UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

"CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI".

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Javier Alexander Moya Chacón

William Germánico Yugcha Quinatoa

Tutor:

Ing. Msc. Carlos Quinatoa

LATACUNGA - ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Javier Alexander Moya Chacón con cedula de identidad N° 050288100 - 6 y William Germánico Yugcha Quinatoa con cedula de identidad N° 050366023-5 declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **"CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI."**, siendo Ing. Msc. Carlos Iván Quinatoa Caiza director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Javier Alexander Moya Chacón
C. C. 050288100 - 6

William Germánico Yugcha Quinatoa
C. C. 050366023 – 5

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

"CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI."

De, **Javier Alexander Moya Chacón** y **William Germánico Yugcha Quinatoa**, de la carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero 2020

El Tutor

Ing. Msc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

CC: 050328786-4

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA) por cuanto, los postulantes: **Javier Alexander Moya Chacón** y **William Germánico Yugcha Quinatoa,** con el título de Proyecto de Investigación: **"CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI."** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 04 de febrero 2020

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)
Ing. PhD. Iliana González
C.C.: 175707065-5

Lector 2
Ing. MsC. Jessica Castillo
C.C.: 060459021-6

Lector 3
Ing. MsC Xavier Proaño
C.C.: 050265642-4

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero reconocimiento y gratitud a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirnos las puertas de la Institución, para podernos formar como profesionales, impartiendo conocimientos de vital importancia para nuestro desempeño en el campo profesional.

Nuestro más sincero y grande agradecimiento al Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza por habernos guiado, compartiendo conocimientos y por ayudarnos en la realización de nuestro tema de tesis.

A la Ing. PhD. Iliana González por guiarnos con sus experiencias y conocimientos en cada etapa de nuestro trabajo de tesis.

A la Ing. Msc Jessica Castillo por su visión crítica de muchos aspectos de nuestra tesis por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos y ayudas a formarnos como personas e investigadores.

Al Ing. Msc. Xavier Proaño nuestros sinceros agradecimientos por su infinita ayuda en el desarrollo de este proyecto.

JAVIER Y WILLIAM

DEDICATORIA

“ANTES QUE NADA, LA PREPARACIÓN ES LA LLAVE DEL ÉXITO”.

ALEXANDER GRAHAM BELL

En primer lugar, agradezco a DIOS, por darme la fuerza necesaria para vivir y seguir adelante en cada paso que doy.

Con mucho amor a mi madre Dorinda Pesantes, que fomento en mi los valores y principios para ser un hombre de bien y que hoy desde el cielo guía mis pasos.

A mis amados hijos José y Katherin, que son el motor de mi vida y por la alegría que me dan cada día para cumplir mis metas.

A mi amada esposa, Katherine Velasco por darme su apoyo incondicional en este gran trayecto. Te Amo

A mis padres, Nelson Chacón y Lorena Chacón por el amor que me brindan, por los consejos impartidos para cumplir este objetivo.

A mis suegros, José Velasco y Maribel Velasco por su comprensión, su paciencia, sus consejos y su apoyo. Gracias

Y a toda mi familia que de una u otra forma me apoyaron incondicionalmente.

JAVIER

DEDICATORIA

A Dios por estar a mi lado y brindarme un día más de vida ya que siempre me ha protegido con el único objetivo de que llegue a culminar mi meta propuesta. "Solo Dios conoce mi camino solo él sabe mi destino; en sus manos está mi futuro"

A mis padres: Manuel Yugcha y María Quinatoa les dedico con un profundo amor mi trabajo de tesis a mi mamita querida quien me supo apoyar con su don de madre espiritualmente, moralmente y emocionalmente para ser un profesional y a mi padre por ser el mejor padre del mundo y brindarme sus consejos para que sea un hombre con futuro en la vida.

A mis hermanos: José, Secundino, Isabel, Manuel, Raúl, Patricio, Jessica y Steven por haber siempre confiado en mí, y brindarme el gran cariño de hermanos que tienen a mi persona y siempre han estado ahí para motivarme a alcanzar mi meta tan anhelada de ser un profesional responsable y de tal forma poder contribuir mis conocimientos con la sociedad.

A la Ing. Alexandra Caizaluisa, por su apoyo moral e incondicional en todos los objetivos planteados a alcanzar, por estar a mi lado y compartir su vida conmigo.

WILLIAM

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA ..... **ii**

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ..... **iii**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN ..... **iv**

AGRADECIMIENTO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

DEDICATORIA ..... **vii**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **viii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiv**

RESUMEN ..... **xvi**

ABSTRACT ..... **xvii**

AVAL DE TRADUCCIÓN ..... **xviii**

1. INFORMACIÓN GENERAL **1**

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO **3**

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO **3**

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO **4**

4.1 Directos 4

4.2 Indirectos 4

5. EL PROBLEMA **4**

5.1 Planteamiento del problema 4

5.2 Formulación del Problema 5

6. OBJETIVOS: **5**

6.1 Objetivo General 5

6.2 Objetivos Específicos 5

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS. **5**

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA 6

8.1 MARCO CONTEXTUAL 6

8. 2 MARCO TEÓRICO 8

8.2.1 RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 8

8.2.1.1 Tipos de Cargas en Redes de Distribución Eléctrica 10

8.2.1.2 Efectos Negativos de cargas no lineales 10

8.2.2 ARMÓNICOS 11

8.2.2.1 Indicadores de la Distorsión Armónica 11

8.2.2.2 Fuentes de Armónicos 12

8.2.2.3 Efectos de los Armónicos 13

8.2.2.4 Parámetros de los Armónicos 13

8.2.2.5 Reducción de los Armónicos 15

8.2.2.6 Distorsión Armónica Total (THD) 16

8.2.3 FILTROS 17

8.2.3.1 Filtros Pasivos 17

8.2.3.2 Filtros Activos 18

8.2.3.3 Estructura básica del filtro activo de potencia 19

8.2.3.4 Generalidades sobre compensación de armónicos 19

8.2.3.5 Técnicas para la compensación de armónicos 21

8.2.3.6 Tipos de Filtros Activos 21

8.2.3.7 Fuentes básicas de perturbaciones y tipos de perturbaciones generadas. 22

8.2.4 BANDA DE HISTÉRESIS 23

8.2.5 MODELACIÓN POR ANCHO DE IMPULSOS (PWM). 24

8.2.5.1 Concepto de PMW 24

8.2.6 PHASE LOCKED-LOOP (PLL) 26

8.2.6.1 Consideraciones 27

8.2.6.2 Aplicaciones 27

8.2.7 CONTROL ÓPTIMO 29

8.2.7.1 Aplicación de la Teoría del Control Óptimo en Ingeniería Eléctrica 30
8.2.7.2 Control de Sistemas Eléctricos de Potencia 30
8.2.8 TEORÍA DE OPTIMIZACIÓN NO LINEAL. 30
8.2.8.1 Restricciones activas 31
8.2.8.2 El problema de optimización NLPP con restricciones 31
8.2.8.3 Punto regular 31
8.2.8.4 Casos especiales del problema NLPP: 31
8.2.8.5 Espacio tangente 32
8.2.8.6 Las principales condiciones de Karush-Kuhn-Tucker 33
8.2.9 TEORÍA ABC OPTIMIZACIÓN NO LINEAL 36
8.2.10 TRANSFORMADA DE CLARKE 38
8.2.11 TRANSFORMADA DE PARK 41
8.2.12 TEORÍA DE AKAGI 44
8.2.12.1 Potencia reactiva en sistema monofásico 46
8.2.12.2 Potencia reactiva en sistema trifásico (balanceado) 47
9. HIPÓTESIS 51
10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL 51
10.1 Tipo de Investigación 51
10.2 Método Deductivo 51
10.3 Método Comparativo 52
10.4 Método de simulación 52
11. ANÁLISIS Y DISCUCIÓN DE RESULTADOS 52
11.1 Análisis e Interpretación 52
11.2 Diagrama de Flujo para filtros activos empleando la optimización no lineal y la teoría de Akagi 53
11.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS CON EL CIRCUITO DE PRUEBA 55
11.3.1 Flujo de potencia del circuito de prueba 55
11.3.2 Flujo de Potencia 55
11.3.3 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal 57

11.3.4 Funcionamiento del filtro con Optimización No Lineal 59
11.3.4.1 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con optimización no lineal (FTO) 60
11.3.5 Funcionamiento del filtro con la teoría de Akagi 61
11.3.5.1 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con la teoría de Akagí (FTA) 62
11.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS CON EL CIRCUITO MODELADO DE 18 NODOS DE LA IEEE 64
11.4.1Flujo de Potencia con el circuito modelado de 18 Nodos de la IEEE 64
11.4.2 Flujo de Potencia 66
11.4.3 Análisis de circuito de 18 Nodos 67
11.4.3.1 Caso 1: Porcentajes de THDv y THDi del circuito de 18 Nodos 67
11.4.3.2 Caso 2: Porcentajes de THDv y THDi del circuito de 18 Nodos 68
11.4.3.3 Caso 3: Porcentajes de THDv y THDi del circuito de 18 Nodos 69
11.4.3.4 Caso 4: Porcentajes de THDv y THDi del circuito de 18 Nodos 71
11.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS. 73
12. IMPACTOS TÉCNICO 75
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 75
12.1 Conclusiones 75
12.2 Recomendaciones 76
13. BIBLIOGRAFÍA 76
14. ANEXOS 82
14.1 (A) DIAGRAMAS DEL SISTEMA DE PRUEBA 1
14.2 (B) Cálculos para el modelamiento del filtro pasivo 7
14.3 (C) Código de la programación de optimización no lineal 11
14.4 (D) Código de la programación de la teoría de Akagi 12
14.5 (E)Manual del Usuario para la modelación de sistemas eléctricos en SIMULINK 14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sistemas de tareas en relación a los objetivos planteados……..5

Tabla 2: Comparación de filtros para su elección……49

Tabla 3: Datos de Flujo de Potencia del sistema de prueba ……56

Tabla 4: Porcentajes de los armónicos de voltaje del circuito de prueba sin carga no lineal..56

Tabla 5: Porcentajes de los armónicos de corriente del circuito de prueba sin carga no lineal……..…56

Tabla 6: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del circuito de prueba sin carga no lineal……..56

Tabla 7: Porcentajes de los armónicos de voltaje del circuito de prueba con carga no lineal……..57

Tabla 8: Porcentajes de los armónicos de corriente del circuito de prueba con carga no lineal……..57

Tabla 9: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del circuito de prueba con carga no lineal……..58

Tabla 10: Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)……60

Tabla 11: Porcentajes de los armónicos del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)……60

Tabla 12: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)……60

Tabla 13: Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)……62

Tabla 14: Porcentajes de los armónicos de corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)……62

Tabla 15: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)……63

Tabla 16: Datos de las cargas en cada nodo del sistema……..65

Tabla 17: Datos de las líneas del sistema……..65

Tabla 18: Datos de Flujo de Potencia del sistema de prueba……66

Tabla 19: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos sin carga no lineal……..67

Tabla 20: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal…….68

Tabla 21: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal conectado el (FTO)…….69

Tabla 22: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal conectado el (FTA)…….71

Tabla 23: Comparación entre los filtros con el circuito de 18 Nodos……74

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Onda con distorsión armónica……11

Fig. 2 Señal fundamental más tercera armónica……15

Fig. 3: Estructura de un filtro activo de potencia……..19

Fig. 4: Construcción de un filtro activo en paralelo……..22

Fig. 5: Construcción de un filtro activo en serie……22

Fig. 6 Circuito rectificador con carga: (a) Inductiva; (b) Capacitiva……23

Fig. 7 Diagrama de control por Histéresis……24

Fig. 8 Ondas de control por histéresis de banda fija……24

Fig. 9 Señal PWM……25

Fig. 10 Diagrama de control PWM por comparación con triangular……25

Fig. 11 Onda de señal PWM por comparación triangular……25

Fig. 12 Tiempo de pulsos de señal PWM……26

Fig. 13 Diagrama de bloques circuito PLL……27

Fig. 14 Sintonía del PLL con el séptimo armónico de una señal de entrada……28

Fig. 15 El PLL ante una señal de entrada sinusoidal contaminada de 1040Hz……28

Fig. 16 Diagrama de Bloques de un sintetizador de frecuencia……29

Fig. 17 Representación de voltaje y corriente, modelo para la compensación activa del filtro……...36

Fig. 18 Relación entre las variables θβ y ABC……39

Fig. 19 Resultados de la transformada de Clark……40

Fig. 20 Relación de las variables DQ0 y ABC……..42

Fig. 21 Circuito de distribución monofásica radial con filtro……46

Fig. 22 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado) con filtro……49

Fig. 23 Diagrama de flujo con (FTO) y (FTA)……..54

Fig. 24 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado)……55

Fig. 25 Señal de la onda armónica sin carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente…….57

Fig. 26 Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente……58

Fig. 27 Orden de los armónicos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente……59

Fig. 28 Señal de onda armónica conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente……..61

Fig. 29 Orden de los armónicos conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente……..61

Fig. 30 Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente……63

Fig. 31 Orden de los armónicos conectado el (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente……..64

Fig. 32 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado) de 18 Nodos de la IEEE……64

Fig. 33 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente……69

Fig. 34 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente……69

Fig. 35 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente……71

Fig. 36 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente……71

Fig. 37 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente……73

Fig. 38 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente……73

Fig. 39 Comparación en porcentajes de (THD) con los filtros aplicando las teorías de Optimización y Akagi……75

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI.

Autores:

Javier Alexander Moya Chacón

William Germánico Yugcha Quinatoa

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estudiar la corrección de armónicos de un sistema eléctrico de distribución para analizar la implementación de un algoritmo basado en la Optimización No Lineal y Teoría de Akagi, cual trata sobre la potencia activa y reactiva instantánea donde las corrientes y los voltajes de un sistema trifásico de tres hilos se expresaban vectorialmente mediante el uso de la transformada de Clarke y Park mientras la otra teoría se basa en obtener un lambda optimo formulando el modelo de optimización no lineal y aplicando la teoría del Lagrange, aplicando las condiciones de (KKT). Este estudio se realizó diseñando un modelo base de un sistema eléctrico simulado en el programa SIMULINK implementando al sistema un filtro activo de potencia que tiene como principal función la reducción de los armónicos en las redes de distribución de energía eléctrica. Las simulaciones realizadas dan resultados óptimos al implementar el filtro activo de potencia corrigiendo de manera notoria los armónicos producidos por las diferentes cargas que ocasionan perturbaciones a la red eléctrica.

Palabras Claves: Armónicos, Sistema eléctrico de Distribución, Transformadas de Clark y Park, Teoría de Akagi, Optimización No Lineal, Simulink, Potencia Activa, Potencia Reactiva, Filtro Activo, Perturbaciones, Cargas.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

THEME: OPTIMAL CONTROL OF AN ACTIVE FILTER FOR HARMONICS REDUCTION ON ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS, USING AKAGI THEORY.

Autores:

Javier Alexander Moya chacón

William Germánico Yugcha Quinatoa

ABSTRACT

The present research has as main objective to review the harmonic correction of an electrical distribution system to analyze the implementation of an algorithm based on the Non-Linear Optimization and Akagi theory, which deals with instantaneous active and reactive power where the currents and voltages of a Three-phase three-wire system were expressed vectorially through the use of the Clarke and Park transform while the other theory is based on getting an optimal lambda that formulate the Non-Linear Optimization model and applying the Lagrange theory, using conditions of (KKT). This research was carried out by a base model desing of a simulated electrical system in SIMULINK program implementing an active power filter that has as its main function the harmonics reduction in the electric power distribution networks. The simulations were carried out to give optimal results when the active power filter was applied, correcting notoriously the harmonics produced by the different loads that cause disturbances to the electric network.

Keywords: Harmonics, Electrical Distribution System, Clark and Park Transforms, Akagi Theory, Non-Linear Optimization Theory, Simulink, Active Power, Reactive Power, Active Filter, Disturbances, Loads.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores Estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas: **Moya Chacón Javier Alexander** y **Yugcha Quinatoa William Germánico,** cuyo título versa **"CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI."**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, 10 de febrero del 2020.

Atentamente.

Mg. Marcelo Pacheco Pruna

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS

C.C. 0502617350

CENTRO DE IDIOMAS

ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FINAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Título del Proyecto.

CONTROL ÓPTIMO DE UN FILTRO ACTIVO PARA LA REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LA TEORÍA DE AKAGI.

1.2 Fecha de inicio:

Octubre 2019.

1.3 Fecha de finalización:

Febrero 2020.

1.4 Lugar de ejecución:

La presente investigación se realizará en la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi.

1.5 Facultad que auspicia

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA).

1.6 Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia.

1.7 EQUIPO DE TRABAJO

Tutor de titulación:

Nombres y Apellidos: Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza

Lugar y fecha de nacimiento: Tanicuchi, 01 de agosto de 1988

Estado Civil: Soltero

Número de cédula: 0503287864

Teléfono: 0978882597

e-mail: carlos.quinatoa4@utc.edu.ec

Datos personales (Postulante 1)

Nombres: Javier Alexander Moya Chacón

Lugar y fecha de nacimiento: Latacunga, 27 de febrero de 1989

Estado civil: Soltero

Número de cédula: 050288100-6

Dirección: Av. Miguel Iturralde, Vía San Silvestre

Teléfono: 0987977822

E-mail: javier.moya6@utc.edu.ec

Datos personales (Postulante 2)

Nombres: William Germánico Yugcha Quinatoa

Lugar y fecha de nacimiento: Tanicuchi, 20 de agosto de 1990.

Estado civil: Soltero

Número de cédula: 050366023-5

Dirección: Parroquia Tanicuchi, Barrio San Andrés

Teléfono: 0995840288

E-mail: william.yugcha5@utc.edu.ec

1.8 Área de conocimiento:

Programación, Control Automático, Sistemas eléctricos de potencia, Redes de distribución.

1.9 Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

1.10 Sub líneas de investigación de la carrera:

Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad el avance tecnológico en electrónica de potencia ha desarrollado un crecimiento útil para viviendas y empresas con los diferentes artefactos electrónicos de gran utilidad y comodidad para la sociedad, no obstante, van acarreando un grave problema para los sistemas de distribución de energía eléctrica llamada armónicos de corriente eléctrica.

La distorsión armónica es una deformación de la onda de voltaje y corriente eléctrica que llega a nuestros hogares y empresas. Esta deformación está originada por los equipos electrónicos que consumen energía eléctrica de una forma no lineal, es decir, de una forma no continua en el tiempo. Esta forma de consumir electricidad, provoca que la forma de onda senoidal de la corriente eléctrica se distorsione. Esta distorsión se puede descomponer en diferentes componentes, conocidas como armónicos. La mayor o menor presencia de armónicos se mide con una magnitud conocida como Distorsión Total Armónica (THD).

Con el aumento constante de las cargas no lineales conectadas a la red de alimentación aparecen muchos problemas de distorsión y pérdida de eficiencia debidos al bajo factor de potencia, el propósito de un filtro activo es el de reducir los dos problemas anteriores; de forma que la corriente que circule por la red eléctrica sea senoidal y que la tensión aplicada a las cargas también lo sea, sin duda alguna interfiere en la calidad de energía por lo que se pretende optimizar la ubicación de un filtro activo.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Desde el punto de vista energético se busca reducir los armónicos de cualquier sistema eléctrico de potencia a través de la ubicación óptima de un filtro activo que permitirá a todo sistema eléctrico reducir costos de energía consumida, costos de penalización de las empresas distribuidoras de energía por lo que dicho proyecto pretende mejorar la calidad de energía e incrementar el rendimiento de equipos y maquinaria de un sistema eléctrico potencia.

En la actualidad los armónicos presentes en las redes eléctricas de distribución por las diferentes fuentes que los generan, ocasionan varios problemas a las redes eléctricas que no permiten tener una energía limpia sin perturbaciones, para esto el estudio de filtros activos que se han

desarrollado e implementado con los diferentes métodos y aplicaciones, ayudan a reducir el problema de los armónicos en las redes de distribución.

El proyecto tiene como finalidad el control óptimo de un filtro activo para reducir armónicos presentes en la red eléctrica de distribución para esto utilizaremos la optimización no lineal y la teoría de Akagi, los conceptos y el desarrollo matemático para determinar el control adecuado en la simulación del filtro activo.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

4.1 Directos

Empresas Distribuidoras de Energía, Industria y Usuarios.

4.2 Indirectos

Estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, facultad de Ingeniería Eléctrica.

5. EL PROBLEMA

5.1 Planteamiento del problema

El desarrollo del sector eléctrico que se ha generado en años pasados ha sido de gran impacto para el progreso de la economía del país y con ello el adelanto tecnológico e industrial que ayudan al desenvolvimiento de las crecientes actividades productivas del Ecuador. En efecto la futura demanda de energía aumentara y con ello los problemas, como lo es uno de mayor importancia es la distorsión armónica que perjudica en la calidad de energía ocasionando daños a las redes eléctricas.

Los armónicos resultan del ingreso de cargas no lineales como lo son los (transformadores, variadores de velocidad, rectificadores, inversores, hornos de arco, lámparas fluorescentes, equipos electrónicos), etcétera, estas cargas son las que producen la distorsión armónica por lo que con lleva a generar pérdidas y deterioro en todo el sistema eléctrico.

5.2 Formulación del Problema

Este problema se pretende eliminar con el estudio y desarrollo de un filtro activo de potencia utilizando la teoría de Akagi, ya que este método interactúa de manera eficaz con los filtros activos al momento de la compensación de potencia reactiva para reducir a un porcentaje mínimo de armónicos que se encuentren en la red de distribución radial.

6. OBJETIVOS:

6.1 Objetivo General

- Realizar el control de un filtro activo para la reducción de armónicos en la de distribución radial empleando la teoría de Akagi.

6.2 Objetivos Específicos

- Realizar el estado del arte sobre la Optimización No Lineal y Akagi para el control del filtro activo aplicado a distribución.
- Comparación de las propiedades matemáticas de la Optimización No Lineal y la teoría Akagi para la selección del filtro activo.
- Desarrollar un algoritmo de control aplicando la teoría de Optimización y Akagi para la implementación del filtro activo y análisis de resultados.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.

Tabla 1: Sistemas de tareas en relación a los objetivos planteados

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADO DE LA ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD
- Realizar el estado del arte sobre la teoría de Optimización y Akagi para el control del filtro activo	Búsqueda bibliográfica referente a la Optimización no lineal y teoría de Akagi	De acuerdo a esta teoría las corrientes del filtro activo se obtienen de la potencia activa y reactiva de la carga no lineal mediante cálculos	Análisis mediante la bibliografía encontrada como puede esta teoría ayudar en el estudio del filtro activo de potencia.

aplicado a distribución		previos que relacionan los voltajes y corrientes de carga en un marco de referencia estacionario.	
- Comparación de las propiedades matemáticas de la Optimización No Lineal y la teoría Akagi para la selección del filtro activo.	Desarrollo matemático de cada una de las teorías.	Acoplamiento entre las teorías. De acuerdo con algunas investigaciones con el aumento constante de las cargas no lineales conectadas a la red de alimentación aparecen muchos problemas de distorsión y pérdida de eficiencia debido al bajo factor de potencia.	Resolución de ecuaciones que permitan determinar que la teoría permitirá reducir los armónicos.
- Desarrollar un algoritmo de control aplicando Optimización no lineal y Akagi para la implementación del filtro activo y análisis de resultados	Implementación del algoritmo para el análisis del comportamiento del filtro activo de potencia con las dos teorías aplicadas	Comparación de resultados previo a un análisis de armónicos para la eficiencia de los filtros contra cargas no lineales en los sistemas de distribución	Con el método de Akagi el filtro activo de potencia cum ple con las expectativas de control y compensación de potencia reactiva para la reducción de armónicos a un porcentaje mayor al del filtro de Optimización no lineal.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1 MARCO CONTEXTUAL

El desarrollo de [1] los armónicos es un obstáculo que todas las redes eléctricas sufre y además provoca: más consumo de potencia, más perdidas en el sistema estrés de los equipos, más corrientes de resonancia en la red.

Según los estudios realizados por [2] las cargas no lineales en la red de alimentación provocan altos niveles de distorsión armónica que son inyectados a la red y esto causa pérdidas de eficiencia energética y bajo factor de potencia de esta forma se ha buscado una manera, que es la utilización de filtros activos de potencia para una red bifásica y así lograr un equilibrio entre fases y neutro.

En [3] debido al cambio de la matriz energética en Ecuador, el ingreso masivo de cargas no lineales a la red eléctrica se presenta armónicos de manera considerable de esta forma es considerable los filtros activos trifásicos para controlar los niveles de armónicos en instalaciones industriales, comerciales y residenciales para cumplir con los parámetros de la norma IEE 519-2014.

Los problemas de las redes eléctricas de distribución [4] se debe al aumento progresivo de las cargas no lineales ayudan al incremento de las inyecciones de corrientes y tensiones armónicas ya que estos pueden ocasionar calentamiento del trasformador, vibraciones en motores, bajo factor de potencia disparos indeseado del equipo de protección ya el filtro de potencia nos ayuda mejorar la calidad de energía.

La presente investigación sobre [5] la distorsión de la onda sinusoidal de la red de alimentación es debido a las cargas no lineales que son que inyectan armónicos a la red por lo que ocasiona variaciones en las corrientes y provoca bajo factor de potencia por lo que es necesario acoplar un filtro de potencia para mejorar la eficiencia energética a los consumidores.

La investigación surgió [6] de este tipo de cargas no lineales consume corrientes con alto contenido de armónicos la forma de compensar las corrientes armónicas es mediante filtros de potencia y también se utiliza los convertidores que manejan una potencia considerable de manera que es necesario proteger al filtro activo el caso de que tenga un riesgo de sufrir fallas ocasionadas por diversas condiciones.

Murillo en su trabajo investigativo [7] para mejorar la calidad energía y eliminar armónicos debido a cargas no lineales se compensa armónicos con los filtros de potencia activa ya que estos elementos mejorar las ondas sinusoidales y la distorsión de la forma de la onda para que exista bajo factor de potencia y no se desequilibre entre las fases.

Trujillo estableció que [8] la corriente no sinusoidal que las cargas consumen es producido por los tipos de problemas y su vez la mala calidad de potencia mediante el filtro activo de potencia se pretende corregir los efectos de potencia de la operación de las cargas.

El estudio de [9] los filtros pasivos nos ayudan al control de armónicos y a eliminar también inyectan componentes de compensación a la red anulando el efecto de los armónicos tienen la capacidad de ajustarse a los cambios en las condiciones de operación en la red eléctrica y se pueden conectar al sistema de distribución en serio o paralelo para mejor la calidad de energía.

Se mención que [10] el filtro pasivo pasa-bajo nos ayuda a eliminar los armónicos debidos a cargas lineales y también debemos estudiar la capacidad de atenuación del filtro para aplicar a la red y mejorar el factor de potencia y la eficiencia energética del sistema de distribución.
El aporte de Hernández [11] el control del filtro activo nos ayuda a compensar el desbalance y distorsión debido a cargas no lineales y con esto se busca implementar un filtro en conexión paralela a la red y así lograr la compensación de corrientes armónicas y de secuencia negativa.

La investigación surgió [12] con el filtro activo de potencia se presente generar una señal de compensación para reducir la distorsión de los armónicos que estas presentes en un sistema fotovoltaicos autónomo y mejorar la calidad de energía a la distribución.

Al implementar [13] el filtro nos ayuda a eliminar corrientes parasitas y perdidas en la red de distribución y también nos ayuda reducir la vida útil de los elementos o equipos eléctricos de las instalaciones.

La investigación hecha por [14] la implementación del algoritmo de identificación permitirá obtener resultados de los coeficientes del modelo del circuito de interconexión entre la red de distribución y el convertidor para luego ser representado en la ecuación de diferencias ya que esto servirá en diferentes tipos de controles digitales con el fin de reducir la distorsión armónica de la red eléctrica y corregir el factor de potencia.

Él [15] se pretende compensar la demanda actual de la eficiencia energética en la red de distribución mediante un desarrollo de convertidor-inversor de fuente de voltaje trifásico de 12 KVA aplicando filtros activos de potencia en sistemas trifásicos de 3 o 4 hilos ya que con este desarrollo aportara al mejor desempeño del sistema.

8. 2 MARCO TEÓRICO

8.2.1 RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

La Red de Distribución de la Energía Eléctrica o Sistema de Distribución de Energía Eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la

subestación de distribución hasta los usuarios finales (medidor del cliente). Se lleva a cabo por los Operadores del Sistema de Distribución (Distribution System Operator o DSO en inglés).
Los elementos que conforman la red o sistema de distribución son los siguientes:

- Subestación de distribución: conjunto de elementos (transformadores, interruptores, seccionadores, etc.) cuya función es reducir los niveles de alta tensión de las líneas de transmisión (o subtransmisión) hasta niveles de media tensión para su ramificación en múltiples salidas.
- Circuito primario.
- Circuito secundario.

La distribución de la energía eléctrica desde las subestaciones de transformación de la red de transporte se realiza en dos etapas.

La primera está constituida por la red de reparto, que, partiendo de las subestaciones de transformación, reparte la energía, normalmente mediante anillos que rodean los grandes centros de consumo, hasta llegar a las estaciones transformadoras de distribución. Las tensiones utilizadas están comprendidas entre 25 y 132 Kv. Intercaladas en estos anillos están las estaciones transformadoras de distribución, encargadas de reducir la tensión desde el nivel de reparto al de distribución en media tensión.

La segunda etapa la constituye la red de distribución propiamente dicha, con tensiones de funcionamiento de 3 a 30 Kv y con una característica muy radial. Esta red cubre la superficie de los grandes centros de consumo (población, gran industria, etc.), uniendo las estaciones transformadoras de distribución con los centros de transformación, que son la última etapa del suministro en media tensión, ya que las tensiones a la salida de estos centros son de baja tensión (125/220 ó 220/380 V).

Las líneas que forman la red de distribución se operan de forma radial, sin que formen mallas, al contrario que las redes de transporte y de reparto. Cuando existe una avería, un dispositivo de protección situado al principio de cada red lo detecta y abre el interruptor que alimenta esta red.

La localización de averías se hace por el método de "prueba y error", dividiendo la red que tiene la avería en dos mitades y energizando una de ellas; a medida que se acota la zona con avería, se devuelve el suministro al resto de la red. Esto ocasiona que en el transcurso de localización se pueden producir varias interrupciones a un mismo usuario de la red. [16]

8.2.1.1 Tipos de Cargas en Redes de Distribución Eléctrica

Las cargas eléctricas en un sistema alimentado en alterna con tensiones senoidales se pueden clasificar, atendiendo a cómo es la corriente por la carga, en dos grupos básicos.

- **Carga Lineal**

En una carga lineal, la forma de onda de la corriente es la misma que la forma de onda de la tensión. Ejemplo de cargas lineales son los motores de inducción, las lámparas incandescentes, los calefactores. Constituyen un tipo de carga que ha sido muy habitual y cuya principal característica es que se utiliza directamente la potencia eléctrica para realizar sus funciones.

- **Carga no Lineal**

Dentro de las cargas no lineales se incluyen todas aquellas que solicitan corrientes no sinusoidales a partir de un generador senoidal, por lo que la forma de onda de la corriente es diferente de la forma de onda de la tensión. Este tipo de carga está presente en equipos y dispositivos eléctricos o electrónicos donde el ahorro energético y el uso eficiente de la electricidad es el aspecto más importante.)

Dentro de cargas no lineales se pueden incluir los equipos de control de velocidad de motores, lámparas fluorescentes y lámparas de descarga, ordenadores, elementos de calefacción con control de temperatura, etc. En las cargas no lineales es usual que la energía eléctrica no sea utilizada directamente tal como se suministra, siendo habitual la utilización de circuitos rectificadores que proporcionan una corriente y tensión continua a su salida y permiten la realización del trabajo para dicho equipo. Generalmente, en los circuitos donde se utilizan estos rectificadores, la corriente no es de forma sinusoidal.

8.2.1.2 Efectos Negativos de cargas no lineales

Sobre la década pasada, alguna compañía de electricidad de gerentes ha descubierto repentinamente un problema sorprendente como ellos adicionó muchas computadoras y equipo electrónico, el factor de poder para la compañía de electricidad bajó. En algunos casos, la reducción en el factor de potenciar era suficiente como para producir cargos extras penalizar el bajo factor de potencia1. En peor, fallas en transformadores y conductores coincidieron con el bajo factor de potencia.

El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas la mayoría argumentarían para mejorar, pero cambiado también la característica de carga de las instalaciones modernas.

Las cargas electrónicas han ganado el nombre de carga no lineal para describir la forma de la potencia. Algunos de los efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una compañía de electricidad son: [17]

- La distorsión de voltaje dentro de instalaciones
- Las corrientes excedentes por el neutro
- Los altos niveles voltaje de neutro a tierra
- El recalentamiento en transformadores
- Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores
- La reducción en la capacidad de distribución
- Penalización por bajo factor de potencia

8.2.2 ARMÓNICOS

Los armónicos son voltajes o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a lo cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Las formas de onda distorsionadas (Fig. 1), pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia. [18]

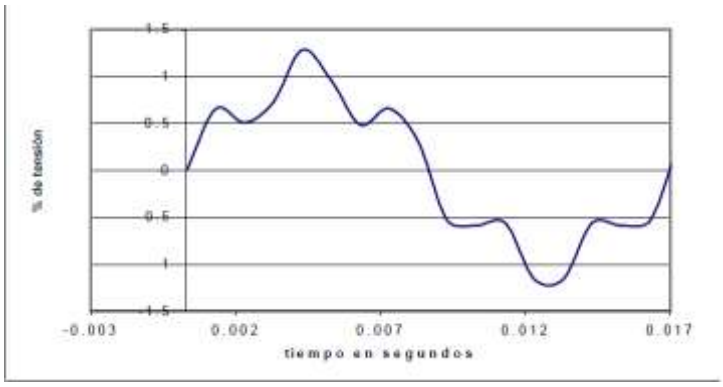


Fig. 1: Onda con distorsión armónica
Fuente: [18]

8.2.2.1 Indicadores de la Distorsión Armónica

Estos indicadores permiten ponderar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de corriente y voltaje, estos indicadores son indispensables para la determinación de las medidas correctivas requeridas. Estas son:

- Factor de potencia.
- Factor de cresta,
- Potencia de distorsión,
- Espectro en frecuencia,
- Tasa de distorsión armónica

8.2.2.2 Fuentes de Armónicos

Los armónicos son el resultado de cargas no lineales, las cuales ante una señal de tipo sinusoidal presentan una respuesta no sinusoidal. Las principales fuentes de armónicos son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente, apareciendo típicamente todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º, ...) pero predominando los impares con valores típicos con respecto a la fundamental de:
    - 20% del 3er armónico
    - 10% del 5º
    - 6% del 7º
    - 3% del 9º
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro.
- La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Swiches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en DC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

8.2.2.3 Efectos de los Armónicos

- Efectos sobre los cables

La distribución de la corriente a través de la sección transversal de un conductor solo es uniforme cuando se trata de corriente directa. En corriente alterna, a medida que la frecuencia aumenta, la no uniformidad de la distribución de corriente es más pronunciada.

- Efectos sobre los transformadores

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

- Efectos sobre los capacitores

Cuando en un sistema de potencia se tienen capacitores instalados existe la posibilidad de encontrar resonancia entre estos y el sistema. Este efecto produce voltajes y corrientes de magnitud considerablemente más alta que en el caso de no haber resonancia.

- Efectos sobre los motores

El mayor efecto que tienen los armónicos de voltaje en la maquinas rotativas sincrónicas y en los motores de inducción es el incremento de calor debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias, por lo tanto, los armónicos afectarán tanto la eficiencia de la máquina como el torque desarrollado.

- Efectos sobre otros equipos

Los equipos electrónicos sensitivos son susceptibles a operación incorrecta a causa de los armónicos. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada. [19]

8.2.2.4 Parámetros de los Armónicos

Los armónicos se clasifican por tres parámetros que son: Orden, Frecuencia y Secuencia, que definen perfectamente la función del armónico correspondiente en las redes eléctricas.

- **Orden de los armónicos.**

Partiendo de que la frecuencia fundamental es de 60Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1, 2, 3, 4, 5,6, 7, … Orden natural de los números.

También se define se define como la relación que hay entre la frecuencia de armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_{60}).

$$n = \frac{f_n}{f_{60}} \tag{1}$$

- **La Frecuencia**

Se define como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental (60Hz), por ejemplo:

$$3^{ra} Armómica\ 3 \times 60Hz = 180Hz \tag{2}$$

Los armónicos de orden impar son los que se encuentran en las redes eléctricas de la industria, edificios y explotaciones industriales, etcétera. Los de orden par solo aparecen cuando hay asimetría en la señal.

- **La Secuencia.**

La secuencia se refiere al giro del armónico con respecto a la fundamental (F). Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos: (Fig. 2)

SECUENCIA (+): Rotación directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etcétera.

SECUENCIA (-): Rotación inversa, produce un freno además calentamiento de conductores.

SECUENCIA (0): No tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicos cero son llamados “Tripens”.

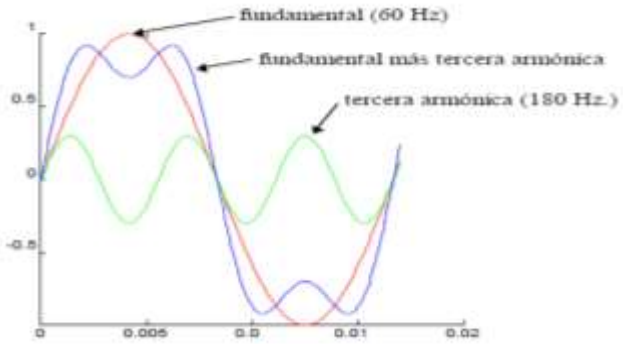


Fig. 2 Señal fundamental más tercera armónica
Fuente: [19]

8.2.2.5 Reducción de los Armónicos

Los métodos para reducir los armónicos, de una manera genérica, se pueden clasificar en tres apartados: filtros pasivos; transformadores de aislamiento, reducción de armónicos; y soluciones activas. Cada una de estas soluciones tiene ventajas e inconvenientes, por lo que no hay una solución que por sí sola pueda considerarse la mejor. [20]

- Filtros Pasivos

Se emplean filtros pasivos para establecer un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas de forma que circulen por el filtro y no por la fuente de alimentación. El filtro puede estar diseñado para un armónico de- terminado o para una banda ancha de armónicos, dependiendo de las exigencias del sistema. [20]

Los filtros LC pasivos se ajustan a la frecuencia que debe eliminarse o atenúan una banda de frecuencias. Los sistemas de recombinación armónica (doble puente, cambio de fase) también se pueden incluir en esta categoría.

- A petición, Schneider Electric puede integrar este tipo de filtro en sus soluciones. Los filtros pasivos tienen dos inconvenientes principales:
- La eliminación de los armónicos solo es eficaz para una instalación específica, es decir, la incorporación o eliminación de cargas puede interrumpir el sistema de filtrado.
- A menudo son difíciles de implementar en las instalaciones que ya existen. [21]

- Filtros activos / acondicionadores de armónicos activos

El filtro activo es un dispositivo conectado en paralelo. Un transformador de intensidad mide el contenido de armónicos de la corriente de carga y controla un generador de corriente que produce una réplica exacta de los mismos de signo opuesto, que es enviada a la fuente de

alimentación en el ciclo siguiente. Como la corriente armónica es compensada por el filtro activo, sólo la corriente fundamental procede de la fuente de alimentación. En la práctica, la magnitud de las corrientes armónicas se reduce en un 90% y, debido a que la impedancia de la fuente a las frecuencias armónicas es reducida, la distorsión de voltaje también se reduce. [20]

Los filtros activos, también denominados acondicionadores de armónicos activos, como AccuSine, cancelan los armónicos inyectando corrientes armónicas exactamente iguales donde surgen. Este tipo de filtros reaccionan en tiempo real (es decir, de forma activa) frente a los armónicos existentes para eliminarlos. Son más eficaces y flexibles que los filtros pasivos, evitan sus inconvenientes y, en comparación, constituyen una solución que: [21]

- Ofrece un gran rendimiento (es posible eliminar totalmente los armónicos, hasta el orden 50º).
- Es flexible y se puede adaptar (posibilidad de configurar la acción) y reutilizar.

8.2.2.6 Distorsión Armónica Total (THD)

Las cargas no lineales generan armónicos tanto de voltaje como de corriente. Esto se debe que, para cada armónico de corriente de carga, hay un armónico de voltaje de alimentación con la misma frecuencia. Como consecuencia, los armónicos también distorsionan el voltaje.

La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia de contenido de una señal alternativa. Es además una medida de la deformación de la señal.

Se calcula aplicando a la entrada una señal de frecuencia y amplitud conocidas. Se suma la potencia de salida de todos los armónicos (basta con los diez primeros) y se divide la suma entre la potencia de salida de la frecuencia fundamental. [22]

La distorsión de una onda sinusoidal se representa en forma de porcentaje.

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{a=2}^{n} Ih_a^2}}{Ih_1} \tag{3}$$

Donde:

Ih= Corriente armónica

a= Número de armónico

Ih_1= Dimensión de la onda de frecuencia fundamental

Cuando se trata con armónicos de voltaje, la expresión viene dada:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \cdots}}{V_1} \times 100\% \quad (4)$$

Donde:

THD_V= Distorsión armónica total de voltaje

V^2= Número de armónico de voltaje

V_1= Voltaje de la onda de frecuencia fundamental

Cuando se trata con armónicos de corriente, la expresión viene dada:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \cdots}}{I_1} \times 100\% \quad (5)$$

Donde:

THD_i= Distorsión armónica total de corriente

$I_{2,3,4}$= Número de armónico de corriente

I_1= Corriente de la onda de frecuencia fundamental

8.2.3 FILTROS

8.2.3.1 Filtros Pasivos

Aquellos circuitos que utilizan capacitores, inductores y resistencias se les conoce como filtros pasivos, la ventaja de estos filtros es la baja sensibilidad y poca disipación de energía.

- Ventajas

- Baratos
- Fáciles de Implementar
- Respuesta aproximada a la función ideal
- Muy utilizados en aplicaciones de altas frecuencias y aplicaciones de potencia

- Desventajas

- Respuesta a la frecuencia puede tener variaciones importantes a la función ideal.

- La respuesta a la frecuencia está limitada al valor de los componentes pasivos.
- Elementos como inductancias son difíciles de conseguir y sus valores se incrementan en bajas frecuencias. [23]

8.2.3.2 Filtros Activos

Se los conoce como "Acondicionadores activos de líneas de potencia" (APLC) tienen como principal obligación la reducción de los armónicos en las redes de distribución de energía eléctrica.

Con el aumento constante de las cargas no lineales conectadas a la red de alimentación aparecen muchos problemas de distorsión y pérdida de eficiencia debidos al bajo factor de potencia. Una de las formas de mejorar esta situación, es la utilización de filtros activos de potencia (APF), por lo que en los últimos años se han desarrollado distintas estructuras para su implementación práctica.

Las cargas no lineales conectadas a la red consumen corrientes que no son senoidales, o sea, tienen un contenido importante de armónicos. Este efecto se indica en la parte superior de la (Fig. 1). Así mismo este consumo de corrientes no senoidales, aplicada a una red eléctrica de impedancia no nula, produce una distorsión en la forma de la tensión en los puntos de conexión de los equipos a la red. Este efecto se representa en la parte inferior de la (Fig. 1).

El propósito de un filtro activo es el de reducir los dos problemas anteriores; de forma que la corriente que circule por la red eléctrica sea senoidal y que la tensión aplicada a las cargas también lo sea.

Para conseguir los dos objetivos anteriores, se pueden utilizar distintas topologías de filtros. Con lo que es necesario realizar una clasificación para su estudio.

Cabe señalar que los filtros activos (Fig.3) presentan como principales ventajas frente a los pasivos; que pueden adaptarse a las condiciones cambiantes de la carga y de la propia red eléctrica; que se reduce la posibilidad de aparición de resonancias entre la red y el filtro (posible causa de sobretensiones en puntos concretos de la red); y que además de la reducción de armónicos los APF pueden también acometer otras tareas como son la corrección del coseno de φ (desfase entre las ondas de tensión y corriente) y el equilibrado entre las fases. [24]

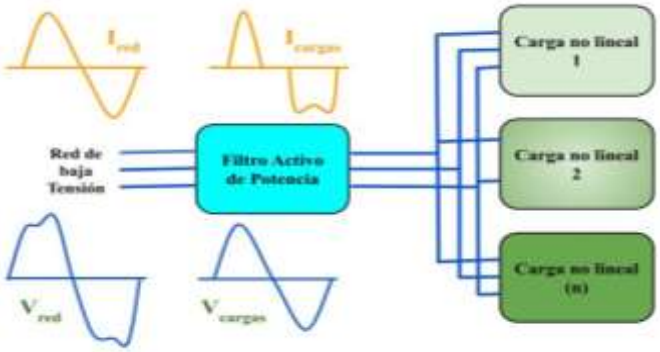


Fig. 3: Filtro activo de potencia
Realizado por: Los Autores

8.2.3.3 Estructura básica del filtro activo de potencia

La estructura básica de un filtro activo de potencia para la compensación de las corrientes no activas y la corrección del factor de potencia se indica en la (Fig. 4). El filtro activo está constituido por cinco bloques bien diferenciados: El propio convertidor de potencia, el enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión de la red, el elemento almacenador de energía del filtro activo de potencia, los dispositivos de acondicionamiento de las señales de potencia y el controlador. Los cuatro primeros elementos son hardware mientras que el controlador también puede un programa que se ejecuta sobre un procesador. [25]

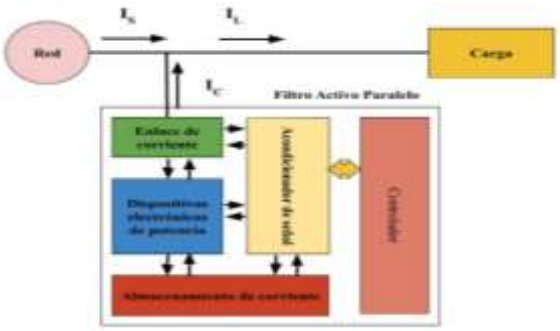


Fig. 3: Estructura de un filtro activo de potencia
Fuente: [25]

8.2.3.4 Generalidades sobre compensación de armónicos

El aumento de cargas no lineales que están presentes en los sistemas de distribución de energía eléctrica, hace que no se consideren como circuitos trifásicos ideales es decir balanceados y con señales sinusoidal puras.

Una carga es no lineal cuando la corriente que circula por ella no tiene la misma forma sinusoidal de la tensión que lo alimenta, algunos de los equipos que presentan características de no linealidad son: los convertidores estáticos (SC Static converters) como rectificadores, inversores, ciclos convertidores, etcétera. A su vez estas cargas no lineales pueden comportarse como fuentes de corriente o de voltaje y este modo de operación depende del tipo de convertidor y los elementos pasivos que se encuentren conectados a él.

En la actualidad la causa principal del aumento de la distorsión armónica en las redes de distribución es la proliferación de convertidores estáticos (SC) de baja potencia. Además de los SC existen otras fuentes de armónicos como son los transformadores, hornos, equipos de arco, lámparas fluorescentes y controladores de voltaje.

Los armónicos causan diferentes problemas en los sistemas eléctricos los cuales son: [26]

- Fallas en banco de condensadores y cables por deterioro del dieléctrico.
- Interferencia en las comunicaciones.
- Perdidas excesivas por calentamiento en máquinas síncronas.
- Perdidas en el núcleo y devanados en transformadores.
- Resonancia.
- Errores en la medición.
- Mala operación de sistemas de control eléctricos.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos de protección.
- Interferencia con sistemas de control y protección de motores.
- Oscilación mecánica en máquinas síncronas y motores de inducción.
- Operación inestable de circuitos de disparo, basados en detección de cruce por cero.

Existen recomendaciones sobre la cantidad de armónicos que una carga debe inyectar en un sistema de potencia, la recomendación Std. IEEE-519-1992, establece los valores para cada uno de los armónicos de voltaje y corriente permisibles, así como los valores de distorsión armónica de acuerdo al tamaño de la carga como lo establece. Estos valores se pueden utilizar para el diseño de instalaciones eléctricas asumiendo la condición de peor caso. Entonces es aconsejable controlar los armoniacos para que los efectos causados por la conexión de la carga no lineal no afecten a los sistemas de potencia. [27]

8.2.3.5 Técnicas para la compensación de armónicos

A. Técnicas tradicionales.

Basan su funcionamiento en componentes pasivos: inductancias, condensadores y transformadores o modificando el esquema de la instalación eléctrica y su misión cualquiera que sea el caso es reducir los armónicos en un punto de conexión a niveles permitidos. Estas técnicas se clasifican por su naturaleza:

- Reducción de las corrientes armónicas de las cargas que lo ocasionan.
- Disminución de la impedancia armónica de la fuente.
- Modificación o rediseño de las instalaciones eléctricas.
- Circulación de armónicos.
- Utilización de inductancias anti-armónicos.
- Instalación de trampas de armónicos

B. Técnicas Activas.

Una forma de reducir la distorsión de la corriente de línea es mejorar la operación del convertidor con respecto a la, corriente que circula a través de él, otra es la utilización, de convertidores adicionales en el sistema de potencia que cumplan la función de compensación activa de armónicos, los cuales modifican la impedancia equivalente de los convertidores para que tengan una mejor operación en relación a la cantidad de armónicos que inyectan o absorben del sistema de potencia. [26]

- Rectificadores con Factor de Potencia Unitario.
- Filtros activos de potencia.

8.2.3.6 Tipos de Filtros Activos

Los filtros activos se clasifican en serie o paralelo y es posible encontrar en algunos sistemas de acondicionamiento una combinación de los dos, esta combinación de filtros activos serie y filtros pasivos se conoce como filtros híbridos.

En la (Fig. 4), es un modelo de un filtro activo paralelo, estos son los más utilizados para eliminar armónicos, compensar potencia reactiva y equilibrio de corrientes desbalanceadas. Este filtro inyecta las corrientes de compensación para eliminar los armónicos o componentes reactivos en el punto de conexión. También se utiliza como compensador estático de potencia

reactiva (STATCON) en redes de sistema de potencia para estabilizar y mejorar la onda de voltaje. [26]

Fig. 4: Construcción de un filtro activo en paralelo
Realizado por: los autores

En la (Fig. 5), se indica un diagrama básico de un filtro en serie. Se conecta antes de la carga, en serie con la alimentación, mediante un transformador. Se utiliza para eliminar voltaje armónico, balancear y regular el voltaje en terminales de la línea.

Fig. 5: Construcción de un filtro activo en serie
Realizado por: Los Autores

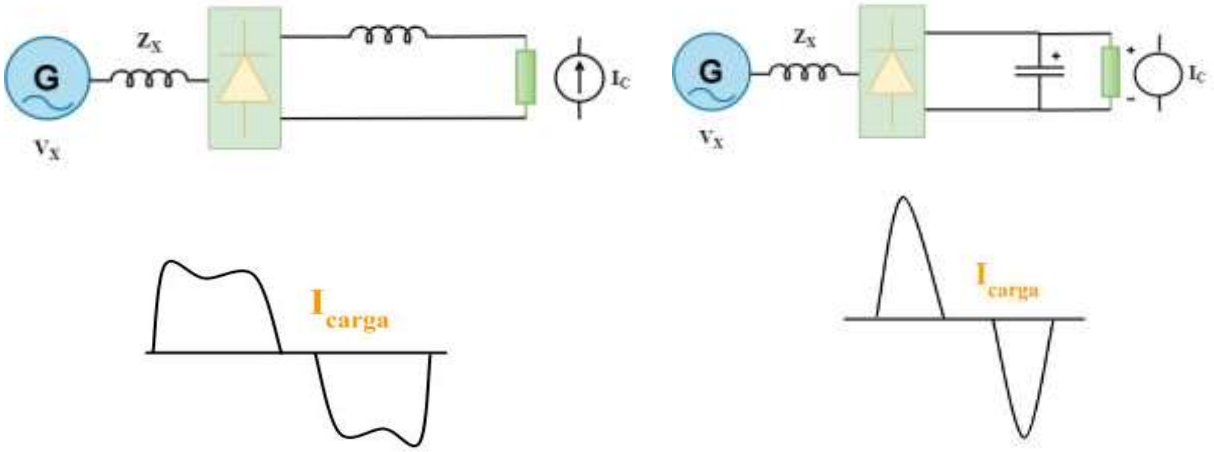
8.2.3.7 Fuentes básicas de perturbaciones y tipos de perturbaciones generadas.

Para poder reducir las perturbaciones con la máxima eficacia posible, es conveniente conocer sus características: como son y cómo se originan.

Las fuentes de perturbaciones más abundantes en la red eléctrica, en la actualidad, son los diversos tipos de convertidores estáticos conectados a la red, y en particular los rectificadores, controlados o no, asociados con diversos tipos de cargas inductivas o capacitivas. En las (Fig.6) se indican, de forma esquemática, estos dos tipos de cargas básicas.

En primer lugar, nos encontramos con una estructura de puente rectificador que alimenta una carga principalmente inductiva. La forma de onda la señal de corriente será del tipo mostrado

en la propia. Con tendencia a presentar una forma de señal cuadrada, en la que la anchura de los diversos semiperiodos dependerá del número de fases y del control del rectificador, si este es del tipo controlado o semicontrolado.



(a) (b)

Fig. 6 Circuito rectificador con carga: (a) Inductiva; (b) Capacitiva
Realizado por: Los Autores

Los APF se pueden clasificar también en: monofásicos, trifásicos de tres hilos y trifásicos de cuatro hilos.

Otra posible clasificación es la de filtros pasivos, activos o mixtos. Los filtros pasivos, como su nombre indica, están construidos mediante la asociación de inductancias y capacidades, calculadas para la eliminación de armónicos concretos. Los filtros activos, en cambio, están constituidos por uno o varios inversores, normalmente de tensión (VSI). Finalmente, los filtros mixtos, están formados por la asociación de filtros pasivos y activos. [24]

8.2.4 BANDA DE HISTÉRESIS

La banda de histéresis es ampliamente utilizada en el control del filtrado activo de corriente y el principal método de control sea capaz de suministrar una respuesta dinámica más rápido posible, las corrientes inyectadas por el filtro al sistema de potencia son censadas y comparadas de forma instantáneas con las corrientes de referencia del sistema y la señal de error resultante e(t) inyectada a un circuito comparador de histéresis de amplitud fija que depende ancho de

banda de histéresis (HB) y del valor instantáneo de la señal de error y esto a su vez generan los pulsos de activación de los elementos semiconductores del inversor. (Fig. 7)

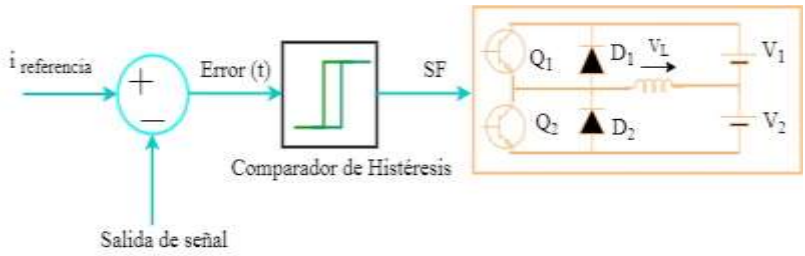


Fig. 7 Diagrama de control por Histéresis
Realizado por: Los Autores

Además, la desviación de la corriente inyectada en el sistema con respecto a corriente de referencia no debe superar el ancho de la banda de histéresis por lo que el inversor debe mantener el estado conmutado ya que la lógica de control está dada de la siguiente forma.

Si: error < (iref – 0.5HB) entonces $g = 1$ el interruptor superior se activa y simultáneamente es desconectado el interruptor inferior.
Si: error > (iref + 0.5HB) entonces $g = 0$ el interruptor inferior se activa y simultáneamente es desconectado el interruptor superior. Ver (Fig. 8) [28]

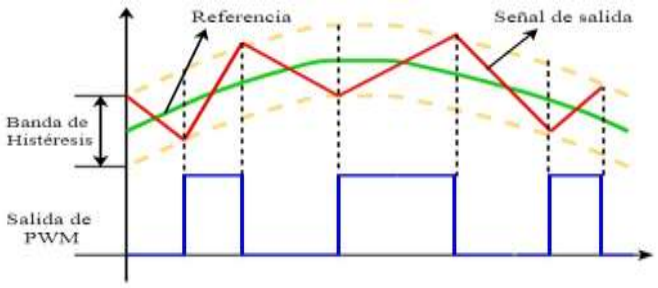


Fig. 8 Ondas de control por histéresis de banda fija
Realizado por: Los Autores [28]

8.2.5 MODELACIÓN POR ANCHO DE IMPULSOS (PWM).

8.2.5.1 Concepto de PMW

Sus siglas PULS WIDTH MODULATION, traducidas al español es, modulación por ancho de pulso. La señal PWM (Fig. 9) consiste en una señal con determinada frecuencia y por lo tanto con un mismo periodo que consta de dos valores fijos de tensión, uno alto (HIGH), que es la amplitud y otro bajo (LOW), que es el valor nulo**.**

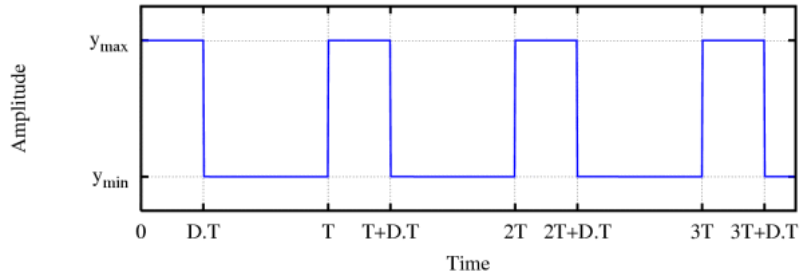


Fig. 9 Señal PWM
Fuente: [29]

En la (Fig.10) del esquema de modulación por onda triangular muestra la secuencia de conmutación del PWM se determinar la comparación de la señal de error, por una señal portadora triangular donde se observa en la figura anterior entonces se le añade al esquema una ganancia proporcional-integral (PI) para luego procesar la señal de error (Fig. 11).

Se ajusta los parámetros K_p y K_i de esta forma puede actuar sobre el error en régimen estacionario y la respuesta transitoria del control. La ventaja de este elemento de control es que este sistema utiliza una onda triangular de frecuencia fija y mantiene una frecuencia de conmutación constante en el dispositivo convertidor, y las desventajas son los posibles errores en la amplitud y fase de la corriente de salida de PWM. [29]

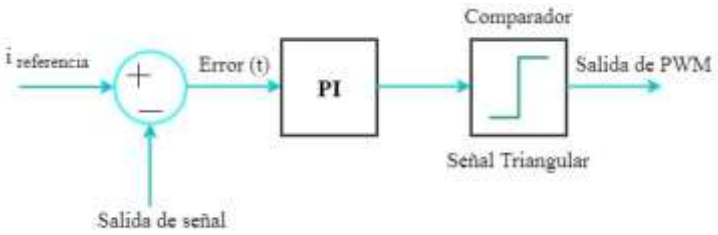


Fig. 10 Diagrama de control PWM por comparación con triangular
Realizado por: Los Autores

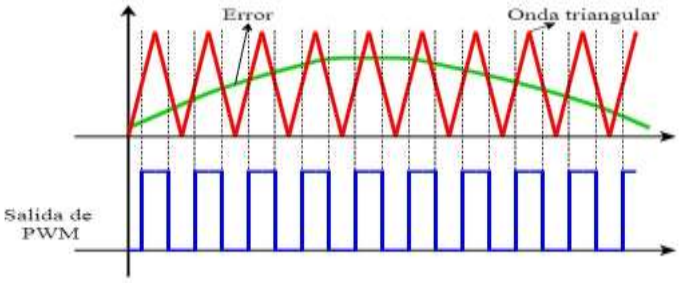


Fig. 11 Onda de señal PWM por comparación triangular
Realizado por: Los Autores

También consta de otro parámetro, que se denomina ciclo de trabajo (duty cycle), y que se refiere al porcentaje de tiempo que el pulso (la cantidad de voltaje entregada) está en activo durante un ciclo o periodo.

Otro parámetro importante es el ancho de pulso (PW – Pulse Width), que define el tiempo que dura el pulso. (Fig. 12).

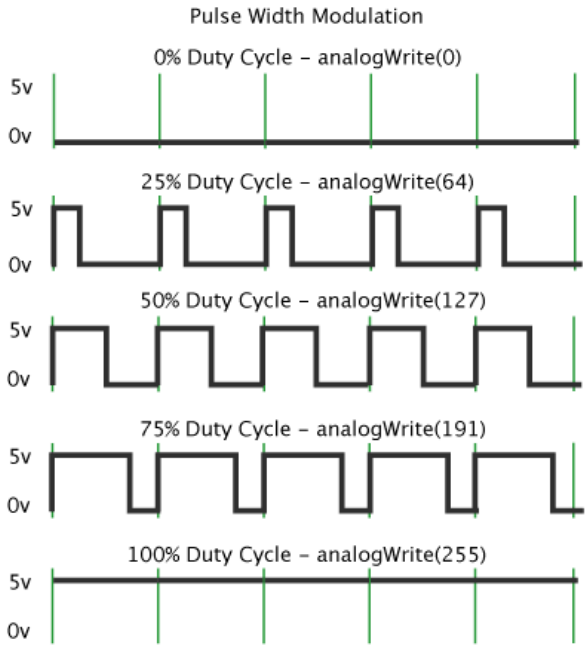


Fig. 12 Tiempo de pulsos de señal PWM
Fuente: [29]

Por tanto, el PWM es una técnica que consiste en variar el ancho de pulso de una señal de voltaje cuadrada con el objetivo de controlar la cantidad de potencia administrada a los componentes o elementos electrónicos conectados. De esta forma, con un ciclo de trabajo del 100 % entregaríamos los 5V totales; un ciclo de trabajo del 50 % entregaría un voltaje de 2.5 V; con un ciclo de trabajo del 10 % conseguiríamos un voltaje del 0.5 V; y así sucesivamente. [29]

8.2.6 PHASE LOCKED-LOOP (PLL)

El circuito PLL es un sistema realimentado cuyo objetivo principal consiste en generación de una señal de salida con amplitud fija y frecuencia coincidente con la de entrada, dentro de un margen determinado. Comprende tres etapas fundamentales: (Fig. 13)

- Comparador de fase (CF). Suministra una que depende del valor absoluto del desfase entre las señales de salida y, de entrada. En algunos casos, esta etapa está constituida por un multiplicador.
- Filtro pasa-bajo (PL). Destinado a la transmisión de la componente de baja frecuencia de la salida de etapa anterior.
- Oscilador controlado por tensión (VCO). Genera la tensión de salida, con frecuencia dependiente de la tensión de salida del filtro PL.

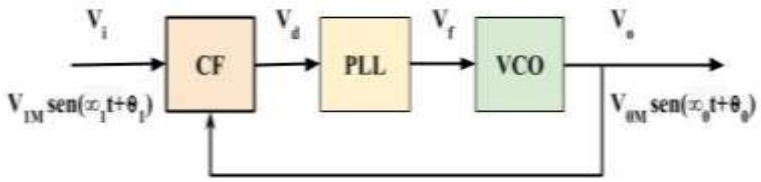


Fig. 13 Diagrama de bloques circuito PLL
Realizado por: Los Autores

8.2.6.1 Consideraciones

El filtro pasa-bajo juega un doble papel en las prestaciones del PLL. Por una parte, atenúa las componentes de alta frecuencia en la salida del de fase; por otra, provee de una cierta memoria al circuito que asegura el volver a capturar de la señal si el sistema sale de sintonía a causa de un ruido transitorio, por ejemplo. Constituye, sin duda, uno de los principales problemas del diseño. [30]

8.2.6.2 Aplicaciones

1. Una de las aplicaciones principales del PLL es la detección y separación de componentes del espectro de la señal de entrada contenidos en el margen de captura. Por ejemplo, la tensión de entrada en el caso de la figura 6 es cuadrada con 5(V) de amplitud y frecuencia de 140(Hz) y su séptimo armónico (980Hz y 910mV) cae dentro del margen de captura controlando la frecuencia de la señal de salida.

   En los casos que el PLL no suministre tensión de salida sinusoidal, triangular o cuadrada, por ejemplo, el circuito puede entrar en sintonía de una forma intempestiva o no deseada. Este efecto se produce para frecuencias de entrada elevadas, al coincidir con algún armónico de la señal de salida. (Fig. 14) [31]

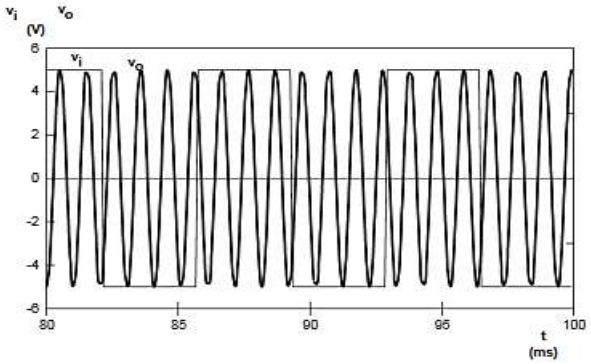


Fig. 14 Sintonía del PLL con el séptimo armónico de una señal de entrada
Fuente: [31]

2. Constituye una aplicación interesante del PLL el filtrado o reconstrucción de señales con altos niveles de ruido. Por ejemplo, en la figura 7 muestra la respuesta del circuito ante una señal de entrada de 1040 (Hz) altamente contaminada; puesto que la componente fundamental es la única situada dentro del margen de captura, se produce una sintonía a su frecuencia. (Fig. 15)

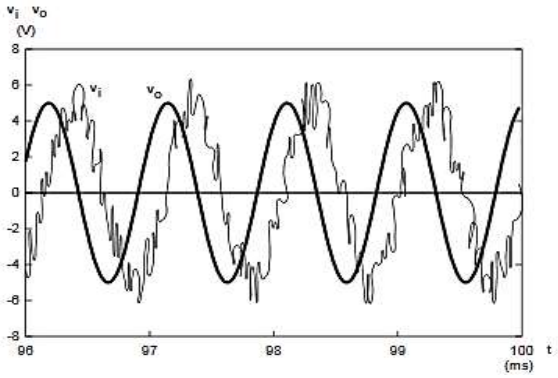


Fig. 15 El PLL ante una señal de entrada sinusoidal contaminada de 1040Hz
Fuente: [31]

3. El fundamento de los sintetizadores de frecuencia reside en la realimentación del circuito de un PLL mediante un divisor de frecuencia (relación N), véase la (Fig. 16). Con ello se consigue la sintonía cumpliendo relación $\omega_0 = N\omega_i$. (Fig. 16)

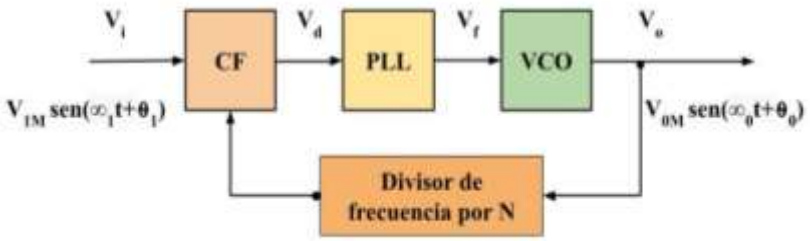


Fig. 16 Diagrama de Bloques de un sintetizador de frecuencia
Fuente: [31]

4. El PLL ofrece un amplio espectro de aplicaciones en los campos de la demodulación FM y la multiplicación, división y síntesis de frecuencia. Una aplicación típica es la modulación FSK Frequency Shift Keying) para la transmisión de datos mediante una portadora que es desplazada entre dos frecuencias preseleccionadas. El desplazamiento se consigue controlando el VCO mediante la señal binaria de datos a transmitir. [31]

8.2.7 CONTROL ÓPTIMO

En los años setenta se dividió la historia de la teoría de control, a partir de esta época se la llama teoría del control clásica a los trabajos presentados hasta ahora. Después los trabajos de Bellman, en Programación Dinámica, los trabajos de R. Kalman, en filtrado y análisis algebraico de problemas de control, y en estados unidos los trabajos de L. Pontryagain, con su principio del máximo, en la antigua Unión Soviética, se estableció las bases de la investigación de la teoría del control moderno, llamado como Control Óptimo. [32]

Como concepto de optimización se emplea, cada vez por una determinada situación que presentan múltiples soluciones, y adopta aquella que bajo ciertas condiciones se considera óptima. El control óptimo, también conocido como optimización dinámica, se encarga de estudiar el mejoramiento de los sistemas que evolucionan con el tiempo. [33]

- Definir el modelo matemático del sistema controlado
- Especificar el criterio de optimizar
- Especificar las condiciones de contorno para el estado,
- Escribir las restricciones sobre el estado y los controles y
- Describir cuales variables del problema están libres

El control optimo tiene como fin buscar un control que haga que el sistema o modelo a controlar tenga la respuesta deseada y a su vez, dicho control optimice (maximice o minimice). Todo esto se lo realiza con las condiciones impuestas por el sistema físico. [34]

8.2.7.1 Aplicación de la Teoría del Control Óptimo en Ingeniería Eléctrica

Las modernas técnicas de C.A. pueden aplicarse en el control de máquinas eléctricas gracias al avance tecnológico producido en el campo de los componentes semiconductores. Esto ha hecho posible que los mismos puedan manejar corrientes y voltajes relativamente grandes; lo suficiente para controlar la mayoría de las máquinas eléctricas que se utilizan en la industria, en una manera prácticamente a voluntad.

8.2.7.2 Control de Sistemas Eléctricos de Potencia

Sería innecesario destacar la importancia que el C.A. ha tenido y tiene en el control de los sistemas eléctricos de potencia, pues es sabido que, por antigua que sea una central, la misma dispone de dispositivos de control que, en forma automática regulan parámetros de interés; tales como: frecuencia, tensión, potencia, etc.

Un sistema interconectado es un ejemplo típico de sistema de control multivariable e interactuante; es decir, cuando se pretende modificar una variable en una de las centrales del sistema, puede resultar la modificación de otra variable en otro u otros puntos del mismo. [35]

8.2.8 TEORÍA DE OPTIMIZACIÓN NO LINEAL.

La teoría de la optimización matemática es definida fundamentalmente del problema de programación no lineal (Nonlinear Programming Problem o NLPP) expresado a continuación:

$$Optimizar \quad f(x_1, \ldots\ldots, x_n) \tag{6}$$

Sujeto a:

$$h_i(x_1, \ldots\ldots, x_n) = 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{7}$$

$$g_j(x_1, \ldots\ldots, x_n) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{8}$$

Se obtiene:

$$(x_1, \ldots\ldots, x_n) \in A \subseteq \mathbb{R} \tag{9}$$

Las funciones f, hi, gj: A → ℝ son reales de diversas variables y A $\subseteq \mathbb{R}^n$ pero A representa a un conjunto abierto y también f, hi, gj ∈ C (A) por lo que las funciones del problema son derivables.

Para resolver el problema mediante la teoría de optimización matemática consiste en primer lugar en buscar valores para las variables x_1 que resuelve el sistema formado por las restricciones y en segundo lugar encontrar de entre estos valores aquel que proporcione el máximo o mínimo valor para la función real $f(x_1, \ldots\ldots, x_n)$.

8.2.8.1 Restricciones activas

El problema de optimización con restricciones NLPP se debe a las restricciones de desigualdad $g_j(x) \leq 0$ esto puede ser activa o saturada en el punto factible x^* , $\in \Omega \iff g_j(x^*) = 0$ en este caso es lo contrario las restricciones puede ser inactiva o no saturada en x^*.

8.2.8.2 El problema de optimización NLPP con restricciones

Sea $x^* \in \Omega$, un punto factible es definido como el conjunto de actividad asociado a x^*, $J(x^*)$ es el conjunto de los índices de las restricciones activas en x^*.

$$J(x^*) = \{j \in \{1, \ldots, p\} |\ \ g_j(x^*) = 0\ \} \tag{10}$$

8.2.8.3 Punto regular

En el problema de optimización con restricciones dado $x^* \in \Omega$, es un punto factible. Porque x^* es regular para las restricciones si la familia de vectores es linealmente independiente.

$$\{\ \{\nabla h_i(x^*)\}_{i=1,\ldots,m}\ , \{\nabla g_i(x^*)\}_{j \in J(x^*)}\ \} \tag{11}$$

8.2.8.4 Casos especiales del problema NLPP:

1.- Problema sin restricciones: En el primer caso no hay ningún tipo de restricciones, es decir, m = p = 0 y el problema es de optimización no lineal.

Optimizar:

$$f(x_1, \ldots\ldots, x_n) \tag{12}$$

Sujeto a:

$$(x_1, \ldots\ldots, x_n) \in A \tag{13}$$

2.- Problemas con restricciones de igualdad o de Lagrange: En el segundo caso el problema planteado se refiere a las restricciones de igualdad, es decir, m ≠ 0 y p = 0

Optimizar:

$$f(x_1, \ldots\ldots, x_n) \tag{14}$$

Sujeto a:

$$h_i(x_1, \ldots\ldots, x_n) = 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{15}$$

$$(x_1, \ldots\ldots, x_n) \in A \tag{16}$$

3.- Problemas univariantes o unidimensionales: En el tercer caso es a un problema particular sin restricciones en el que hay una sola variable, es decir n = 1, m ≠ 0 y p ≠ 0.

Optimizar:

$$f(x) \tag{17}$$

Sujeto a:

$$x \in I \subseteq \mathbb{R} \tag{18}$$

La I en la mayoría de las ocasiones es un intervalo.

8.2.8.5 Espacio tangente

Es x^* un punto factible para el problema de optimización ya que el espacio tangente es un conjunto de vectores definido como:

$$M(x^*) = \{d \in \mathbb{R}^n | \quad \nabla^T h_i(x)d = 0; \quad \nabla^T g_j(x^*)d = 0, \ i = 1, \ldots\ldots, m; j \in J(x^*)\} \tag{19}$$

Derivando se obtiene:

$$M(x^*) = \{d \in \mathbb{R}^n | \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial h_i}{\partial x_k}(x^*)d_k = 0, \quad i = 1, \ldots, m; \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial g_i}{\partial x_k}(x^*)d_k = 0, \quad j \in J(x^*)\} \tag{20}$$

8.2.8.6 Las principales condiciones de Karush-Kuhn-Tucker

Las condiciones del problema general de optimización no lineal es cumplir sus posibles soluciones optimas y estas condiciones son las llamadas condiciones de Karush-Kuhn-Tucker.

Las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker para un problema con objetivo de minimizar y aquella que se deben cumplir cuando el objetivo es de maximizar.

A. Minimización

Planteado el problema

$Minimizar \ f(x)$ Sujeto a:

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, \ldots, m \tag{21}$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \ldots, p \tag{22}$$

Las f, hi, gj: A → ℝ son funciones de clase C^1 (A) y A ⊆ $\mathbb{R}^n$ es un conjunto abierto. Entonces diremos que $x^* \in A$ es un punto de Karush-Kuhn-Tucker o que cumple las condiciones mínimas de Karush-Kuhn-Tucker para el problema planteado si y solo si $\exists \ \lambda_1, \ldots, \lambda_m, \mu_1, \ldots, \mu_p \in \mathbb{R}$, de esta forma deben cumplir las siguientes condiciones:

1. **Condición estacionaria**

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla h_i(x^*) + \sum_{j=1}^{p} \mu_i \nabla g_i(x^*) = 0 \tag{23}$$

2. **Condición de factibilidad**

$$h_i(x^*) = 0 \quad i = 1, \ldots, m \tag{24}$$

$$g_j(x^*) \leq 0 \quad j = 1, \ldots, p \tag{25}$$

3. Condición de positividad

$$\mu_i \geq 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{26}$$

4. Condición de holgura

$$\mu_j g_j(x^*) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{27}$$

Los valores de $\lambda_1, \ldots\ldots, \lambda_m, \mu_1, \ldots\ldots, \mu_p$ se llaman multiplicadores entre estos podemos distinguir los multiplicadores de la Lagrange asociados a las restricciones de igualdad y los de Karush-Kuhn-Tucker asociados también a las restricciones de desigualdad.

El punto $x^* \in A \cap \Omega$ que cumple con la condición estacionaria se puede decir que son puntos críticos y que serán condicionados de acuerdo al problema que haya restricciones de algún tipo. Estos tipos de condiciones se les expresa en términos de la llamada función Lagrange y se define la función objetivo y las restricciones de tal forma como:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda_1 h_1(x) + \cdots + \lambda_m h_m(x) + \mu_1 g_1(x) + \cdots + \mu_p g_p(x) \tag{28}$$

Siendo:

$$\lambda = (\lambda_1, \ldots, \lambda_m) \tag{29}$$

$$\mu = (\mu_1, \ldots, \mu_p) \tag{30}$$

y en las condiciones estacionarias se expresa de la siguiente forma al momento de derivar las componentes de x.

$$\nabla_x L(x, \lambda, \mu) = 0 \tag{31}$$

B. Maximización

Las condiciones equivalentes para un problema de maximización son de la forma:

$Maximizar \ f(x)$

Sujeto a:

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{32}$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{33}$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{34}$$

También la función maximizar es lo opuesto de minimizar la función ya que se puede comprobar aplicando la definición de punto de Karush-Kuhn-Tucker al problema lo que cambia es la condición de positiva a una condición negativa.

$Minimizar \;\; g(x) = -f(x)$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{35}$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{36}$$

Las f, hi, gj : A → ℝ son funciones de clase C^1 (A) y A ⊆ $\mathbb{R}^n$ es un conjunto abierto. Entonces diremos que $x^* \in A$ es un punto de Karush-Kuhn-Tucker o que cumple las condiciones mínimas de Karush-Kuhn-Tucker para el problema planteado si y solo si $\exists\, \lambda_1, \ldots\ldots, \lambda_m, \mu_1, \ldots\ldots, \mu_p \in \mathbb{R}$, de esta forma deben cumplir las siguientes condiciones: [36]

1. **Condición estacionaria**

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla h_i(x^*) + \sum_{j=1}^{p} \mu_i \nabla g_i(x^*) = 0 \tag{37}$$

2. **Condición de factibilidad**

$$h_i(x^*) = 0 \quad i = 1, \ldots\ldots, m \tag{38}$$

$$g_j(x^*) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{39}$$

3. **Condición de positividad**

$$g_j(x^*) \leq 0 \quad j = 1, \ldots\ldots, p \tag{40}$$

4. **Condición de holgura**

$$\mu_j g_j(x^*) \leq 0 \quad j = 1, \ldots, p \tag{41}$$

8.2.9 TEORÍA ABC OPTIMIZACIÓN NO LINEAL

El objetivo de la optimización no lineal es encontrar los valores de las variables de las decisiones optimas de un problema, es decir; encontrar cual es el máximo o el mínimo de una determinada función sujeto a unas condiciones o restricciones en el que constituye las limitaciones a las cuales se encuentra sujeto el problema. (Fig. 17)

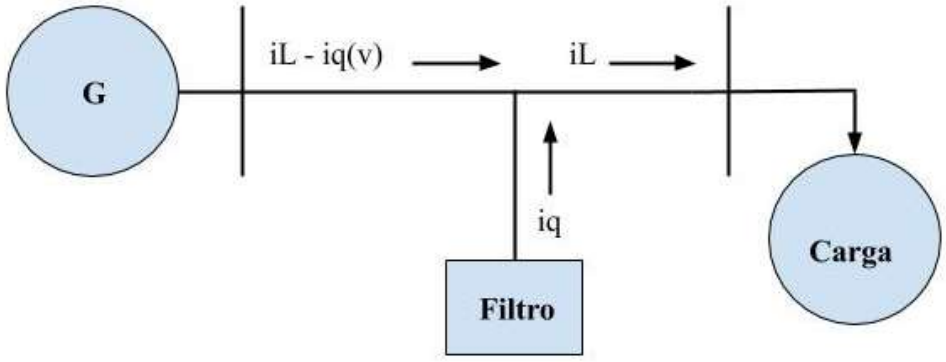


Fig. 17 Representación de voltaje y corriente, modelo para la compensación activa del filtro
Realizado por: Los Autores

La ecuación (42) representa las pérdidas cuadráticas que existe en sistema trifásico debido a los conductores de los circuitos primarios y secundarios, en los devanados, en los núcleos de los transformadores de distribución y el ingreso de cargas no lineales.

En la ecuación (43) tiene una restricción de potencia del sistema para compensar la potencia reactiva e igualar a cero para minimizar los armónicos del sistema de distribución.

Minimizar:

$$\sum_{K=1}^{3} \frac{1}{2} (iLk - iqk)^2 \tag{42}$$

Sujeto a:

$$\sum_{K=1}^{3} vk * iqk = 0 \tag{43}$$

Donde:

$\boldsymbol{k}$ = fases (a, b, c)

$\boldsymbol{iLk}$ = corrientes de línea instantánea en (k)

$\boldsymbol{iqk}$ = corriente de compensación instantánea en (k)

$\boldsymbol{Vk}$ = voltaje instantáneo en fase (k)

En la ecuación (44) el voltaje y la corriente se multiplica por un porcentaje de error (λ) para minimizar la corriente de línea instantánea mediante la corriente de compensación instantánea:

$$\mathrm{L}(\mathrm{iqk},\lambda) = \sum_{\mathrm{K}=1}^{3} \frac{1}{2}(\mathrm{iLk} - \mathrm{iqk})^2 + \lambda \sum_{\mathrm{K}=1}^{3} \mathrm{vk} * \mathrm{iqk} = 0 \tag{44}$$

La ecuación (44) se debe derivar con relación a la corriente del filtro (∂iqk), de la misma forma se deriva la variación de error ($\partial\lambda$) para obtener las ecuaciones (45 y 46) respectivamente, con las condiciones estacionaria y de factibilidad de KKT.

$$\frac{\partial L}{\partial iqk} = (iLk - iqk)(-1) + \lambda vk = 0 \tag{45}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = vk\ iqk = 0 \tag{46}$$

Después de derivar se debe multiplicar entre las ecuaciones por el voltaje de línea (vk), ecuación (46), para obtener la ecuación (47) donde se simplificará la potencia activa del filtro.

$$-(iLk - iqk)vk + \lambda vk^2 = 0 \tag{47}$$

$$-iLkvk + iqkvk + \lambda vk^2 = 0 \tag{48}$$

Al eliminar la corriente del filtro ecuación (48) se obtiene la sumatoria de las tres fases de voltaje y corriente del sistema.

$$-\sum iLk\, vk + \lambda \sum v\, k^2 = 0 \tag{49}$$

Así se obtiene la potencia trifásica más los errores de variación en el voltaje de línea en ecuación (50).

$$-P_{3\phi} + \lambda \left(\sum vk^2 \right) = 0 \tag{50}$$

Con esto se despeja lambda optimo (λ) de la ecuación (51) que permitirá el control de los disparos del filtro para las tres fases en la ecuación (52). [37]

$$\lambda = \frac{P}{\sum_{k=1}^{3} vk^2} \tag{51}$$

Reemplazando:

$$-iLk + iqk + \lambda vk = 0 \tag{52}$$

$$iqk = iLk - \lambda vk \tag{53}$$

Se obtiene la ecuación de control:

$$iqk = iLk - \left(\frac{P}{\sum v\, k^2} \right) vk \tag{54}$$

Las señales de onda distorsionada de voltaje y corriente ingresaran a la ecuación (54) programada en Matlab, que proporcionara la señal de corriente de las tres fases del sistema que se utilizará para el control del filtro al momento de realizar los disparos de la corriente instantánea para la onda faltante.

8.2.10 TRANSFORMADA DE CLARKE

Esta transformada permite cambiar las variables de voltaje y corriente de un sistema trifásico (a, b, c) a un sistema de dos variables denotadas como alfa (θ) y beta (β).

Como se muestra en la (Fig. 18) el eje-a coincide con el eje de la fase a, y el eje-b está atrasado 90º. Para que esta transformación sea bidireccional, una tercera variable conocida como componente de secuencia-cero se adiciona.

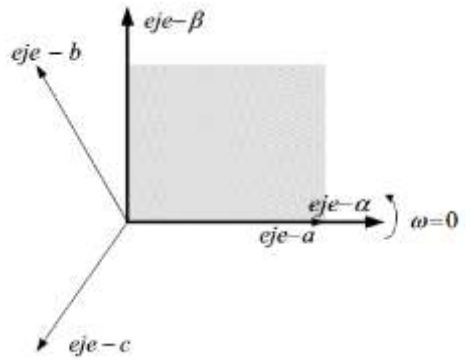


Fig. 18 Relación entre las variables θβ y ABC
Fuente: [38]

A través de la transformada de Clark se modifican las tres corrientes de entrada a un equivalente ortogonal de dos fases. Las ecuaciones para realizar esta modificación son:

$$I_{\propto} = \frac{2}{3} i_{\propto} - \frac{1}{3}(i_b - i_c) \tag{55}$$

$$I_{\beta} = \frac{2}{3}(i_b - i_c) \tag{56}$$

$$I_0 = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \tag{57}$$

Donde $I_{\propto}$ e I_{β} son las representaciones de las corrientes de entrada en un marco de referencia ortogonal; I_0 es la componente homopolar del sistema.

En muchas aplicaciones el componente homopolar es menos importante. De este modo en ausencia del componente homopolar del vector en el espacio $\mu = \mu_{\alpha} + j\mu_{\beta}$, representan las tres fases de la señal de entrada original. Ahora consideramos la corriente $I_{\propto}$ se superpone a i_a y además $i_a + i_b + i_c = 0$. En este caso las corrientes de entrada pueden ser transformadas a través de las siguientes relaciones: [38]

$$i_{\alpha} = i_a \tag{58}$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \tag{59}$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{60}$$

La matriz de transformación $\lfloor T_{\alpha\beta 0} \rfloor$ esta dada por:

$$\lfloor f_{\alpha\beta 0} \rfloor = \lfloor T_{\alpha\beta 0} \rfloor * \lfloor f_{abc} \rfloor \tag{61}$$

La transformada inversa es:

$$\lfloor T_{\alpha\beta 0} \rfloor = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{62}$$

La modificación del marco $(\alpha; \beta)$ a un sistema trifásico, se realiza por medio de las siguientes ecuaciones:

$$i_a = i_\alpha \tag{63}$$

$$i_b = -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \tag{64}$$

$$i_c = -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \tag{65}$$

$$\left[T_{\alpha\beta 0}\right]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{66}$$

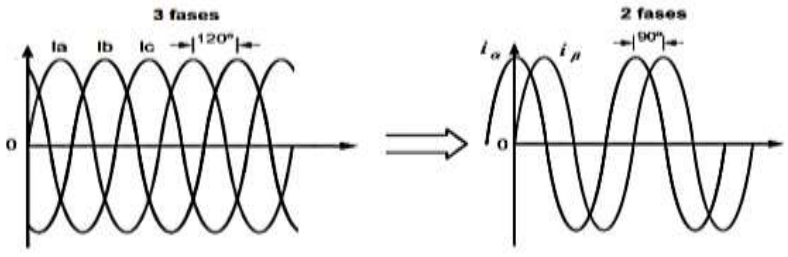


Fig. 19 Resultados de la transformada de Clark
Fuente: [39]

8.2.11 TRANSFORMADA DE PARK

Se tiene dos vectores (α y β), desfasados 90° por donde circulan corrientes (i_α y i_β) respectivamente que se requiere sustituir el efecto estático, por los vectores (d, y q) desfasados 90° pero que se muevan sobre un Angulo (ρ) para seguir al marco (d, q) acoplado al flujo de corriente:

Las señales de onda de las tres fases (ABC), se toma para la transformada de Clark donde se variará los tres vectores de 120° a dos vectores (α y β), desfasados 90°, que posteriormente tomará la transformada de Park para cambiar a vectores (d, y q) donde la velocidad angular se define como el voltaje de la red, además establece un ángulo de desfase (ρ) a 0° para que la señal de voltaje (Vα) se represente en DC de 0V **(Vd)** y que el voltaje (Vβ) se represente como DC negativo **(Vq).**

La rotación sobre el ángulo ρ está dada por las siguientes expresiones:

$$i_d = i_\alpha cos\rho + i_\beta sen\rho \tag{67}$$

$$i_q = -i_\alpha sen\rho + i_\beta cos\rho \tag{68}$$

La Transformada de Park es más conocida por la transformación de tres fases a dos fases en el análisis de máquinas sincrónicas. La matriz de transformación es de la forma:

$$\lfloor f_{dq0} \rfloor = \lfloor T_{dq0}(\theta_d) \rfloor * \lfloor f_{abc} \rfloor \tag{69}$$

Donde la matriz transformación (dq0) está definida por:

$$\lfloor T_{dq0}(\theta_d) \rfloor = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_d & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{70}$$

Se debe obtener nuevamente las corrientes para alimentar. Etas corrientes son función de la salida del controlador (id^*, iq^*) y el ángulo del flujo θ¸la salida de estas va a un modulador por ancho de pulso (PWM) donde se efectúa el control de la cantidad de energía que se requiere. Esto se logra a través de la transformada inversa y de esta manera obtener las corrientes $i_a,\ i_b\ e\ i_c$, las cuales son las que ingresan al PWM para ser convertidas en pulsos de energía. [38]

La matriz inversa esta dada por:

Los vectores en el marco (d-q) son transformados al marco de dos fases α-β; calculadas con la rotación sobre el ángulo ρ, de acuerdo a las siguientes formulas:

$$i_{\propto} = i_d cos\rho - i_q sen\rho \tag{71}$$

$$i_{\beta} = i_d sen\rho + i_q cos\rho \tag{72}$$

$$\left[T_{dq0}(\theta_d)\right]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}.\begin{bmatrix} cos\theta_d & -sen\theta_d & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -sen\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & -sen\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{73}$$

La transformación de Park es usada para transformar las cantidades del estator en el marco de referencia (dq), el cual está fijo al rotor, con el eje positivo (d) alineado con el eje magnético del devanado de campo. El eje positivo (q) está adelantado 90º al eje positivo (d) en la transformación original. (Fig. 20)

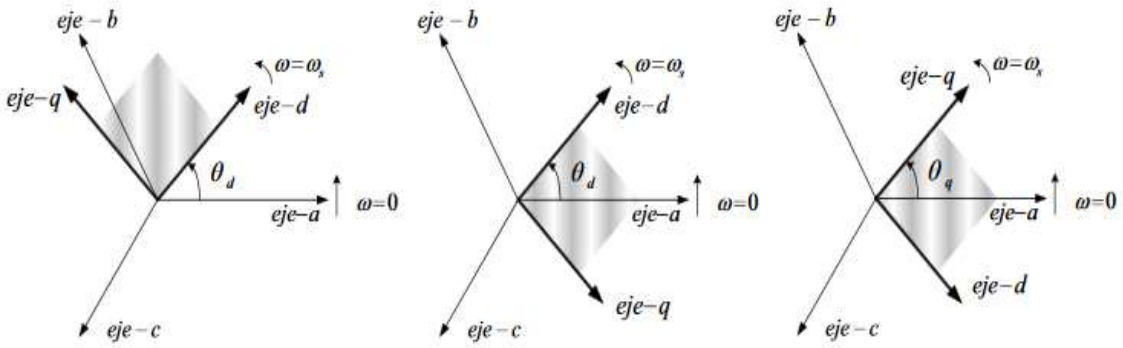


Fig. 20 Relación de las variables DQ0 y ABC
Realizado por: [38]

Algunos autores definen que el eje (q) está retrasado al eje (d) por 90º. Definido de esta manera, el eje (q) coincide con el voltaje inducido.

$$\left[T_{dq0}(\theta_d)\right] = \frac{2}{3}.\begin{bmatrix} cos\theta_d & cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}\,\theta_d & sen\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & sen\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{74}$$

Otra forma de la transformación qd0 en el que el eje (q) adelanta al eje (d) y la transformación está expresada en términos del ángulo (θ_d) , entre el eje (q) y el eje (a), se muestra en la figura anterior. Ahora la expresión de transformación es la siguiente:

$$\lfloor f_{dq0} \rfloor = \left[T_{dq0}(\theta_q)\right] * \lfloor f_{abc} \rfloor \tag{75}$$

Donde:

$$\left[T_{dq0}(\theta_d)\right] = \frac{2}{3}.\begin{bmatrix} cos\theta_q & cos\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}\,\theta_q & sen\left(\theta_q - \frac{2\pi}{3}\right) & sen\left(\theta_q + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{76}$$

La matriz inversa está dada por:

$$\left[T_{dq0}(\theta_d)\right]^{-1} = \frac{2}{3}.\begin{bmatrix} cos\theta_d & \text{sen}\,\theta_d & 1 \\ cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & sen\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & sen\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{77}$$

La relación entre θq y θd, en la transformación de Park original es:

$$\theta_q = \theta_d + \frac{\pi}{2} \tag{78}$$

Sustituyendo la relación anterior en $\left|T_{dq0}(\theta_d)\right|$ y haciendo uso de las fórmulas de reducción trigonométrica:

$$cos\left(\theta_d + \frac{\pi}{2}\right) = -sen\theta_d \tag{79}$$

$$sen\left(\theta_d + \frac{\pi}{2}\right) = cos\theta_d \tag{80}$$

De esta manera se puede concluir que las dos transformaciones $\left|T_{dq0}(\theta_q)\right|$ y $\left|T_{dq0}(\theta_d)\right|$ son básicamente las mismas, excepto en el orden de las variables (d) y (q). [39]

8.2.12 TEORÍA DE AKAGI

La teoría de Akagi propone un concepto nuevo del entendimiento de la potencia activa instantánea y de la potencia reactiva instantánea y esto puede ser usado en régimen transitorio con voltajes e intensidades senoidales y no senoidales.

El principal objetivo de Akagi es obtener la intensidad activa instantánea y la intensidad reactiva instantánea de tal forma que sean explicados de manera de flujos de potencia entre el sistema de generación y el sistema de receptor por lo que la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea se basa en el diseño de compensadores estáticos de potencia que no necesiten de elementos que almacene energía para poder llevar a cabo la compensación.

Para el caso de un sistema a tres hilos es necesario la conversión del sistema vectorial de voltaje e intensidad del sistema a un nuevo sistema de ejes ortogonales α, β, pues se usa la transformada de Park.

Está definido el sistema trifásico por las fases ABC a continuación:

Para los voltajes,

$$\bar{V}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = [P] * \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \tag{81}$$

la matriz $[P]$, es la transformada de Park.

Para las corrientes,

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = [P] * \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (82)$$

Utilizando las variables de transformadas de Akagi se puede definir las potencias: [30]

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha\beta} \\ Q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\propto & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (83)$$

Akagi definió la $P_{\alpha\beta}$ como la Potencia real Instantánea, pues se obtiene como producto de voltajes y corrientes de la misma fase.

$$p_{\alpha\beta} = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = V_A i_A + V_B i_B + V_C i_C \quad (84)$$

y expresados como:

$$p(t) = P_{\alpha\beta} = \bar{P} + \tilde{p} \quad (85)$$

El término $\bar{P}$ es una constante y representa la potencia activa del sistema y el segundo término $\tilde{P}$ aparece del sistema trifásico cuando existe desequilibrio o presencia de un elemento no lineal en el sistema.

La expresión $q_{\alpha\beta}$, es denominada como la Potencia imaginaria instantánea por lo que fue la verdadera innovación de la fórmula de la teoría de Akagi ya que establece que la reactiva no se puede medir en el plano real sino sobre un eje ortogonal, principalmente definido por el vector potencia imaginaria instantánea y que resulta del producto de voltajes y corrientes de fases distintas del sistema trasformado. Por lo que Akagi propone como unidad para esta potencia imaginaria el IVA (Imaginary Volt-Ampere).

$$q_{\alpha\beta} = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha \quad (86)$$

Por lo cual la fórmula de esta potencia en el sistema original ABC será:

$$q = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_A - V_B)i_C + (V_B - V_C)i_A + (V_C - V_A)i_B] \quad (87)$$

y será usada para medir la potencia reactiva del sistema trifásico lineales.

La potencia imaginaria instantánea expresada por Akagi se puede descomponer en dos términos:

$$q(t) = q_{\alpha\beta} = \bar{Q} + \tilde{q} \quad (88)$$

El término $\bar{Q}$ es constante y representa la potencia reactiva del sistema y el segundo término $\tilde{q}$ aparece del sistema desequilibrado y no lineal por la suma de los términos senoidales. [40]

8.2.12.1 Potencia reactiva en sistema monofásico

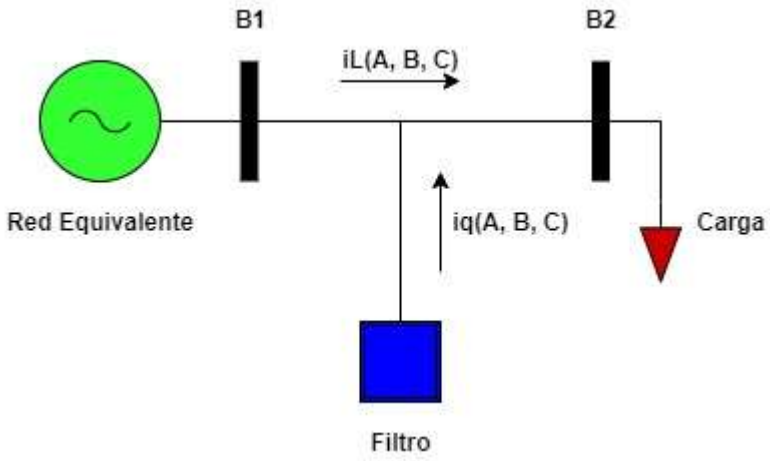


Fig. 21 Circuito de distribución monofásica radial con filtro
Realizado por: Los Autores

En la (Fig. 21) se diagrama un modelo de una red de distribución monofásica radial con la implementación del filtro activo de potencia que permitirá reducir las perturbaciones como lo es el bajo factor de potencia y los armónicos.

Las siguientes ecuaciones servirán para el control de la potencia reactiva:

$$v = \sqrt{2}\, v_{rms} \times cos(\omega t) \tag{89}$$

$$i = \sqrt{2}\, i_{rms} \times cos(\omega t + \emptyset) \tag{90}$$

$$P(t) = v(t) \times i(t) = 2v_{rms} \times i_{rms} \times \cos(\omega t) \times \cos(\omega t + \emptyset) \tag{91}$$

$$(2v_{rms} \times i_{rms} \times cos^2(\omega t) \times \cos\emptyset) - (2v_{rms} \times i_{rms} \times sen(\omega t) \times \operatorname{sen}\emptyset) \tag{92}$$

8.2.12.2 Potencia reactiva en sistema trifásico (balanceado)

En la (Fig. 22) se diagrama un modelo de una red de distribución trifásica radial (balanceada) con la implementación del filtro activo de potencia que permitirá reducir las perturbaciones en la red como lo es el bajo factor de potencia y los armónicos

Las siguientes ecuaciones servirán para el control de la potencia reactiva:

$$P(t) = [v_a(t) \times i_a(t)] + [v_b(t) \times i_b(t)] + [v_c(t) \times i_c(t)] \tag{93}$$

Como está desfasada 120° entonces tenemos:

$$P(t) = 3v_{rms} \times i_{rms} \times cos\emptyset \tag{94}$$

Detalle de los voltajes y corrientes de cada fase:

$$v_a = v_s \cos(\omega t) \tag{95}$$

$$v_b = v_s \cos(\omega t - 2\pi/3) \tag{96}$$

$$v_c = v_s \cos(\omega t + 2\pi/3) \tag{97}$$

$$i_a = i_s \cos(\omega t + \emptyset) \tag{98}$$

$$i_b = i_s \cos(\omega t + \emptyset - 2\pi/3) \tag{99}$$

$$i_c = i_s \cos(\omega t + \emptyset + 2\pi/3) \tag{100}$$

Entonces la potencia trifásica nos queda así:

$$P_{3\emptyset}(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \tag{101}$$

$$\begin{aligned} P_{3\emptyset}(t) = {} & [v_s \cos(\omega t) * i_s \cos(\omega t + \emptyset)] \\ & + [v_s \cos(\omega t - 2\pi/3) * i_s \cos(\omega t + \emptyset - 2\pi/3)] \\ & + [v_s \cos(\omega t + 2\pi/3) * i_s \cos(\omega t + \emptyset + 2\pi/3)] \end{aligned} \tag{102}$$

$$P_{3\emptyset}(t) = v_s * i_s(\frac{2}{3} * \cos\emptyset = 3v_{rms} * i_{rms} * \cos\emptyset \tag{103}$$

Control para filtros activos (balanceados).

En el marco de referencia αβ:

$$p = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta \tag{104}$$

$$q = v_\alpha * i_\beta + v_\beta * i_\alpha \tag{105}$$

Donde:

$p =$ potencia activa

$q =$ potencia reactiva instantánea

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{106}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{107}$$

$$i_\alpha = a v_\alpha p + a(-v_\beta) q \tag{108}$$

$$i_\beta = a v_\beta p + a v_\alpha q \tag{109}$$

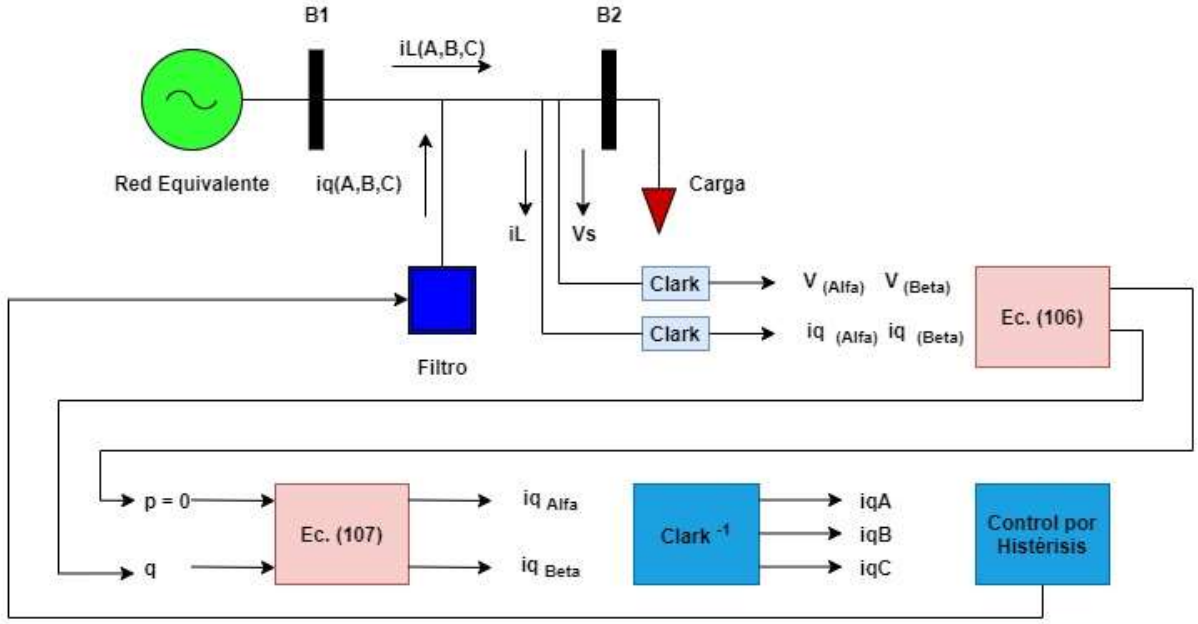


Fig. 22 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado) con filtro
Realizado por: Los Autores

Las ecuaciones (108 y 109) respectivamente sirven para compensar las corrientes instantáneas reactivas (iq_α iq_β) que se retro alimenta a la transformada de Clark y enviar la señal de corriente para las tres fases (ABC) al control por banda de histéresis y este hacia el filtro.

Una vez realizada la revisión de los distintos temas que intervienen en esta investigación se ha determinado que el filtro activo de potencia es el más adecuado para la reducción de armónicos por la adaptabilidad de sus características permitiéndonos controlarlo por medio de la teoría de Akagi. Para esto se realizará una tabla comparativa de las características de los filtros más comunes existentes:

Tabla 2: Comparación de filtros para su elección.

TIPOS DE FILTROS / CARACTERÍSTICAS	FILTRO ACTIVO DE POTENCIA	FILTRO PASIVO DE POTENCIA	FILTRO HIBRIDO DE POTENCIA
Costo de implantación	Alto	Bajo	Medio
Compensación de energía reactiva de carácter inductivo	Alto	Bajo	Medio
Reducción de armónicos	Alto	Bajo	Medio

Componentes de los filtros	Alto	Bajo	Medio
Algoritmo de control apropiados	Alto	Ninguno	Medio
Topología de los filtros de potencia	Alto	Bajo	Medio
Cálculo del diseño de filtro	Alto	Bajo	Medio
Control del Filtro	Alto	Bajo	Bajo
Avance Tecnológico	Alto	Bajo	Bajo
Estructura del filtro	Alto	Bajo	Bajo
Mantenimiento del dispositivo	Bajo	Medio	Alto
Ahorro en facturación	Alto	Bajo	Medio
Diseño de la estructura del dispositivo	Alto	Bajo	Bajo
Los componentes del filtro son voluminosos, pesados.	Bajo	Alto	Alto
La ganancia en potencia y la sintonización del dispositivo con la red.	Bajo	Alto	Alto
Sensibilidad	Alto	Baja	Medio
Señales de salida	Alto	Bajo	Medio
Impedancia	Bajo	Alto	Medio
Alimentación	Alto	Ninguno	Medio

Para realizar la (tabla 2) se ha tomado como referencia tres tipos de filtros más comunes que se utilizan en la actualidad para hacer una comparación de sus características, por lo consiguiente se seleccionó al filtro activo de potencia por su alta eficiencia en la reducción de armónicos y por el control que nos permite realizar al relacionarlo con el algoritmo propuesto en este caso la teoría de Akagi.

9. HIPÓTESIS

Al diseñar un filtro activo de potencia aplicando la teoría de Akagi y realizando una comparación con optimización no lineal para demostrar la efectividad en la reducción de los armónicos en los sistemas eléctricos de distribución.

10. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

10.1 Tipo de Investigación

Para la elaboración de esta de esta investigación sobre el control óptimo de un filtro activo adoptamos por utilizar el tipo de investigación cuantitativa, el cual es definido según **Pita Fernández, Pértegas Díaz** [41] la investigación cuantitativa trata de determinar la fuerza de asociación o correlación entre variables, la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede. Tras el estudio de la asociación o correlación pretende, a su vez, hacer inferencia causal que explique por qué las cosas suceden o no de una forma determinada.

La presente investigación se acoge al método cuantitativo debido a que vamos a trabajar con datos obtenido de variables que se genera cuando se aplica el control óptimo de un filtro activo enfocado en la red eléctrica de distribución en general.

De tal forma el planteamiento de esta investigación se cataloga con el propósito de corregir los problemas que tienen las redes de distribución con una posible solución al implementar el control de un filtro activo de potencia.

10.2 Método Deductivo

En [42] el método deductivo permite determinar las características de una realidad particular que se estudia por derivación o resultado de los atributos o enunciados contenidos en proposiciones o leyes científicas de carácter general formuladas con anterioridad. Mediante la deducción se derivan las consecuencias particulares o individuales de las inferencias o conclusiones generales aceptadas.

10.3 Método Comparativo

La investigación sobre [43] el método comparativo o el análisis comparativo en un procedimiento que se ubica entre los métodos científicos más utilizados por los investigadores. Junto con el método experimental y el estadístico, el método comparativo es un recurso ampliamente utilizado en las ciencias sociales. Incluso algunos han llegado a considerar la comparación como un procedimiento inherente a la investigación científica.

10.4 Método de simulación

En la elaboración del método de simulación consiste en disponer al estudiante un aspecto de imitación con la realidad y establecer en ese ámbito situaciones problemáticas que tendrá que enfrentar con condiciones reales al que debe dar solución en la vida profesional en cual está definido según [44] por ello el software MATLAB y SIMULINK permite modelar sistemas de cualquier tipo de ingeniería, para nuestro caso de estudio se utilizó la librería (Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks), por consiguiente es de gran utilidad ya que contiene modelos para representar casi todos los elementos activos y pasivos que conforman un sistema eléctrico de potencia.

11. ANÁLISIS Y DISCUCIÓN DE RESULTADOS

11.1 Análisis e Interpretación

El desarrollo de la electrónica de potencia, así como la gran cantidad de cargas no lineales existentes en instalaciones industriales y comerciales tales como; (convertidores de potencia controladores de velocidad de motores, fuentes de alimentación conmutadas, hornos etcétera.), han deteriorado la calidad de potencia en los sistemas de distribución y transmisión, causando una operación no deseada de los sistemas de potencia.

Uno de los problemas más comunes que interviene a la calidad de energía en sistemas eléctricos de distribución es la deformación de la onda, producida en gran medida por el fenómeno denominado “Distorsión Armónica” problema que afecta a las redes de distribución como a los consumidores finales.

El objetivo de la presente investigación es establecer la naturaleza de los armónicos y como se puede abarcar este problema con el estudio de filtros activos aplicando la teoría de Akagi y

optimización no lineal necesarios para realizar el control, que servirán para la programación del filtro que ayudarán a reducir el problema de los armónicos en las redes de distribución o industria.

Para el análisis del filtro activo propuesto se ha tomado un sistema de prueba convencional y uno de la IEEE de 18 Nodos, radiales de distribución que consta de un sistema trifásico balanceado, para el cual se realizó los siguientes puntos:

- Flujo de potencia con datos del circuito de prueba (CP).
- Flujo de potencia con el circuito de prueba modificado donde se ubicó la carga no lineal.
- Determino los índices de armónicos, así como el THDv, y el THDi, con la carga no lineal en cada nodo.
- Se ubicó cerca de la carga no lineal el filtro activo con optimización no lineal y se determinó el THDv y el THDi en cada nodo.
- Se ubicó cerca de la carga no lineal el filtro activo con la teoría de Akagi y se determinó el THDv y el THDi en cada nodo.
- Se comparó los resultados con los métodos propuestos.

11.2 Diagrama de Flujo para filtros activos empleando la optimización no lineal y la teoría de Akagi

Para el estudio de armónicos en redes de distribución se emplea una modelación en Simulink de circuitos eléctricos con características reales para observar el comportamiento de la onda senoidal al ingresar una carga no lineal por lo que el sistema sufre un cambio en los valores de porcentaje de THD en voltaje y corriente para lo cual se realiza el estudio de optimización no lineal y teoría de Akagí, en base a un criterio de control de las ondas senoidales por medio de las ecuaciones aplicadas en cada teoría de tal manera que de este estudio se puede llegar a reducir los armónicos a porcentajes aceptables y que el sistema obtenga un buen rendimiento y mejor calidad de energía al usuario. La labor del estudio realizado se reflejará con un diagrama de flujo (Fig. 23).

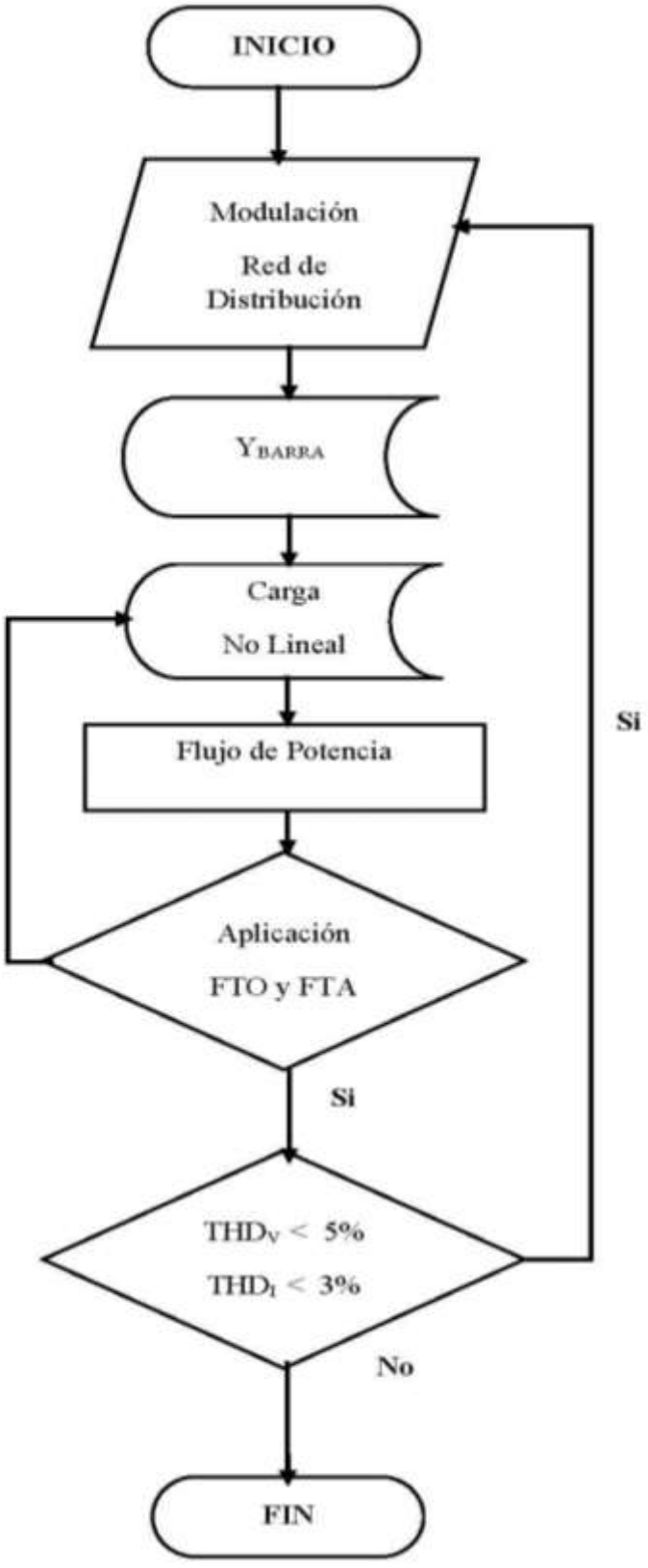


Fig. 23 Diagrama de flujo con (FTO) y (FTA)
Realizado por: Los Autores

11.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS CON EL CIRCUITO DE PRUEBA

11.3.1 Flujo de potencia del circuito de prueba

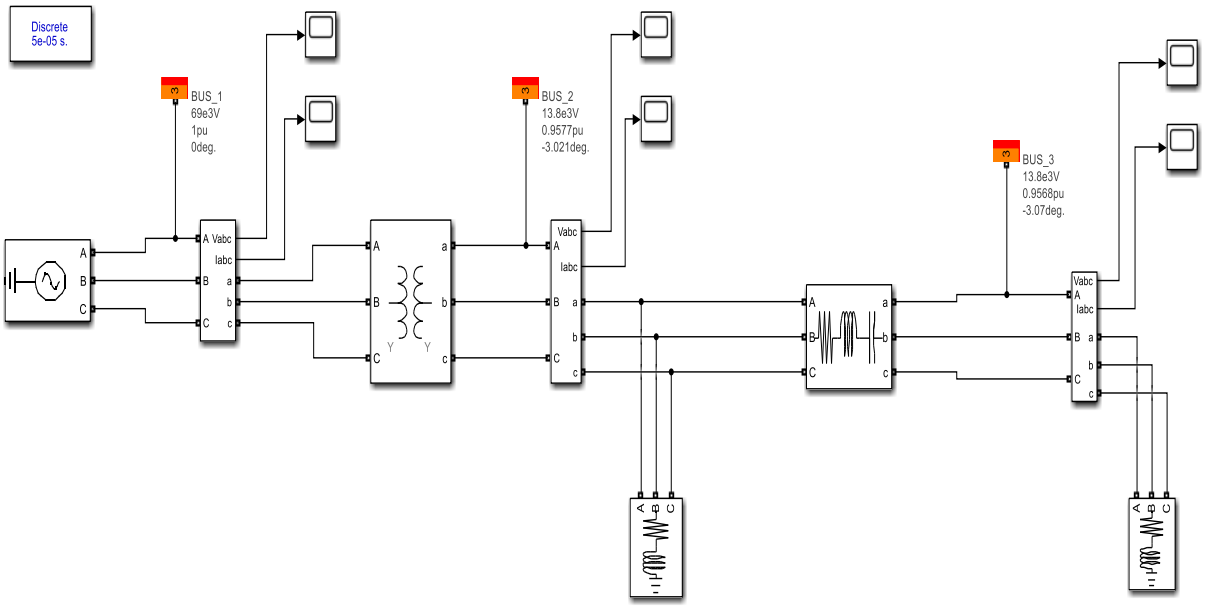


Fig. 24 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado)
Realizado por: Los Autores

En la (Fig. 24) se indica un sistema de distribución radial que consta de una generación, un transformador, 3 barrar y dos cargas puntuales que los datos se detallarán a continuación:

Tabla 2: Datos equivalentes del sistema de prueba

CIRCUITO DE PRUEBA	DATOS
Red Equivalente	V= 69 Kv
Línea	Z= 0.02 + j0.1591^-3 [Ω]
Transformador	Z= (0.0098+j0.0762) [Ω]
Barra 1	V= 69 Kv
Barra 2	V= 13.8 Kv
	Carga: 10MW, fp: 0.85↓
Barra 3	V= 13.8 Kv
	Carga: 3MW, fp: 0.9↓

11.3.2 Flujo de Potencia

Para el desarrollo del flujo de potencia se modelo en Simulink el sistema de prueba con los datos establecidos [45] para esto se obtuvo resultados similares al sistema de referencia por lo

cual facilita analizar con carga no lineal, los filtros con optimización no lineal y teoría de Akagí al comparar los efectos que dicha carga afecta al sistema de prueba, con el control de los filtros podemos reducir los armónicos a un mínimo porcentaje de los existentes al ingresar la carga no lineal.

Tabla 3: Datos de Flujo de Potencia del sistema de prueba

Tipo de barra	ID de la barra	V base (kv)	V ref. (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V_LF (pu)	V ángulo_ LF (pu)	P_LF (MW)	Q_LF (Mvar)
PV	1	69.0	1	0.01	0.00	1	0.00	13.17	8.73
PQ	2	13.8	1	10.00	6.20	0.9577	-3.02	10.00	6.20
PQ	3	13.8	1	3.00	1.45	0.9568	-3.07	3.00	1.45

En este sistema realizaremos el análisis del orden de los armónicos, la distorsión armónica total (THD) en cada barra tanto de corriente como de voltaje, así como también se le conectara los filtros con optimización no lineal y la teoría de Akagí, que detallaremos los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 4: Porcentajes de los armónicos de voltaje del circuito de prueba sin carga no lineal

Barras	Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
2	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
3	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01

Tabla 5: Porcentajes de los armónicos de corriente del circuito de prueba sin carga no lineal

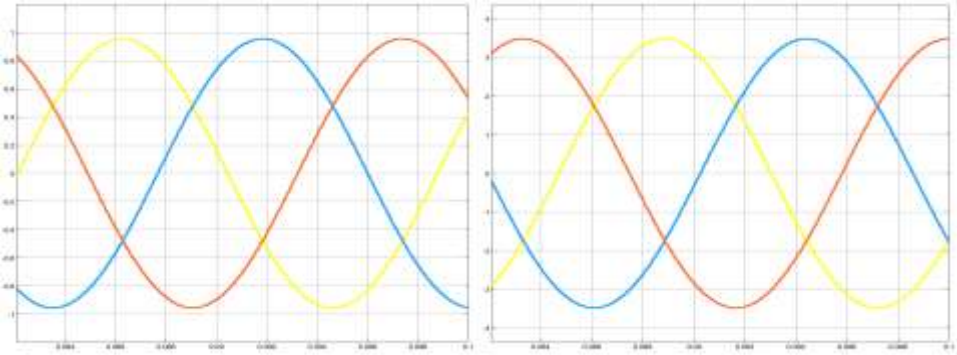
Barras	Frecuencia Armónica de Corriente (I%)					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
2	100	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
3	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01

Tabla 6: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del circuito de prueba sin carga no lineal

Barras	$THD_v \rightarrow$ %	$THD_i \rightarrow$ %

1	0.17	0.16
2	0.17	0.16
3	0.17	0.17

De los datos obtenidos, se puede observar que el circuito de prueba no presenta ninguna perturbación armónica (Fig. 25), por lo que es un sistema balanceado y solo se encuentra conectadas cargas que generan un porcentaje mínimo de armónicos.



(a) **(b)**

Fig. 25 Señal de la onda armónica sin carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.3.3 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal

De igual manera al circuito se le inyectará una carga no lineal (Anexo. A.4) para observar cómo afecta al sistema, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

Tabla 7: Porcentajes de los armónicos de voltaje del circuito de prueba con carga no lineal

Barras	**Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)**					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
2	100	1.60	1.09	1.26	0.99	1.03
3	100	1.73	1.18	1.37	1.07	1.12

Tabla 8: Porcentajes de los armónicos de corriente del circuito de prueba con carga no lineal

Barras	**Frecuencia Armónica de Corriente (I%)**					
	1	5	7	11	13	17

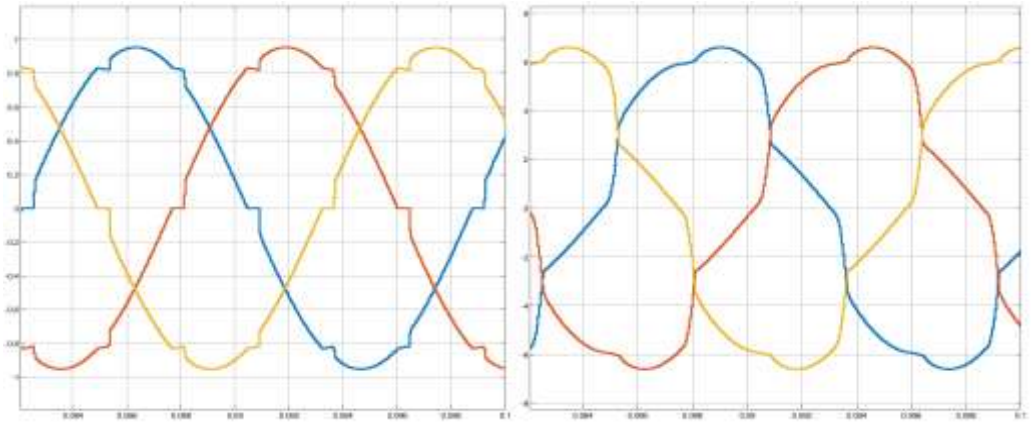
1	100	3.49	1.64	1.28	0.83	0.70
2	100	3.50	1.64	1.38	0.83	0.70
3	100	10.82	5.08	3.99	2.60	2.15

Tabla 9: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del circuito de prueba con carga no lineal

Barras	$\boldsymbol{THD_v} \rightarrow$ %	$\boldsymbol{THD_i} \rightarrow$ %
1	0.17	4.29
2	3.35	4.30
3	3.63	13.30

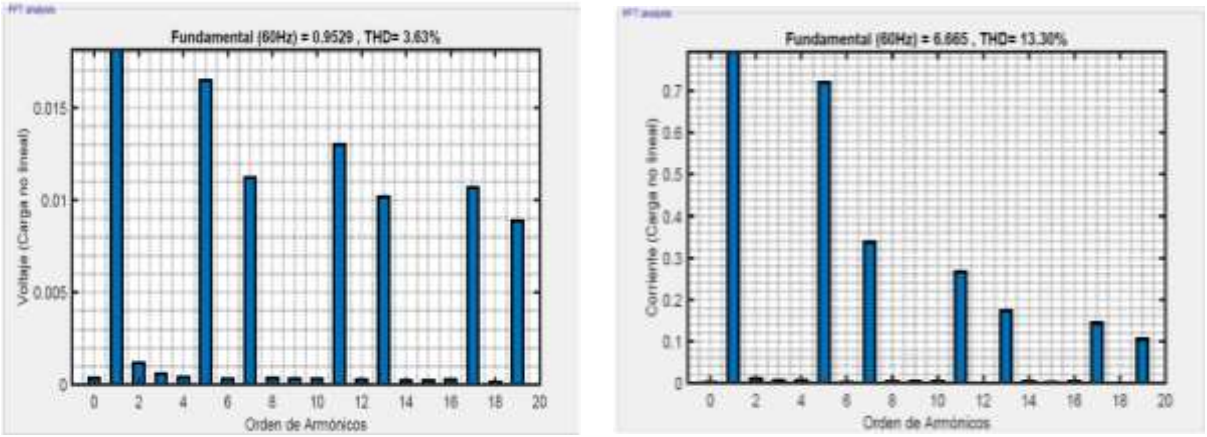
En las (Fig. 26) se indicará la señal de la onda distorsionada de voltaje y corriente debido a la conexión de la carga no lineal en la barra de carga del sistema que es la de mayor concentración de los armónicos que inyectan hacia la red de distribución.

Al ingresar la carga no lineal los datos obtenidos en las tablas anteriores reflejan el cambio que sufre el sistema de prueba con los efectos de la distorsión armónica total (THD) (Fig. 27) como en las diferentes escalas de los armónicos y esto a su vez disminuye la calidad de energía en el sistema.



(a) **(b)**

Fig. 26 Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 27 Orden de los armónicos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.3.4 Funcionamiento del filtro con Optimización No Lineal

Al circuito de prueba se le inyecta una carga no lineal que afectara a todo el sistema distorsionando la forma de onda de voltaje y corriente en cada nodo del circuito, para la solución de este problema se realiza el estudio de la teoría de optimización aplicado a filtros activos de potencia. El fundamento de esta teoría consta de obtener señales con ondas distorsionadas de corriente y voltaje provenientes de la inyección de la carga no lineal y estas serán ingresadas a las ecuaciones de estudio de optimización no lineal dando como resultado la ecuación de control (ecuación 53), que proporciona la señal de corriente de las tres fases del sistema que serán ingresadas a la banda de histéresis, que esta controlara el filtrado activo de corriente por lo que permite el control de la señal de salida de las tres fases y esto procesa una señal de error en (HB) con la lógica de control (-0.5) condición activada, (0.5) condición desactivada, las ondas generadas por la banda de histéresis serán ingresadas al inversor que consta de un capacitor (100^3) como almacenamiento de energía para su funcionamiento, en el interior de este inversor se encuentran seis (IGBTs) modelados cada uno de estos con una resistencia interna (1^-3Ohms) y dos elementos adicionales que es una resistencia de (100 Ohms), un capacitor de (0.1^-06Faradios) para equilibrar la corriente de salida con los pulsos para compensación de la onda faltante de la carga no lineal.

11.3.4.1 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con optimización no lineal (FTO)

En este caso al circuito de prueba se le conecta el filtro con la teoría de optimización (FTO) (Anexo. A.5), que es uno de los métodos investigados que permitirán reducir el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

Tabla 10: Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	**Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)**					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
2	100	0.17	0.10	0.13	0.12	0.13
3	100	0.26	0.18	0.22	0.20	0.21

Tabla 11: Porcentajes de los armónicos del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

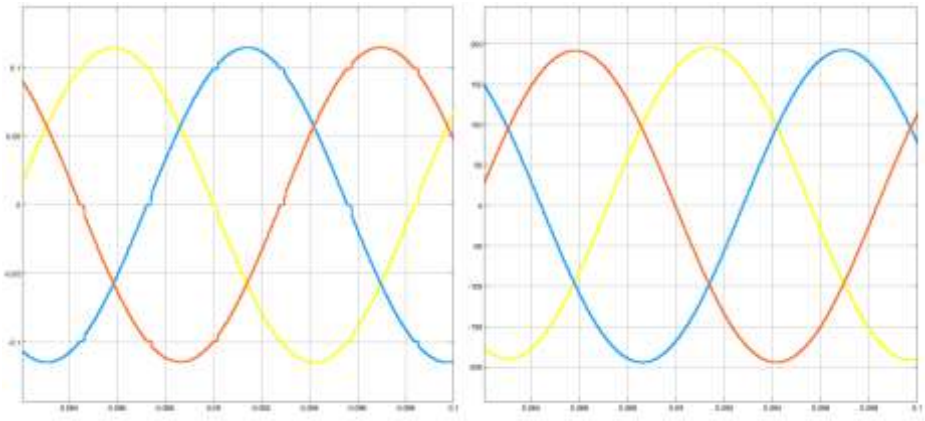
Barras	**Frecuencia Armónica de Corriente (I%)**					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.14	0.10	0.07	0.06	0.04
2	100	0.14	0.10	0.07	0.06	0.04
3	100	11.19	5.59	4.41	3.13	2.18

Tabla 12: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	$\boldsymbol{THD_v} \rightarrow$ %	$\boldsymbol{THD_i} \rightarrow$ %
1	0.17	0.57
2	0.54	0.57
3	0.86	0.57

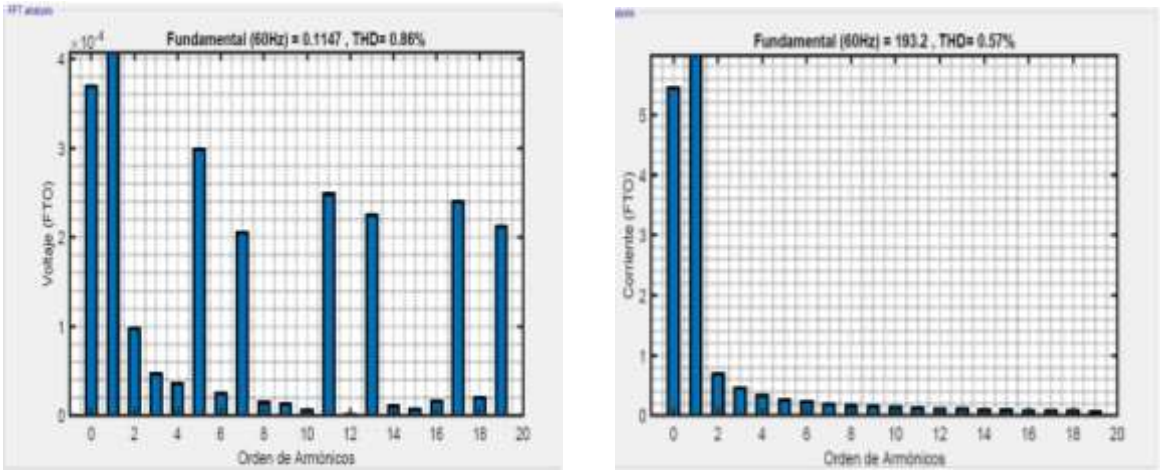
El filtro con optimización no lineal está modelado para compensar la potencia reactiva y reducir la presencia de los armónicos en porcentaje aceptable para que el sistema continúe entregando una energía con menor índice de armónicos, con esto al conectar el filtro (FTO) al sistema de prueba podemos verificar la reducción de los armónicos en la onda sinusoidal de voltaje y corriente (Fig. 28) a un porcentaje favorable para la calidad de energía del sistema de

distribución, de la misma forma se puede observar que el orden de los armónicos también disminuyen (Fig. 29).



(a) **(b)**

Fig. 28 Señal de onda armónica conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 29 Orden de los armónicos conectado el (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.3.5 Funcionamiento del filtro con la teoría de Akagi

Al momento de ingresar la carga no lineal al circuito de prueba se toma las señales de onda distorsionada de voltaje y corriente utilizando las ecuaciones de la transformada de Clark y Park de este resultado se obtiene los voltajes y las corrientes en (alfa) y (beta), para así ingresar a una nueva ecuación de compensación de la potencia instantánea (p , q) para esto se utiliza la potencia compensada para los vectores de voltaje y corriente en (alfa) y (beta) entonces se

tomara la nueva inversa de la transformada de Clark y así obtener las componentes trifásicas de voltaje y corriente para la red.

Con las fases obtenidas del estudio de la teoría de Akagí estas tres fases serán ingresadas por señales de onda hacia la banda de histéresis con el fin de que esta tome el control del filtrado activo de corriente y por ende la banda de histéresis permite a las ondas de las tres fases un rápido control de la señal de salida, también puede procesar la señal de error en (HB) teniendo en cuenta la lógica de control (-0.5) condición activada, (0.5) condición desactivada, con las ondas controladas ingresan al filtro que en su configuración consta de un voltaje de entrada de (10^-3 DC) para el funcionamiento del filtro activo que en su interior consta de seis (IGBTs) modelados cada uno de estos con una resistencia interna (1^-3Ohms) y dos elementos adicionales que es una resistencia de (100 Ohms), un capacitor de (0.1^-06Faradios) para la compensación de potencia reactiva y esto a su vez el rectifica la onda distorsionada del sistema.

11.3.5.1 Flujo de potencia del circuito de prueba con carga no lineal conectado el filtro con la teoría de Akagí (FTA)

En este caso al circuito de prueba se le conecta el filtro con la teoría de Akagí (Anexo. A.6), que es el otro método investigado que permitirá reducir satisfactoriamente el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, este filtro en comparación con el filtro de optimización no lineal es más eficiente para contrarrestar las perturbaciones producidas por la carga no lineal del sistema de prueba, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

Tabla 13: Porcentajes de los armónicos de voltaje del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)

Barras	**Frecuencia Armónica de Voltaje (V%)**					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
2	100	0.06	0.04	0.02	0.02	0.02
3	100	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03

Tabla 14: Porcentajes de los armónicos de corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)

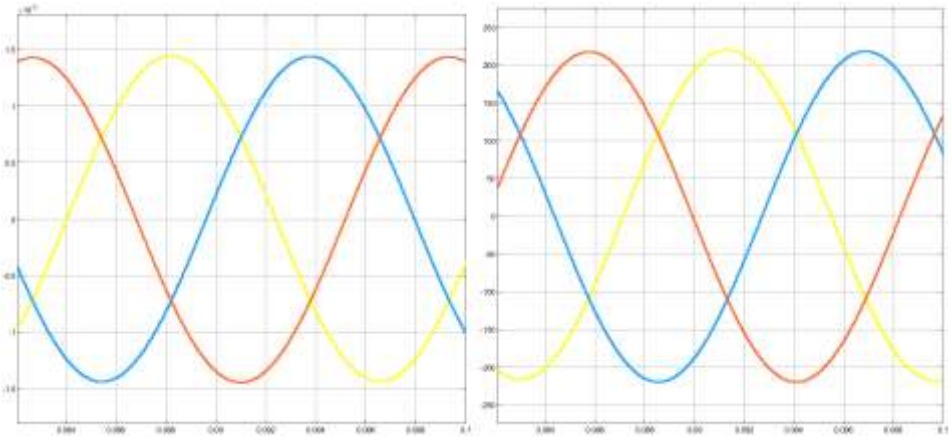
Barras	**Frecuencia Armónica de Corriente (I%)**					
	1	5	7	11	13	17
1	100	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03
2	100	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03

3	100	11.36	5.58	4.48	3.18	2.80

Tabla 15: Distorsión Armónica Total de Voltaje y Corriente del (CP) con carga no lineal conectado el (FTA)

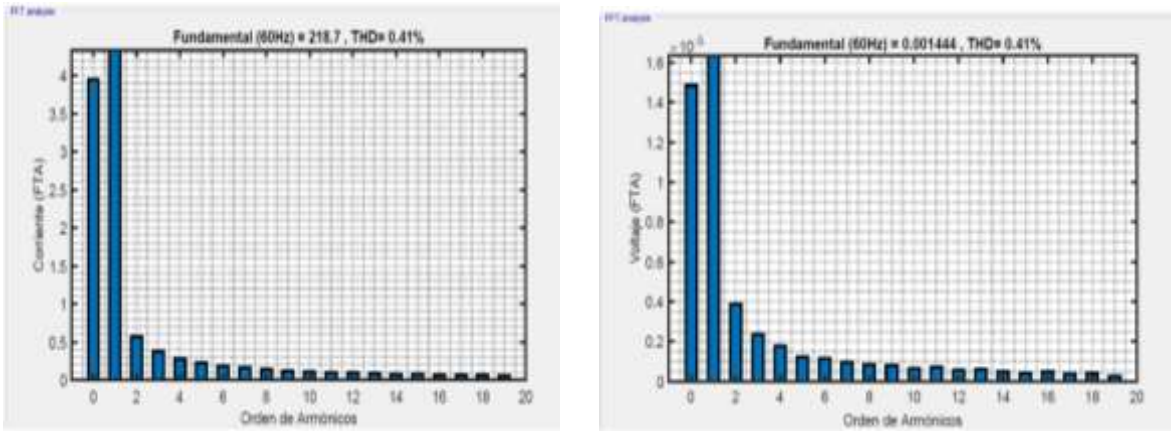
Barras	$\boldsymbol{THD_v} \rightarrow$ %	$\boldsymbol{THD_i} \rightarrow$ %
1	0.17	0.41
2	0.24	0.41
3	0.41	0.41

Como se observa los resultados en las tablas anteriores conectando el filtro con la teoría de Akagí al circuito de prueba se puede verificar que este método reduce los armónicos en un porcentaje más que el (FTO) por lo cual el (FTA) se destaca en comparación de otros métodos convencionales que existe para la reducción de armónicos. Este método al compensar la potencia reactiva instantánea refleja su eficiencia al reducir las perturbaciones en las ondas senoidales de voltaje y corriente (Fig. 30) de igual manera la distorsión armónica total (Fig. 31), por lo que ha este filtro se lo conectara a otro circuito modelada con datos reales de un circuito de distribución para comprobar su validez.



(a) **(b)**

Fig. 30 Señal de la onda armónica con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 31 Orden de los armónicos conectado el (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS CON EL CIRCUITO MODELADO DE 18 NODOS DE LA IEEE

11.4.1Flujo de Potencia con el circuito modelado de 18 Nodos de la IEEE

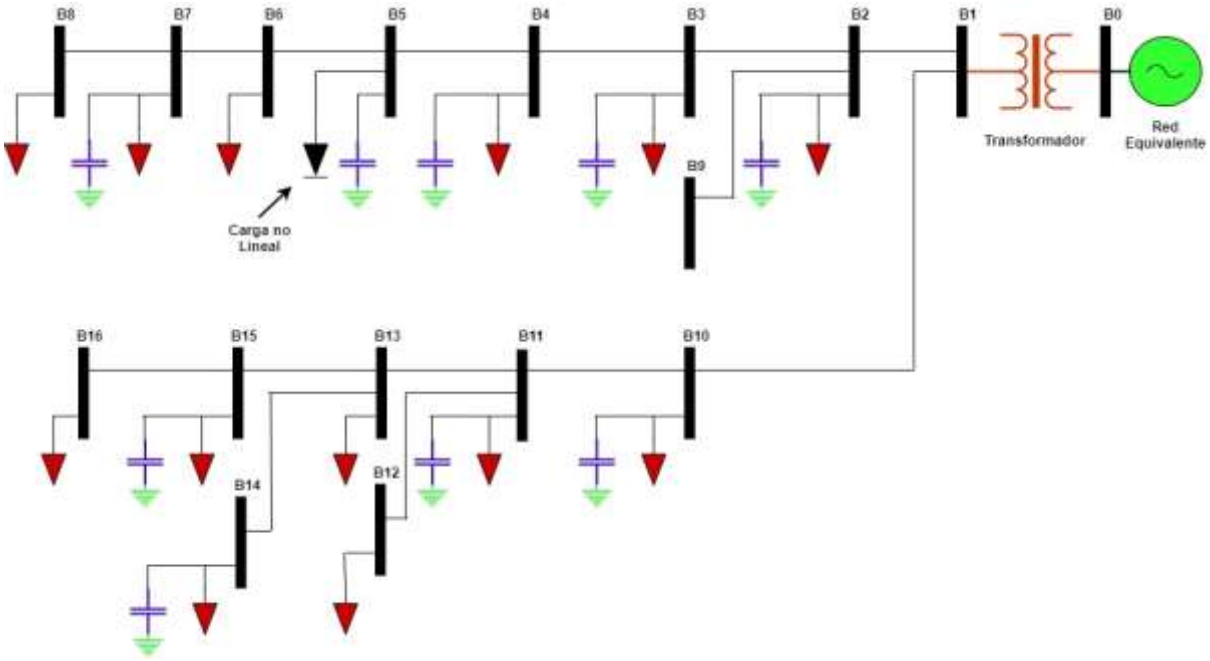


Fig. 32 Circuito de distribución trifásico radial (balanceado) de 18 Nodos de la IEEE
Realizado por: Los Autores

En la (Fig. 32) se indica un sistema de distribución radial de 18 nodos de la IEEE, que se modelo en Simulink, el transformador es de 138 a 12.5Kv, los datos de cargas y de las líneas para este sistema están convertidos en por unidad (pu) y se detallarán en las siguientes tablas, además se

anexara un manual del usuario que permita al estudiante modelar circuitos eléctricos en Simulink. Anexo (E).

Tabla 16: Datos de las cargas en cada nodo del sistema

NODO	P (MW)	Q (MW)
2	0.2	0.12
3	0.4	0.25
4	1.5	0.93
6	0.8	0.5
7	0.2	0.12
8	1	0.62
9	0.5	0.31
10	1	0.62
11	0.3	0.19
12	0.2	0.12
13	0.8	0.5
14	0.5	0.31
15	1	0.62
16	0.2	0.12

Tabla 17: Datos de las líneas del sistema

NODOS		R (Ohm/Km)	X (Ohm/Km)
Envió	**Recibo**		
1	**2**	0.1316	0.3676
2	**3**	0.1317	0.3675
3	**4**	0.1317	0.3675
4	**5**	0.1316	0.3675
5	**6**	0.1314	0.3673
6	**7**	0.3673	0.4524
7	**8**	0.6957	0.5219
2	**9**	0.3673	0.4755
1	**10**	0.3674	0.4757
10	**11**	0.3732	0.4833
11	**12**	0.3675	0.4757

11	**13**	0.3674	0.4758
13	**14**	0.3674	0.4757
13	**15**	0.3674	0.4527
15	**16**	0.3677	0.453

11.4.2 Flujo de Potencia

En esta configuración se logró desarrollar un sistema de distribución radial (balanceado) reflejado a parámetros reales expuestos en el sistema de 18 nodos de la IEEE que permitirá realizar un análisis de flujos de potencia, para verificar los valores de voltaje y potencia de la modelación para posteriormente implementarlo en el estudio que se está realizando. Los datos se expresarán en la siguiente tabla:

Tabla 18: Datos de Flujo de Potencia del sistema de prueba

Tipo de barra	ID de la barra	V base (kv)	V ref. (pu)	P (MW)	Q (Mvar)	V_LF (pu)	V ángulo LF (pu)	P_LF (MW)	Q_LF (Mvar)
PV	1	138	1.1	0.01	0.00	1.1	0.00	9.03	-183.13
PQ	2	12.5	1	0.20	0.12	1.1167	-1.46	0.20	0.12
PQ	3	12.5	1	0.40	0.25	1.1188	-2.08	0.40	0.25
PQ	4	12.5	1	0.40	0.25	1.1200	-5.58	0.40	0.25
PQ	5	12.5	1	1.50	0.93	1.1206	-3.02	1.50	0.93
PQ	6	12.5	1	0.40	0.25	1.1228	-3.30	0.40	0.25
PQ	7	12.5	1	0.80	0.50	1.1202	-3.50	0.80	0.50
PQ	8	12.5	1	0.20	0.12	1.1177	-3.66	0.20	0.12
PQ	9	12.5	1	1.00	0.62	1.1118	-3.69	1.00	0.62
PQ	10	12.5	1	0.50	0.31	1.1169	-2.12	0.50	0.31
PQ	11	12.5	1	1.00	0.62	1.1174	-2.40	1.00	0.62
PQ	12	12.5	1	0.30	0.19	1.1181	-3.11	0.30	0.19
PQ	13	12.5	1	0.20	0.12	1.1174	-3.13	0.20	0.12
PQ	14	12.5	1	0.80	0.50	1.1167	-3.62	0.80	0.50
PQ	15	12.5	1	0.50	0.31	1.1199	-3.86	0.50	0.31
PQ	16	12.5	1	1.00	0.62	1.1152	-3.82	1.00	0.62
PQ	17	12.5	1	0.20	0.12	1.1144	-3.83	0.0	0.12

11.4.3 Análisis de circuito de 18 Nodos

En este modelado realizaremos el análisis de la distorsión armónica total (THD) en cada barra tanto de corriente como de voltaje, así como también se le conectara los filtros con optimización no lineal y la teoría de Akagi, que detallaremos por casos y los resultados por medio de tablas.

11.4.3.1 Caso 1: Porcentajes de THD_v y THD_i del circuito de 18 Nodos

- **Sin carga no lineal**

Tabla 19: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos sin carga no lineal

Barras	$THD_v \rightarrow$ %	$THD_i \rightarrow$ %
1	0.16	0.09
2	0.16	0.15
3	0.16	0.16
4	0.16	0.16
5	0.16	0.16
6	0.16	0.15
7	0.16	0.16
8	0.16	0.17
9	0.16	0.15
10	0.16	0.15
11	0.16	0.15
12	0.16	0.15
13	0.16	0.15
14	0.16	0.16
15	0.16	0.11
16	0.16	0.17
17	0.16	0.15

De los datos obtenidos, se puede observar que el circuito de prueba no presenta ninguna perturbación armónica, por lo que es un sistema balanceado y solo se encuentra conectadas cargas que generan un porcentaje mínimo de armónicos.

11.4.3.2 Caso 2: Porcentajes de THD_v y THD_i del circuito de 18 Nodos

- **Con carga no lineal**

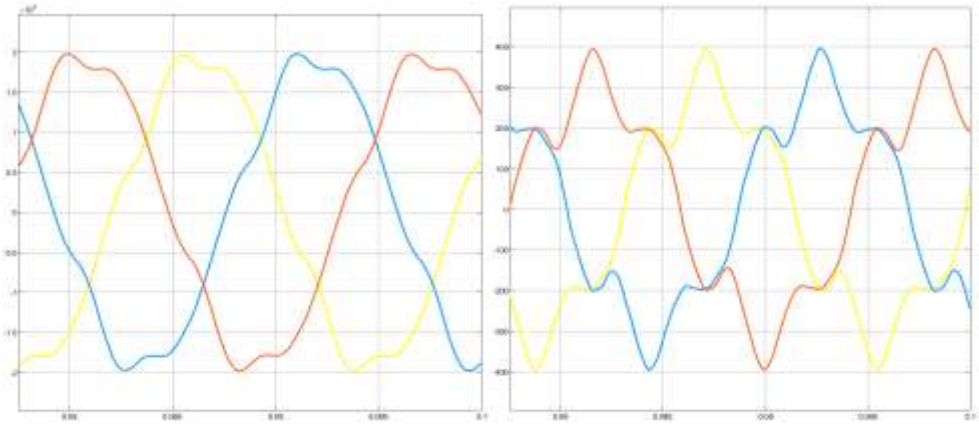
Para este caso al circuito (Fig. 33) se le inyectará una carga no lineal en la barra (B5), para observar cómo afecta al sistema, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de los armónicos en las siguientes tablas.

Tabla 20: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal

Barras	$THD_v \rightarrow$ %	$THD_i \rightarrow$ %
1	1.01	3.91
2	1.76	14.91
3	3.28	20.95
4	4.70	21.36
5	5.99	20.48
6	7.09	23.02
7	7.40	16.50
8	7.79	26.86
9	7.79	6.67
10	3.28	2.80
11	2.91	26.21
12	4.22	29.87
13	4.22	3.64
14	5.24	30.62
15	5.92	34.56
16	5.60	25.37
17	5.60	4.84

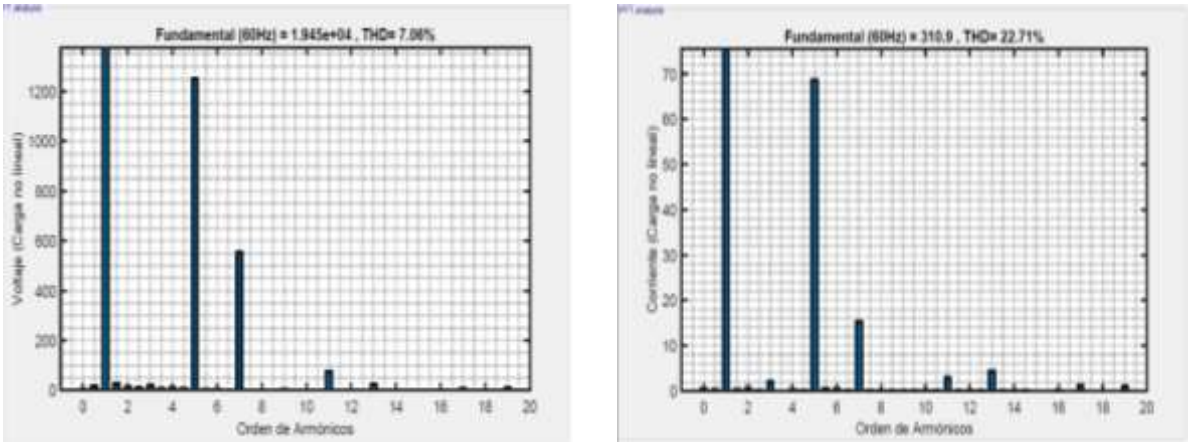
En la (Fig. 33) se indica la señal de la onda distorsionada de voltaje y corriente debido a la conexión de la carga no lineal en la barra (B5) del sistema que es la de mayor concentración de los armónicos que inyectan hacia la red de distribución.

Al ingresar la carga no lineal los datos obtenidos en la tabla anterior reflejan el cambio que sufre el sistema de prueba con los efectos de la distorsión armónica total (THD) (Fig. 34) y esto a su vez disminuye la calidad de energía en el sistema.



(a) **(b)**

Fig. 33 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 34 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal: (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.4.3.3 Caso 3: Porcentajes de THD_v y THD_i del circuito de 18 Nodos

- **Con carga no lineal conectado el filtro con optimización no lineal**

En este caso al circuito de prueba se le conecta el filtro con optimización no lineal (FTO) en la barra (B5), que es uno de los métodos investigados que permitirán reducir el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, para esto se hará el análisis y la comparación de los porcentajes de la distorsión armónica total en la siguiente tabla.

Tabla 21: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal conectado el (FTO)

Barras	$THD_v \rightarrow$ %	$THD_i \rightarrow$ %

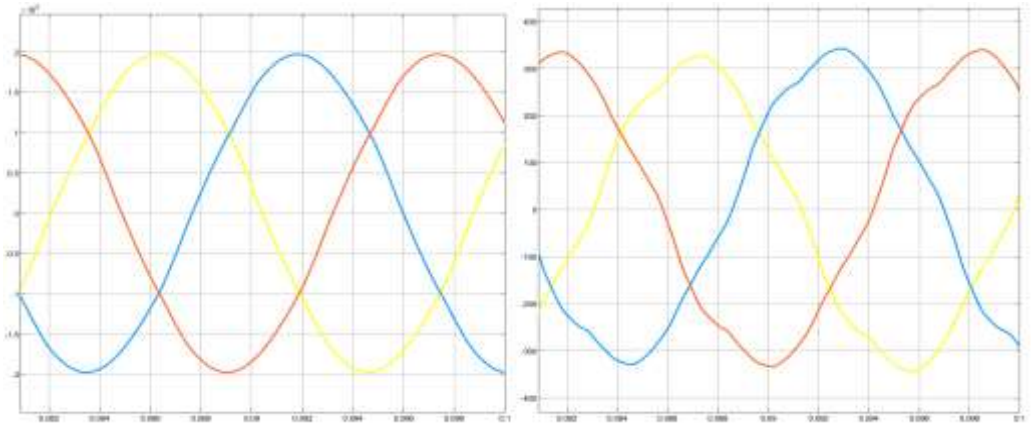
1	0.17	0.64
2	0.32	2.57
3	0.59	3.85
4	0.80	3.96
5	0.99	3.85
6	1.15	4.56
7	1.21	3.29
8	1.29	5.43
9	1.29	1.12
10	0.59	0.50
11	0.48	4.12
12	0.67	4.74
13	0.67	0.58
14	0.82	5.01
15	0.94	5.74
16	0.88	4.08
17	0.88	0.76

Con la información recopilada en los pasos anteriores los datos se escribieron en la tabla anterior para proceder al análisis de como el filtro actúa de manera eficiente frente a la conexión de la carga no lineal, rectificando la onda distorsionada con la finalidad de disminuir un porcentaje aceptable de armónicos.

Cabe mencionar que el filtro de optimización no lineal fue creado en años anteriores con el propósito de reducir los armónicos, que a su vez este filtro con su diseño y programación ha sido de ayuda para grandes investigaciones aportando en el adelanto tecnológico.

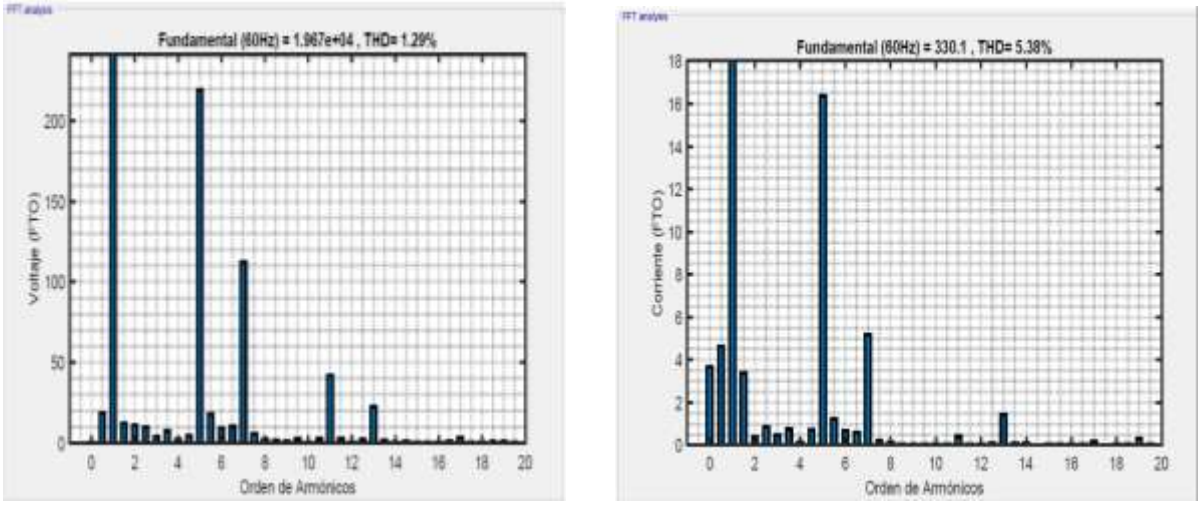
Los criterios y análisis empleados para este filtro nos han demostrado que al emplearlo en cualquier tipo de sistema eléctrico trifásico su funcionamiento supera a los otros métodos tradicionales con un alto porcentaje en la compensación de la potencia reactiva.

Dicho esto, al conectar el filtro de optimización no lineal al sistema de 18 nodos podemos observar la reducción de los armónicos en la onda sinusoidal de voltaje y corriente (Fig. 35) a un porcentaje favorable para la calidad de energía del sistema de distribución.



(a) **(b)**

Fig. 35 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 36 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTO): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.4.3.4 Caso 4: Porcentajes de THD_v y THD_i del circuito de 18 Nodos

- **Con carga no lineal conectado el filtro con la teoría de Akagí**

En este caso al circuito de 18 nodos se le conecta el filtro con la teoría de Akagí (FTA) en la barra (B5), que es el otro método investigado que permitirá reducir satisfactoriamente el porcentaje de los armónicos en las distintas barras de conexión del circuito, los datos se recopilaron en la siguiente tabla:

Tabla 22: THD de Voltaje y Corriente del circuito de 18 Nodos con carga no lineal conectado el (FTA)

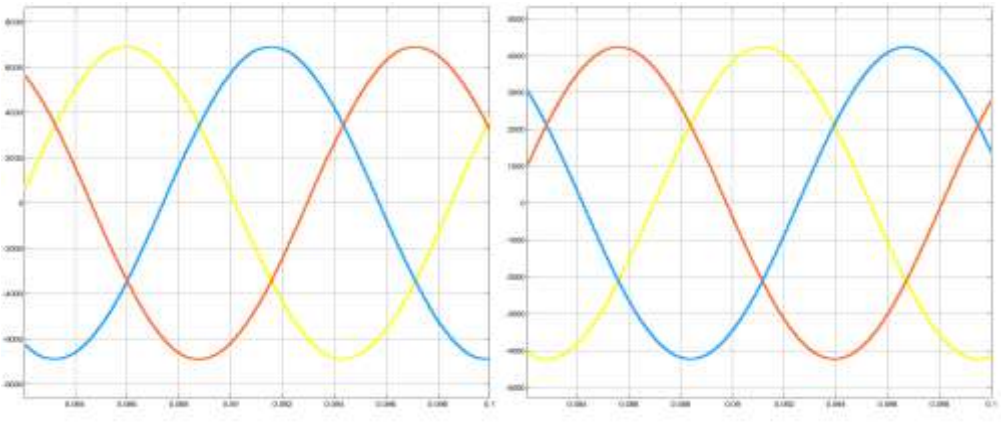
Barras	$THD_v \rightarrow$ %	$THD_i \rightarrow$ %

1	0.17	0.58
2	0.19	0.15
3	0.21	0.12
4	0.24	0.12
5	0.31	0.12
6	0.45	0.12
7	0.48	2.51
8	0.54	3.96
9	0.54	2.67
10	0.21	0.26
11	0.23	1.37
12	0.29	1.56
13	0.29	0.29
14	0.33	1.60
15	0.37	1.81
16	0.35	1.33
17	0.35	0.35

La operación del filtro de Akagí y configuración parte del estudio de las teorías de Clark y Park ingresadas de forma programada en Matlab para una primera parte en la que utilizara también la teoría de control de (p, q) obteniendo así la compensación de potencia reactiva.

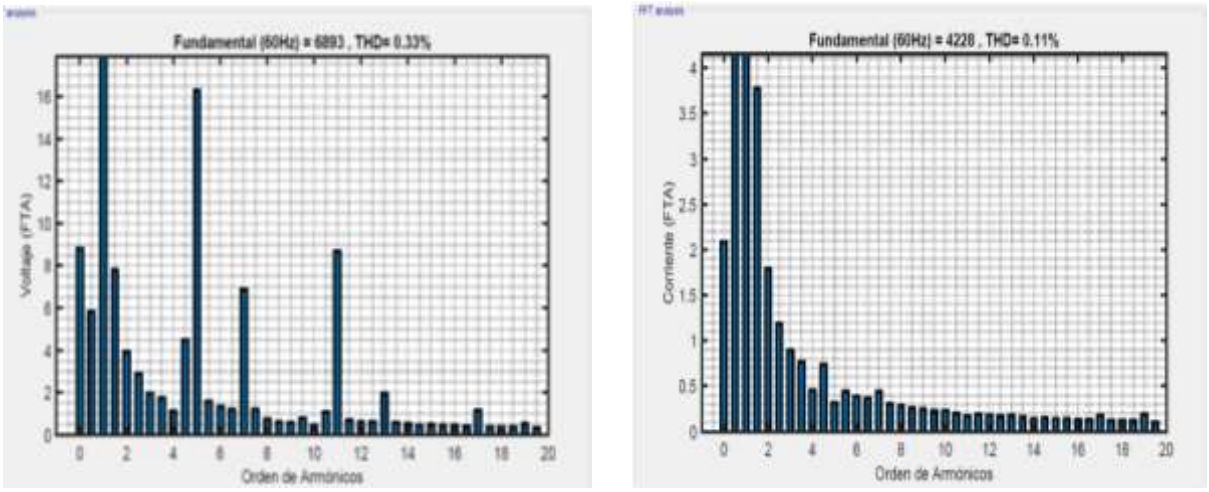
Con el filtro de Akagí conectado a la red los datos recogidos en la tabla anterior describen la versatilidad de este filtro ante elevadas magnitudes de los armónicos en la red de distribución por ende este filtro es más eficiente en un mayor porcentaje de reducción de las perturbaciones por lo que en comparación con el filtro de optimización no lineal.

Esta compensación de la onda sinusoidal de voltaje y corriente se indicará en las (Fig. 37), una visualización clara de que el filtro implementado al circuito actúa con mayor eficiencia ante cualquier carga no lineal que puede ser introducida a la red.



(a) **(b)**

Fig. 37 Señal de la onda del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores



(a) **(b)**

Fig. 38 Orden de los armónicos del circuito de 18 nodos con carga no lineal y (FTA): (a) Voltaje; (b) Corriente
Realizado por: Los Autores

11.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS.

El análisis realizado al sistema de 18 nodos de la IEEE, conectando al sistema una carga no lineal, genera distorsión en las ondas de voltaje y corriente para lo cual el estudio realizado de los filtros con optimización no lineal y Akagí cada uno actúa de una forma adecuada ante el problema de los armónicos, pero al comparar los datos entre estos dos métodos el filtro (FTA) supera al de Opmtiización no lineal (FTO) por lo cual las expectativas de esta investigación son favorables para proyectos de implementación.

La comparación de los porcentajes de los THD tanto de voltaje como de corriente se reflejarán a continuación en las tablas e imágenes de los dos métodos utilizados anteriormente en el análisis obtenido de los resultados.

Tabla 23: Comparación entre los filtros con el circuito de 18 Nodos

BARRAS	FTO	FTA	% entre los métodos	FTO	FTA	% entre los métodos
	THD_v → %	THD_v → %		THD_i → %	THD_i → %	
1	0.17	0.17	**0**	0.64	0.58	**0.06**
2	0.32	0.19	**0.13**	2.57	0.15	**2.42**
3	0.59	0.21	**0.38**	3.85	0.12	**3.73**
4	0.80	0.24	**0.56**	3.96	0.12	**3.84**
5	0.99	0.31	**0.68**	3.85	0.12	**3.73**
6	1.15	0.45	**0.7**	4.56	0.12	**4.44**
7	1.21	0.48	**0.73**	3.29	2.51	**0.78**
8	1.29	0.54	**0.75**	5.43	3.96	**1.47**
9	1.29	0.54	**0.75**	1.12	2.67	**-1.55**
10	0.59	0.21	**0.38**	0.50	0.26	**0.24**
11	0.48	0.23	**0.25**	4.12	1.37	**2.75**
12	0.67	0.29	**0.38**	4.74	1.56	**3.18**
13	0.67	0.29	**0.38**	0.58	0.29	**0.29**
14	0.82	0.33	**0.49**	5.01	1.60	**3.41**
15	0.94	0.37	**0.57**	5.74	1.81	**3.93**
16	0.88	0.35	**0.53**	4.08	1.33	**2.75**
17	0.88	0.35	**0.53**	0.76	0.35	**0.41**

Las magnitudes de voltaje y corriente armónicas son reflejadas en la tabla anterior del circuito de 18 Nodos que se implementó el estudio de optimización no lineal y Akagi para filtros activos de potencia en la reducción de los armónicos a distintos porcentajes según el nodo y las cargas que estén asociadas a este nodo.

Los valores de la distorsión armónica total (THD) tanto de voltaje como de corriente según el caso de estudio están detallados de acuerdo a las dos teorías explicadas anteriormente dando como resultado que las dos teorías aplicadas a sistemas de distribución ejecutan su función a condiciones aceptables en la reducción de los armónicos.

La reducción de armónicos con el filtro de optimización no lineal es buena y está dentro de los parámetros de aceptación para que el sistema de una buena calidad de energía y no provoque daños a los elementos electrónicos de los usuarios residenciales.

Al ingresar al sistema el filtro con la teoría de Akagi se puede diferenciar un porcentaje de disminución mayor de armónicos en comparación con el filtro de optimización no lineal por lo

que el presente estudio realizado demuestra gran importancia en el avance tecnológico para la reducción de armónicos que queda abierto en lo posterior para una implementación del mismo. La comparación se puede observar en la siguiente figura:

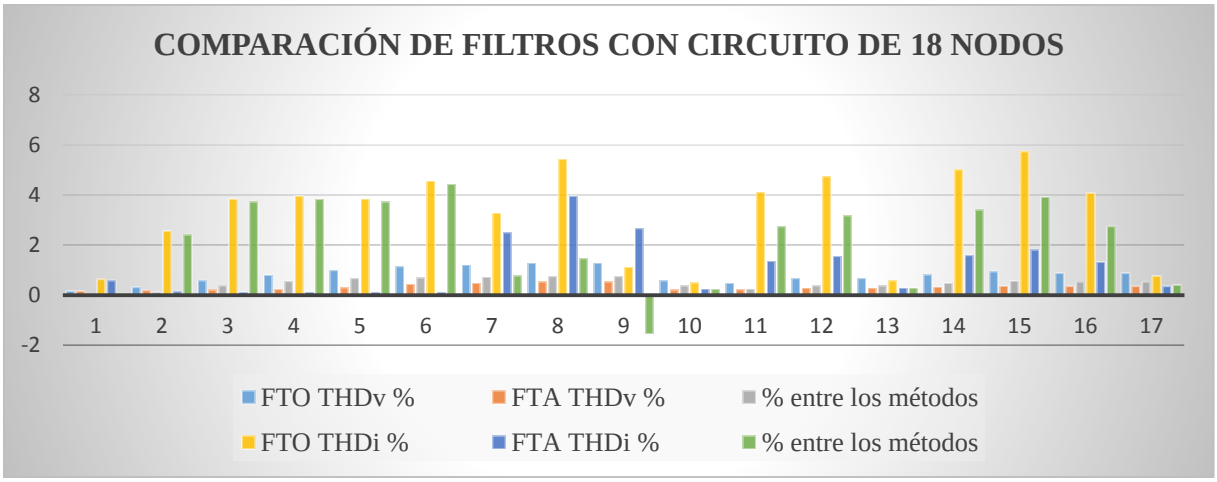


Fig. 39 Comparación en porcentajes de (THD) con los filtros aplicando optimización no lineal y la teoría de Akagi
Realizado por: Los Autores

12. IMPACTOS TÉCNICO

En el estudio de la comparación con la optimización no lineal y la teoría de Akagi se basa en seleccionar el filtro activo para minimizar los armónicos del sistema de distribución introduciendo la carga no lineal al sistema mejorando así la calidad de la energía eléctrica de las empresas distribuidoras ofreciendo un servicio más eficiente para los usuarios y por ende reducir la facturación del consumo eléctrico del usuario.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

- Al realizar la recopilación de información fue limitada ya que se encuentran en plataformas virtuales con acceso restringido a estudiantes que no pertenezcan a dichas entidades por lo que se dificulto la tarea, esto en cuanto a la teoría de Akagi ya que el estudio del arte de los demás temas que involucran este estudio se encuentra de manera alcanzable.

- En el desarrollo de optimización no lineal se utiliza las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker donde se encuentra un lambda óptimo para el control de los disparos del filtro y reducir los armónicos cuando ingrese una carga no lineal, entonces la teoría de Akagi nos permite obtener la corriente activa instantánea y la corriente reactiva instantánea para realizar la compensación de la potencia reactiva donde esta teoría cumple con las expectativas de minimizar los armónicos en un mayor porcentaje que la teoría de optimización.
- Se efectúa una programación de las teorías en estudio para realizar el control de un filtro activo para compensar armónicos programando las diferentes condiciones y ecuaciones para las dos teorías en el programa Matlab y con esto la modelación de los filtros en el programa Simulink, donde se realizó las simulaciones en los circuitos de prueba.

12.2 Recomendaciones

- En el caso de estudio como la teoría de Akagi en los buscadores de libres como Google entre otros no se pudo recopilar información ya que este tema solo se encuentra en sitios web con acceso restringido como lo es la IEEE entre otras.
- Las teorías desglosadas pueden ser de gran utilización para los posteriores trabajos de titulación en la parte de investigación.
- En el diseño de los circuitos modelados en Simulink se debe tener un amplio conocimiento al momento de modelar los diferentes elementos que comprenderán el circuito eléctrico de aplicación.
- Esta investigación está desarrollada para circuitos de distribución trifásicos balanceados por lo que se recomienda para las futuras investigaciones se investigue para circuitos desbalanceados.
- La implementación del filtro activo de potencia con la teoría de Akagi para una propuesta tecnológica lleva a un elevado costo.

13. BIBLIOGRAFÍA

[1] Danfoss, "Supresión segura de armonicos para su instalacion", Madrid-España: Miniparc 3, 2014.

[2] M. F. F. Q. H. Bueno, “Diseño y Construcción de Un Filtro Activo para Eliminar Armónicos de una Red Bifásica Residencial.”, Cuenca, 2014.

[3] J. Calderón, "Diseño y comparación mediante simulación de dos técnicas de control PI y SMC para el filtro activo trifasico de tres hilos en topología paralelo", Quito, 2017.

[4] A. E. A. J.Marulanda, «"Estudio comparativo decinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia",» Tecnura, vol. 21, nº 52, pp. 1-18, 2017.

[5] Danfoss, "Mitigación de armónicos", Madrid, 2010.

[6] C. G. C. Flores, "Sistema de sensado, acondicionamiento y proteccion para un filtro activo de 2kva", Mexico, 2014.

[7] D. Murillo, "Compensación de armónicos con un filtro activo de potencia", Colombia, 2010.

[8] O. Trujillo, "Compensación de corriente usando filtro activo de potencia en derivacion para fuentes armónicas de tensión", Colombia, 2015.

[9] D. M. R. L. A. Alzate, «"Prototipo para la compensación de armónicosen sistema trifasico",» Tecnura, vol. 20, nº 96-105, pp. 1-10, 2016.

[10] J. Ferrero, "Filtro para la frecuencia de conmutación de un inversor fotovoltaico", Valladolid, 2018.

[11] C. Hernández, "Control de un filtro activo paralelo basado en un conversor fuente de voltaje de 4-piernas aplicado a sistemas de disribución de 4Hilos", Santiago de Chile, 2016.

[12] L. C. G. M. J. C. C. Caballero, «"Filtro activo de potencia para compensar la distorción armónica de un sistema fotovoltaico autónomo",» Ecorfan, vol. 3, nº 976-84, pp. 1- 9, 2016.

[13] Electro Industria, «"Armonicos",» Electro Inductria , vol. 1, pp. 1-3, 2015.

[14] J. V. J. R. F. Peña, «Sistema de identificación para filtros activos de potencia,» Maskana, vol. 1, p. 1, 2014.

[15] Í. Mogrovejo, "Control predictivo generalizado aplicado a un inversor multinivel en cascada para diseño de un filtro activo de potencia", Cuenca, 2015.

[16] wikipedia, «Red de distribución de energía eléctrica,» 11 Octubre 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_distribuci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica. [Último acceso: 12 Diciembre 2018].

[17] A. Zavola, «Cargas No Lineales,» [En línea]. Available: https://es.scribd.com/document/376410766/255331062-Cargas-No-Lineales. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[18] «armonicos en las redes electricas,» [En línea]. Available: file:///C:/Users/User/Downloads/Arm_nicos_en_Redes_El_ctricas.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[19] J. D. Arcila, «armónicos en sistemas eléctricos,» [En línea]. Available: http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[20] Olfer, «medidas para reducir los armónicos,» [En línea]. Available: http://www.olfer.com/media/faq/reducir-armonicos.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[21] Schneider, «Eliminacion de armonicos en instalaciones,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://www.apc.com/salestools/LARD-8K6K8S/LARD-8K6K8S_R2_ES.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[22] electronicayciencia.blogspot.com, «La Distorsión Armónica Total (THD),» [En línea]. Available: http://electronicayciencia.blogspot.com/2013/03/la-distorsion-armonica-total-thd.html. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[23] J. G. Quiñones, «Electronica aplicada,» [En línea]. Available: http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/jgomez/eap/filtros.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

[24] M. Lamich, «Filtros Activos de Potencia,» [En línea]. Available: http://www.crit.upc.edu/JCEE2006/pdf_ponencies/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[25] U. d. cantabria, «Compensaci´on de arm´onicos de corriente ycorrecci´on del factor de potencia mediantefiltros activos paralelo. Estado delconocimiento,» [En línea]. Available: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10632/3de8.APLcap3.pdf?sequence=4&isAllowed=y. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[26] F. R. J. y. J. M. S. Pedro Fabián Cárdenas H, «Aspectos Generales de Filtros Activos de Potencia en Sistemas de Potencia,» 16-18 Noviembre 2005. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/269103042_Aspectos_Generales_de_Filtros_Activos_de_Potencia_en_Sistemas_de_Potencia. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[27] I. S. 519-1992, «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,» 12 Abril 1993. [En línea]. Available: https://sci-hub.tw/10.1109/IEEESTD.1993.114370. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[28] I. V. S. F. Christian Cruz, «Diseño y simulacion del control de un filtro activo monofasico paralelo,» [En línea]. [Último acceso: 14 Noviembre 2019].

[29] J. Abellán, «Modulacion por ancho de pulso (PWM),» 21 Febrero 2016. [En línea]. Available: https://elrincondemaxwell.wordpress.com/2016/02/21/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[30] G. G. S. A. A. F. E. H. W. (. evandro m. sasso(1), «investigação dos modelos de circuitos de sincronismo trifásicos baseados na teoria das potências real e imaginária instantâneas (p-PLL E q-PLL),» Septiembre 2002. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267625119_investigacao_dos_modelos_de_circuitos_de_sincronismo_trifasicos_baseados_na_teoria_das_potencias_real_e_imaginaria_instantaneas_p-PLL_E_q-PLL. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[31] R. Pindado, «Phase Locked-Loop (PLL): Fundamento y aplicaciones,» [En línea]. Available: http://www.jcee.upc.edu/JCEE2001/PDFs2001/pindado.pdf. [Último acceso: 14 Noviembre 2019].

[32] L. M. S. M. A. AlvarezLeón, «Introducción al Control Óptimo y aplicación del Principio de Pontryagin alcomportamiento de un motor de Corriente Continua,» 3 Diceimbre 2009. [En línea]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/599/digital_18243.pdf?sequence=1. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[33] G. A. G. T. Á. B. García, «1aplicación de técnicas de control óptimo usando filtro de kalman sobre un modelo de generador eólico,» 2011. [En línea]. Available: http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/textoyanexos/62312136G643.pdf. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[34] I. S. LEGUIZAMON, «la teoría del control automático aplicada al area de ingeniería eléctrica,» [En línea]. Available: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjKrJi27LflAhWKuVkKHc8MDG4QFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.um.edu.ar%2Fojs-

new%2Findex.php%2FRUM%2Farticle%2Fdownload%2F508%2F498&usg=AOvVaw1nMDwllYgrabTVS-FESr4. [Último acceso: 29 octubre 2019].

[35] S. P. HERNANDEZ, «optimizacion y control optimo,» [En línea]. Available: http://filemon.upct.es/~paredes/oco.htm. [Último acceso: 14 Novienbre 2019].

[36] D. F. O. Tellez, «Control Óptimo,» 2013. [En línea]. Available: https://studylib.es/doc/6004762/control-%C3%B3ptimo---divisi%C3%B3n-de-estudios-de-posgrado. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[37] J. P. G. T. Luis Enrique Avendaño González, «Simulación de control vectorial a un motor de,» 1 Abril 2013. [En línea]. Available: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwikx5GAuJfmAhVGnFkKHcKHDuwQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4269026.pdf&usg=AOvVaw0amHbuUDLc80eWFtvqfxiM. [Último acceso: 2 Diciemre 2019].

[38] D. F. B. N. A. D. R. SÁNCHEZ, «contrucción e implementación del sistema de control vectorial de orientación de campo directo (dfoc) para un motor trifásico de inducción,» Marzo 2012. [En línea]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4592/1/CD-4214.pdf#page=24&zoom=auto,-107,726. [Último acceso: 14 Noviembre 2019].

[39] D. M. YARCE, «compensación de armónicos con un filtro activo de potencia,» 2010. [En línea]. Available:

http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1473/62138223M977.pdf?sequence=1. [Último acceso: 31 Octubre 2019].

[40] P. D. Pita Fernández, «"Investigacion cuantitativa y cualitativa",» 27 Mayo 2002. [En línea]. Available: https://www.fisterra.com/gestor/upload/guias/cuanti_cuali2.pdf. [Último acceso: 11 Enero 2019].

[41] J. L. Abreu, «"El Método de la Investigación",» Diciembre 2014. [En línea]. Available: http://www.spentamexico.org/v9-n3/A17.9(3)195-204.pdf. [Último acceso: 11 Enero 2019].

[42] E. A. D. L. D. L. G. CARLOS GÓMEZ DÍAZ DE LEÓN, «"método comparativo",» [En línea]. Available: http://eprints.uanl.mx/9802/1/Estudio%20Comparado.pdf. [Último acceso: 11 Enero 2019].

[43] M. Y. L. Ruiz, «la simulacion como metodo de enseñanza,» 2011. [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/margaysabel/la-simulacin-como-mtodo-de-enseanza. [Último acceso: 29 Enero 2020].

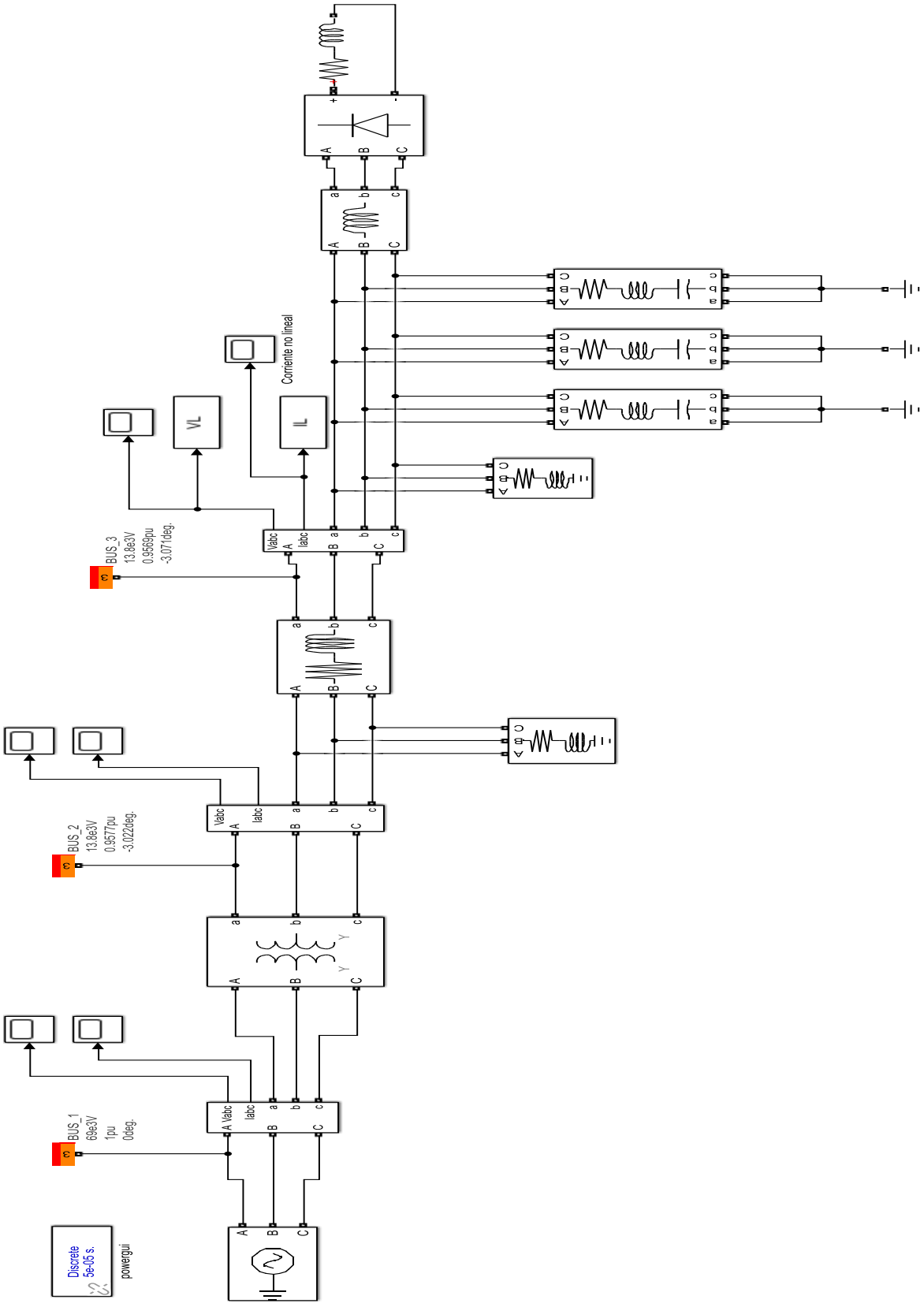
[44] J. C. G. M. Alejandro Garcés Ruiz, «Flujo de Carga Armonico para Sistemas Radiales,» 25 Agosto 2010. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/44131277_flujo_de_carga_armonico_para_sistemas_radiales. [Último acceso: 9 Enero 2020].

[45] crit.upc.edu, «Filtros Activos de Potencia,» [En línea]. Available: http://www.crit.upc.edu/JCEE2006/pdf_ponencies/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2018].

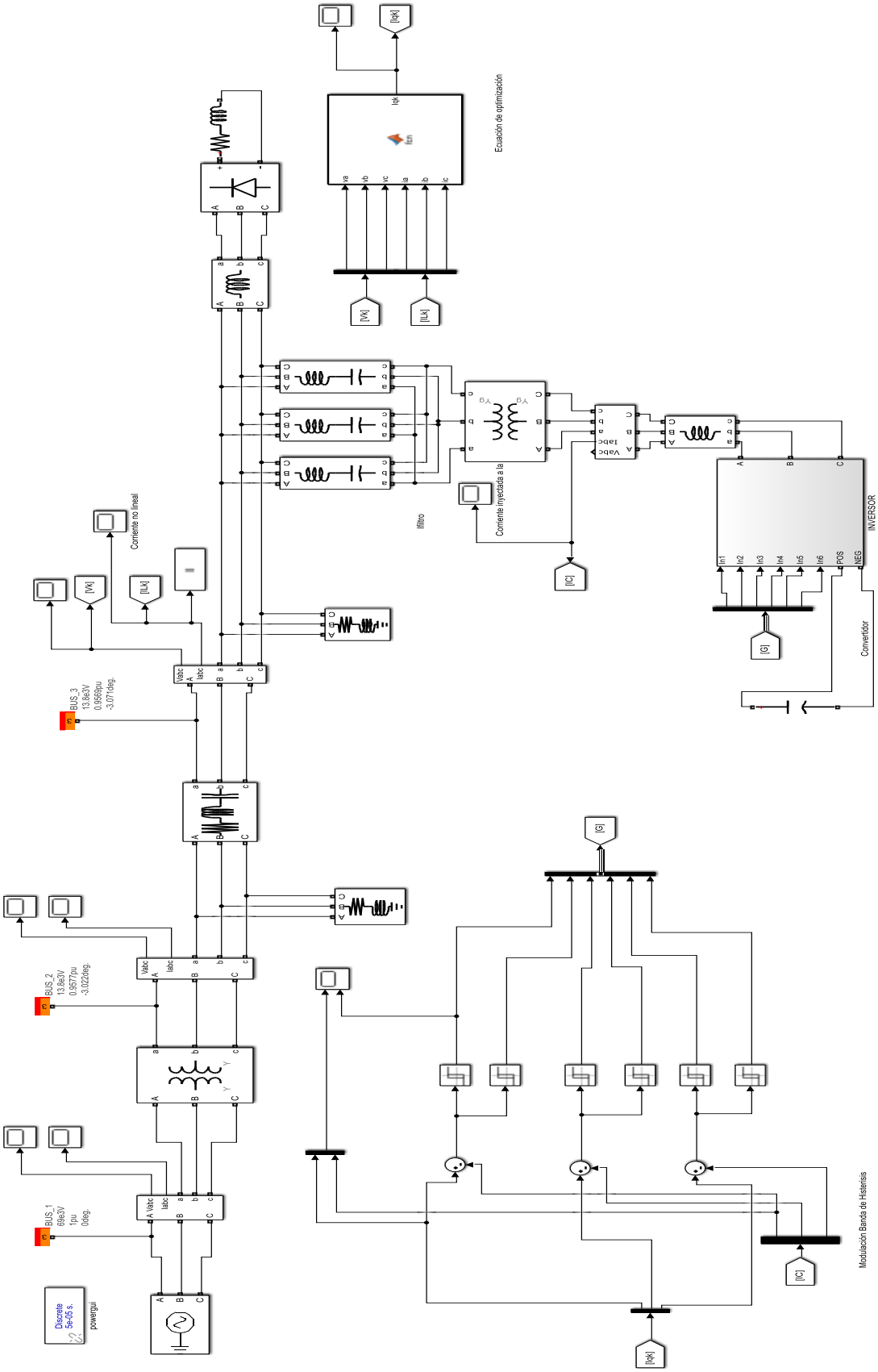
14. ANEXOS

14.1 (A) DIAGRAMAS DEL SISTEMA DE PRUEBA

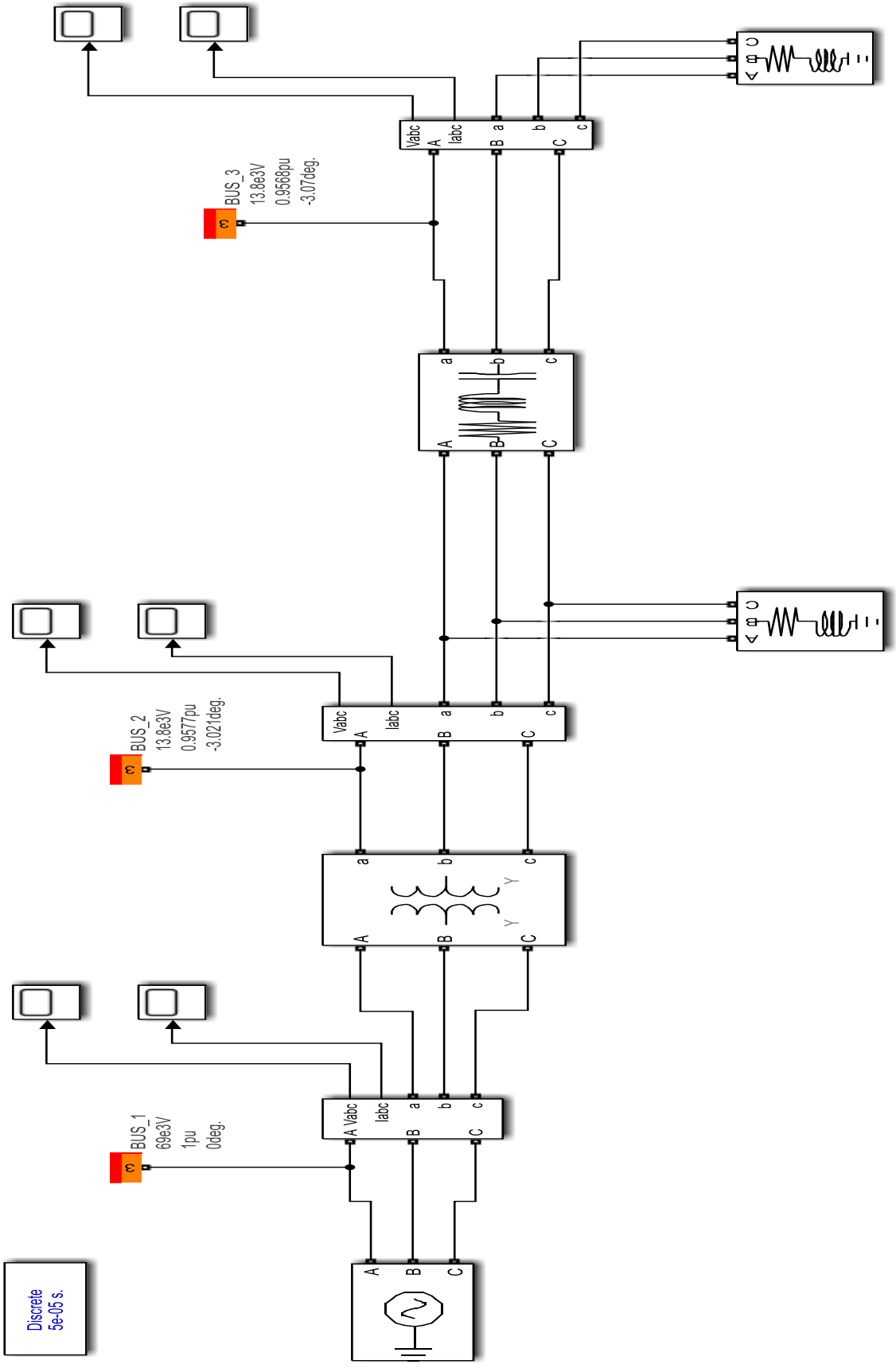
1. FILTRO PASIVO



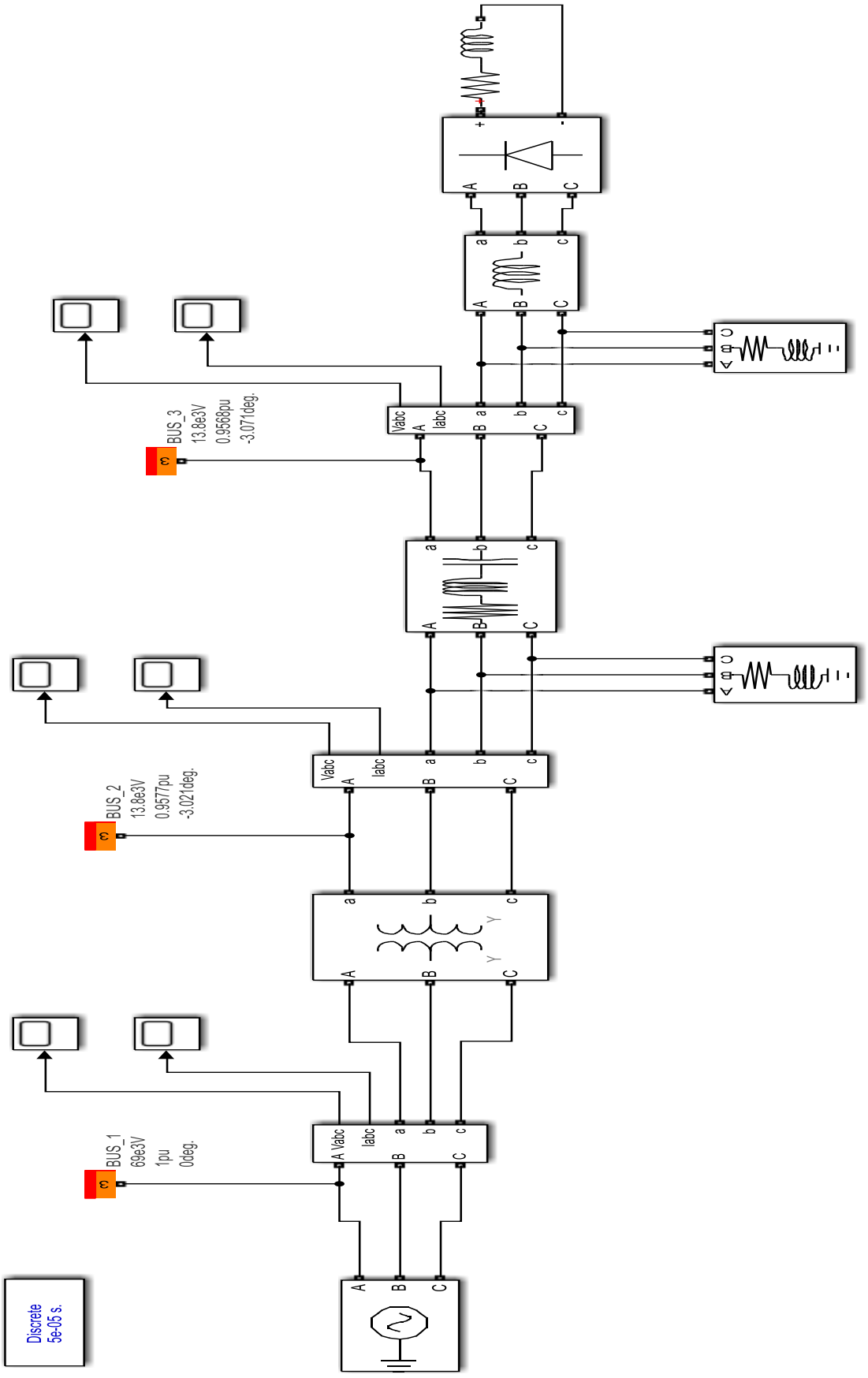
2. FILTRO HÍBRIDO



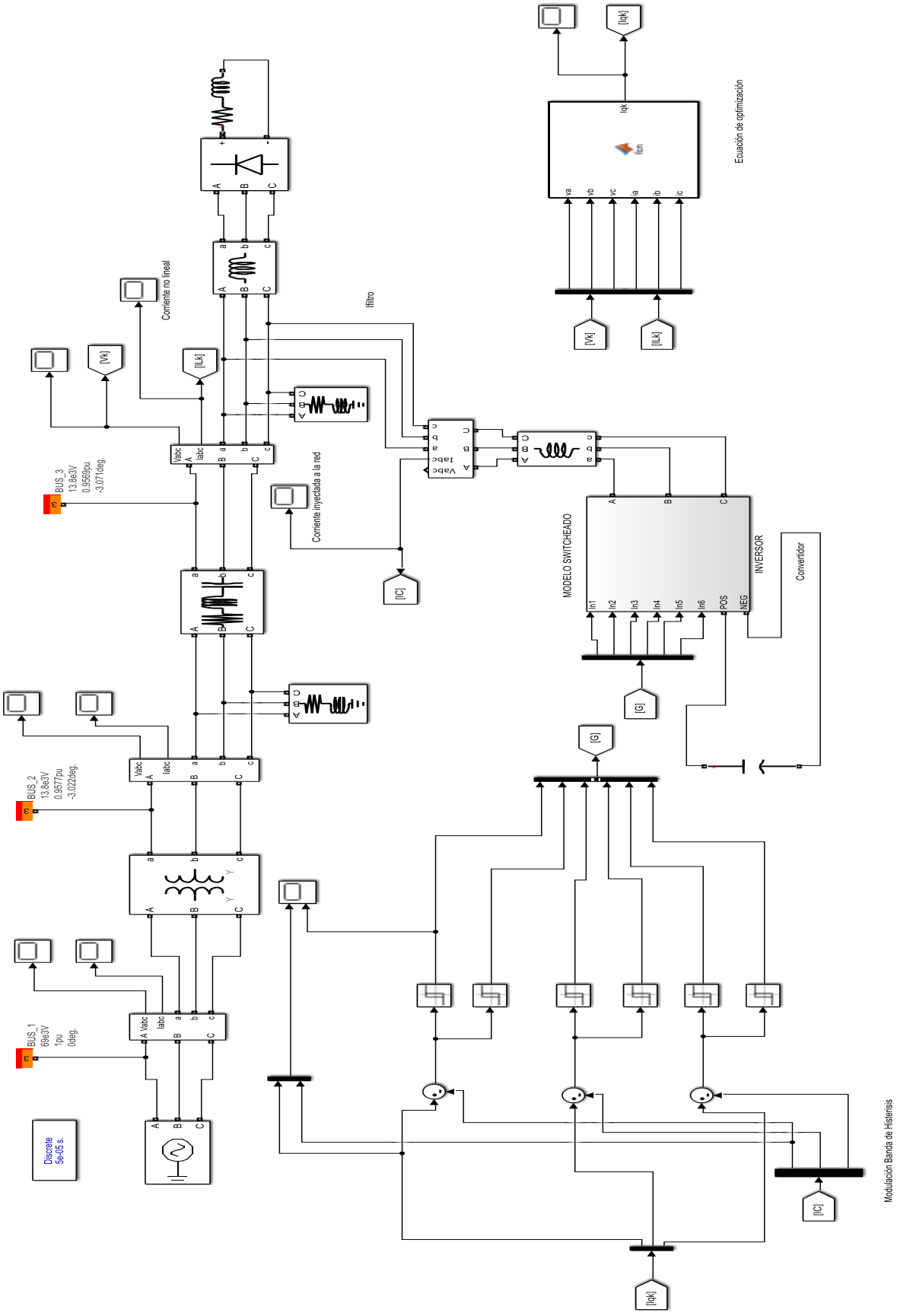
3. SISTEMA DE PRUEBA SIN CARGA



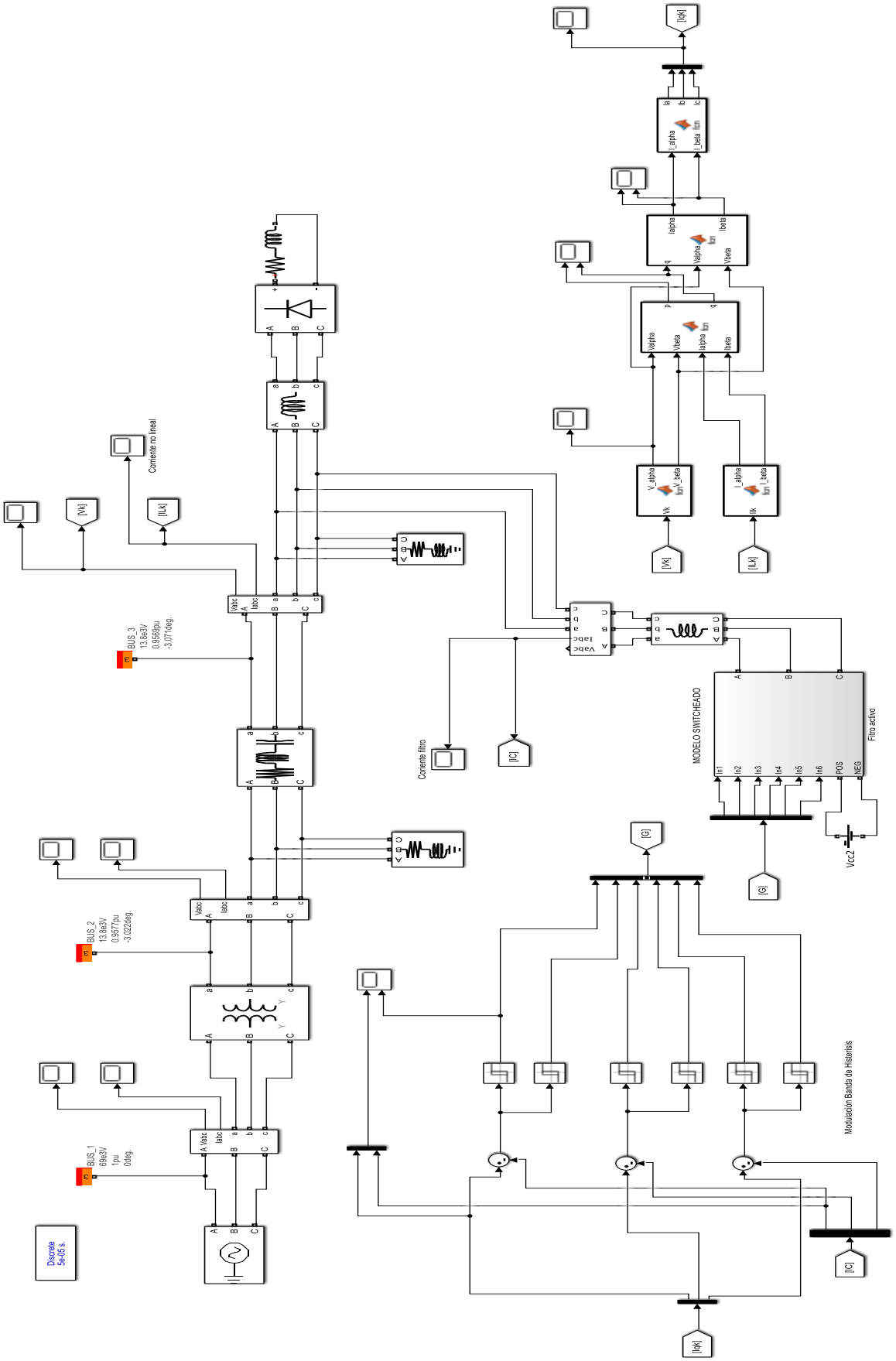
4, SISTEMA DE PRUEBA CON CARGA NO LINEAL



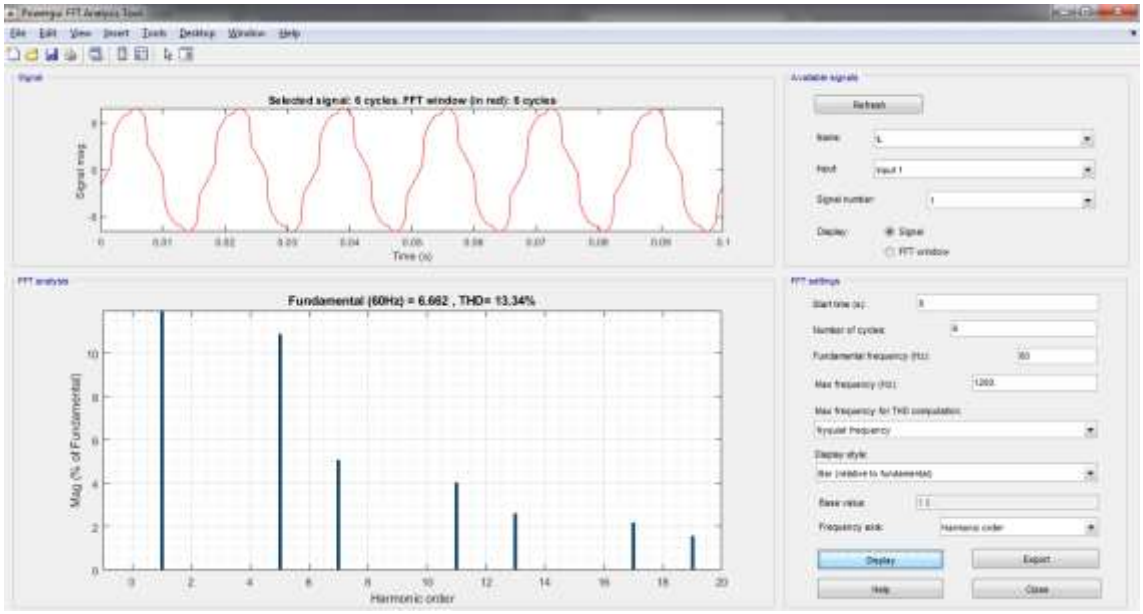
5. SISTEMA DE PRUEBA CON FTO



6. SISTEMA DE PRUEBA CON FTA



14.2 (B) Cálculos para el modelamiento del filtro pasivo



IMPEDANCIA (A)

$$Z = R_F + j\left[\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F}\right]$$

Reactancia efectiva (A)

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{ff}} = \left(\frac{13800^2}{0.6e6}\right)$$

$$X_{eff} = 317.4\,\Omega$$

Reactancia Capacitiva (A)

$$X_c = \frac{h^2}{h^2 - 1}\,X_{eff} = \left(\frac{4.95^2}{4.95^2 - 1}\right)317.4$$

$$X_c = 330.9\,\Omega$$

Capacitancia (A)

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi(60)(330.9)}$$

$$C = 8.02\,\mu F$$

Reactancia Inductiva (A)

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{330.9}{4.95^2}$$

$$X_L = 13.5\ \Omega$$

Inductancia (A)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{13.5}{2\pi(60)}$$

$$L = 35.8\ mH$$

Resistencia (A)

$$R = \frac{X_L(f_{reson})}{Q_f} = \frac{13.5\ (4.95)}{20}$$

$$R = 3.34\ \Omega$$

Impedancia (B)

$$Z = R_F + j\left[\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F}\right]$$

Reactancia efectiva (B)

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{ff}} = \left(\frac{13800^2}{0.3e6}\right)$$

$$X_{eff} = 634.8\ \Omega$$

Reactancia capacitiva (B)

$$X_c = \frac{h^2}{h^2 - 1}\ X_{eff} = \left(\frac{6.9^2}{6.9^2 - 1}\right) 634.8$$

$$X_c = 648.42\ \Omega$$

Capacitancia (B)

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi(60)(648.42)}$$

$$C = 4.09\ \mu F$$

Reactancia Inductiva (B)

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{648.42}{6.9^2}$$

$$X_L = 13.62\ \Omega$$

Inductancia (B)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{13.62}{2\pi(60)}$$

$$L = 36.13\ mH$$

Resistencia (B)

$$R = \frac{X_L(f_{reson})}{Q_f} = \frac{13.62\ (6.9)}{20}$$

$$R = 1.173\ \Omega$$

Impedancia (C)

$$Z = R_F + j\left[\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F}\right]$$

Reactancia efectiva (C)

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{ff}} = \left(\frac{13800^2}{0.3e6}\right)$$

$$X_{eff} = 634.8\ \Omega$$

Reactancia capacitiva (C)

$$X_c = \frac{h^2}{h^2 - 1}\ X_{eff} = \left(\frac{10.8^2}{10.8^2 - 1}\right)634.8$$

$$X_c = 640.29\ \Omega$$

Capacitancia (C)

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi(60)(640.29)}$$

$$C = 4.14\ \mu F$$

Reactancia Inductiva (C)

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = \frac{640.29}{10.8^2}$$

$$X_L = 5.49\ \Omega$$

Inductancia (C)

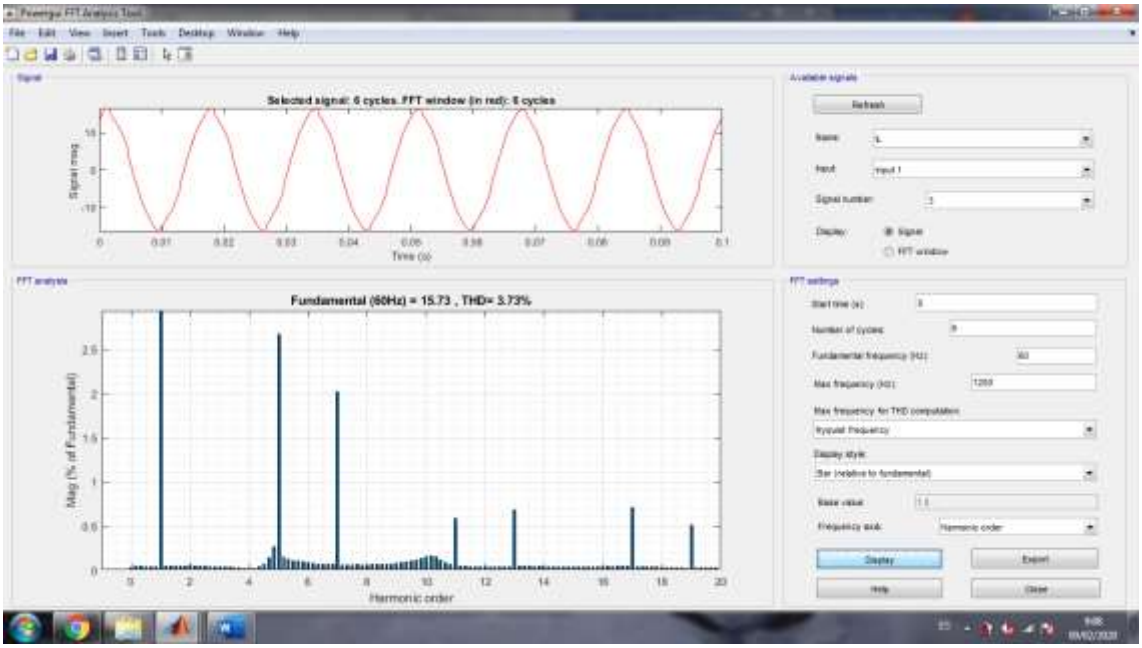
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5.49}{2\pi(60)}$$

$$L = 14.56\ mH$$

Resistencia (C)

$$R = \frac{X_L(f_{reson})}{Q_f} = \frac{5.49(10.8)}{20}$$

$$R = 1.48\ \Omega$$



14.3 (C) Código de la programación de optimización no lineal

En el siguiente lenguaje de programación se detalla las variables que se utilizó para encontrar la ecuación de control de optimización no lineal.

K = fases (a, b, c)

Iqk = Corriente de compensación instantánea en (k)

```
function Iqk = fcn(va,vb,vc,ia,ib,ic)
%#codegen
iqa = ia-((((va*ia+vb*ib+vc*ic))/(va^2+vb^2+vc^2))*va);
iqb = ib-((((va*ia+vb*ib+vc*ic))/(va^2+vb^2+vc^2))*vb);
iqc = ic-((((va*ia+vb*ib+vc*ic))/(va^2+vb^2+vc^2))*vc);
Iqk = [iqa,iqb,iqc];
```

14.4 (D) Código de la programación de la teoría de Akagi

A continuación, se indica el lenguaje de programación utilizado para desarrollar las transformadas de Clark y Park que sirven para el estudio de la teoría de Akagi.

K = fases (a, b, c)

VK = Voltaje instantáneo en fase (k)

```
function [V_alpha,V_beta] = fcn(Vk)
%#codegen
Va=Vk(1);
Vb=Vk(2);
Vc=Vk(3);

V_alpha=sqrt(2/3)*(Va -(1/2)*Vb -(1/2)*Vc);
V_beta=sqrt(2/3)*((sqrt(3)/2)*Vb -(sqrt(3)/2)*Vc);
```

ILK = Corriente de compensación instantánea en (k)

```
function [I_alpha,I_beta] = fcn(Ilk)
%#codegen
Ia=Ilk(1);
Ib=Ilk(2);
Ic=Ilk(3);

I_alpha=sqrt(2/3)*(Ia -(1/2)*Ib -(1/2)*Ic);
I_beta=sqrt(2/3)*((sqrt(3)/2)*Ib -(sqrt(3)/2)*Ic);
```

PQ = potencia activa y reactiva

```
function [p,q] = fcn(Valpha,Vbeta,Ialpha,Ibeta)

%#codegen

  p = Valpha*Ialpha + Vbeta*Ibeta;
  q = -Vbeta*Ialpha + Valpha*Ibeta;
```

```
end
```

(P = 0) Potencia activa se hace cero porque necesitamos compensar reactivos a nuestro sistema

```
function [Ialpha,Ibeta] = fcn(q,Valpha,Vbeta)

%#codegen
 p=0;

 a = 1/(Valpha^2 + Vbeta^2);

 Ialpha=a*(Valpha*p -(Vbeta*q));

 Ibeta= a*(Vbeta*p +(Valpha*q));

end
```

Ia, Ib, Ic = Corrientes de compensación

```
function [Ia,Ib,Ic] = fcn(I_alpha,I_beta)
%#codegen
Ia=sqrt(2/3)*I_alpha;
Ib=sqrt(2/3)*(-(1/2)*I_alpha + (sqrt(3)/2)*I_beta);
Ic=sqrt(2/3)*(-(1/2)*I_alpha - (sqrt(3)/2)*I_beta);
```

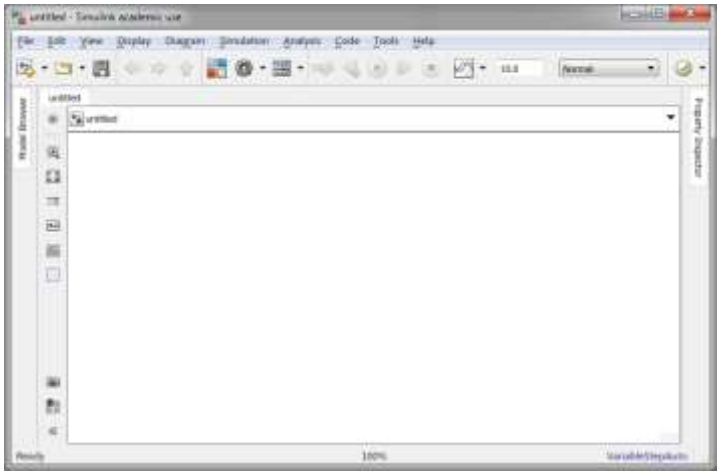
14.5 (E)Manual del Usuario para la modelación de sistemas eléctricos en SIMULINK

MANUAL DE USUARIO PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EN SIMULINK

A. MODELACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

1. Crear un modelo en blanco.

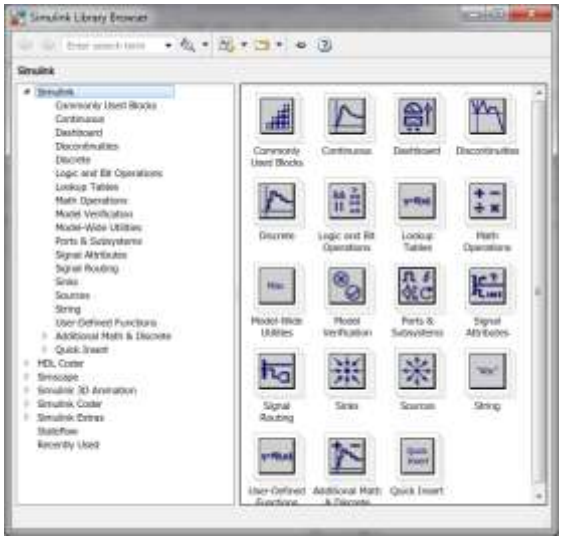
Abrimos el entorno de simulación de SIMULINK disponible en el programa Matlab. Creamos un nuevo modelo en blanco. La ventana que contiene nuestro modelo inicial tiene la apariencia que se ve en la imagen inferior.



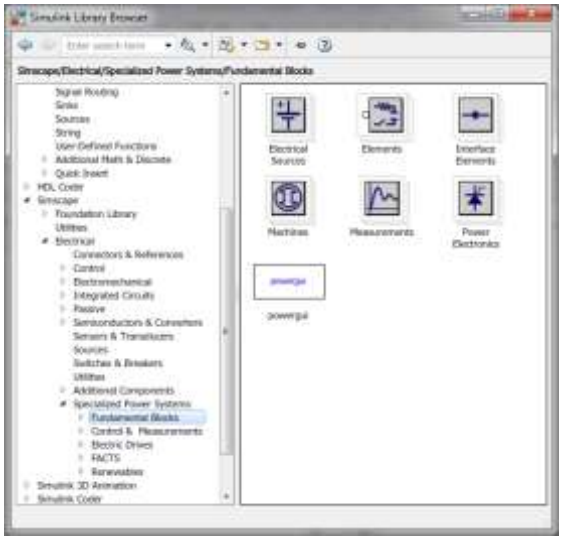
Finalmente debemos nombrar y guardar nuestro modelo en formato .slx

2. Acceder a la librería

Para añadir cualquier elemento al espacio de simulación, utilizaremos la librería de Simulink



En la ventana “Simulink Library Browser” nos permite seleccionar los elementos necsarios para armar nuestro modelo. Para ello, nos da dos opciones, realizar la búsqueda en casa que conozcamos el nombre del elemento o a través del listado de librerías de componentes instaladas en nuestro ordenador.

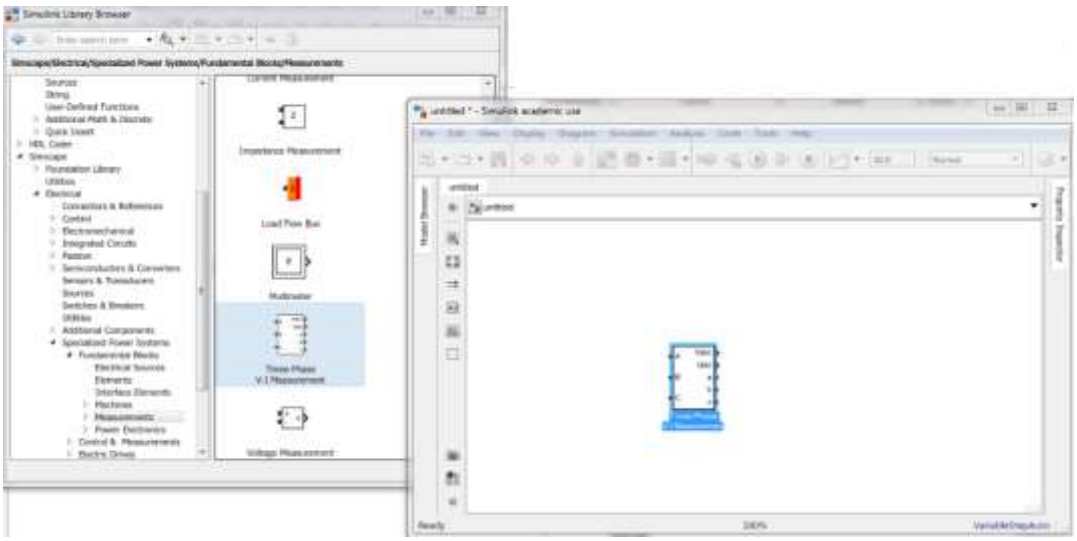


Para armar el sistema eléctrico propuesto utilizaremos los elementos que se encuentran en la librería **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks.**

Esta librería es de gran utilidad ya que contiene modelos para representar casi todos los elementos activos y pasivos que conforman un sistema eléctrico.

3. Añadir elementos desde la librería

Cualquier elemento de la librería puede ser añadido a nuestro modelo con solo dar clic sobre él y arrastrarlo al espacio en blanco de nuestro modelo.



Una vez agregado el elemento, debemos modificar su nombre por uno que represente al componente de la red eléctrica que representa.

4. Modelar Sistemas eléctricos

Un sistema eléctrico está compuesto de varios componentes. Generadores, líneas de transmisión, líneas de distribución, transformadores y cargas serán representados por sus

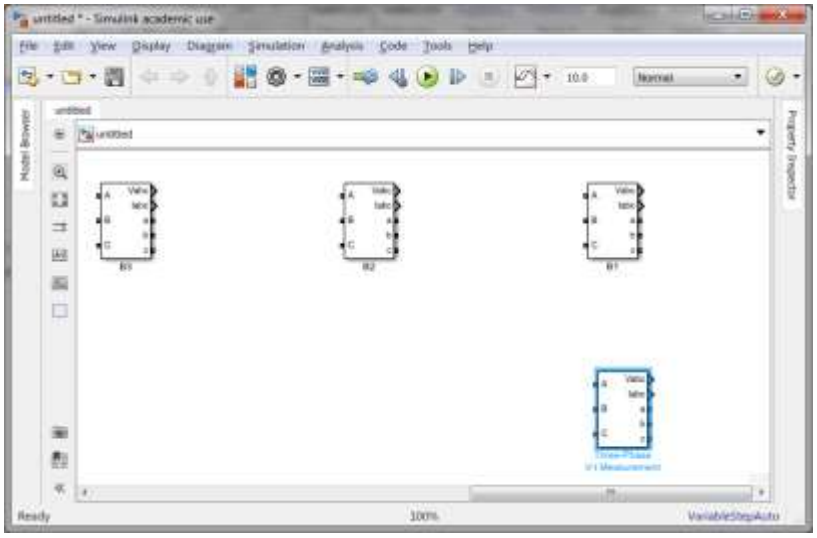
respectivos modelos. La interconexión de estos modelos permitirá simular el comportamiento del sistema

Recomendamos agregar los elementos en el siguiente orden:

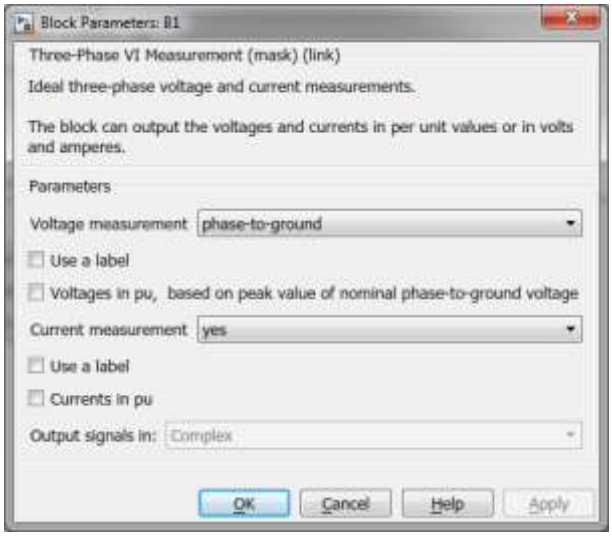
- Barras o nodos
- Líneas de transmisión
- Transformadores
- Generadores o equivalentes de la red
- Banco de capacitores
- Cargas lineales
- Cargas no lineales

4.1 Barras o nodos

Como primer paso procedemos a ingresar todas las barras o nodos que posea nuestro sistema, en nuestro caso son 18 barras. En simulink las barras del sistema pueden ser representadas por el bloque "Three PhaseV-I Measurement". Este bloque lo encontraremos en la librería **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Measurement.**

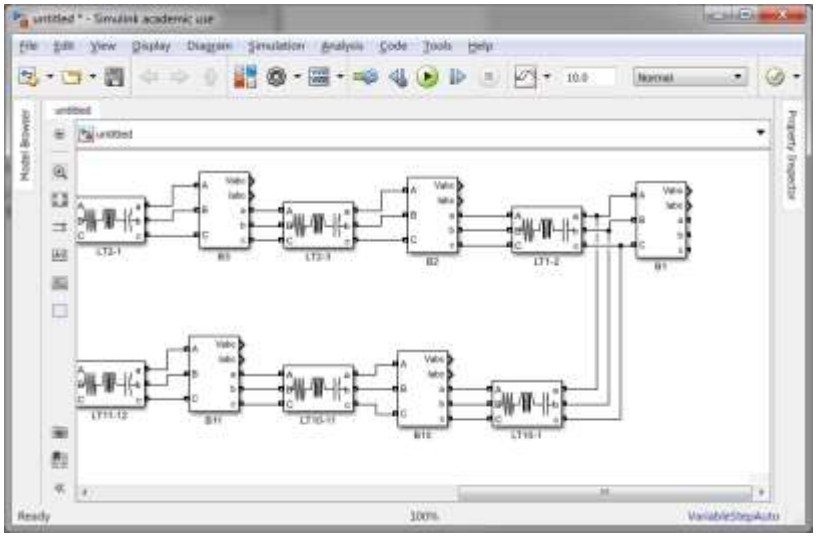


Accedemos a los parámetros del bloque dando doble clic en él. Este bloque permite la medición de voltaje y corriente a través de él.



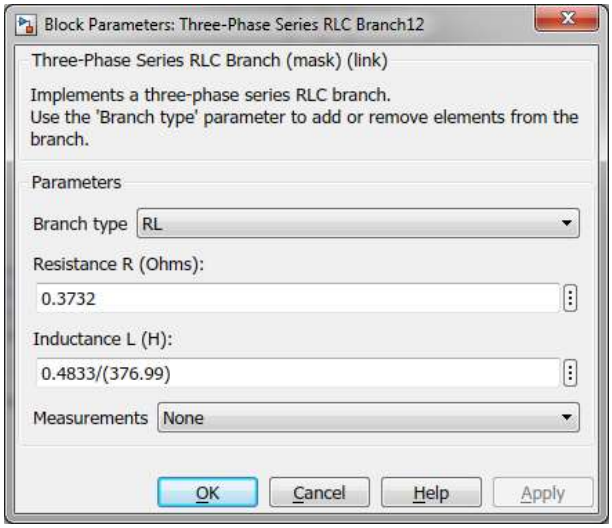
4.2 Líneas de distribución

Las líneas de distribución las representamos mediante el modelo serie RL. Para utilizaremos el bloque "Three Phase Series RLC Branch" que se encuentra en la librería **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Elements**



Los parámetros que ingresamos en este bloque son:

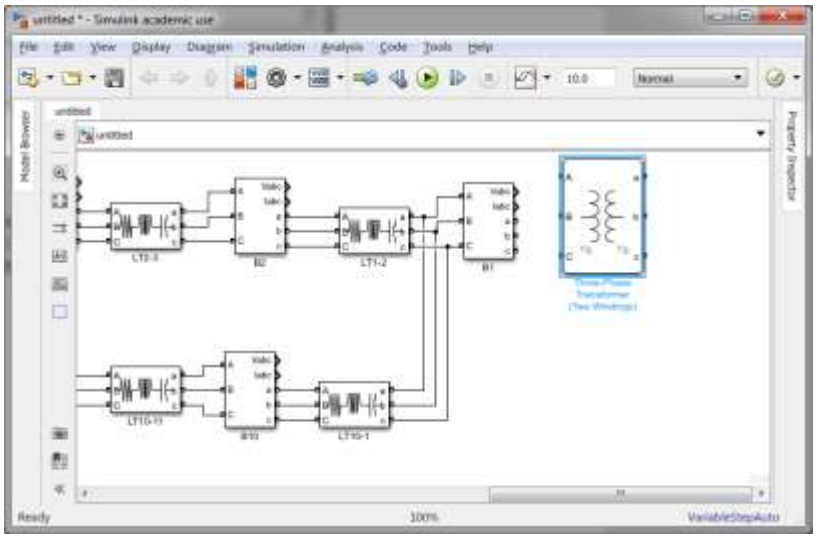
- Tipo, en este caso RL
- Resistencia [ohm/ km]
- Inductancia [L/ km], que puede ser calculada a partir de la reactancia inductiva $L = X_L/2\pi f$



Recomendación: El nombre de las líneas de distribución deben indicar el nombre de las barras a las que se conectan.

4.3 Transformadores

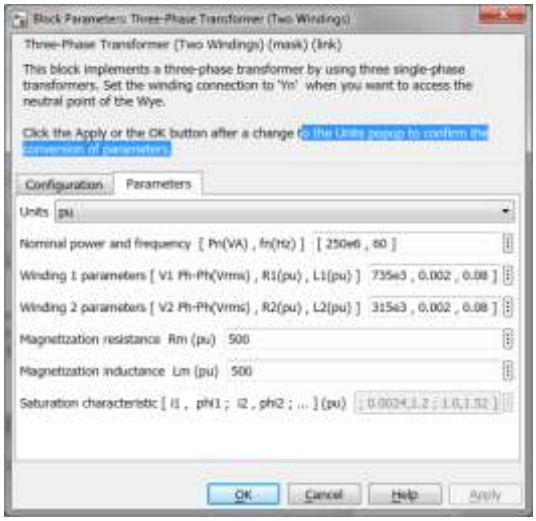
Simulink nos permite modelar al transformador trifásico a través del bloque *"Three Phase Transformer (Two Windings)"* que se encuentra ubicado en la librería **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Elements**.



Los parámetros que debemos especificar en este bloque son:

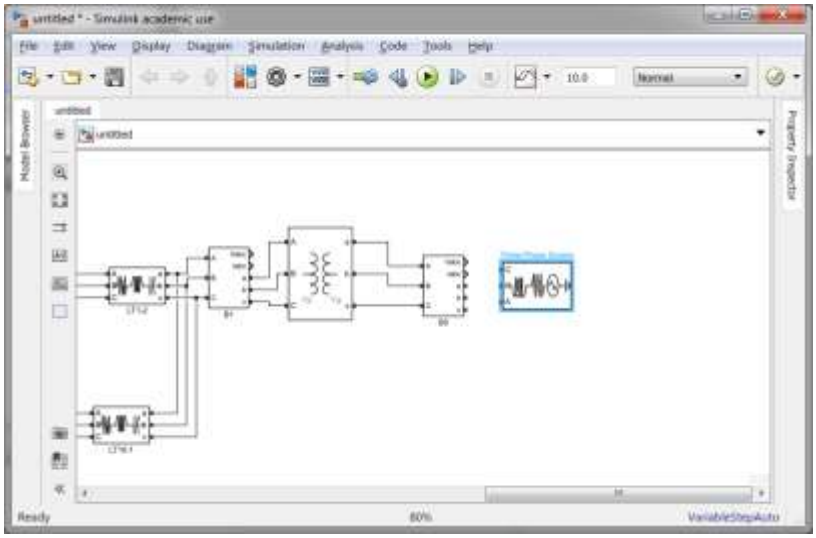
- Conexión
- Tipo de núcleo
- Frecuencia [f]
- Potencia nominal [VA]
- Voltaje primario [V]
- Voltaje secundario [V]
- Resistencia de devanados primario y secundario [pu]
- Inductancia de devanados primario y secundario [pu]
- Resistencia de magnetización [pu]

- Inductancia de magnetización [pu]



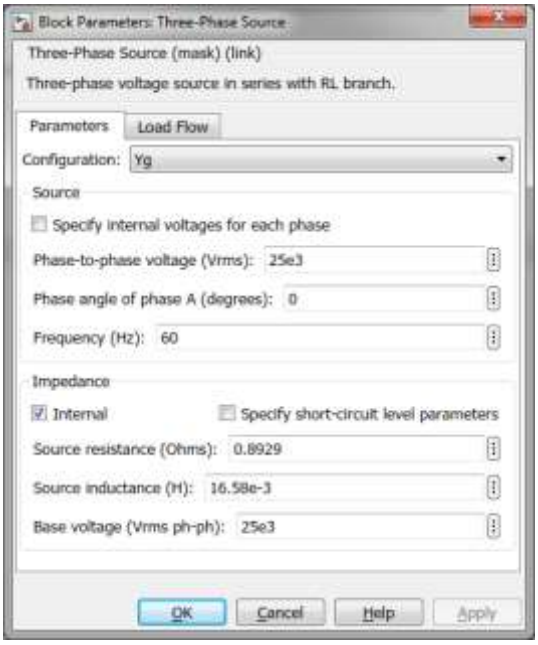
4.4 Equivalente de la red

Simulink nos permite modelar una red eléctrica a través de su equivalente: Fuente en serie con la impedancia de corto circuito, mediante el bloque *"Three Phase Source"* que se encuentra en la librería: **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Electrical Sources**.



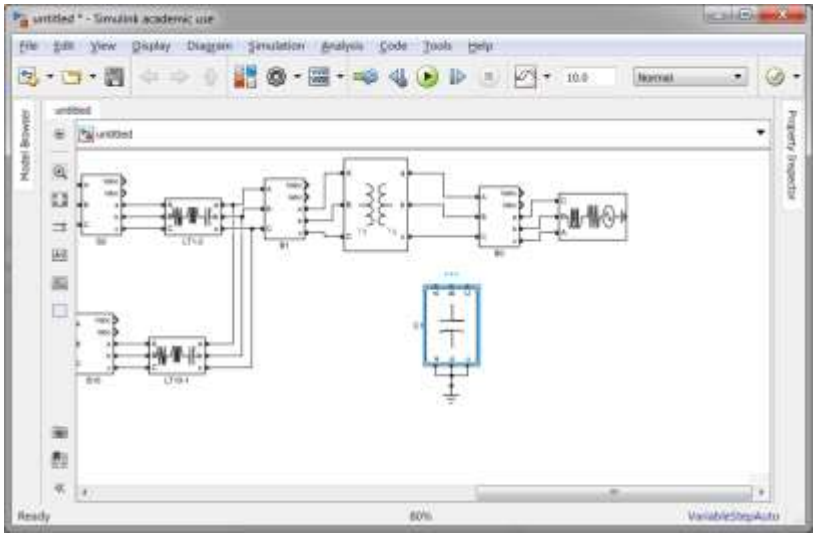
Los parámetros que debemos ingresar a este bloque son:

- Voltaje fase-fase [Vrms]
- Angulo de fase [deg]
- Frecuencia [F]
- Resistencia [ohms]
- Inductancia [L]
- Voltaje Base [Vrms]



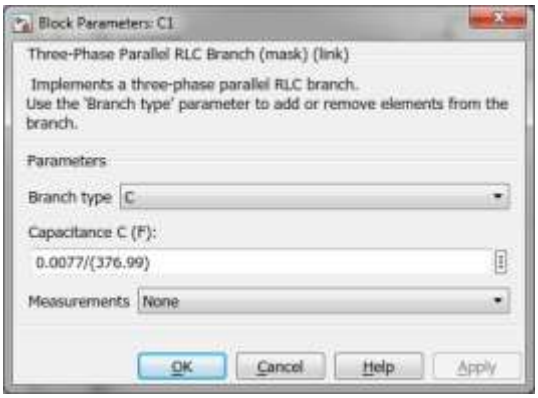
4.5 Banco de capacitores

Los bancos de capacitores pueden ser representados en Simulink mediante el bloque *"Three Phase Parallel RLC Branch"*. Este bloque lo configuramos como una capacitancia y lo conectamos a tierra a traves del bloque ground. Estos bloques los encontramos en la librería: **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Elements**.



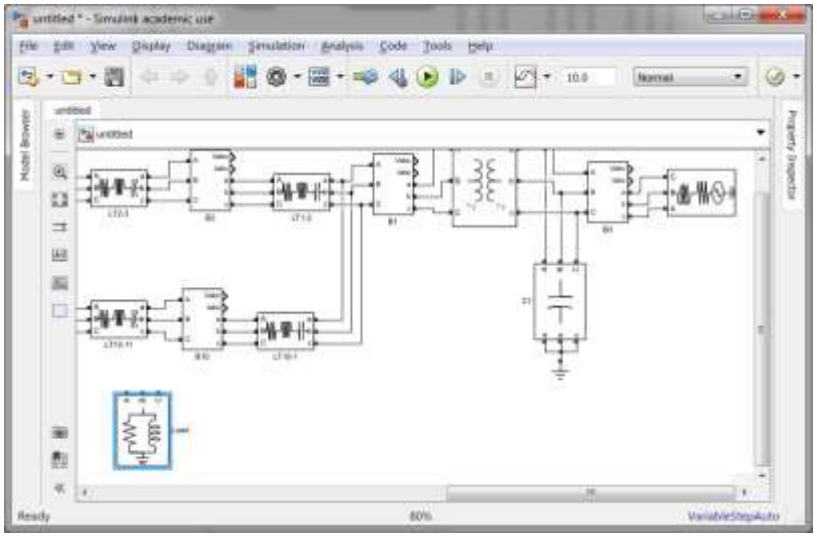
La capacitancia es el único parámetro que ingresamos a este bloque. Esta puede ser calculada a partir de la admitancia capacitiva así:

$$C = \frac{Y}{2\pi f}$$



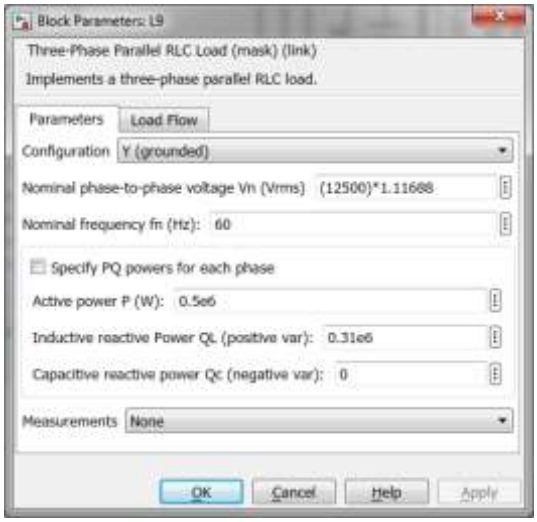
4.6 Cargas Lineales

Las cargas lineales son modeladas en Simulink mediante el bloque "Three Phase Parallel Load". Este bloque lo encontramos en la librería: **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Elements**.



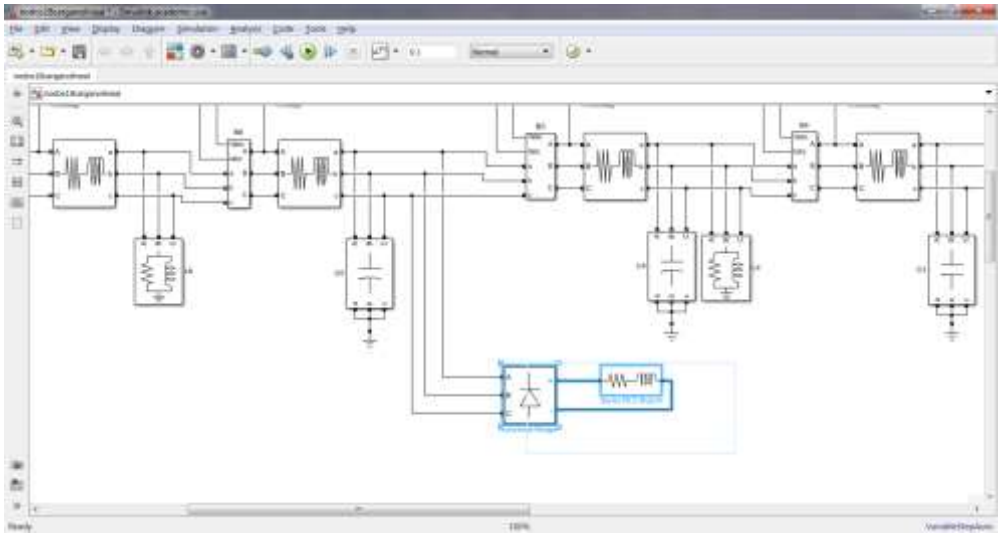
Los parámetros que ingresamos a este bloque son:

- Configuración
- Frecuencia [f]
- Potencia Activa [W]
- Potencia Reactiva Inductiva [Var]
- Potencia Reactiva Capacitiva [Var]

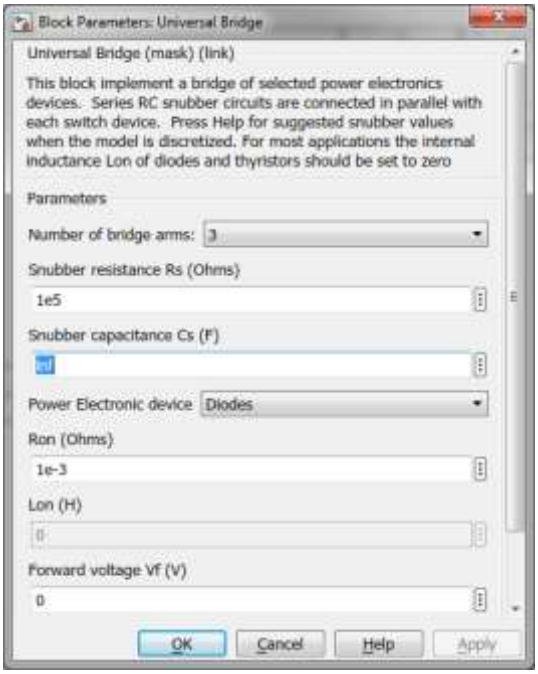


4.7 Cargas no lineales

Simulink permite modelar cargas no lineales mediante la utilización de **"Universal Bridge"** bloque que representan a un puente de rectificador cuyo número de pulsos podemos elegir. La carga: resistiva, inductiva o capacitiva; conectada a este bloque es alimentada por voltaje continuo.



El bloque "Universal Bridge" se encuentra en la librería: **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Power Electronics.**



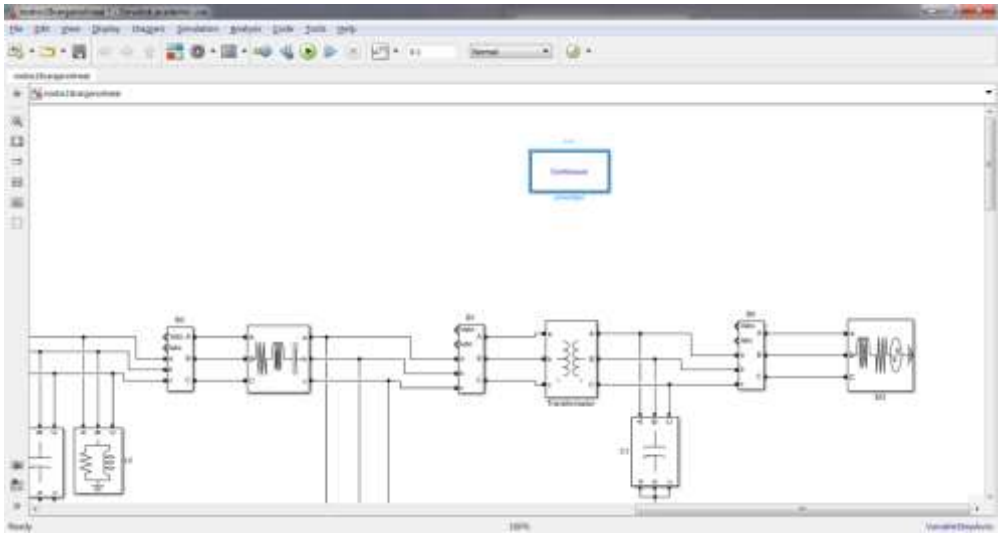
B. FLUJOS DE POTENCIA

Para realizar un análisis de flujos de potencia en Simulink debemos integrar a nuestro modelo dos bloques.

1. Bloque Powergui

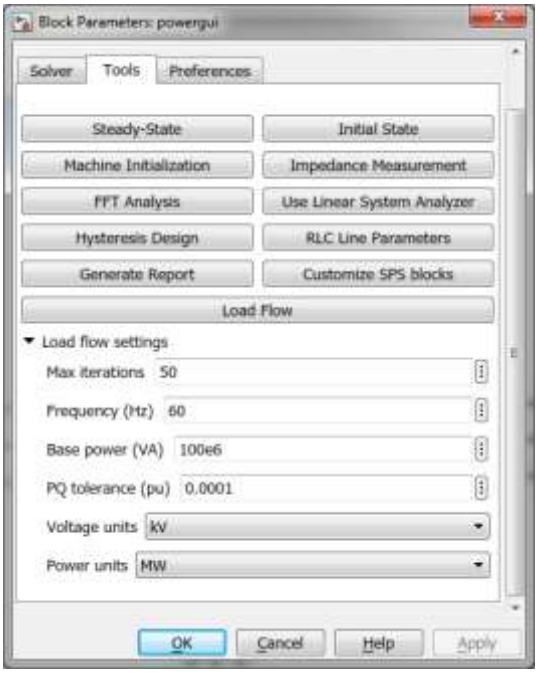
El primero, "Powergui", bloque dedicado a sistemas eléctricos el cual nos permite acceder a las herramientas de análisis que posee Simulink como: Flujos de potencia, Inicialización de variables, Análisis de Fourier, etc

Este bloque se encuentra en la librería: **Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks.**



Para realizar un análisis de flujos de potencia debemos ajustar los siguientes parámetros:

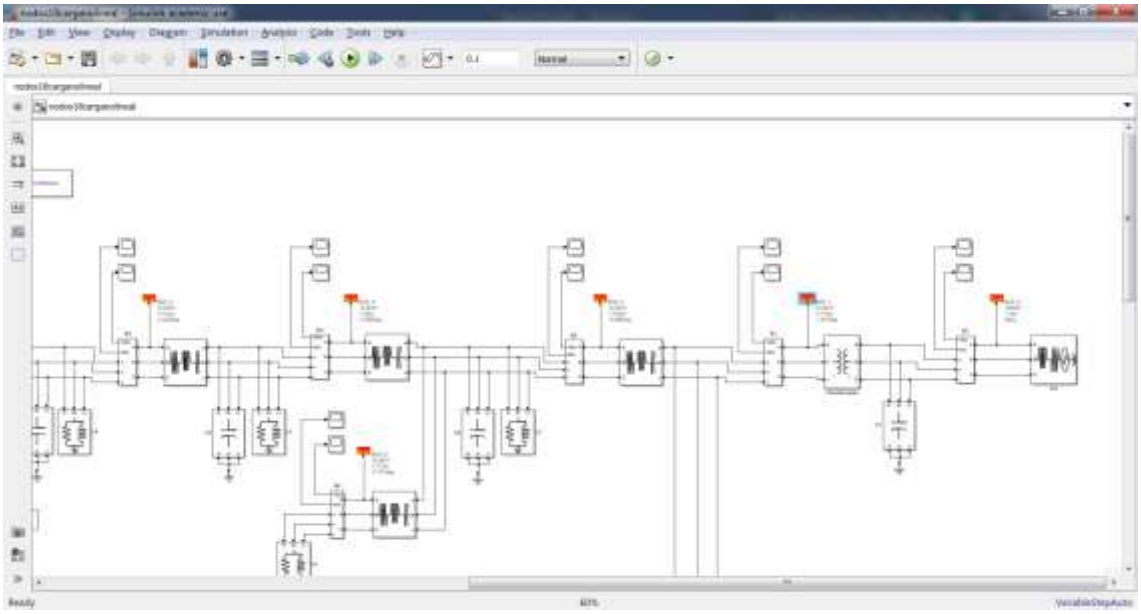
- Frecuencia [Hz]
- Número de iteraciones
- Potencia Base [VA]
- Tolerancia



2. Bloque Load Flow Bus

El segundo, "Load Flow Bus", bloque necesario para correr un flujo de potencia pues nos permite especificar los puntos del sistema que serán considerados como nodos. En nuestro ejemplo añadiremos 18, uno por cada nodo del sistema.

Este bloque se encuentra en la librería: ***Simscape>>Electrical>>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Measurements.***

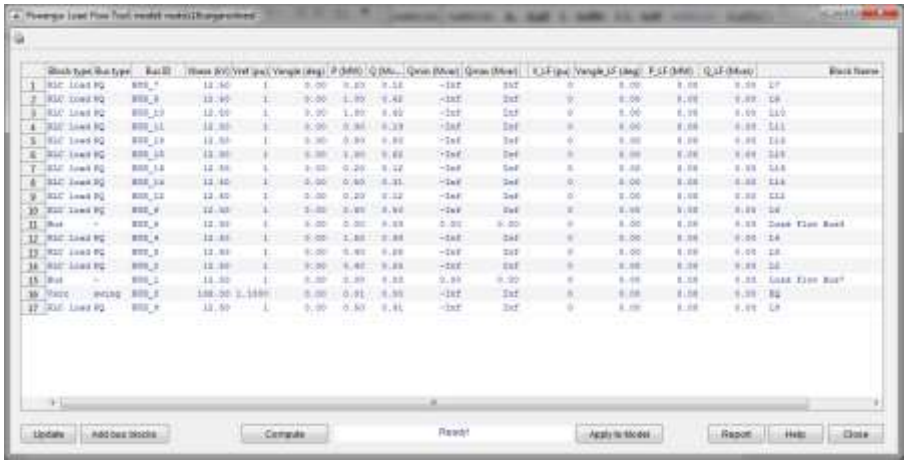


En este bloque debemos establecer el voltaje base, tipo (Slack o PV), voltaje y ángulo de ser el caso.

3. Load Flow Tool

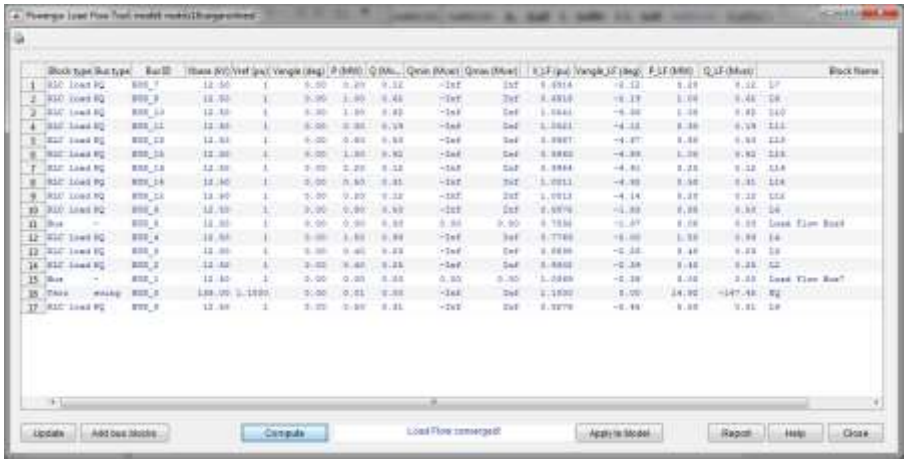
Una vez insertado los bloques anteriormente mencionados, procedemos a correr el flujo de potencia. Para ello, damos clic en el bloque Powergui, en la opción "***Load Flow"*** y esperamos a que se cargue la aplicación ***Load Flow Tool.***

Esta aplicación se abrirá en una ventana similar a la siguiente:



En esta ventana debemos verificar que todos los que ingresamos sea correctos, y en caso de no existir ningún error, procedemos a dar clic en ***Compute*** para correr el flujo de potencia en nuestro sistema.

En caso de no existir errores de convergencia se obtendrán los resultados del flujo de potencia en nuestro sistema.



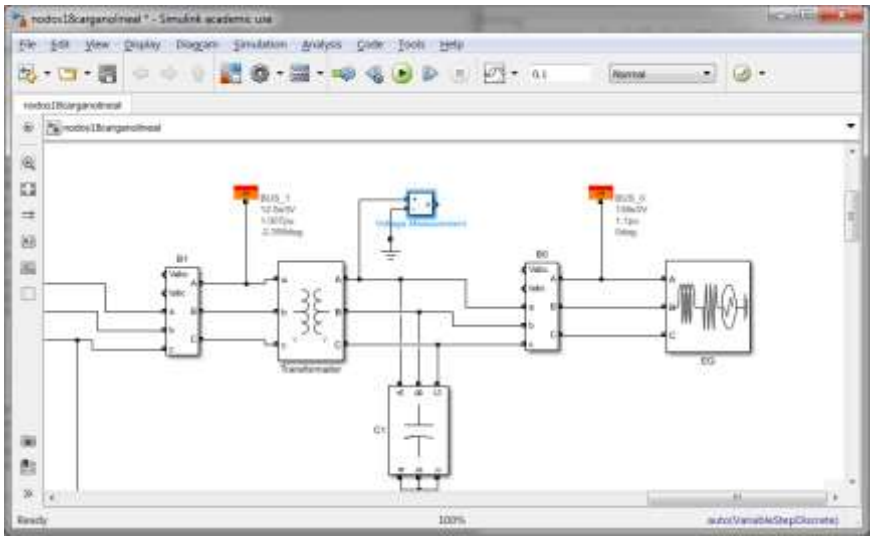
Finalmente, si estamos de acuerdo con los resultados procedemos a dar clic en **Apply to Model** para aplicar los mismos a nuestro sistema.

C. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

1. Medición de voltaje y corriente

Para realizar el análisis de armónicos en nuestro sistema procederemos a utilizar la herramienta **FFT Analysis** que vine integrada en el bloque **Powergui** de Simulink. Pero primero debemos adecuar nuestro sistema para el análisis, para ello, agregaremos los bloques **"Voltage Measument"** o "**Current Measurement"** desde la librería:

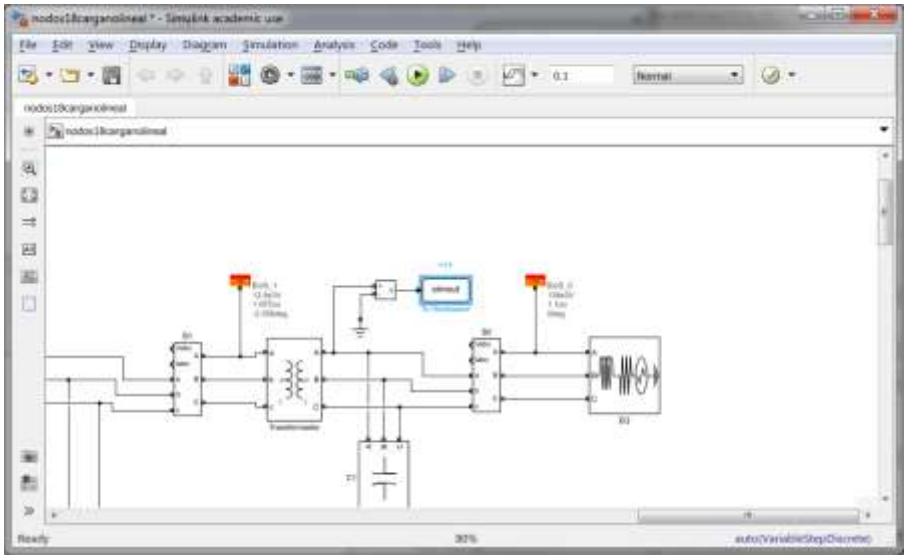
Simscape>>Electrical>>Specialized>>PowerSystem>>FundamentalBlocks>>Measurements.



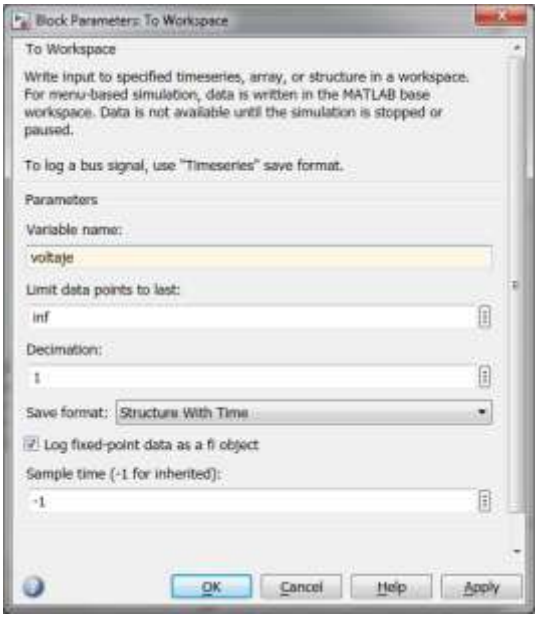
Estos bloques nos permitirán medir el voltaje o corriente de cualquier punto del sistema. En el ejemplo mediremos el voltaje de la red en el lado primario del transformador.

2. Almacenar los datos

Para realizar el análisis de armónicos en una seña de voltaje o corriente debemos guardar la señal que queremos analizar en una variable del **Workspace** de Matlab en formato de estructura con tiempo.



Para ello utilizaremos el bloque **to Worspace** que se encuentra en la librería: **Simulink>>Sinks**



En este bloque guardaremos en la variable voltaje de tipo **Structure with time** los datos medidos durante la simulación.

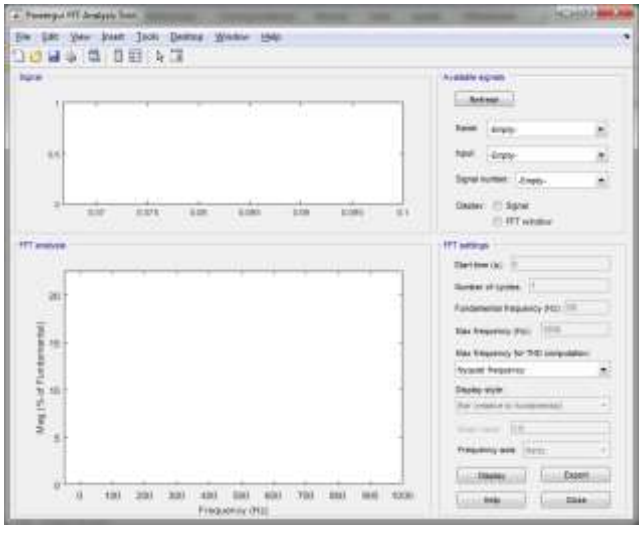
3. FFT Analysis Tool

Para realizar el análisis de contenido de armónicos en la señal de voltaje debemos primero correr la simulación en Simulink. Es importante establecer los parámetros de simulación adecuados para este análisis tales como: tiempo de simulación, Solver, Step, etc.

En este ejemplo, se simula durante 0.1 segundos el sistema modelado utilizando la configuración por defecto de Simulink.

Una vez se completa la simulación se habrá creado la variable voltaje en el **Workspace.**

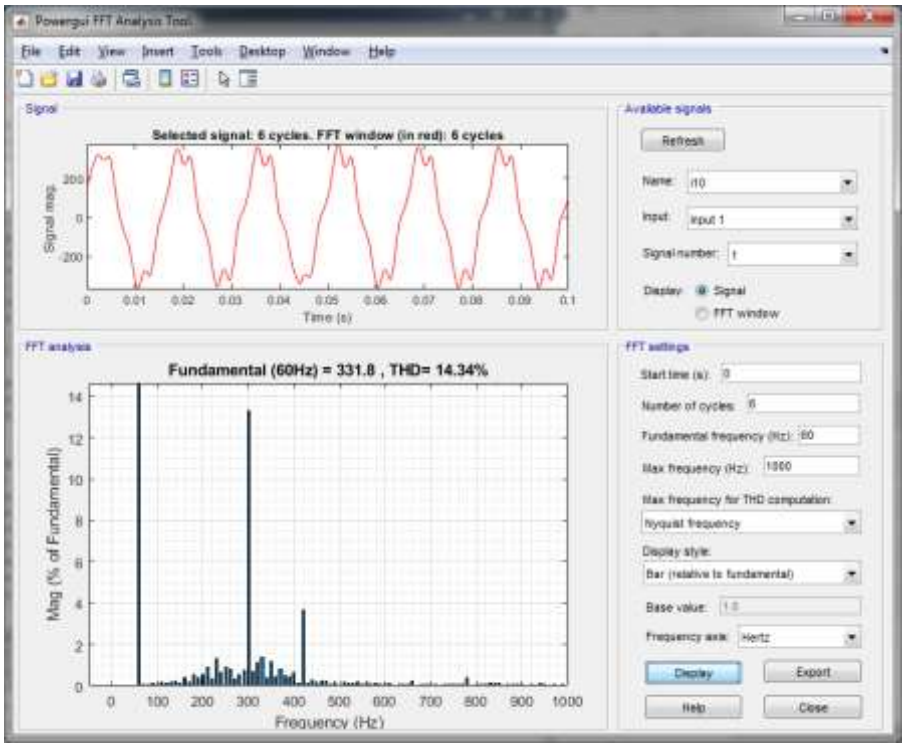
Entonces, accederemos a la aplicación **FFT Analysis** haciendo clic en el bloque **Powergui.**



Aquí seleccionaremos:

- nombre de la señal a analizar
- tiempo inicial
- numero de ciclos
- frecuencia fundamental
- frecuencia máxima que se tomara en cuenta en el análisis.

Una vez seleccionado estos valores, damos clic en Display y obtenemos los siguientes resultados

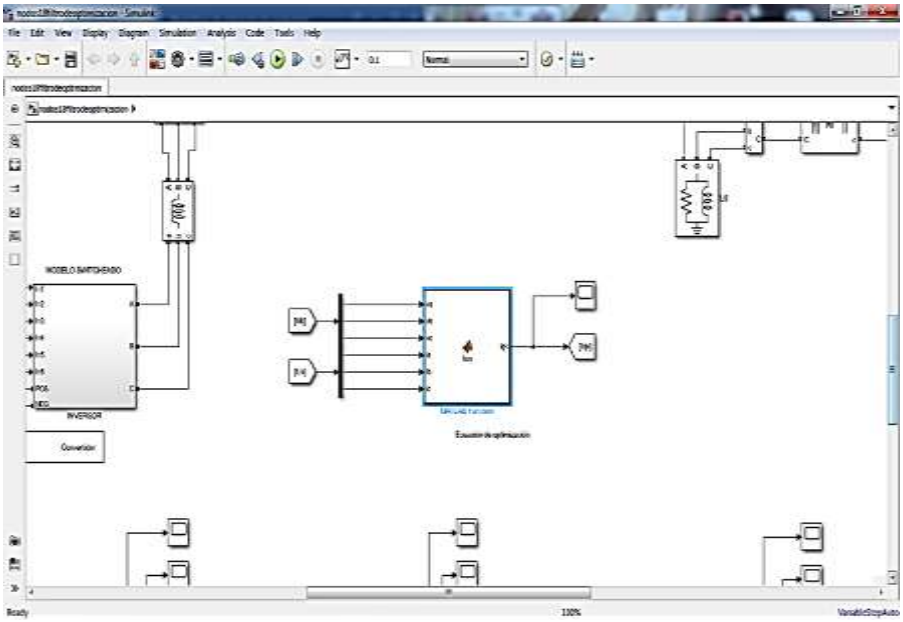


Aquí se aprecia el valor de los armónicos en la señal en porcentaje de la componente fundamental y el valor de la distorsión armónica total THD.

D. INGRESO DEL FTO A LA RED DE DISTRIBUCIÓN

1. Ecuación de control de la FTO

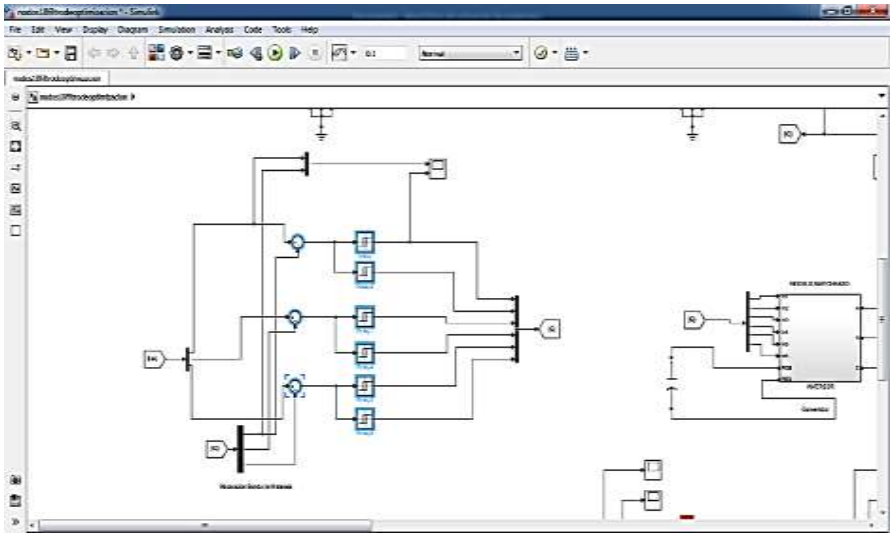
Para realizar la programación de nuestra ecuación obtenida de la reducción del filtro de optimización no lineal con sus respectivos condiciones y restricciones de la Karush-Kuhn-Tucker para el control del filtro activo de potencia procedemos a utilizar la herramienta **User-Defined Functions>>MATLAB System.**



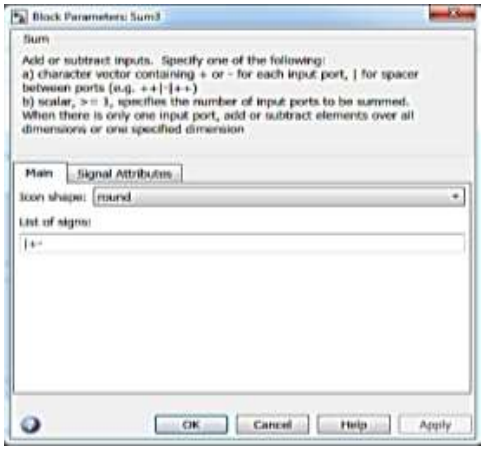
En esta función de Matlab nos permite programar la función que nosotros necesitamos para poder controlar al filtro activo de potencia

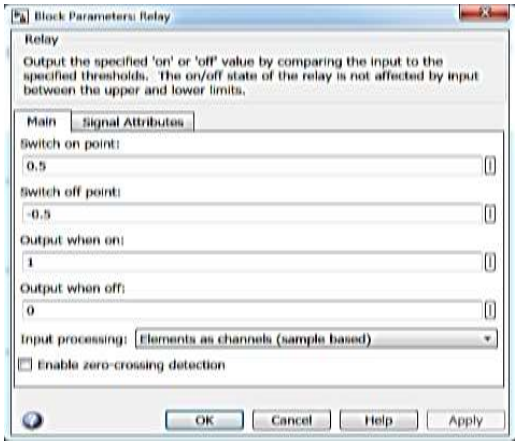
2. Modulación de banda de Histéresis

En el modelamiento de la banda de histéresis primero comenzamos eligiendo de la librería **Simulink>>Commonly Used Blocks>>Sum y Relay** para modelar las tres fases de control.



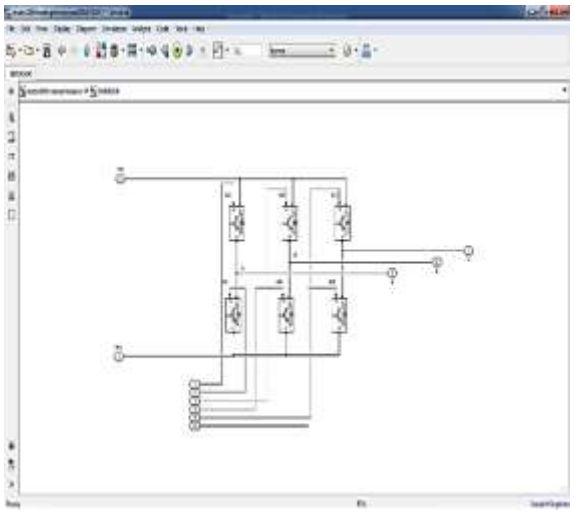
Entonces accedemos al elemento de que conformar la banda de histéresis para configurar los parámetros que comprenderán el sistema de control de la banda de histéresis.

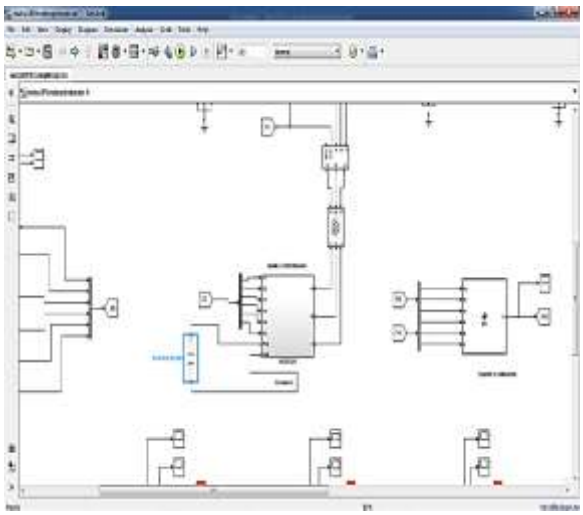




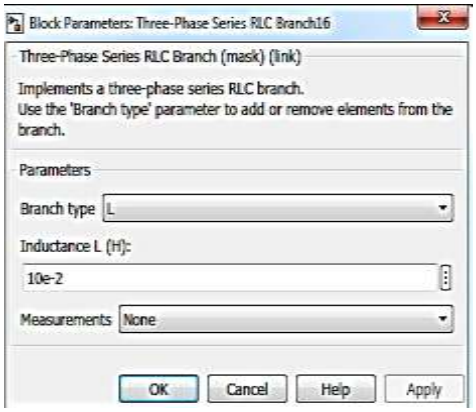
3. Filtro activo de potencia

Selecionamos de **Simscape>>Electrical >>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Power Electronics** los 6 IGBTs para modelar el inversor con que estará alimentado con un capacitor de 100e-6 y con esto estar ingresado a la red.





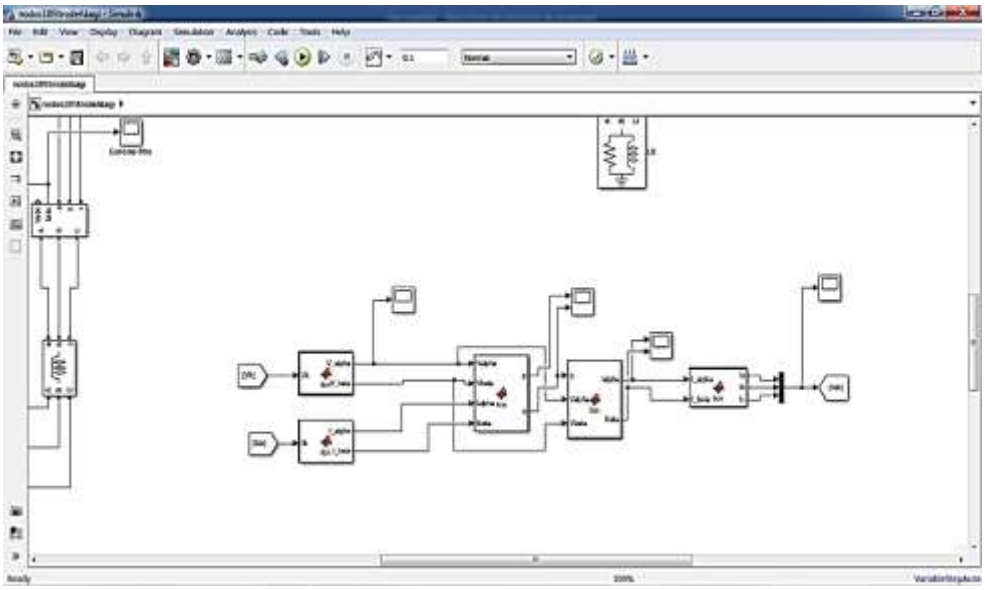
La red del filtro que se conectará al ingresar a la red de distribución de 18 nodos estará dimensionada de 10e-2 de los elementos de **Simulink (Three-Phase Series L Branch (mask)(link))**



E. INGRESO DEL FTA A LA RED DE DISTRIBUCIÓN

1. Ecuación de control de la FTA

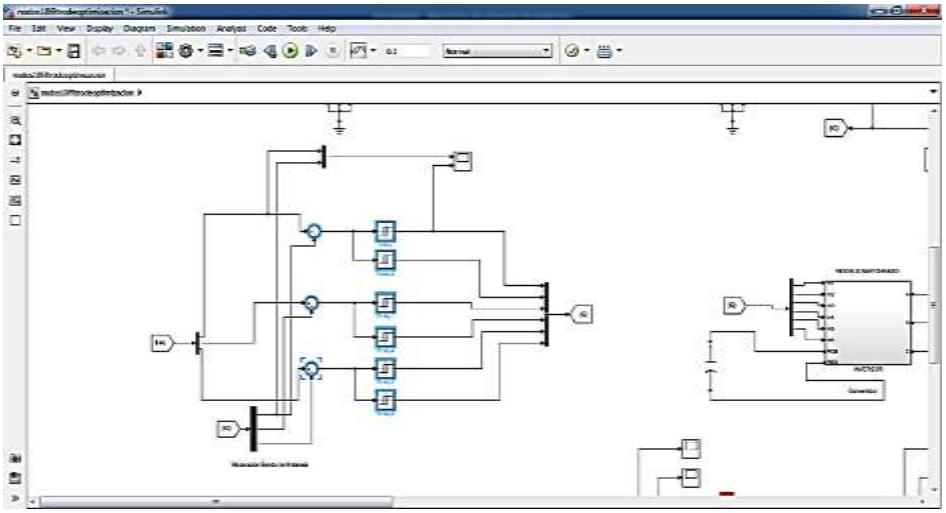
Para programar el estudio de la teoría de Akagi se comienza modelando las teorías básicas de las transformadas de Clark a Park tanto de voltaje como de corriente donde serán insertadas a programación donde se compensarán la potencia reactiva para el filtro y así poder controlar las ondas, primero se comienza modelado la teoría de Clark a Park en la herramienta **User-Defined Functions>>MATLAB System.**



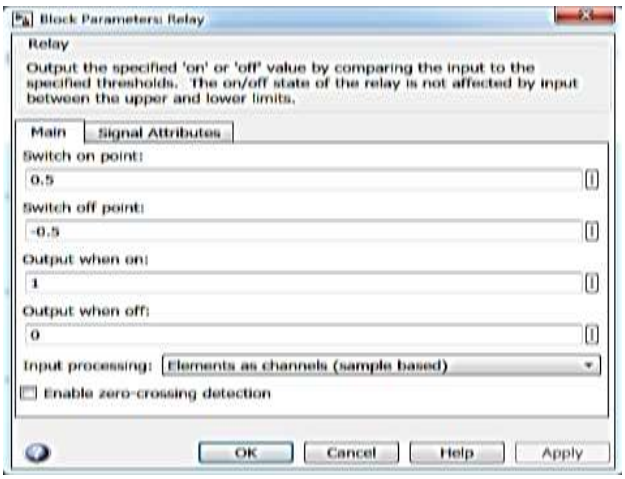
De esta manera se puede programas las funciones de control que nosotros necesitamos para poder control al filtro de acuerdo a nuestra teoría de estudio.

2. Modulación de banda de Histéresis

En el modelamiento de la banda de histéresis para FTA también tiene la misma secuencia que el FTO primero comenzamos eligiendo de la librería **Simulink>>Commonly Used Blocks>>Sum y Relay** para modelar las tres fases de control.

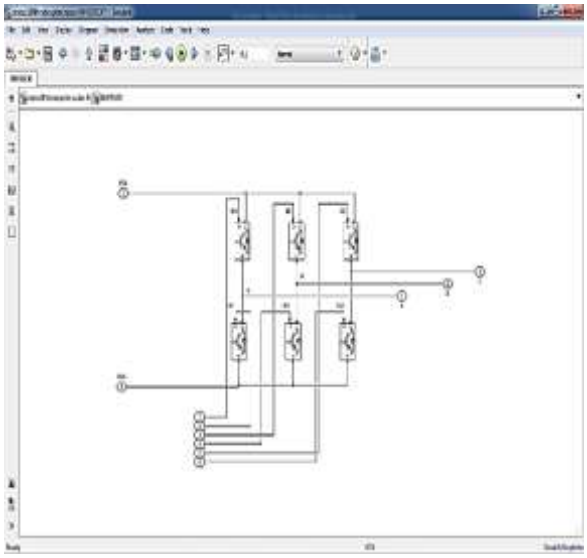


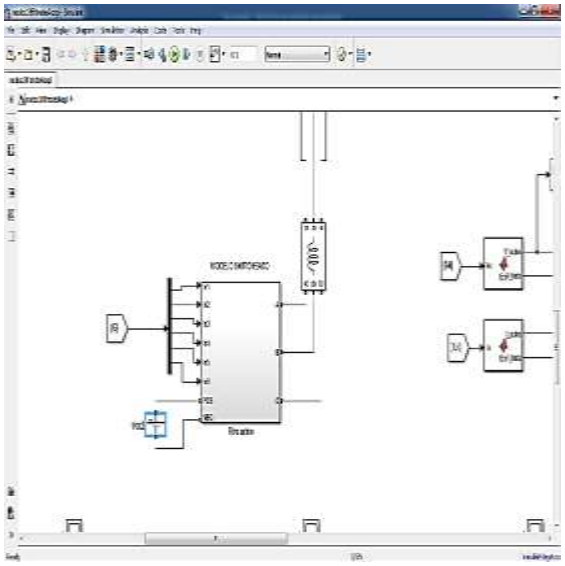
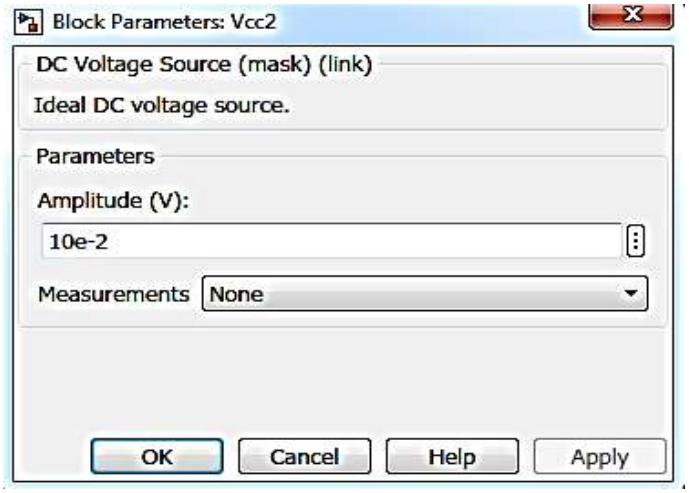
Entonces accedemos al elemento de que conformar la banda de histéresis para configurar los parámetros que comprenderán el sistema de control de la banda de histéresis.



3. Filtro activo de potencia

Selecionamos de **Simscape>>Electrical >>Specialized Power System>>Fundamental Blocks>>Power Electronics** los 6 IGBTs para modelar el inversor con que estará alimentado con un voltaje DC de 10e-2 y con esto se ingresará a la red.





La red del filtro que se conectará al ingresar a la red de distribución de 18 nodos estará dimensionada de 10e-2 de los elementos de **Simulink (Three-Phase Series L Branch (mask)(link))**