayor cantidad de armónicas de tercer orden y además el sistema no es balanceado, las barras de neutros transportarán corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las terceras armónicas de secuencia cero generadas por éstas, por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma

corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales.

d) Efectos de los armónicos en motores de inducción: El efecto en este caso es un aumento de las pérdidas I^2R en los devanados tanto del estator como del rotor, así como también un aumento de las pérdidas mecánicas aunque en menor proporción. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .

1.4.4 Interarmónicos

Este término se refiere a las señales de frecuencia que a diferencia de los armónicos, no son de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental o de red.

Los interarmónicos pueden ser encontrados en las redes de todas las clases de voltaje; pueden aparecer como frecuencias discretas o como espectros de ancho de banda. Las principales fuentes de distorsión de forma de onda por interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, motores de inducción y los dispositivos de arco.

1.5 Recopilación de datos obtenidos en el Grupo Cartopel - Cuenca.

Para realizar una labor de campo tuvimos acceso a la Industria *Grupo Cartopel* – *Cuenca* en donde se pudo realizar mediciones de calidad de energía. Se tomo mediciones en la zona QAC1en donde se conectan los variadores de frecuencia, que son los principales generadores de armónicos en la red. En la figura 1.11 se puede apreciar el diagrama unifilar de la empresa en mención.



Figura. 1.11 Diagrama Unifilar del Grupo Cartopel – Cuenca.

Como se puede observar, la el tablero QAC1 presenta un factor de potencia de 0.7 y en dicha zona se conectan variadores de frecuencia para máquinas especiales. En la tabla 1.2 se detallan las máquinas conectadas en esta barra con sus respectivas potencias.

MAQUINA	TIPO	POTENCIA
Mesa Superior	AC	125 HP
Mesa Formación	AC	125 HP
Prensa Fabric.1	DC	135 HP
Prensa Fabric.2	DC	300 HP
Rodillo Helper	AC	75 HP
Rodillo Pick Up	AC	75 HP
Secadores 1.	DC	60 HP
Secadores 2.	DC	60 HP
Secadores 3.	DC	63 HP
Secadores 4.	DC	75 HP
Secadores 5.	DC	75 HP
Calan	AC	60 HP
Pope Reel.	AC	60 HP
Total.		1288 HP

Tabla 1.2 Máquinas Conectadas en el Cuadro QAC1.

1.5.1 Monitoreo en la Barra Principal de QAC1

En el monitoreo de la calidad de energía eléctrica en la barra principal QAC1 fue realizado en el lado de baja tensión (440v), por lo tanto los datos de corriente y tensión se encuentran referenciados a este nivel de tensión. Los datos obtenidos fueron medidos en un tiempo de 7 días seguidos, el tiempo de medición es lo suficientemente amplio y cumple con normas establecidas para el análisis de calidad.

En el análisis se han tomado en cuenta los datos con mayor variación en el tiempo, de tal manera que los resultados representen el escenario más crítico del comportamiento global. Se debe tener en cuenta que la conexión del transformador está conectado en triangulo, razón por la cual no existe neutro.

1.5.2 Análisis de Voltaje.

El nivel de voltaje tiene variaciones en el rango del $\pm 2\%$ del valor medio, en el 99% del tiempo de medición. Este valor se encuentra dentro de la normativa (5%). Una falla se registro al medir los valores máximos de voltaje como se en la tabla 1.3.

Hora	L12	L23	L31
9:01:2011	380.38	370.16	371.5

Tabla 1.3 Medición de Voltaje que incumple la norma

Sin embargo a pesar de que este valor incumplió la norma, es mínima su incidencia en la medición total.

1.5.3 Análisis de Frecuencia.

En los valores de frecuencia se mantiene entre rangos muy pequeños de variación. En la tabla 1.4 se aprecia los valores medidos

	L12	L23	L31
Mínimo	59.83	59.94	60.01
Máximo	59.99	60.03	60.03

Tabla 1.4 Medición de Frecuencia

1.5.4 Armónico de Voltaje

En lo que tiene que ver con el THD de voltaje la norma reguladora indica que no puede superar el 8% respecto al voltaje nominal del punto de medición. Para las mediciones que se realizaron en la barra principal, los armónicos de voltaje no incumplieron la norma. La tabla 1.5 detalla el valor máximo en porcentaje que se midió en la barra QAC1.

HORA	THD V L12	THD V L23	THD V L31	
	Max %	Max %	Max %	
9:01:45	6.38	6.53	6.82	

Tabla 1.5 Valores del THD de tensión máximo en la barra.

1.5.5 Armónicos de Corriente

Las mediciones de armónicos de corriente que se pudieron tomar resultaron incumplir la norma establecida con el Conelec, y el 100% del tiempo sobrepaso el valor límite. En la tabla 1.6 se detalla el valor más alto registrado.

Tabla 1.6 Valores del THD de corriente máximo en la barra.

HORA	THD A L12	THD A L23	THD A L31
	Max %	Max %	Max %
9:21:45	52.46	52	58.81

La figura 1.12 muestra el porcentaje armónico de la red.



Figura. 1.12 Porcentaje de THD total en la barra QAC.

Los valores de los armónicos múltiplos de la fundamental de igual manera se midieron, y se puede ver que el que más afecta a red es el 5^{to} armónico como se ve en la figura 1.13



Figura. 1.13 Porcentaje de armónicos en la barra QAC1.

1.5.6 Resultados.

Luego de realizar las mediciones y luego de su correspondiente análisis se llegaron a las siguientes recomendaciones:

- Los valores de variación de tensión se encuentran dentro de los parámetros aceptables, sin embargo es necesario evitar los transitorios producidos por fallas externas, debido a los dispositivos electrónicos o por el mal manejo de la corriente de carga.
- El THD de corriente promedio es del 16 % por lo que este valor es influyente en la red incumpliendo la norma. Cabe añadir que el armónico que mayor problema introduce a la red es el 5^{to} pues su valor esta sobre el 18%.

CAPITULO 2 2. FILTROS MULTINIVEL

2.1 Generalidades

En los últimos años la industria ha experimentado cambios con la conexión de nuevas cargas que tienen un comportamiento no lineal, con lo cual se ha incrementado la existencia de corrientes no senoidales en la red. Estas corrientes con elevado contenido armónico de traducen en trabajo útil y en la aparición de problemas en la red.

En la actualidad ya no es suficiente entender la energía activa, la energía reactiva y el factor de potencia de forma convencional ya que estos conceptos son validos solo cuando la onda de tensión y corriente son senoidales, por lo cual se hace necesario considerar la parte de la energía que no se traduce en potencia útil y que es debida a la presencia de formas de onda no senoidales, que no son otro cosa que los armónicos de voltaje y corriente.

Los principales generadores de armónicos se encuentran en aplicaciones de electrónica de potencia como son variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc., dichos generadores se encuentran principalmente en la automatización de procesos industriales. Es por eso que se hace necesario eliminar estas perturbaciones con la finalidad de mejorar la calidad de la energía, y así disminuir el riego de paras en la producción en el sector industrial, mediante la aplicación de filtros, capaces de eliminar armónicos de tensión y corriente; y a su vez mejorar el factor de potencia.

2.2 Convertidor Multinivel en CA

Los filtros activos constan de diferentes elementos eléctricos como es el tipo de almacenador de energía empleado, los dispositivos electrónicos de potencia que constituyen el inversor y de elementos pasivos utilizados en la conexión del inversor a la red [17].

2.2.1 Elementos para el almacenamiento de energía en continua.

Las configuraciones de los filtros activos de potencia disponen de elementos almacenadores de energía de tipo capacitivo. En este caso la energía disponible para la compensación se acumula 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.

Es importante mencionar que si bien la mayoría de los filtros activos de potencia utilizan condensadores, también se puede utilizar bobinas. En la figura 2.1 se muestra un filtro activo con un elemento inductivo. El problema de este tipo de topología es la imposibilidad de ser aplicada en esquemas de compensación multinivel.



Figura. 2.1: Filtro activo trifásico con al almacenamiento DC inductivo.

2.2.2 Dispositivos electrónicos de potencia.

En los filtros activos de potencia se pueden ocupar diversos tipos de dispositivos semiconductores. Los más utilizados en la actualidad son los transistores bipolares con puerta aislada (IGBTs) y los tiristores controlados de puerta aislada (IGCTs).

Las características que se deben tener en cuenta en un filtro son las del elemento almacenador de energía que se emplea, las frecuencias de conmutación máxima de trabajo y los valores máximos de $\frac{dV}{dt}$ y $\frac{dI}{dt}$ durante la compensación. Todas estas condiciones de trabajo del filtro determinarán las características de los dispositivos electrónicos de potencia empleados:

- Curva de operación segura
- Tensiones y corrientes máximas tanto en bloqueo como en saturación
- Características del circuito de control

2.3 Características de los Convertidores Multinivel.

2.3.1 Topologías Multinivel.

2.3.1.1 Inversores

Los inversores son utilizados en el control de motores, sistemas de alimentación ininterrumpibles, y en general en aplicaciones que necesitan de una tensión de salida en CA controlada. Los inversores también pueden ser utilizados para resolver problemas de distorsión en la red eléctrica como: contaminación armónica, mala regulación, bajo factor de potencia, etc [17].

Cada tipo de inversor, en sus variantes de medio puente y puente completo, utiliza dispositivos semiconductores de potencia para proporcionar la tensión deseada en la salida. En teoría en un inversor ideal, la salida debería ser una señal sin contenido armónico, sin embargo, en la práctica el contenido armónico dependerá en gran medida del tipo de control empleado en la generación de las señales de conmutación.

Entre las principales aplicaciones de los inversores están:

- Control de motores, donde la frecuencia y la tensión de salida deben ser variables.
- Sistemas de alimentación ininterrumpibles, donde la frecuencia y la tensión de salida son fijas.
- Filtros activos, para reproducir distorsiones en la red eléctrica y mejora la forma de onda de la tensión de línea.

2.3.1.2 Inversores Multinivel

Los inversores multinivel alimentados en tensión han surgido como una nueva opción de convertidor para aplicaciones de alta potencia como lo son los filtros activos. El inversor multinivel básicamente sintetiza una onda de tensión en varias tensiones de cd escalonadas.

Existen algunas topologías de inversores multinivel, pero se las puede agrupar en tres estructuras básicas:

- 1. Inversor multinivel de diodos de enclavamiento. (DCMLI)
- 2. Inversor multinivel de condensadores flotantes. (FCMLI)
- 3. Inversor multinivel de inversores en cascada. (CMLI)

Todas las topologías de inversores multinivel producen una forma de onda de salida similar, la cual está formada por escalones de tensión, proporcionando así una tensión de gran calidad y lo más parecido posible a la forma de onda que se pretende reproducir. En la figura 2.2 se puede apreciar una de salida típica de un inversor multinivel, en donde se puede observar que está formada por escalones de tensión.



Figura. 2.2: Tensión de salida de un inversor multinivel

Cabe mencionar que dependiendo del número de niveles que proporcione el inversor, el contenido armónico presente en la tensión de salida disminuye.

Entre las ventajas que presentan los inversores multinivel se incluye una caída de tensión de los dispositivos, menos que la presente en el bus de C.C ya que puede controlar en base al número de niveles del inversor multinivel, además, se puede trabajar a frecuencias de conmutación bajas. Con lo anterior se tienen menores pérdidas por conmutación en los dispositivos semiconductores, también, debido a que su salida está formada por niveles de tensión, el contenido armónico que resulta es bajo en comparación con los inversores convencionales que utilizan técnicas PWM.

Los inversores multinivel tienen una gran cantidad de aplicaciones, pero principalmente a la compensación de energía reactiva en sistemas de distribución de energía eléctrica, también apunta a las investigaciones sobre balanceo de la tensión en los condensadores en las topologías de diodos de enclavamiento y en la de condensadores flotantes, ya que es uno de los principales problemas que presentan.

El área de la calidad de la energía es un frente amplio para la aplicación de inversores multinivel, pues se usan como compensadores como se puede ver en la figura 2.3, en donde se lo aplica en un filtro activo de tensión monofásico.



Figura. 2.3: Filtro activo de tensión utilizando un inversor multinivel.

Donde:

- V_s es la tensión de línea.
- Z_s es la impedancia que presenta la red.
- I_s , I_L la corriente que demanda la carga no lineal.
- V_{sh} es la tensión de salida del inversor multinivel.

La figura 2.3 es una de las aplicaciones más comunes de los inversores multinivel. El funcionamiento se basa en reproducir perturbaciones eléctricas que contaminan la red, y por medio del filtro activo se inyectan en la red eléctrica con signo opuesto, eliminando distorsiones de tensión y entregando a la carga una señal lo más senoidal posible.

2.3.1.2.1 Inversores Multinivel de Diodos de Enclavamiento (DCMLI)

La función principal de un inversor multinivel de diodos de enclavamiento es sintetizar una onda sinusoidal a partir de varios niveles de tensión, habitualmente obtenida de condensadores que cumplen la función de fuentes de cc. Lo condensadores se conectan en serie para dividir la tensión, y de esta manera los dispositivos de potencia operan con una tensión menor entre terminales.

En la figura 2.4 se puede observar la topología de diodos de enclavamiento con una estructura monofásica, conformada por un inversor de 3 niveles. La salida de tensión se obtiene conectando la carga entre los puntos A y B formando un puente completo. Cabe decir que esta estructura puede extenderse a cualquier número de niveles, sin embargo su desventaja es el desbalance de tensión en el bus de cc.



Figura. 2.4: Inversor Multinivel de 3 niveles monofásico

En cambio en la figura 2.5 se puede observar la versión trifásica para un inversor multinivel de diodos de enclavamiento de 4 niveles. El número de niveles se define como el número de escalas de tensión que se obtiene entre una salida monofásica, A, B o C y el nivel de tierra. El inversor puede conectarse tanto en delta o estrella dependiendo de la aplicación que se lo requiera.



Figura. 2.5: Inversor Multinivel de 4 niveles trifásico.

Las características más significativas y que describen a la estructura son las siguientes:

- a) El esfuerzo en tensión de los dispositivos se balancea con el número de niveles, ya que la tensión que debe manejar cada dispositivo es menor.
- b) Debido a su principio de operación los diodos de enclavamiento de ésta pueden llegar a manejar la tensión de más de un nivel, aunque los interruptores principales sólo manejen la tensión de un solo nivel. Lo anterior provoca que se tenga que utilizar la conexión en serie de diodos para repartir las tensiones.
- c) Esta topología utiliza, en su versión trifásica, un mismo banco de condensadores para alimentar a las tres fases, lo cual hace que los condensadores deban ser de gran capacidad.
- d) Los diodos de enclavamiento permiten fijar los niveles de tensión en la salida.

Dentro de la topología es importante establecer una secuencia de conmutación tal que permita obtener a la salida las tensiones que se necesiten o se deseen experimentar. En la tabla 2.1 se muestra los distintos estados de conmutación que permite obtener los valores de tensión que proporciona el inversor multinivel de diodos de enclavamiento en una rama de 4 niveles. Para la versión trifásica los valores de la tabla son los mismos teniendo presente el desfase de 120° para cada fase. El punto de referencia en las tensiones se toma como la parte negativa de la tensión de alimentación de la rama.

Tensión de	Estado de conmutación					
salida Vsal	S1 +	S2+	S3+	S1-	S2-	S3-
Vcd	1	1	1	0	0	0
2/3Vcd	0	1	1	1	0	0
1/3Vcd	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1

Tabla. 2.1: Niveles de tensión en la salida para un inversor de 4 niveles

2.3.1.2.2 Inversores Multinivel de Condensadores flotantes (FCMLI)

Este tipo de topología es considerada la alternativa más cercana de la topología de diodos de enclavamiento. En este inversor multinivel, la salida puede expresarse como las posibles combinaciones de conexión de los condensadores de los que se compone. Su estructura es similar al DCMLI pero utiliza condensadores en lugar de diodos para establecer niveles de tensión.

En la figura 2.6 se detalla la estructura monofásica del inversor multinivel de condensadores flotantes en el cual se observa que no se necesitan de diodos extras para suministrar los niveles de tensión.



Fig. 2.6: Inversor multinivel de condensadores flotantes de 3 niveles

La estructura trifásica de un inversor de 4 niveles se puede apreciar en la figura 2.7 en la cual por medio de las conmutaciones adecuadas se proporciona a la salida la tensión presente en los condensadores, y la carga es conectada ya sea en delta o estrella entre los puntos A, B y C.



Figura. 2.7: Inversor multinivel de 4 niveles trifásico.

La ventaja de esta estructura es que no se necesita diodos de enclavamiento con la topología DCMLI. Esta topología limita de manera natural los dV/dt de los dispositivos e introduce más estados de conmutación que pueden ser usados para mantener balanceada la carga de los condensadores.

Las características más significativas y que describen a la estructura son las siguientes:

- a) Los condensadores ven un rizo de corriente a la frecuencia natural o mayor, dependiendo de la estrategia de modulación.
- b) Por su topología presenta un inconveniente al necesitar que los condensadores estén cargados previamente antes de funcionar como inversor, con lo cual se hace necesario tener una secuencia de arranque o utilizar un sistema externo para

monitorear la carga de los condensadores y mantenerlos en un nivel de tensión adecuado.

- c) El esfuerzo de tensión en los dispositivos se balancea con el número de niveles.
 Al aumentar el número de niveles de tensión que manejar cada dispositivo, disminuye el esfuerzo en cada uno.
- d) Presenta una variedad en combinaciones de conmutación en los dispositivos para una misma tensión de salida, permitiendo tener flexibilidad para mantener la carga en los condensadores.

La topología de esta estructura se puede analizar basándose en la figura 2.8 que es una parte de la estructura trifásica.



Figura. 2.8: Diagrama de una rama de FCMLI

La tabla 2.2 proporciona los estados de conmutación para los diferentes estados de conmutación. La cantidad de estados de conmutación redundantes aumenta conforme aumenta el número de niveles de inversor multinivel.

Tensión	Estado de conmutación					
de salida						
Vsal	S1 +	S2+	S3 +	S1-	S2-	S3-
Vcd	1	1	1	0	0	0
2/3Vcd	1	1	0	0	0	1
2/3Vcd	0	1	1	1	0	0
1/3 Vcd	0	0	1	1	1	0
1/3 Vcd	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	1	1

Tabla. 2.2: Niveles de tensión en la salida para FCMLI de 4 niveles y sus estados deconmutación.

2.3.1.2.3 Inversores Multinivel de Inversores en cascada (CMLI)

Una topología multinivel de inversores realiza la misma función que una topología DCMLI o una topología FCMLI. Genera una tensión senoidal a partir de distintas fuentes de CC, y sus estructura se basa en la conexión en cascada de inversores puente completo. Esta configuración es muy utilizada en aplicaciones en fuentes de CA y variadores de velocidad.

La estructura monofásica se la puede observar en la figura 2.9 con m niveles. Este inversor puede evitar el uso de diodos de enclavamiento o condensadores de balanceo de tensión. También, se puede obtener una mínima distorsión armónica al controlar los ángulos de disparo de los diferentes niveles de tensión. La figura 2.10 se muestra las posibles opciones de implementación dependiendo de la aplicación del inversor multinivel. La figura 2.10-a, corresponde a la aplicación en accionadores para motores, con la alimentación de tensión suministrada por una fase y se tienen fuentes de cc implementadas con rectificadores. La figura 2.10-b corresponde a una aplicación en compensadores de potencia y en donde sólo son utilizados condensadores, los cuales se cargan y se descargan utilizando los mismos inversores puente completo.



Figura. 2.9: Estructura monofásica para el inversor multinivel de inversores en cascada.



Figura. 2.10: Estructura monofásica de inversores en cascada de 7 niveles: a) para accionadores eléctricos, b) para compensadores.

Las configuraciones de la figura 2.10, muestra una fuente de cc por cada inversor del mismo valor de tensión, sin embargo, es posible emplear distintos valores de tensión de alimentación en los inversores individuales.

2.3.1.3 Aplicaciones de los Inversores Multinivel.

La aplicación de los inversores multinivel son principalmente las fuentes de A.C, compensadores de potencia activa – reactiva y accionadores para motores eléctricos. En general el campo de aplicación dependerá de la potencia y la tecnología de semiconductores que se pueden emplear como son:

- Inversores con GTO de 3kV (tracción, inducción, calentamiento)
- Inversores con IGBT y MOSFET desde 1000V (variadores de velocidad, troceadores a alta frecuencia)

Por sus características, los inversores multinivel son la mejor opción para aplicaciones de media y baja tensión, debido a la manera en que se distribuye la tensión en los dispositivos semiconductores, las bajas pérdidas por conmutación y el mínimo de contenido armónico en la tensión de salida. En la tabla 2.3 se pueden ver las diferentes aplicaciones para los inversores multinivel.

Diodos de	Condensadores Flotantes	Inversores en
Enclavamiento DCMLI	FCMLI	Cascada CMLI
Statom (Series Static VAR Compensator)	Vsi	Statcom
Asd (Adjustable Speed Drive)	Troceadores de Tensión	Asd
Facts (Flesible AC Transmision System)	Plc (Power Line Conditioner)	Vsi
Ssc (Static Synchronous Compensator)		Plc

Tabla. 2.3: Aplicaciones de los inversores multinivel

2.3.1.4 Técnicas de Modulación.

Las técnicas de modulación que utilizan las estructuras multinivel se las puede clasificar en cuatro categorías como son:

- Técnica Multipasos, escalera o conmutaciones a frecuencia fundamental
- Técnica PWM vectorial, (SVPMW)
- Técnica PWM senoidal basadas en portadoras (SPWM)
- Técnica PWM programado (SHEPWM)

En los inversores multinivel la técnica de modulación utilizada puede optimizar alguna característica en especial como son:

- La frecuencia de conmutación resultante
- La complejidad de implementación
- El espectro armónico de la forma de onda de salida
- El uso de estados redundantes de conmutación del inversor

2.3.1.4.1 Técnica de frecuencia fundamental

Esta técnica es muy útil para inversores multinivel, ya que utilizándola es posible obtener una salida de tensión con baja distorsión armónica (THD), sin utilizar filtro de salida. Debido a que los dispositivos semiconductores sólo conmutan una vez por ciclo se tienen pérdidas por conmutación en los dispositivos semiconductores, lo que da como resultado un nivel bajo de interferencia electromagnética.

En la figura 2.11 se puede observar la forma de onda típica de salida para un inversor multinivel de 9 niveles al cual se le aplica la técnica de frecuencia fundamental. Como se ve la tensión pico V_p que está formada por escalones de tensión de valor V_{cd} , la cual se obtiene de condenadores cargados a este valor de tensión.



Figura. 2.11: Tensión de salida de un multinivel de 9 niveles.

2.3.1.4.2 Técnica PWM vectorial

Un inversor multinivel es un sintetizador de tensión que genera su salida a base de niveles discretos de tensión de cd. La técnica PWM vectorial puede lograr hacer el mismo proceso que la topología de diodos de enclavamiento.

Esta técnica puede estudiarse basándose en el inversor de n niveles, con condensadores cargados a una tensión de V_{cd} como se puede ver en la figura 2.12, en el cual se especifican estados y vectores de conmutación.



Figura. 2.12: Diagrama de n niveles para inversor trifásico

Es importante distinguir entre estados de conmutación y vectores de conmutación, debido a que diferentes vectores de conmutación pueden implementarse con varios estados de conmutación. Los estados de conmutación y los vectores se incrementan rápidamente conforme el número de niveles aumenta. Con una gran cantidad de vectores o de estados de conmutación, se tiene un importante grado de libertad tanto para balancear la carga de los condensadores en el bus de cd como para optimizar el patrón de conmutación para proporcionar la tensión de salida.
Sin embargo, para un número grande de niveles, la dificultad de cálculo se incrementa, e incluso se vuelve inviable su implementación, es por esta razón que en topologías de diodos se utilizan por lo general convertidores con 3 niveles como máximo.

2.3.1.4.3 Técnica PWM multiportadoras.

Esta técnica hace uso de varias portadoras triangulares para general los patrones de conmutación. Las diferentes técnicas de modulación pueden clasificarse en:

- Métodos de disposición de portadoras (CDPWM), donde la onda de referencia es muestreada a través de un número determinado de portadoras, desplazadas en incrementos contiguos de la amplitud de la inda de referencia.
- Métodos PWM de corrimiento de fase (PSPWM), donde las múltiples portadoras están desfasadas
- Métodos híbridos (H) los cuales pueden considerarse como combinaciones de las anteriores.



Figura. 2.13: Técnica PWM multiportadora: a) Técnica PWM de corrimiento de fase, b), c) y d) variantes de técnica de disposición de portadora CD.

2.3.1.4.4 Técnica PWM programado.

Esta técnica proporciona teóricamente la máxima calidad en la tensión de salida entre los métodos PWM utilizando m ángulos de disparo en un cuarto de onda. En la figura 2.14 se puede observar la forma de onda típica de salida para un inversor multinivel de 7 nivles a l cual se le aplica esta técnica de modulación.



Figura. 2.14: Tensión de salida para PWM programado.

Cada escalón de tensión corresponde a la tensión de salida de un inversor puente completo y los ángulos de conmutación α_i se calculan para la eliminación de los armónicos de más bajo orden.

2.4 Análisis de los Filtros Multinivel.

Un filtro es un circuito que selecciona frecuencias en una banda especificada y que a su vez bloquea o atenúa señales con frecuencia fuera de la banda establecida. En forma general, dichas señales son voltajes. Los filtros que emplean elementos como capacitores, inductores y resistencias se denominan *filtros pasivos* y aquellos que ocupan las propiedades de amplificadores operacionales, resistencia y capacitores se denominan *filtros activos* [6].

Durante los últimos años los filtros activos han dado buenos resultados para resolver el problema de la distorsión armónica producido por cargas no lineales. Presentan una buena confiabilidad, pero poseen importantes pérdidas y requieren altos valores de filtros capacitivos en paralelo a las terminales de corriente alterna AC para eliminar las corrientes armónicas no deseadas.

2.4.1 Filtros Activos

Los filtros activos son dispositivos que han sido diseñados para mejorar la calidad de la energía eléctrica, específicamente la calidad de la forma de onda en la red de distribución de energía eléctrica.

Su funcionamiento está basado el controlar dispositivos de potencia que actúan como interruptores, direccionando la energía almacenada en un condensador para compensar o mitigar las perturbaciones existentes.

Las perturbaciones a ser compensadas están en función del tipo de control que se aplique al filtro activo, y de la configuración que tenga, pudiendo ser serie, paralelo o una combinación de los dos.

Los filtros activos se pueden clasificar en función del tipo de convertidor que ocupa, la topología y el número de fases [16].

2.4.1.1 Por el tipo de Convertidor

Cuando la energía es proporcionada por un condensador, el inversor cumple con el papel de fuente de tensión controlada (Voltage Source Converters, VCS), Figura 2.15 (a), en tanto que si la energía es almacenada en una bobina, el inversor se comportará como una fuente de intensidad controlada (Current Source Converters, CSC), Figura 2.15 (b).



(b) Tipo fuente de corriente

Figura. 2.15: Tipos de convertidores de potencia de un filtro activo

2.4.1.2 Por la Topología

Por la topología utilizada, los filtros activos pueden estar en conexión serie, paralelo o una combinación de las dos.

2.4.1.2.1 Filtro activo conexión paralelo

Un filtro activo paralelo funciona como una fuente de corriente dependiente e inyecta al sistema una corriente de compensación requerida por la carga no lineal, así el

sistema de potencia principal solo proporciona la componente fundamental de corriente y en fase con la respectiva tensión. Este tipo de filtros activos se recomienda para cargas del tipo inductivo, es decir, que se comporten como una fuente de corriente.

Algo que se debe tener en cuenta, es que la energía asociada a los armónicos es de carácter no activa, por lo que la potencia que requiere el filtro para su funcionamiento teóricamente cera cero, sin embargo se debe aportar una mínima potencia debido a las pérdidas ocasionadas por semiconductores, conductores, y elementos no ideales.

La conexión del filtro activo paralelo se lo puede hacer de forma directa teniendo en cuenta que el filtro debe poseer el asilamiento adecuado para el nivel de tensión en donde se va a conectar. La figura 2.16 muestra la configuración de un sistema con un filtro activo paralelo.



Figura. 2.16: Filtrado activo paralelo con fuente de alimentación

2.4.1.2.2 Filtro activo conexión serie.

Un filtro activo serie está diseñado para compensar los armónicos de voltaje que se encuentren en la señal de tensión. Este filtro se comporta como una fuente de tensión dependiente, que aísla a la red eléctrica y la carga cuando las frecuencias sean distintas a la frecuencia fundamental.

Este filtro se conecta en serie a la carga no lineal como se ve en la figura 2.17, mediante un transformador de distribución. La función principal de este filtro es generar una tensión de igual forma y magnitud que la perturbación pero desfasada 180°, de esta manera cuando la red esta distorsionada, la carga no se vea afectada por está. El filtro activo serie inyecta componentes de tensión en serie con el voltaje de alimentación y por lo tanto se convertiría en una fuente de tensión controlada que compensa picos y huecos de tensión en el lado de la carga.

Hay que destacar que el filtro al actuar como fuente de voltaje, aporta el valor necesario para hacer que la impedancia sea la adecuada según el contenido de armónicos de la carga. Algo a tener presente en este filtro es que se lo debe dimensionar de manera que soporte la corriente que consume la carga no lineal, y de igual forma debe tener las respectivas protecciones para evitar su destrucción en caso de un cortocircuito.



Figura. 2.17: Filtrado activo serie

2.4.1.2.3 Filtro activo conexión serie paralelo.

Un filtro activo de potencia serie paralelo o también llamado filtro activo de potencia universal, es la combinación de los filtros descritos anteriormente, en el cual el filtro paralelo elimina los armónicos de corriente y puede hacer la compensación de energía reactiva, en tanto el filtro serie realiza el desacople respecto a la red y puede realizar otras funciones, como compensación de flickers, desequilibrios y regulación de voltaje. La figura 2.18 muestra la configuración de este filtro.



Figura. 2.18: Filtrado activo serie paralelo

2.4.1.3 Por el Número de Fases

Dependiendo del sistema que se quiere compensar, se hace necesario que el filtro activo tenga el mismo número de fases. De igual manera la selección del número de fases es muy importante, ya que es la base para poder elegir el algoritmo de control que puede variar aún teniendo necesidades de compensación similares.

2.4.1.3.1 Filtro Activo Monofásico.

En un filtro activo monofásico la etapa de potencia consiste básicamente en un puente inversor VSI (Voltage Source Inverters) monofásico, y dependiendo de si se tiene acceso al punto medio de la batería de condensadores, se podrá implementar un filtro de dos ramas Fig. 2.19(a) o de una rama Fig. 2.19 (b) [17].



Figura.2.19: Filtro activo monofásico

2.4.1.3.2 Filtro Activo Trifásico.

Para un sistema trifásico equilibrado sin línea de neutro es común utilizar un filtro en cuya etapa de potencia tenga un puente inversor VSI trifásico de tres ramas Fig. 2.20



Figura.2.20: Filtro activo de tres ramas y tres hilos

Sin embargo, en el caso de que el sistema eléctrico posea la línea de neutro ya sea porque existe desequilibrio o no, se suele utilizar un inversor de cuatro ramas como se ve en la Fig. 2.21 (a) o de tres ramas en caso de ser posible una conexión al punto medio de la batería de condensadores como en la Fig. 2.21 (b).



(a) Cuatro ramas



(b) Tres ramas

Fig. 2.21: Filtro activo trifásico de cuatro hilos.

2.4.2 Control de un Filtro Activo en Paralelo

Para el control del filtro activo es necesario estructurar una estrategia que inyecte la corriente necesaria para compensar los armónicos generados por la carga no lineal y a su vez se evite la propagación por la red eléctrica [16].

En el control del filtro activo, son necesarios tres lazos de control muy relacionados entre sí. El primero calcula la corriente de referencia que debe inyectar el filtro, el segundo mantiene el voltaje de corriente continua en un valor que garantice el control del filtro y el tercero garantiza que el filtro siga la referencia deseada mediante señales de disparo al inversor. En la figura 2.22 se puede observar el control del filtro.



Figura. 2.22: Controles en un filtro activo, conexión paralelo

El primer control, es decir el que genera la corriente de referencia, se lo puede dividir en las siguientes categorías

- Teorías de Potencia.
- Algoritmos basados en fuentes 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 que suministrada esté en fase y tenga la misma forma de onda que la tensión aplicada.

Un segundo tipo de algoritmo, busca que el sistema eléctrico suministre una corriente sinusoidal pura para cualquier tipo de tensión que se le aplique. Para ello elimina de la señal de corriente todas las componentes distintas a la frecuencia fundamental. Dichos algoritmos pueden ser Fourier, Filtros resonantes, Filtros adaptativos, etc.

El objetivo central de esta tesis se centrará en el segundo tipo de algoritmo, ya que lo que se desea es eliminar los armónicos del sistema.

El segundo control será el control de tensión, que de ser necesario se puede aplicar control PI 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 como corriente de referencia $i_{Ref.}$

El tercer control, es decir el 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 una tensión constante del bus de continua. Para lograr esto, el sistema de control debe calcular la corriente de referencia que el filtro debe seguir, y luego debe estimar la corriente que debe inyectar el filtro, en el instante que actúan los IGBTs.

2.4.2.1 Estimación de la corriente de referencia.

La corriente de referencia es la que debe generar el filtro activo para poder corregir las perturbaciones originadas en la carga. La corriente de referencia para el filtro debe contener todas las componentes que hacen que la corriente de una carga se desvié de la ideal y se puede calcular de la siguiente manera:

$$i_{Ref}(t) = i_L(t) - i_{fund}(t)$$
 Ecuacion 2.1

Donde:

 i_{Ref} : corriente de referencia.

 i_L : corriente de la carga.

 i_{fund} : corrientes fundamental.

La corriente fundamental dependerá de lo que se desee mitigar. Lo importante es hacer un análisis armónico de la señal de corriente absorbida por la carga para compensar la distorsión de la forma de onda.

Para estimar la componente fundamental se puede utilizar algoritmos basados en la transformada de *Fourier*, filtros resonantes, filtros adaptativos, redes neuronales, etc.

2.4.2.2 Control de la tensión del bus de continua.

Si partimos del hecho de que el condensador tiene un intercambio nulo de potencia activa con la red, la tensión del condensador no debería cambiar en su estado estable. Sin embargo en la práctica, el filtro activo tiene pérdidas inherentes a su funcionamiento, como son las de conmutación de los semiconductores, lo que hará que la tensión del bus de continua puede disminuir.

Para poder compensar las pérdidas y mantener la tensión del bus de continua en el valor preestablecido, la corriente ideal que circulará por el sistema deberá modificarse para suministrar la potencia de pérdidas demandada por el filtro activo. Dado que la relación entre el error de tensión y potencia de pérdidas, ΔP_{dc} es desconocida, se puede ocupar un controlador PI para su estimación.

El análisis principal del control nace del balance energético entre la energía $\omega_{Ref.}$ requerida para mantener la tensión de referencia, y la energía almacenada en el condensador ω_{dc} , es decir:

$$\omega_{Ref} = \frac{1}{2} C_{dc} U_{Ref}^2 \qquad ; \qquad \omega_{dc} = \frac{1}{2} C_{dc} u_{dc}^2(t) \qquad Ecuation 2.2$$

Dónde:

 C_{dc} : valor de la capacitancia equivalente en el lado de CC. $u_{dc}(t)$: tensión medida en el condensador. U_{Ref} : valor de referencia de la tensión.

Y, considerando la energía de pérdidas como:

$$\Delta \omega = \frac{C_{dc}}{2} \left[U_{Ref}^2 - u_{dc}^2(t) \right]$$
$$= \frac{C_{dc}}{2} \left[U_{Ref} - u_{dc}(t) \right] \left[U_{Ref} - u_{dc}(t) \right] \qquad Ecuation 2.3$$

Teniendo en cuenta que la variación de tensiones es mínima, el término $[U_{Ref} + u_{dc}(t)]$ se lo puede aproximar a:

$$\left[U_{Ref} + u_{dc}(t)\right] \approx 2U_{Ref} \qquad Ecuacion 2.4$$

En tal caso, la ecuación de energía de pérdidas $\Delta \omega$, tendrá asociada la siguiente aproximación:

$$\Delta \omega \approx C_{dc} U_{Ref} [U_{Ref} - u_{dc}(t)] \qquad Ecuacion 2.5$$

Manipulando la ecuación 3.5, y teniendo en cuenta que la energía almacenada en un ciclo es igual a la potencia multiplicada por el período, T, obtenemos:

$$\Delta P_{dc} \approx \frac{C_{dc} U_{Ref}}{T} \left[U_{Ref} - u_{dc}(t) \right] \qquad Ecuacion 2.6$$

2.4.2.3 Calculo de la corriente de referencia.

El cálculo de la corriente de referencia para la compensación es una de las funciones básicas que se debe realizar para parta un FAP. El método que se seleccione para este fin debe establecer sus características durante toda la compensación.

Este elemento debe calcular los valores instantáneos de la corriente que se vaya a inyectar de forma que la misma se compense con la componente no activa de la corriente de la carga.

A continuación se muestran los métodos de cálculo de la corriente no activa de la carga más empleados en sistemas trifásicos.

2.4.2.3.1 Transformada de Fourier

Se trata de un método de compensación en el dominio de la frecuencia basado en la transformada de Fourier.



Figura .2.23 Controlador basado en la Transformada de Fourier.

Donde se adquieren N muestras de la corriente i_L que correspondan a periodos de la frecuencia fundamental, donde se puede realizar la transformada de Fourier sobre el total de las muestras obteniendo la magnitud de las componentes fundamentales de la señal y sus respectivos desfases con respecto el inicio de la adquisición de las muestras.

Una vez que se obtengan las magnitudes de los armónicos que se encuentran presentes dentro de la corriente de carga el controlador debe filtrar los mismos y realizar la transformada inversa, para de este modo, se generen nuevos valores de cada uno de los armónicos seleccionados y de esta manera la suma de estos corresponde a la corriente de referencia de compensación.

2.4.2.4 Control de la Corriente de Inyección.

Los distintos métodos de inyección de corriente de un FAP, pueden plantearse como un problema, dado que las distintas conmutaciones que existen en los dispositivos electrónicos de potencia que se encuentran dentro del FAP, se producen a muy altas frecuencias en comparación con las señales de referencia para la inyección, se puede analizarse su comportamiento mediante su linealizacion a baja frecuencia. Las técnicas de control y modulación que se presentan a continuación se basan en ese planteamiento.

2.4.2.4.1 Control por Histéresis.

Este tipo de modulación presenta la característica de generar la señal de control para el FAP y su modulación de forma simultánea, además de eso este tipo de control no necesita un controlador de tipo PWM ya que la señal que generada por el controlador por Histéresis solo toma valores de 1, 0 [14].

Este tipo de control de conmutación se basa en medir la señal a controlar y compararla con una señal de referencia, para el filtrado de armónicos se trata de una señal de corriente.

El error generado por este controlador depende directamente del valor de la ventana de h que es generada, si el error que se genera entre la referencia y la media supera un cierto umbral ^+h , la banda correspondiente del inversor cambia su estado de conmutación para que cambiando la polaridad de la tensión aplicada, se modifique la trayectoria de la intensidad y así hacer que el error entre dentro de los parámetros establecidos dentro del control.

Una de las principales ventajas que presenta este método es su simplicidad. Y entre sus principales inconvenientes se encuentra en el rizado de la intensidad depende tanto de la banda h como de la frecuencia de trabajo, inversa del tiempo del ciclo T_s .

Cuando mayor sea la frecuencia y menor la banda de histéresis, mas sinusoidal será la corriente obtenida.

2.4.2.4.2 Control Proporcional-Integral PI.

Este regulador se utiliza para calcular las señales que se encuentran dentro del control del inversor para poder seguir la corriente de referencia. Una vez calculadas las señales las mismas son sintetizadas usando la técnica de control PWM [14].

Donde el controlador queda definido por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$
 Ecuacion 2.7

Donde el valor de K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral y ambos valores son ajustables de acuerdo al sistema a controlar. Donde el tiempo integral regula la accion del control integral, mientras que una modificacion de K_p afecta tanto a la parte integral como a la proporcional. T_i recibe el nombre de frecuencia de reposicion y se asocia a las repeticiones de la accion proporcional.

En este tipo de controlador donde la senal proporcional al error se suma a la senal proporcional ala integral del error obteniendose la senal de control del inversor.por otra parte este controlador permite mantener estacionaria la salida cuando el error alcanza un valor de 0.

2.4.2.4.3 Control de Tiempo de Establecimiento finito o de tiempo muerto (Deatbeat).

Este tipo de controlador está diseñado para realizar un control discreto en el tiempo. El cual tiene como objetivo obtener un error nulo de régimen permanente con un

número de periodos de muestreos mínimos alcanzando el estado estacionario en n+1 muestras, siendo n el orden del sistema.

Se considera un sistema lineal caracterizado por la siguiente ecuación:

$$[1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}] y(k)$$

= $[b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}] u(k)$ Ecuacion 2.8

Donde $n \le m$ y z^{-1} representa el operador de retardo unitario.

Se define una función J, asociada al error de seguimiento de la señal de referencia:

$$J = [y(k) - y_{Ref}(K)]^{2} \qquad Ecuacion 2.9$$

Se observa que para que la función J asociada al error de seguimiento sea mínima, la señal a controlar debe ser tal que en el instante k alcance a la señal de referencia, y teniendo en cuenta que en el instante k la salida debe ser igual a la referencia [5].

2.4.2.4.4 Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea PQ.

Esta teoría está basada en un enfoque vectorial de un sistema trifásico y se usa la transformación propuesta por CLARKE para pasar del dominio de a-b-c al dominio α - β -0 y viceversa [19].

Esta teoría fue desarrollada inicialmente para sistemas trifásicos sin neutro, haciendo uso de los vectores espaciales instantáneos para definir el sistema trifásico en un sistema de dos ejes ortogonales, denominados α - β , que definen completamente el sistema trifásico.

La potencia instantánea de un sistema trifásico se puede definir como:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \qquad Ecuacion \ 2.10$$

Como un nuevo concepto, Akagi, Kanazawa y Nabae, definieron un vector espacial, denominado *potencia imaginaria instantánea*, como producto vectorial de tensiones y corrientes, del siguiente modo teniendo en cuenta que los ejes α y β son perpendiculares se puede decir que la potencia imaginaria instantánea q, tiene la expresión [25]:

$$q = v_{\alpha}i_{\beta} - v_{\beta}i_{\alpha} \qquad \qquad Ecuacion \ 2.11$$

Este vector está situado en un eje perpendicular al plano α - β y consta de dos sumandos, que son el producto vectorial de la tensión según un eje por la corriente según el otro eje. En una representación gráfica estos productos son vectores cuya dirección es perpendicular al plano formado por los ejes α - β y de sentido contrario, tal como se representa en la figura.



Figura. 2.24. Representación espacial de la potencia imaginaria instantánea

Las potencias instantáneas también se puede expresar de forma matricial. La dimensión de la potencia instantánea p, suma los 2 productos de magnitudes instantáneas en el mismo eje, es el vatio (w). Sin embargo no existe una dimensión eléctrica para la potencia imaginaria instantánea.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \qquad Ecuacion 2.12$$

Los sumandos $p_{\alpha q}$ y $p_{\beta q}$ tienen el mismo valor y signo contrario, se cancelan mutuamente y no contribuyen a la transferencia de potencia instantánea entre la fuente y la carga. Por ello a esos términos se les llama *potencia reactiva instantánea* y puede considerarse que es una potencia que circula entre las fases y no entre la fuente y la carga, como parecería lógico. Además para su compensación no es necesario disponer de ningún sistema de almacenamiento de energía.

El concepto de la *potencia reactiva instantánea*, que no hay que confundir con la *potencia imaginaria instantánea*, es en realidad el más importante aportado por la teoría introducida por Akagi y otros [25]

CAPITULO 3 3. DISEÑO DEL FILTRO MULTINIVEL.

3.1 Selección del modelo basado en los datos obtenidos del Grupo Cartopel-Cuenca

En base al estudio de calidad de energía llevado a cabo en Cartopel y con lo investigado en el Capitulo 2 sobre Filtros Multinivel se va a utilizar un modelo de filtro activo de potencia en configuración paralelo debido a que necesitamos compensar corriente y enfocarnos en los armónicos de corriente en especial a los de orden 5^{to}, y 7^{mo} que son los que presentan mayor porcentaje de de distorsión.

Como el cuadro QAC1 suministra energía a 13 máquinas, cada una de diferente potencia y característica, centraremos el diseño y simulación para una carga no lineal a la cual variaremos el ángulo de disparo para modificar su corriente de carga.

3.2 Diseño del Filtro

3.2.1 Software de Simulación

En este capítulo se hará uso del SIMULINK. Dicho programa maneja un entorno de programación visual, llegando a ser una herramienta para simular modelos o sistemas con un grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Es empleado arduamente en Ingeniería Eléctrica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), telecomunicaciones, sistemas de control, entre otros.

Simulink, en este caso, nos permite verificar los resultados producto de un estudio teórico, el análisis del filtro activo de potencia con sus diferentes niveles, la topología propuesta y su diseño. Dentro de este programa se detalla los modelos de IGBT, elementos pasivos, bloques de control y tratamiento de las señales.

CAPITULO 3. DISEÑO DEL FILTRO MULTINIVEL. 2012



Figura. 3.1: Filtro activo de Potencia monofásico implementado en Simulink.

3.2.2 Modelo del Sistema de Potencia

Para esta etapa se ha considerado un sistema de distribución secundario que contenga características lo más cercanas a la realidad. Para esto hemos tomado el sistema monofásico para el inicio de la explicación, este sistema, principalmente consiste en una fuente monofásica con su respectiva impedancia y carga [24].

3.2.2.1 Estructura de la Red Monofásica

La red de alimentación se considera con neutro, senoidal y balanceada, con sus respectivas impedancias, no presenta modificaciones en los parámetros de magnitud, ángulo de fase e impedancia para la carga empleada.

La carga no lineal a compensar esta basada en un rectificador monofásico, y en la Figura (3.2), se puede ver el circuito en Simulink para su compensación. En este esquema se puede observar claramente los subsistemas de potencia y de control. A continuación se detallan estos:

- Fuente de alimentación.
- Carga no lineal.

- Filtro activo (Condensador, bobina de acoplamiento e inversor).
- Generación de referencia.
- Control de tensión.
- Control de corriente.



Figura. 3.2: Filtro activo de Potencia monofásico

3.2.2.1.1 Generación de la Corriente de Referencia

El problema en la generación de la corriente de referencia es en sí mismo el elemento de más cuidado en el diseño e implementación del filtro, debido a que este sistema depende directamente del funcionamiento adecuado del filtro.

Al momento de generar la corriente de compensación monofásica, es necesario tener en cuenta dos factores. Uno la compensación de las corrientes armónicas y el otro, la compensación de la energía reactiva [20].

Para cumplir con el objetivo de la compensación, la corriente de referencia o corriente que debe inyectar el filtro activo $i_{ref}(t)$ debe ser igual en cada instante de tiempo a:

$$i_{ref}(t) = i_L(t) - i_{fund}(t)$$
 Ecuacion 3.1

En la Figura 3.3 arriba, la corriente que debe inyectar el filtro activo, abajo, se puede observar la corriente que demanda la carga no lineal, al aplicar la Ecuación 3.1.



Figura. 3.3: Corriente que debe inyectar el filtro activo, y la corriente que demanda la carga no lineal.

A partir de la corriente de carga, se extrae la información necesaria para producir una referencia con los armónicos de corriente. Esta referencia sirve para actuar sobre la etapa de potencia del filtro.

3.2.2.1.1.1 Obtención de la Corriente Fundamental

Las expresiones de tensión e intensidad instantáneas en los sistemas eléctricos se pueden descomponer como una suma de sus infinitos armónicos, el cual incluye el fundamental:

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{\infty} V_k \sin(kwt + \theta_k)$$
 Ecuacion 3.2

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{\infty} I_k \sin(kwt + \phi_k) \qquad Ecuation 3.3$$

En las ecuaciones (3.2), (3.3) k representa el número de armónicos (incluyendo la componente fundamental), mientras que $V_k e I_k$ representan en valor eficaz de las componentes incluyendo los valores delas componentes fundamentales. A continuación se muestran los valores eficaces de la tensión e intensidad:

$$V = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} V_k^2} \quad I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} \quad Ecuacion 3.4$$

Esto se da a partir de la corriente de carga, ya que de esta se extrae una referencia que involucre la informacion correspondiente as las armonicas, la corriente reactiva fundamental y el desbalance de las cargas, sin presentar un desfasamiento significativo debido al procesamiento de la senal.



Figura. 3.4: Generación de la Corriente de Referencia

El propósito del filtro activo a utilizar es compensar las corrientes armónicas de la corriente de la carga i_L , con lo cual, solo la componente, $i_{fund}(t)$ de frecuencia fundamental de 60 Hz deberá circular por el sistema eléctrico. Para ello se define la corriente de referencia como aquella corriente que debe inyectar el filtro activo y cuyo valor es igual a la diferencia entre la corriente de carga i_L y la corriente fundamenta, i_{fund} como se mostró en la ecuación (3.1).



Figura. 3.5: Simulación de la Corriente Fundamental

3.2.2.1.2 Cálculo de la Inductancia de Acoplamiento

El valor de esta inductancia está relacionado con el máximo rizado de corriente presente en la conversión.

Este inductor sirve como enlace para inyectar la corriente de compensación a la carga, para valores pequeños del inductor L_f el filtro será capaz de seguir la señal de referencia de compensación con mayor facilidad, pero debido a la baja inductancia esto crea que el rizo de corriente debido a la frecuencia de conmutación del filtro sea elevado. Y lo contrario sucedería si el valor del inductor L_f es mayor el rizo de la corriente del filtro se menor, pero no podrá seguir con facilidad la señal de referencia [24].

El valor de la inductancia se determina de las ecuaciones estáticas que se definen a continuación:

$$L\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = v_i \qquad \qquad Ecuacion \ 3.5$$

Y considerando el tiempo de encendido de los interruptores:

$$L = \frac{v_i \delta T_s}{\Delta i_L} \qquad Ecuacion 3.6$$

El circuito del filtro está conformado por un condensador que se requiere para el intercambio de energía con la red, dispositivos de conmutación del tipo IGBT conectados en paralelo, y una inductancia por fase entre el filtro y la red.



Figura. 3.6: Configuración interna de los IGBT en el sistema monofásico

3.2.2.1.3 Cálculo de la Tensión en los Condensadores

Las configuraciones del FAP mostradas disponen de dispositivos almacenadores de energía de tipo capacitivo. En este caso la energía disponible para la compensación de energía se almacena en un condensador, pudiendo establecer el nivel de energía del filtro activo de potencia mediante la medida de la tensión de continua.

Para esto se debe tener en cuenta que la tensión en los condensadores del filtro activo debe ser superior a la tensión pico de la red. Esta es una condición necesaria para poder garantizar la inyección de la corriente de compensación de forma continua.

Esta capacitancia tiene una gran influencia en la tensión de rizado y su necesidad se supone de la estabilidad que proporciona sobre el control de seguimiento de corriente puesto que el condensador opera como fuente de energía para 2 modos de operación [2].

De esta manera considerando que la corriente fluyera libremente de la inductancia al capacitor se tendría:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \qquad Ecuacion 3.7$$

Dónde:

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_L dt \qquad Ecuacion \ 3.8$$

Donde i_L es la corriente de compensación demandada por el filtro.

Suponiendo una variación en la corriente de la red de un 25%, su valor pico en función de su valor nominal es:

$$V_{con} = 1.25(\sqrt{2} * V_L) \qquad Ecuacion 3.9$$

Finalmente el valor expresado en la ecuación (3.2) se puede tener la tensión máxima que pueden soportar los interruptores. Ya que en el filtro, cuando Q_1 esta encendido y Q_2 se encuentra apagado y viceversa (fig. 3.4) al valor del voltaje del condensador se le agrega un valor de seguridad del 25%, por lo tanto el valor que debe soportar los interruptores es de:

$$V_{IGBT} = 1.25 * V_{con}$$
 Ecuacion 3.10



Figura. 3.7: comportamiento de carga y descarga del Capacitor



Figura. 3.8: Control de carga y descarga del Capacitor

3.2.2.1.4 Cálculo de la Corriente de Compensación

Como ya se dijo anteriormente la corriente eficaz de compensación sirve para determinar la potencia del filtro activo, pero no para conocer su capacidad máxima de compensación, para eso es necesario conocer el valor pico de la corriente de compensación la cual es totalmente distinta de la corriente eficaz.

Para determinar dicha corriente se puede proceder de 2 formas, la primera utilizando el simulador o la segunda mediante la siguiente ecuación:

$$I_{Pmax} = \frac{\sqrt{2} * P}{3 * V_L} \qquad Ecuacion 3.11$$

Dónde:

P = Potencia nominal de la carga

 V_L = Tensión de la línea de la red

 I_{Pmax} = Corriente pico máxima de la carga

3.2.2.2 Conmutación para los Estados Posibles del FAP

Para lograr los distintos estados en la conmutación se utilizan interruptores que dependen de la capacidad de corte de corriente, de la frecuencia de conmutación y del nivel de aislamiento de tensión. Y dado que estos elementos tienen la característica de ser rápidos a costa de un menor dimensionamiento en tensión y corriente, se debe buscar

un compromiso entre la frecuencia de conmutación a utilizar y la capacidad de corte y de aislamiento que se requiera [25].

Para nuestra aplicación hemos aplicado la tecnología de las IGBTs de marca SEMIKRON, que según el fabricante puede utilizarse en aplicaciones que demanden el dimensionamiento antes mencionado.

Para ello se tomaron en cuenta las características del IGBT de la marca SEMIKRON del modelo SEMIX402GAL066HDs, el cual cuenta con las siguientes características:

Tabla. 3.1: Características técnicas del IGBT SEMIX402GAL066HDs

	IGBT	
i _C	502	А
i _{Cnom}	400	А
$V_{CE(sat)}$	1.45	V
E_{on}	22	mJ
E_{off}	24	mJ
R_{th}	0.12	K/W
R _{th}	0.12 DIODE	K/W
R _{th} I _f	0.12 DIODE 543	K/W A
R_{th} I_f V_f	0.12 DIODE 543 1.4	K/W A V
R_{th} I_f V_f E_{rr}	0.12 DIODE 543 1.4 10	K/W A V mJ

Además de las características técnicas hay que tomar en cuenta los distintos valores de la frecuencia de conmutación para lo cual hemos tomado como referencia la misma marca de IGBTs antes mencionados, y sus valores se muestran a continuación:

Tensión	Frecuencia	de
(V)	conmutación	
600	Hasta 30kHz	
1200	Hasta 20kHz	
1700	Hasta 10kHz	
3300	Hasta 3kHz	

Tabla. 3.2: frecuencia de conmutación típica de los IGBTs

El modelo de conmutación ideal para un FAP de 2 niveles en la que la tensión de salida de cada rama se obtiene conectando los distintos interruptores de manera que se puede seguir de la manera más exacta a la corriente se referencia.

Para no cortocircuitar la fuente de tensión (condensadores) y no abrir la fuente de corriente (inductancia) se debe cumplir con ciertas restricciones que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla. 3.3: Conmutación típica de los IGBTs para un FAP de un nivel

V _{ab}	Q1	Q2	Q3	Q4
0	1	0	1	0
V_{ab}	1	0	0	1
0	1	0	1	0
$-V_{ab}$	0	1	1	0
0	1	0	1	0

3.2.2.1 Uso de un Puente IGBT

La utilización de los puentes a base de IGBTs, trae consigo una serie de mejoras en comparación a los distintos rectificadores formados por dispositivos de control de fase. Los rectificadores que emplean IGBT permiten tanto la rectificación como la generación, pero hacen posible controlar el nivel de CD y el factor de potencia del desplazamiento sin tener en cuenta la dirección del flujo de potencia.

Además el puente de IGBT presenta un modo seguro de funcionamiento, en caso de una posible ausencia del flujo de tensión. También se presentan como una buena herramienta para la mitigación de armónicos ya que los IGBT, a baja distorsión armónica generada en la corriente de línea. Para bajas frecuencias de conmutación, el IGBT genera una baja carga armónica. Esta carga armónica se incrementa a medida que aumenta la frecuencia de conmutación del dispositivo.

Para ello la capacidad de establecimiento de voltaje, en casa de una tensión de suministro inferior a la nominal, la tensión del bus de CD se mantiene estabilizada para mantener la tensión del accionamiento superior a la de alimentación.

3.2.2.2 Estructura de la Carga

Para la evaluación del filtro se han tomado como referencia cargas electrónicas del tipo trifásico, lo que crea una carga equilibrada no lineal.

A diferencia de los convertidores monofásicos, los convertidores electrónicos trifásicos no generan corrientes armónicas múltiplo de 3. Esta es una gran ventaja, porque la potencia en estos sistemas suele ser superior a las aplicaciones monofásicas, y la presencia de corrientes armónicas de tan bajo orden presenta un problema muy complejo. Sin embargo, estos esquemas todavía pueden introducir corrientes armónicas de valor significativo debido a sus características de frecuencia.

Las corrientes armónicas características generadas por rectificadores controlados o no controlados son en función del número de pulsos del convertidor. Los armónicos que se generan están dados por [2]:

Armónicas de secuencia positiva:

$$n = rk + 1$$
 Ecuacion 3.12

90

Armónicas de secuencia negativa:

$$n = rk - 1$$
 Ecuacion 3.13

r= factor dependiente del tipo de convertidor

k= 1, 2, 3, 4,....

Donde r=3 para un rectificador trifásico, y las armónicas que se presentaran serán 5°, 7°, 11°, 13°, 17°, 19°, 23°, *etc*

La amplitud de las corrientes armónicas depende de la aplicación que tenga el rectificador o si es controlado o no. En general, la descomposición de la onda de corriente en armónicas depende de la exactitud con que se represente dicha onda.

Para fines de estudio global como se presenta aquí, se puede hablar básicamente de convertidores con salida de corriente o con salida de voltaje.

Los rectificadores con salida de corriente se emplean para controladores de velocidad de motores en corriente directa. Mientras que los rectificadores con salida de voltaje se emplean en variadores de velocidad de motores de corriente alterna con inversores alimentados en tensión.

3.2.3 Control de la Corriente de Inyección

El control de la corriente de inyección en un FAP puede plantearse como un problema no lineal, dado que las conmutaciones de los dispositivos electrónicos de potencia del FAP se producen a muy altas frecuencia en comparación con las señales de referencia para la inyección, se puede analizar su comportamiento mediante su linealizacion a baja frecuencia.

3.2.3.1 Control por Histéresis de Corriente

Este tipo de método es ampliamente utilizado en el filtrado activo de corriente. Su principal característica es que la generación de una señal de referencia y su modulación se realiza simultáneamente. Entre sus mayores ventajas se encuentra su

2012

sencilla estructura, estabilidad a variaciones en la carga y simplicidad en la implementación. La principal desventaja que presenta es que la frecuencia de conmutación varía durante un periodo de la fundamental, resultando a veces en una operación irregular del filtro y aumentando las perdidas por conmutación.

En el control por histéresis, las corrientes inyectadas por el filtro al sistema de potencia son censadas y comparadas de forma instantánea con las corrientes de referencia. La señal de error resultante e(t) es aplicada a un circuito comparador de histéresis de amplitud fija que, dependiendo del ancho de la banda de histéresis y del valor instantáneo de la señal de error, genera los pulsos de activación de los dispositivos semiconductores del filtro. Así, mientras que la desviación de la corriente inyectada en el sistema respecto a la corriente de referencia no supere el ancho de la banda de histéresis el filtro mantiene el estado de conmutación [14].

La banda de histéresis se mantiene constante en todo el periodo de operación. Su modelo matemático está dado por las siguientes ecuaciones:

 $i_{ref} = i_c$ Ecuacion 3.14

$$i_{up} = i_{ref} + HB$$
 Ecuacion 3.15

$$i_{lo} = i_{ref} - HB$$
 Ecuacion 3.16

El ancho de banda AB esta dado por:

$$AB = i_{up} - i_{lo} \qquad Ecuacion 3.17$$

$$AB = 2HB$$
 Ecuacion 3.18

Donde :

 i_{up} : Banda superior o limite superior.

 i_{lo} : Banda inferior o limite inferior

 i_{ref} : corriente de compensacion.

3.2.3.2 Control PI

Se trata de una de las alternativas más empleadas en FAP debido a su extendida utilización en el área de regulación en general y a la relativa sencillez de su estructura, independientemente del software en que se realice.

Este tipo de controladores pertenece a la categoría de los controladores llamados lineales, los cuales buscan generar la tensión necesaria mediante técnicas de modulación de ancho de pulso.

La diferencia de este controlador con los llamados lineales, radica en la forma en la que se calcula la tensión del FAP. Para ello, se utiliza el error de corriente, entre la corriente generada por los filtro, i_f , y la corriente de referencia i_{ref} , como entrada de un controlador PI.

Las ganancias del PI se ajustan para que la salida sea justo la tensión del FAP. Un problema típico en este tipo de controladores radica que este tipo de controlador es la saturación del integrador [14].

Esta situación se produce cuando el error i_e permanece durante un tiempo considerable en relación a la constante de tiempo del integrador ocasionando la falla del controlador. La solución a este problema pasa por la limitación a la salida del integrador.

La figura 3.11 muestra un PI analógico con el control de saturación constituido por 2 diodos zener en el bloque integrador.



Figura. 3.9: Controlador PI analógico con control de saturación.

La aplicación del PI a las estructuras del control de la inyección resulta apropiada en el caso del marco de referencia rotatorio y síncrono pero, en los casos restantes, puede originarse errores estacionarios en la compensación.

Aun en el primer caso, su aplicación para la compensación en sistemas desequilibrados resulta compleja ya que precisa realizar la segunda transformación al marco rotatorio para que el controlador opere sobre las componentes de secuencia negativa. Una alternativa para eliminar el error estacionario en la compensación es la utilización de integradores generalizados. Estos permiten integrar la amplitud de la señal de error en el marco de referencia estacionario corrigiendo el error estacionario en la convencional.

Entre sus características se destaca la capacidad de operar incluso en condiciones de desequilibrio y su complejidad cuando la corriente de referencia para la compensación presenta varios armónicos.

3.2.3.3 Control PWM

El control mediante el PWM modula el voltaje por ancho de pulso, lo que hace que el voltaje de salida no sea perfectamente sinusoidal y se mueva bruscamente, generando variaciones en el tiempo [24]. Esto puede causar problemas en las aislaciones, y en caso de los motores, producir danos en los rodamientos.

Para aplicaciones de gran capacidad de filtrado de una carga de gran potencia se puede utilizar cierto número de filtros activos conectados en paralelo, donde uno funciona como maestro y los demás como esclavos. El uso de varios FAP permitirá distintas frecuencias de conmutación y una disminución en las perdidas y problemas ocasionados por la conmutación.

3.3 Simulación y Resultados

A continuación se mostrara la simulación del modelo del filtro activo en paralelo desarrollado para la mitigación de armónicos en un sistema de potencia con cargas no

lineales. Para la simulación de este filtro se utilizaron valores que se indican en la tabla 3.4

Tabla. 3.4: Valores de los Elementos de la Fuente y la Carga no Lineal

Descripción	Elemento	Valor
Fuente monofásica de entrada	V_L	220v
Inductancia de la fuente	L_f	76μΗ
Resistencia de la fuente	R_f	$1 m\Omega$
Resistencia de encendido del rectificador	<i>R_{rectif}</i>	1mΩ
Inductancia de la carga	L _c	100mH
Resistencia de la carga	R_c	10Ω
Voltaje de la carga en DC	V_c	270v
Corriente de la carga en DC	i _c	15 A
Corriente fundamental de entrada	i _{fund}	14A

Pero además de estos hay que tener en cuenta los valores de los distintos elementos que se van a emplear en nuestro FAP, como la resistencia de acoplamiento entre el FAP y la fuente de energía, ya que como se indicó anteriormente este valor es esencial para el correcto funcionamiento del FAP, en lo que se refiere al seguimiento de las corrientes de referencia y la relación de energía almacenada en los condensadores.

A continuación en la tabla 3.5 se detallan todos los valores de los elementos que se emplearon para la simulación de nuestro FAP
Descripción	Elemento	Valor
	R _s	100e3 Ω
Entrada del filtro	R _{on}	1mΩ
	C _{IGBT}	2μF
	L _{IGBT}	1µH
Inductancia de	L _{acop}	3.3µH
Acople		
Condensador etapa 1	<i>C</i> ₁	8000µF
Condensador etapa 2	C_2	8000µF

Tabla. 3.5: Componentes del FAP

Para verificar lo que se explicó anteriormente se realizó la simulación del FAP en MATLAB haciendo uso de las herramientas de Simulink, dentro del cual se tomó los modelos disponibles de IGBT, los elementos pasivos, los bloques de control y tratamiento de señales.

A continuación se muestra el modelo desarrollado de un filtro activo de potencia en paralelo para la mitigación de armónicos en sistemas de potencia. El FAP desarrollado posee los valores indicados en las tablas 3.3 y 3.4. CAPITULO 3. DISEÑO DEL FILTRO MULTINIVEL. 2012



Figura. 3.10: Filtro Activo de Potencia desarrollado para la mitigación de armónicos.

A continuación se presentaran los resultados de las simulaciones del filtro, lo que nos permitirá estimar el comportamiento en la mitigación de los distintos armónicos que se encuentran dentro de la red.

3.3.1 Etapa de Potencia del FAP

Esta etapa ha sido construida para la simulación con el modelo de IGBT/DIODO que se encuentra disponible en el Simulink, configurando 4 elementos en puente.

Los elementos pasivos conectados en el puente de lado de DC el condensador y de lado de AC la corriente de acople, la resistencia colocada en paralelo con el conversor es una resistencia de auto descarga, que permite conservar la estabilidad del mismo.

En la figura 3.11 de muestra en detalle la construcción de la etapa de potencia del FAP, con los elementos antes descritos.



Figura. 3.11: Etapa de potencia del filtro activo

3.3.2 Sistema de Control

El sistema de control está compuesto de varias etapas, la primera extrae la componente fundamental de la corriente de la carga, la segunda extrae la componente real de corriente de la carga, la tercera se encarga del control de lógica para los interruptores del puente de IGBT, la cuarta se encarga de la detección de los semiciclos de corriente y la última etapa se encarga del control automático y el PWM. La señal de control obtenida, es entregada al modulador PWM, en donde se genera la conmutación de alta frecuencia del conversor.

En la figura 3.12 se muestra el controlador con sus respectivas características.



Figura. 3.12: Etapa de control del FAP

3.3.3 Representación de la Carga no Lineal

La carga no lineal empleada es un rectificador monofásico controlado, acompañado de una componente resistiva que permite desarrollar el factor de potencia deteriorado en función del desplazamiento de las fases y en consecuencia la circulación de energía reactiva a la frecuencia fundamental, y fuentes de corriente sinusoidal configuradas en paralelo con la carga lineal.

2012



Figura. 3.13: Carga no lineal utilizada para la simulación

3.3.4 Simulaciones del Filtro Activo de Potencia para un Sistema Monofásico

De acuerdo con la implementación lograda y mostrada en la figura 3.10 se propone obtener las corrientes de referencia del sistema monofásico.

En consecuencia la compensación de la corriente de distorsión, sobre las fases, deberá conducir a la compensación del sistema monofásico. En la figura 3.13 se puede observar las referencias generadas en la simulación.



Figura. 3.13: a) Corriente consumida por la carga b) Corriente de referencia generada

3.3.4.1 Seguimiento de la Corriente de Referencia

Se puede apreciar claramente en la figura 3.14 que el sistema realiza el seguimiento adecuado de la señal de referencia y además responde con suficiente rapidez a los cambios producidos por el ingreso de nuevas componentes de la compensación.



Fig. 3.14: Seguimiento de la corriente de referencia

3.3.4.2 Control de Carga de los Condensadores

Dentro de nuestras simulaciones los capacitores realizan la función, la cual es proporcionar una disminución en el rizado de la tensión.

Por otra parte, al igual que las fuentes conmutadas, de acuerdo con la capacitancia del condensador, se podrán asumir sin variaciones considerables los transitorios de energía de cada ciclo del filtro.

La figura 3.15 se muestra el comportamiento que tienen los capacitores al momento de carga y descarga, para la compensación de la corriente en la carga.

2012



Figura. 3.15: Comportamiento de carga y descarga en los condensadores

Sin embargo, la capacitancia no se puede tomar valores demasiados altos, para intentar lograr rizados muy bajos, ya que se introduce retardos considerables en el sistema que pueden impedir la acción oportuna de los controladores y producir inestabilidades.

Cuando se produce algún tipo de desviación en los parámetros de la compensación, es la tensión en DC la que por su diferencia del valor esperado indique la presencia de un error de compensación.



Figura. 3.16: Error en la compensación

Sin embargo este fenómeno no es degenerativo y puede ser usado como retroalimentación del control en forma repetitiva, para que el error no se salga de los parámetros previamente establecidos.

3.3.5 Compensación de la Corriente

El filtro activo que se desarrolló, tiene la capacidad de compensar la potencia de distorsión asociada con las componentes armónicas de la corriente de frecuencia fundamental.

El filtrado garantiza que la corriente suministrada por la fuente tenga la misma forma de la tensión, y de esta manera se asegura la mínima distorsión. La simulación de funcionamiento del sistema sin compensación permite apreciar la distorsión introducida por componentes armónicas en la forma de la señal de corriente.



Fig. 3.17: Voltaje y Corriente sin compensación

En la tabla 3.5 se presentan los valores introducidos a las variables para el efecto de la simulación. La figura 3.17 en la parte superior se muestra la forma de onda del voltaje suministrado por la fuente sin compensar, mientras que en la parte inferior se aprecia la corriente que entrega la fuente sin compensar.

Por otra parte si se aumenta los niveles de corriente exigidos por la carga no lineal el diseño presentado mostrara un aumento en la distorsión.

3.3.5.1 Corriente de Compensación del FAP

Como se vio anteriormente los armónicos generados por la carga no lineal aplicada para esta simulación, crean que la forma de onda se distorsione en gran

103

2012

medida. Al ejecutar el filtro dentro de nuestro sistema monofásico, se puede apreciar la disminución de los armónicos que se encontraban presentes dentro de la corriente de la fuente. En la figura 3.18 se puede apreciar la diminución de las componentes armónicas.

Dado que la señal de compensación resulta de la sumatoria de los diferentes armónicos presentes en la red, es posible que a condiciones extremas se produzca la adición de pendientes positivas en regiones específicas de la señal que superen el seguimiento establecido por el FAP



Fig. 3.18: Corriente de la fuente compensada

Se puede notar claramente la mejora en la distorsión que presentaba la corriente sin el FAP, en la siguiente figura se puede apreciar claramente cómo se comportan las corrientes con y sin el FAP.



Fig. 3.19: Comparación entre la corriente compensada y sin compensar

3.3.5.2 Compensación de los Armónicos de Corriente

Una de los principales objetivos que tiene el filtro es la compensación de los armónicos que se encuentren presentes dentro de la corriente que son causados por la integración de una carga no lineal al sistema.

A continuación se mostrará en porcentaje los armónicos que genera la carga no lineal utilizada para nuestra simulación (rectificador monofásico controlado).



Fig. 3.20: Armónicos generados por la carga no lineal sin compensar

Sin embargo las formas comunes de las corrientes con alto contenido no lineal, presentan sus consumos más significativos generalmente en cercanías al pico de la tensión de la red debido a que allí se produce la recarga de los capacitores.

Ya con la colocación del filtro se consiguió que los armónicos que se encontraban dentro de la red tuvieran una significativa disminución como se presenta en la figura 3.21



Fig. 3.21: Armónicos generados por la carga no lineal compensados

Debido a que no se tiene la velocidad de respuesta requerida las formas de onda que se mostraron en la figura 3.19, tienden a tener picos en su forma de onda, por lo que la compensación de los armónicos no se reduce en su totalidad.

3.3.6 Red Trifásica

La red que se va a tener en consideración los mismos parámetros que ya se mencionaron en la estructura monofásica, lo que nos permite distinguirlas de las cargas empleadas. Además de esto este sistema puede disponer de 3 o 4 ramas dependiendo si el sistema consta o no con un neutro. En las figura 3.22 se muestra la representación de la red trifásica que está dentro de nuestras simulaciones.



Fig. 3.22 Red Trifásica para la Simulación

En este caso el sistema presenta 3 o 4 ramas dependiendo de si el punto de conexión que tiene 3 o 4 hilos.

El esquema utilizado para la compensación en este proyecto corresponde a filtros activos en conexión paralela con la carga, de modo que su comportamiento es similar a una fuente de corriente lineal, que inyecta en el punto de conexión de la carga las corrientes necesarias para atenuar la distorsión de la red [19].

Se ha tenido en cuenta para la simulación estructuras del convertidor de potencia en redes trifásicas sin neutro.

La red trifásica se va a presentar con más detalle en el capítulo siguiente donde se demostrara con la variación en los tipos de carga la eficacia que se puede llegar a tener con el modelo del filtro presentado anteriormente.

CAPITULO 4 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de Resultados Obtenidos en Base al modelo de Simulación.

Una vez que se simulo el sistema monofásico, vamos a migrar a un sistema trifásico en donde se empezara por describir las cargas que se van a simular, y luego se simularan las mismas cargas pero con la adición del filtro activo en paralelo.

4.1.1 Descripción de Cargas a Simular.

Para poder probar el filtro multinivel de dos etapas, se procedió a la simulación con tres cargas de prueba. En una primera parte se simularan las cargas no lineales con tres ángulos de disparo. De dicho proceso se sustraerá la corriente de carga, la corriente y voltaje de red, y la cantidad de armónicos que dicha carga introduce al sistema.

4.1.2 Simulación de Cargas no Lineales sin Filtro

Las cargas no lineales fueron extraídas de [22]. Para la prueba se escogieron dichas cargas pues son los circuitos más opados en aplicaciones industriales, de manera especial en variadores de frecuencia, con potencias desde fraccionarias hasta niveles de megavatios.

4.1.2.1 Convertidor Trifásico de Media Onda

Los convertidores trifásicos son de gran utilidad pues suministran un valor de voltaje de salida más alto en comparación con un convertidor monofásico. Son ampliamente utilizados en variadores de frecuencia de alta potencia. En la figura 4.1 se muestra su configuración de esta carga en un modelo SIMULINK.



Fig. 4.1 Convertidor Trifásico de Media Onda con Generador de Angulo de Disparo.

Para variar la corriente de carga, se procedió a disparar a tres ángulos diferentes.

4.1.2.1.1 Simulación de Carga no Lineal 1 a 45°.

En este caso, se simulo un ángulo de 45° para variar la corriente de carga, obteniendo las siguientes gráficas.



Fig. 4.2 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 45°.

Como se puede observar en la figura 4.2, la corriente de la red e encuentra distorsionada producto de la carga ni lineal que se emplea.

Mediante el uso de la herramienta FFT Analysis Tool, se puedo generar la grafica de armónicos que posee la corriente de Red. En la figura 4.3 se observa el orden armónico y su porcentaje. Es importante detallar que su THD total alcanza un 69.83%.



Fig. 4.3 Orden Armónico generado para un ángulo de 45°

En la tabla 4.1 se detalla los armónicos que superan el límite establecido por la Regulación del Conelec – 004/01 [3], en la cual se establece que incumplen la norma aquellos armónicos superen el 8%.

Tabla 4.1 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
45°	100%	60%	19%	12%	15%	7%	8%	9%	4%	5%	6%	3%	4%	5%

4.1.2.1.2 Simulación de Carga no Lineal 1 a 90°.

El ángulo de disparo se modifico a 90° con lo cual la características de la forma de onda de corriente se modifican como se puede observar en la Fig. 4.4.



Fig. 4.4. Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 90°.

La generación de armónicos con este ángulo de disparo se observa en la figura 4.5. Su THD se incremento a 114.14% debido a que al variar el ángulo de disparo, la corriente de la red se modifico, perdiendo su forma senoidal. Los armónicos que incumplen la norma se detallan en la tabla 4.2.



Fig. 4.5 Orden Armónico generado para un ángulo de 90°.

Tabla. 4.2 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	H3	H4	Н5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
90°	100%	81%	55%	31%	18%	19%	18%	14%	11%	11%	11%	10%	8%	8%

4.1.2.1.3 Simulación de Carga no Lineal 1 a 135°.

Para un ángulo de 135°, la corriente de carga de la red ha perdido su característica senoidal, como se observa en la figura 4.6.



Fig. 4.6 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 135°.

Los componentes armónicos que la FFT del Simulink se muestra en la Fig. 4.7. Se debe tener presente que según aumenta el ángulo de disparó, la corriente de la red presenta mayor variación de su componente fundamental, y por ende su componente armónica aumenta a un nivel de THD igual a 198,62%.



Fig. 4.7 Orden Armónico generado para un ángulo de 135°.

En la tabla 4.3 se puede observar que la mayoría de armónicos incumplen con el límite establecido del 8%.

Tabla. 4.3 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
90°	100%	95%	87%	77%	66%	54%	42%	32%	25%	22%	21%	21%	21%	20%

4.1.2.2 Semiconvertidor Trifásico

Un semiconvertidor trifásico es ampliamente utilizado a nivel industrial pues maneja niveles de potencia hasta de 120Kw, en los que se requiere de una operación de un solo cuadrante. A medida que aumenta el ángulo de retraso se reduce el factor de potencia de este convertidor. [22]

En la figura 4.8 se esquematiza esta carga no lineal, en un modelado Simulink.



Fig. 4.8 Semiconvertidor Trifásico con Generador de Angulo de Disparo.

De igual manera para variar la forma de onda de la carga y a su vez modificar la corriente de la red, se procedió a variar el ángulo de disparo.

4.1.2.2.1 Simulación de Carga no Lineal 2 a 45°.

Como se lo hizo para la primera carga no lineal, se repetirá la simulación variando el ángulo de disparo. En este caso de evaluara al circuito con 45°. La figura 4.9 enseña el comportamiento que tiene tanto el voltaje como la corriente de la red.



Fig. 4.9 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 45[°]

La figura 4.10 brinda el porcentaje armónico que se genera producto de la carga no lineal y a su vez se observa el THD de 34.07%.



Fig. 4.10 Orden Armónico generado para un ángulo de 45°

La tabla 4.4 muestra los armónicos que sobrepasan el límite del 8% después del cual los armónicos causan daño a la red.

Tabla 4.4 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
45°	100%	13%	0%	12%	20%	0%	5%	11%	0%	8%	2%	0%	2%	7%

4.1.2.2.2 Simulación de Carga no Lineal 2 a 90°.

Con la ayuda del Simulink se obtuvo la grafica de voltaje y corriente de la red ocupando la carga no lineal 2, disparada a un ángulo de 90° como se muestra en la Figura 4.11.



Fig. 4.11 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 90°

La figura 4.12 nos informa sobre el nivel de armónicos que posee la red, con un THD de 73.66%. En la tabla 4.5 se ha marcado de color los armónicos que sobrepasan el límite establecido según normas de calidad.



Fig. 4.12 Orden Armónico generado para un ángulo de 90°.

Tabla 4.5 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
90°	100%	67%	0%	13%	17%	0%	8%	9%	0%	6%	7%	0%	5%	5%

4.1.2.2.3 Simulación de Carga no Lineal 2 a 135°.

Un tercer ángulo de disparo es simulado con el fin de probar que corriente genera la carga no lineal 2 al ser disparado a un ángulo de 135° como se ve en la figura 4.13.



Fig. 4.13 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 135°.

La Figura 4.14 muestra que el THD aumento a 112.96%, producto de la deformación de la forma de onda de la corriente de la red.



Fig. 4.14 Orden Armónico generado para un ángulo de 135°.

La tabla 4.6 se muestra que la totalidad de armónicos están incumpliendo la norma.



Ang.	H1	H2	Н3	H4	Н5	H6	H7	H8	Н9	H10	H11	H12	H13	H14
135°	100%	87%	2%	47%	28%	1%	20%	19%	2%	15%	11%	2%	12%	10%

4.1.2.3 Convertidor Trifásico Completo.

El convertido trifásico completo es sin duda el más utilizado en aplicaciones en el campo industrial. Puede manejar potencias hasta de 220 kW, en las que se requieren de una operación en dos cuadrantes. La figura 4.15 muestra el esquema plasmado en el Simulink.



Fig. 4.15 Convertidor Trifásico Completo con Generador de Angulo de Disparo.

4.1.2.3.1 Simulación de Carga no Lineal 3 a 30°.

Para simular el convertidor Trifásico completo, se empieza por simular un primer ángulo de 30°. Las curvas características de este circuito se ven en la Figura 4.16.



Fig. 4.16 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 30°

Para conocer el porcentaje de armónicos en la corriente de la red, nos valimos del FFT Analysis Tool, obteniendo una información de un THD igual a 72.74% como se ve en la Figura 4.17.



Fig. 4.17 Orden Armónico generado para un ángulo de 30°.

En la tabla 4.7 se observa los porcentajes de armónicos generados, se marcan aquellos que incumplen la norma permitida.

Tabla 4.7 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	Н3	H4	Н5	H6	H7	H8	Н9	H10	H11	H12	H13	H14
30°	100%	66%	0%	13%	16%	0%	8%	9%	0%	6%	6%	0%	5%	5%

4.1.2.3.2 Simulación de Carga no Lineal 3 a 60°.

Para conocer la corriente de red generada por la carga no lineal 3 a un ángulo de disparo de 60° se simulo la carga obteniendo la figura 4.18.



Fig. 4.18 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 60°.

La figura 4.19 esquematiza el porcentaje armónico que posee la red. Su THD aumenta a 95.61% al aumentar el ángulo de disparo.



Fig. 4.19 Orden Armónico generado para un ángulo de 60°.

En tabla 4.8 se pueden observar los armónicos generados. Se debe tener presente que los de mayor incidencia son los de orden 2° , 4° , 5° y 7° .

Tabla 4.8 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec

Ang.	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
60°	100%	81%	0%	31%	18%	0%	18%	14%	0%	11%	11%	0%	8%	8%

4.1.2.3.3 Simulación de Carga no Lineal 3 a 90°.

Para terminar las simulaciones del convertidor trifásico completo, se procedió a probar la carga no lineal con un ángulo de 90°. Los resultados se ven en la figura 4.20.



Fig. 4.20 Voltaje y Corriente de la Red Disparada a 90°.



La figura 4.21 enseña los armónicos de corriente con un THD de 133.81%.

Fig. 4.21 Orden Armónico generado para un ángulo de 90°.

Por ultimo en la tabla 4.9 se puede observar los armónicos de mayor problema que se da en la corriente de la red producto de la carga no lineal 3.

Tabla 4.9 Armónicos que incumplen la norma de Regulación del Conelec.

Ang.	H1	H2	Н3	H4	H5	H6	H7	H8	Н9	H10	H11	H12	H13	H14
60°	100%	91%	0%	63%	47%	0%	23%	20%	0%	20%	19%	0%	13%	12%

4.1.3 Simulación de Cargas no Lineales con Filtro.

Para poder entender el funcionamiento del filtro multinivel se procederá a simular con los mismos ángulos que se lo hizo para las cargas no lineales. En este caso el objetivo principal es verificar el funcionamiento del filtro y en qué medida disminuye el contenido armónico en la red. La simulación conlleva un análisis conjunto del sistema de control, para saber que tan eficaz se vuelve el filtro ante cargas variantes. De igual forma se analiza el beneficio de usar una o dos etapas, y el control que conlleva la carga de los condensadores.

4.1.3.1 Aplicación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico de Media Onda.

Para simular este proceso se implemento el filtro en la carga no lineal antes descrita. La figura 4.22 muestra el circuito en el Simulink.



Fig. 4.22 Implementación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico de Media Onda.

Como se puede apreciar en la figura, el sistema consta de una fuente trifásica que brinda un voltaje eficaz de 220v a 60 Hz. El Filtro está conectado en configuración estrella y adicionalmente posee un generador de pulsos en el cuál se puede elegir el ángulo de disparó para variar la forma de onda de la corriente de carga y a su vez la corriente de la Red.

4.1.3.1.1 Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 45°, 90° y 135°.

En el caso de la implementación del filtro activo se generan varias graficas de análisis, puesto que al aplicar un sistema de control se deben tener en cuenta variables como corriente, voltaje en condensadores, tiempos de respuesta y armónicos generados.

4.1.3.1.1.1 Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A.

En las grafica 4.23, 4.24 y 4.25 se pueden observar las corrientes calculadas y las corrientes de compensación generada por el sistema de potencia. Como se pueden ver las graficas son muy similares, por lo que la corriente de compensación es efectiva para los requerimientos del sistema.



Fig. 4.23 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 45°.



Fig. 4.24 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 90°.



Fig. 4.25 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 135°.

4.1.3.1.1.2 Corriente de Salida, de Compensación y de Carga ante la Variación del Ángulo de Disparo.

Como producto de la simulación, de igual forma se obtuvo las gráficas de corriente de la fase A, las cuales se aprecian en la Figura 4.26, 4.27, 4.28. La primera corriente es producto de la compensación que lleva a cabo el filtro activo. Como se puede ver, es muy semejante a una senoidal pura.



Fig. 4.26. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 45°.



Fig. 4.27. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 90°.



Fig. 4.28. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 135°

4.1.3.1.1.3 Curvas de Carga de Condensadores.

El sistema cuenta con dos condensadores, los cuales son los encargados de inyectar la corriente necesaria al momento que lo solicite el controlador. Dichos condensadores deben mantenerse en un nivel de carga estable en caso de necesitar una corriente de compensación alta. El estado de los condensadores controlados se los puede ver en la figura 4.29, 4.30, y 4.31 disparado cada uno a 45°, 90° y 135° respectivamente.



Fig. 4.29 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2, Disparado a 45°.



Fig. 4.30 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2, Disparado a 90°.



Fig. 4.31 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2, Disparado a 135°

4.1.3.1.1.4 Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido Armónico.

Una vez simulado el sistema, se puede observa la corriente trifásica compensada que el filtro entrega a la Red. En las gráficas 4.32, 4.33 y 4.34 se observan las corrientes resultantes, con su respectivo ángulo de disparo.



Fig. 4.32. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 45°.



Fig. 4.33. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 90°.



Fig. 4.34. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 135°.

4.1.3.1.1.5 Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo.

El objetivo principal del filtro activo es tratar de mejorar en lo posible la corriente de la Red y hacerla lo más senoidal posible. Producto de este proceso se logra disminuir el contenido armónico. Para poder entender de mejor manera se va a comparar mediante el uso de gráficos el contenido armónico que poseía la red antes de aplicar un filtro activo en la grafica 4.35 y luego de ser utilizado como se ve en la gráfica 4.36.



Fig. 4.35 Orden Armónico de la Carga no lineal Sin Filtro.



Fig. 4.36 Orden Armónico de la Carga no lineal Con Filtro.

4.1.3.2 Aplicación del Filtro Activo a un Semiconvertidor Trifásico.

El esquema de un semiconvertidor trifásico con la implementación de un filtro activo de potencia se lo puede ver en la figura 4.37.

CAPITULO 4ANÁLISIS DE RESULTADOS 2012



Fig. 4.37 Implementación del Filtro Activo a un Semiconvertidor Trifásico.

Para entender su funcionamiento, curvas de corriente y sistema de control se va a someter al circuito trifásico a una simulación variando su ángulo de disparo.

4.1.3.2.1 Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 45°, 90° y 135°.

Se va a simular al circuito trifásico, variando los ángulos a 45°, 90° y 135° y así obtener las gráficas que nos darán la lectura del comportamiento del filtro, ante la variación de la corriente de carga.

4.1.3.2.1.1 Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A.

En las figuras 4.38, 4.39, y 4.40 se puede observar el trabajo que realiza el controlador al calcular la corriente de referencia y disparar los IGBTs para generar la corriente de compensación.
CAPITULO 4ANÁLISIS DE RESULTADOS 2012



Fig. 4.38 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 45°.



Fig. 4.39 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 90°.



Fig. 4.40 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 135°.

4.1.3.2.1.2 Corriente de Salida, de Compensación y de Carga ante la Variación del Ángulo de Disparo.

Las figuras 4.41, 4.42 y 4.43 enseñan las corrientes resultantes luego de la simulación. La primera es la corriente de Red resultante de la compensación realizada por el filtro, la segunda la corriente de compensación y la tercera la corriente de carga.



Fig. 4.41. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 45°.



Fig. 4.42. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 90°.



Fig. 4.43. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 135°.

4.1.3.2.1.3 Curvas de Carga de Condensadores.

En lo que tiene que ver con la gráfica del control de los condensadores, se ha simulado variando los ángulos, y en los tres casos no han variado sus características por lo que la figura 4.44 representa a las tres situaciones.



Fig. 4.44 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2.

4.1.3.2.1.4 Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido Armónico.

La simulo la corriente de la red para las tres variantes, dando como resultado las figuras 4.45, 4.46 y 4.47, en donde se observa la forma senoidal obtenida.



Fig. 4.45. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 45°.



Fig. 4.46. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 90°.



Fig. 4.47. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 135°.

4.1.3.2.1.5 Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo.

En la figura 4.48 se puede apreciar el contenido armónico que posee el sistema al no contar con un filtro activo y en la figura 4.49 se muestra el contenido armónico de la red luego de la aplicación del filtro. Como se puede ver, la disminución de armónicos es sustancial.



Fig. 4.48 Orden Armónico de la Carga no lineal Sin Filtro.



Fig. 4.49 Orden Armónico de la Carga no lineal Con Filtro.

4.1.3.3 Aplicación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico Completo.

El esquema de un convertidor trifásico con la implementación de un filtro activo de potencia se lo puede ver en la figura 4.50.



Fig. 4.50 Implementación del Filtro Activo a un Convertidor Trifásico Completo.

4.1.3.3.1 Simulación del Filtro Variando el Ángulo a 30°, 60° y 90°.

Como se realizo para las cargas no lineales anteriores, se va a simular el circuito variando los ángulos de disparo el convertidor trifásico completo. A continuación se detallan mediante graficas los resultados obtenidos.

4.1.3.3.1.1 Corriente de Referencia y Compensación de la Fase A.

En las figuras 4.51, 4.52, y 4.53 se observan las corrientes de referencia y las corrientes de compensación, variando sus ángulos de disparo para cada carga no lineal.



Fig. 4.51 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 30°.



Fig. 4.52 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 60°.



Fig. 4.53 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 90°.

4.1.3.3.1.2 Corriente de salida, de Compensación y de Carga ante la Variación del Ángulo de Disparo.

Las corrientes de la red, corriente de compensación y corriente de la carga no lineal a sus diferentes ángulos de disparo se pueden ver en las figuras 4.54, 4.55, y 4.56.



Fig. 4.54. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 30°.



Fig. 4.55. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 60°.



Fig. 4.56. Generación de Corrientes de Red, Compensación y Carga a 90°.

4.1.3.3.1.3 Curvas de Carga de Condensadores.

Las curvas del control de carga los condensadores se pueden ver en las figuras 4.57, 4.58 y 4.59. De igual forma se hace el análisis variando los tres ángulos de disparo.

CAPITULO 4ANÁLISIS DE RESULTADOS 2012



Fig. 4.57 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2 a ángulo de 30°.



Fig. 4.58 Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2 a ángulo de 60°.



Fig. 4.59. Referencia de Condensadores, Control de Condensador 1, Control de Condensador 2 a ángulo de 90°.

4.1.3.3.1.4 Corriente Trifásica Compensada por el Filtro y Contenido Armónico.

Las gráficas 4.60, 4.61 y 4.62 muestran la corriente de salida que se genera producto de la aplicación del filtro. De igual manera que en casos anteriores, se simulo con los tres ángulos de disparo.



Fig. 4.60. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 30°.



Fig. 4.61. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 60°.



Fig. 4.62. Corriente De Red Resultante al aplicar el filtro activo, disparado con un ángulo de 90°.

4.1.3.3.1.5 Contenido Armónico antes y después del Filtro Activo.

La simulación del convertido trifásico completo nos entrego los resultados del contenido armónico que posee la red. En las Figuras 4.63 y 4.64 se realiza la comparación del antes y el después de la implementación del filtro.



Fig. 4.63 Orden Armónico de la Carga no lineal Sin Filtro.



Fig. 4.64 Orden Armónico de la Carga no lineal Con Filtro.

4.2 Ventajas y Desventajas de la utilización de un filtro multinivel de dos etapas.

4.2.1 Comparación entre Utilizar una Etapa y dos Etapas

La ventaja de utilizar un sistema multinivel es que se puede incrementar la magnitud del voltaje de salida pues se utilizan dos condensadores al mismo tiempo, con lo cual se aumenta el rendimiento del filtro haciendo mas rápido, se reduce el contenido armónico de corriente de salida, y sobre todo permite disminuir la frecuencia de conmutación soportada por los semiconductores, es decir se logra alargar la vida útil de los componentes de potencia.

Se simulo el sistema con una y dos etapas para demostrar que la efectividad de utilizar 5 niveles en vez de 3 niveles.

4.2.1.1 Simulación de Convertidor Trifásico de Media Onda Aplicando una y dos Etapas.

Para la demostración se tomo un ángulo cualquiera de disparo, en este caso fue de 30°. En la figura 4.65 se puede ver la corriente de referencia y la corriente de compensación con una sola etapa, y en la figura 4.66 aplicamos dos etapas.

CAPITULO 4ANÁLISIS DE RESULTADOS 2012



Fig. 4.65 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 30° con una etapa.



Fig. 4.66 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 30° con dos etapas.

Como se puede ver en las gráficas, al utilizar dos etapas, la corriente de compensación en la figura 4.66 es más rápida. En la tabla 4.10 se puede observar el tiempo que le lleva al sistema de potencia generar la corriente de compensación.

Tabla 4.10 Tiempo de generación de la corriente de compensación.

	T inicial (seg)	T final (seg)	Tiempo utilizado (ms)
1 Etapa	0,2028	0,2031	0,3
2 Etapas	0,2028	0,2029	0,1

4.2.1.2 Simulación del Semiconvertidor Trifásico aplicando una y dos Etapas.

De igual manera se simulo la segunda carga no lineal con un ángulo de prueba de 90° y con una y dos etapas, con lo cual se generaron las figuras 4.67 y 4.68 como se ve a continuación.



Fig. 4.67 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 90° con una etapa.



Fig. 4.68 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 90° con dos etapas.

Los tiempos que cada etapa ocupa en seguir la corriente de referencia se ven en la tabla 4.11.

	T inicial (seg)	T final (seg)	Tiempo utilizado (ms)
1 Etapa	0,4931	0,4935	0,4
2 Etapas	0,4931	0,4933	0,2

Tabla 4.11 Tiempo de generación de la corriente de compensación.

4.2.1.3 Simulación del Convertidor Trifásico completo aplicando una y dos Etapas.

Para esta simulación se tomo un ángulo de disparo de 45° y de igual manera se probo con una y dos etapas como se ve en las figuras 4.69 y 4.70.



Fig. 4.69 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 45° con una etapa.



Fig. 4.70 Corriente de Compensación y Corriente de Referencia a 45° con dos etapas.

La tabla 4.12 muestra el tiempo que se demora en formar la corriente de compensación el sistema de potencia.

Tabla 4.12 Tiempo de generación de la corriente de compensación

	T incial (seg)	T final (seg)	Tiempo utilizado (ms)
1 Etapa	0,6076	0,6078	0,2
2 Etapas	0,6076	0,6077	0,1

4.2.2 Medición del Factor de Potencia en Cargas No Lineales con y sin Filtro.

Para concluir nuestras simulaciones, es de suma importancia conocer el factor de potencia que presentan las cargas no lineales antes y después de someterse al sistema de filtrado propuesto.

4.2.2.1 Factor de Potencia obtenido para el Convertido Trifásico de Media Onda con y sin Filtro.

La principal problemática del sector industrial radica en la penalización por el factor de potencia, ya que la empresa que suministra el servicio energético en nuestro país limita esté índice hasta mínimo 0.92, es decir valores inferiores son multados, y hablando a nivel industrial, dichas multas están en el orden de miles.

En la figura 4.71 se puede observar el factor de potencia que se obtiene al simular el circuito. Se tomo un ángulo de prueba de 60° .



Fig. 4.71 Factor de Potencia de la Carga no lineal sin Filtro.

Como se observa, el factor de potencia es oscilante, manteniéndose entre 0 y 1 debido a la carga no lineal. En la figura 4.72 se muestra la simulación de la mis carga no lineal pero implementado el filtro activo.



Fig. 4.72 Factor de Potencia de la Carga no lineal Con Filtro.

Como se puede observar en la figura 4.72 el factor de potencia obtenido oscila entre 0.75 y 1, lo cual resulta aceptable a comparación con su gráfica en donde la carga no lineal no tiene filtro. Esto sin duda es beneficioso pues al mejorar el factor de potencia, disminuimos sutancialmente la penalización.

4.2.2.2 Factor de Potencia obtenido para el Semiconvertidor Trifásico con y sin Filtro.

Como se realizo para la carga no lineal anterior, el factor de potencia obtenido de simular el semiconvertidor trifásico se observa en la figura 4.73.

CAPITULO 4ANÁLISIS DE RESULTADOS 2012



Figura 4.73 Factor de Potencia de la Carga no lineal sin Filtro.

Como se aprecia en la figura 4.73 el factor de potencia se mantiene entre 0.5 y 1 de forma oscilante, la cual desemboca en un factor de potencia promedio de 0.75.

La figura 4.74 nos muestra el factor de potencia luego de pasar por la compensación que realiza el filtro activo.



Fig. 4.74 Factor de Potencia de la Carga no lineal Con Filtro.

Como se observa la figura 4.74 su factor de potencia mejora sustancialmente pues se mantiene en 0.8 y 1, sin embargo su tendencia es a mantenerse por encima de los 0.95, manteniéndonos fuera de la penalización.

4.2.2.3 Factor de Potencia obtenido para el Convertidor Trifásico Completo con y sin Filtro.

La grafica del factor de potencia se simulo con un ángulo de disparo de 60°. La figura 4.75 muestra el resultado obtenido.



Fig. 4.75 Factor de Potencia de la Carga no lineal Sin Filtro.

En la grafica se puede ver que el factor de potencia en este caso oscila entre -0.5 y 1, lo que sin duda desemboca en una fuerte penalización por parte de la empresa reguladora del suministro eléctrico.



Fig. 4.76 Factor de Potencia de la Carga no lineal Con Filtro.

En la figura 4.76 se puede observar el trabajo que realiza el filtro en lo que tiene que ver con el factor de potencia. El factor de potencia mejora sustancialmente, pues se mantiene muy próximo a 1, con pequeños picos que son insignificantes comparando en forma general.

4.3 Conclusiones y Recomendaciones.

La permanente optimización de las instalaciones eléctricas conlleva el empleo con más frecuencia de cargas no lineales. Al mismo tiempo el empleo de equipos más sensibles a las perturbaciones hace necesario que a lo hora de diseñar los equipos de compensación se tomen en consideración factores que hasta ahora no eran relevantes.

En función de la naturaleza de los diferentes equipos eléctricos utilizados en los diversos procesos de producción, se puede generar dentro de la instalación diferentes tipos de perturbaciones que se deben conocer. Por este motivo se hace necesario evaluar el nivel de calidad de la energía eléctrica de la instalación, y esta evaluación consiste en cuantificar los fenómenos electromagnéticos súbitos o generados que pueden llegar a perturbar la forma, la continuidad, el equilibrio o la estabilidad de la tensión y de la corriente.

En la actualidad, en nuestra industria el número de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica aumentan de forma considerable, y para reducir estas perturbaciones es necesario considerar la incorporación de sistemas de compensación a la red. En esta tesis se evaluó la compensación activa mediante la Simulación de un Filtro Activo de Potencia de Dos Etapas, conectado en paralelo con la finalidad de reducir distintos tipos de perturbaciones en el nivel de baja tensión de una red de distribución.

Las pruebas realizadas permitieron observar el comportamiento del filtro bajo diferentes condiciones de operación como el variar el tipo de carga no lineal y a su vez el ángulo de disparo, con lo cual se confirma que desde el punto de vista de la simulación, el diseño es confiable.

De acuerdo a las simulaciones obtenidas, se puede concluir que el filtro activo de corriente es una buena opción, ya que permite mejorar la calidad en la señales de corriente y voltaje. En el caso de la corriente de la red se obtuvo una reducción en la distorsión armónica total como se vio en las figuras 4.35 y 4.36 en donde pasamos de un

69.8% a 35.2% para la primera carga no lineal; en las figuras 4.48 y 4.49 se puede ver una disminución del 34.07% al 15.16% en la segunda carga no lineal y en la tercera carga no lineal que se puede ver en las figuras 4.59 y 4.60 un reducción del 72.47% a un 14.45% de THD total.

En lo que tiene que ver con el factor de potencia, se realizo la prueba a las tres cargas. En una primera parte se simulo sin conectar el filtro activo de potencia, y se observo que su medición oscila entre 0 y 1, con su forma de onda muy variante como se observa en la figura 4.69, en cambio cuando se utiliza el filtro, su factor de potencia se ve mejorado manteniéndose entre 0.75 y 1 como se observa en la figura 4.70, cabe decir que si bien es igual oscilante, su tendencia es a mantenerse por encima del 0.92 que es el límite reglamentario por la empresa distribuidora. De igual forma para las dos cargas no lineales restantes, las mediciones fueron muy similares.

El buen funcionamiento y desempeño del sistema depende en gran medida del controlador que se ocupo. Al aumentar la complejidad de los algoritmos de control puede parecer una desventaja desde el punto de vista del procesamiento requerido, como se pudo observar en la simulaciones de nuestro filtro, ya que al tener un sistema de control repetitivo (control por Histeresis), el procesamiento de la señal se hizo de una manera demasiado lenta lo que provoco que se observen grandes picos en las formas de onda de las corrientes que se estaban compensando, sin embargo en la actualidad se cuenta con procesadores mucho más efectivos que nos pueden ayudar en nuestras intensiones. En el controlador se puede notar que si se disminuye la amplitud de la banda de histéresis, aumenta la frecuencia de conmutación y el THD disminuye; y en caso contrario, si aumenta la banda de histéresis se disminuye la frecuencia de conmutación

Con esto quisimos dar una introducción a los sistemas de control, ya que en el campo de la investigación en este momento existen controladores con una mayor rapidez de procesamiento como son el control PI basado en pasividad, el Predictivo que se basa en predecir las características que va a tomar la corriente, el método PQ el cual disminuye las operaciones matemáticas y hace que el sistemas se vuelva más rápido.

La velocidad de procesamiento de nuestro sistema se vuelve lento debido a que todo el control lo realiza en tres pasos y a la lentitud del sistema de procesamiento, mientras que otros métodos como el PQ reducen esta operaciones a tan solo 2.

Por lo que este proyecto servirá como bases para que en un futuro se pueda implementar este filtro con los distintos métodos de control hasta que se logre encontrar el de mayor eficiencia y que se acople a las características que se necesitan dentro de la industria en cuenca.

Es importante tener presente que las prestaciones de un filtro activo dependen de diversos parámetros de diseño, a la vez que el comportamiento mismo del compensador varía de acuerdo a la configuración del sistema, por lo que al momento de implementar el filtro se tiene que tener presente las características propias del sistema.

Como futuras líneas de investigación en base a esta tesis se puede proponer mejorar la manera adquirir la señal de ingreso para poder generar la referencia, es decir ocupara la teoría PQ, ya que esta transforma un sistema de tres ejes en uno de dos ejes, logrando mayor rapidez de procesamiento de la señal. En lo que tiene que ver con el sistema de control se puede ocupar un sistema predictivo o un controlador vectorial que si bien son logaritmos un tanto más complejos de programar, son más eficientes al momento de generar la corriente de compensación por medio del disparo de los IGBT's.

ANEXO A

FOTOS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS EN CARTOPEL-CUENCA



Conexiones de la los TC a las conexiones de la barra Principal del Cuadro QAC1



Conexión total del Aparato de Medida al cuadro Principal QAC1



Formas de Onda de Voltaje obtenidas por el Instrumento de Medición en el cuadro QAC1



Forma de Onda de la Corriente durante los 7 días de medición

BIBLIOGRAFÍA

[1] TEJADA A., LLAMAS A., "Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos" Recuperado :(7 de noviembre del 2011)

http://www.mty.itesm.mx/decic/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07E fectarm.PDF

[2] PIGAZO ALBERTO, (2004) LÓPEZ, "Método de control de filtros activos de potencia paralelo tolerante a las perturbaciones de la tensión de red", Universidad de Cantabria, Santander.

Recuperado: (12 de enero del 2012) http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10632/0de8.APLprevio.pdf?sequence=1

[3] CONELEC, REGULACION No. CONELEC – 004/01, Recuperado: (28 de octubre del 2011) www.conelec.gob.ec/normativa/CalidadDeServicio.doc

[4] COBAS PEREIRA MANUEL F, "LA CALIDAD DEL SUMINISTRODE LA ENERGÍA ELÉCTRICA", Fac. Ing. Elect. ISPJAE Recuperado: (7 de noviembre del 2011) http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornada%20VI/2_6.pdf

[5] DUBERNEY MURILLO YARCE, (2010), "Compensación de Armónicos con un Filtro Activo de Potencia", Universidad Tecnológica de Pereira Programa de Ingeniería Eléctrica, Grupo de Investigación en Electrónica de Potencia, Pereira, Colombia Recuperado: (12 de enero del 2012) http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1473/1/62138223M977.pdf

[6] REYES TRUJILLO ELEAZAR, (2005). "Aplicación de un Filtro Activo de Corriente en la Reducción de Armónicos en Sistemas Eléctricos Industriales". Instituto Politécnico Nacional. México.

Recuperado: (5 de febrero del 2012) http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V11N4/V11N4_art03.pdf

[7] BARCENAS ERNESTO, (2002). "Análisis y Desarrollo de un Inversor Multinivel".
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cenidet.
Recuperado: (5 de febrero del 2012)
http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/126MC_ebb.pdf

[8] RENEDO ANGLADA FRANCISCO JAVIER, (2010), "Control de Filtros Activos de Potencia en conexión paralelo", UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS, MADRID

Recuperado: (25 de enero del 2012) http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4c2a25dd36c72.pdf [9] ROBLEDO LEAL GERARDO MANUEL (2008), "Calidad de la Energía Eléctrica: Camino a la Normalización", Simposio de Metrología Santiago de Querétaro, México Recuperado: (7 de noviembre del 2011) http://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/S5/SM2008-S5B2-1188.pdf

[10] MIRANDA HOMERO, CÁRDENAS VÍCTOR, PALACIOS ELVIA, (2006), "Filtro Activo Paralelo con Inversor de 5-Niveles Basado en Celdas en Cascada", Congreso Nacional de Control Automático, UNAM, México, DF Recuperado: (25 de enero del 2012) galia.fc.uaslp.mx/posgrado/mlr_archivos/eph.htm

[11] TÉLLEZ RAMÍRE EUGENIO, "Calidad de la Energía: automatización, productividad y calidad s.a". MEXICO
Recuperado: (7 de noviembre del 2011)
http://www.watergymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%2
Oy%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf

[12] BAEZ JESÚS (2004), "Calidad de Energía Eléctrica"
Recuperado: (7 de noviembre del 2011)
http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/jabaez/clases/e074/introduccion.pdf

[13] BALCELLS J. (2006), "Filtrado de Armónicos en Instalaciones industriales", Universidad Politécnica de Catalunya, (UPC) JCEE
Recuperado: (15 de noviembre del 2011) http://www.jcee.upc.es/JCEE2006/pdf_ponencies/PPTs/Filtrat_Harmonics_JCEE_Nov2 006.pdf

[14] MARULANDA DURANGO JESSER JAMES, CADAVID RODRÍGUEZ JULIÁN
(2008), "Control por Histéresis de la Corriente en los Filtros Activos de Potencia", UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, FACULTAD DE INGENIRÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PEREIRA Recuperado: (25 de febrero del 2012)
http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1062/1/621381532M389.pdf

[15] GARCÍA CARRASCO JOAQUÍN ELOY, (2007), "Control Directo de Potencia de Convertidores" Electrónicos Conectados a la Red, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Leganés. Recuperado: (25 de febrero del 2012)

http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2371/1/Tesis_J_Eloy-Garcia.pdf

[16] PETIT SUÁREZ JOHANN FARITH, (2007). "Control de Filtros Activos de Potencia Para La Mitigación de Armónicos y Mejora del Factor de Potencia en Sistemas Desequilibrados. Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado: (25 de febrero del 2012) http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2384/1/Tesis_JF_PetitSuarez.pdf [17] PETIT SUÁREZ JOHANN FARITH x (2005). "Topologías y algoritmos de control para filtros actives aplicados a la mejora de la calidad de suministro eléctrico". Universidad Carlos III de Madrid.
Recuperado: (25 de febrero del 2012) http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2384/1/Tesis JF PetitSuarez.pdf

 [18] ESPINOZA MENDOZA LUIS GUILLERMO, "Efectos de la instalación de bancos de Capacitores en sistemas industriales con presencia de armónicas"
 Recuperado: (2 de diciembre del 2011) http://www.funken.com.mx/activosfunken_base/FunkenAT-02.pdf

[19] LAMICH M., "Filtros Activos de Potencia", UNIVERSITAD POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
Recuperado: (2 de marzo del 2012) http://www.jcee.upc.es/JCEE2006/pdf_ponencies/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf

[20] LUMBRERAS MANUEL ROMÁN (2006), "Filtros Activos de Potencia para la Compensación Instantánea de Armónicos y Energía Reactiva", Barcelona Recuperado:(2 de marzo del 2012) http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6306/01mrl01de01.pdf?sequence=1

[21] SÁNCHEZ CORTÉS MIGUEL ANGEL (2009), "Calidad de la Energía Eléctrica" Instituto Tecnológico de Puebla DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA"

Recuperado: (2 de diciembre del 2011) http://www.cimepuebla.org/mx/index.php?option=com_content&view=article&id=145: calidad-de-la-energia-electrica&catid=52:publicaciones&Itemid=137

[22] RASHID MUHAMMAD H. "Capitulo 5: Rectificadores Controlados. *Electrónica de potencia*". Segunda Edición.
Recuperado: (2 de diciembre del 2011) http://www.mediafire.com/?4br22yo8tllaltv

[23] PINZÓN ARDILA O, GARCÍA CERRADA A., GARCÍA GONZÁLEZ P., "Aplicación del Control Repetitivo a Filtros Activos de Potencia en Conexión Paralelo", Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España

Recuperado: (2 de marzo del 2012)

http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4c293a5a0a9c6.pdf

[24] LOPEZ SANTOS OSWALDO, (2010), "Filtro Activo Paralelo para Compensación de Factor de Potencia y Distorsión Armónica en Aplicaciones Industriales",

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA, Bogotá (2 de marzo del 2012) http://www.bdigital.unal.edu.co/2636/1/280222.2010.pdf

[25] HANZELKA ZBIGNIEW & BIEN ANDRZEJ, (2006), Armónicos AGH University of Science and Tecnology Recuperado: (2 de diciembre del 2011) http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia_calidad/Guia%20Calidad%205-1-4%20Perturbaciones%20de%20Tension%20-%20Parpadeo.pdf