

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS
PRODUCIDOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA DE SEIS PULSOS

PAULO CESAR SARMIENTO CRESPO

HERNAN DAVID MANOTAS MATOS



UNIVERSIDAD DE LA COSTA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BARRANQUILLA

2018

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS
PRODUCIDOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA DE SEIS PULSOS

AUTORES: PAULO CESAR SARMIENTO CRESPO C.C 8649253
HERNAN DAVID MANOTAS MATOS C.C 1129539183

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Tutor del proyecto:

ING. JORGE IVAN SILVA ORTEGA Ms.C.

Cotutor:

ING. VLADIMIR SANTOS SOUSA PhD

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

BARRANQUILLA

2018



CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERIA
ACTA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

Por medio de la presente se da aprobación al Trabajo de Grado evaluado por los jurados: **MSc. ELIANA MARÍA NORIEGA ANGARITA** como PTC de ingeniería Eléctrica e **MSc. JOSÉ RICARDO NUÑEZ ALVAREZ** como PTC de Ingeniería Eléctrica, presentado por los estudiantes que se mencionan a continuación:

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO	ESTUDIANTE (S)	IDENTIFICACIÓN	ASESOR / CO-ASESOR
Evaluación de técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por variadores de frecuencia de seis pulsos	Paulo Cesar Sarmiento Crespo	C.C. 8649253	Jorge Silva Ortega
	Hernán David Manotas Matos	C.C. 1129539183	Vladimir Sousa Santos

APROBADO APLAZADO

NOTA: 4.5 MERITORIO LAUREADO

Se firma la presente en la ciudad de Barranquilla, a los 30 días del mes de octubre de 2018.

Eliana Noriega

Ing. ELIANA NORIEGA ANGARITA
 Directora Programa
 Ingeniería Eléctrica

Eliana Noriega

MSc. ELIANA MARÍA NORIEGA ANGARITA
 Jurado Evaluador 1

José Ricardo Nuñez Alvarez

MSc. JOSÉ RICARDO NUÑEZ ALVAREZ
 Jurado Evaluador 2

Agradecimientos

Mi primer agradecimiento es hacia Dios, quien con su bendición logré finalizar este ciclo profesional y también a toda mi familia por estar siempre presentes. Mi gratitud a todos los docentes y personal de la universidad de la costa, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo.

De igual manera mis agradecimientos a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, a toda la Facultad de Ingeniería Eléctrica, a todos los profesores en especial al Dr. Vladimir Santos Sousa y Jorge Silva, quienes con la enseñanza de sus conocimientos y experiencias lograron crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo durante todo este proceso, quien con su dirección permitió el desarrollo de este proyecto de grado.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a mis padres Juan Manotas y Enith Mattos quienes con su esfuerzo y cariño me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más. A mi compañero Paulo Sarmiento, que con su conocimiento y esfuerzo fue posible realizar este proyecto de grado y finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis compañeros de estudio, con su apoyo en toda esta experiencia universitaria. Por otra parte, mi compañero Paulo Sarmiento agradece a sus padres Encarnación Sarmiento y Efraín Sarmiento, a su esposa María Mercedes e hija María Paula por un logro más cumplido.

Resumen

Los problemas de calidad de la potencia suelen generar distorsión en las variables de tensión y corriente que alimentan un equipo y/o proceso. Dentro de los problemas de calidad de la potencia se destacan las distorsiones armónicas causadas típicamente por equipos de accionamiento y control de procesos, los cuales debido a su alto contenido de elementos de electrónica de potencia y cargas no lineales asociadas al proceso generan distorsiones, esto incluye las tecnologías de variadores de velocidad. La presencia de armónicos suele ocasionar calentamiento y aumento de pérdidas en los transformadores, motores, pérdidas de sincronismo del reloj en las tarjetas electrónicas, problemas por corrientes de fuga, corrientes de modo común, corriente reflejada, incremento en la resistividad de los conductores, aumento de la corriente Total RMS, entre otros. La presente investigación propone evaluar las técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por los variadores de frecuencia de seis pulsos utilizando la herramienta SIMULINK de MATLAB para la caracterización de las componentes armónicas generadas por variadores de frecuencia tanto de seis como de doce pulsos. Se consideran la revisión de técnicas para la reducción de los efectos armónicos considerando lo contemplado en IEEE std 519 de 2014 y los documentos normativos nacionales tales como la CREG 070 de 1998 y las normas técnicas colombianas NTC 5000, NTC 5001. Como caso de prueba se realizan simulaciones de variadores de frecuencia de seis pulsos y se analizan las técnicas para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia utilizando SIMULINK (MATLAB), logrando identificar la mejor opción técnica-económica para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia mediante el caso de estudio considerado.

Palabras clave: *variadores de frecuencia, armónicos, calidad de la potencia, distorsión armónica*

Abstract

Power quality problems usually generate distortion in voltage and current variables affecting equipment and/or process. Power quality problems include harmonic distortions commonly caused by drivers and process control equipment, which due to their high content of power electronics elements and non-linear loads associated to the process generate distortions, such as Variable speed drive technologies. The presence of harmonics tends to cause heating and increased losses in power transformers, motors, losses of clock synchronism in electronic cards, problems with leakage currents, presence of common mode currents, reflected current, increased resistivity of conductors, increased of total RMS current, among others. This research proposes to evaluate the techniques for reducing the effect of harmonics produced by six-pulse frequency converters using MATLAB's SIMULINK tool for the characterization of harmonic components generated by both six-pulse and twelve-pulse frequency converters. It is considered the revision of techniques for the reduction of harmonic effects considering what is contemplated in IEEE std 519 of 2014 and the national normative documents such as CREG 070 of 1998 and the Colombian technical standards NTC 5000, NTC 5001. As a test case, simulations of six pulse frequency variators are performed and the techniques for the reduction of the effects of harmonics generated by the frequency variators are analyzed using SIMULINK (MATLAB), identifying the best technical-economic option for the reduction of the effects of harmonics generated by the frequency variators through the case study considered.

Keywords: *frequency variators, harmonics, power quality, harmonic distortion.*

Abreviaturas

CA: Corriente alterna.

CPE: Calidad de la Potencia.

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas.

CC: Corriente continua.

IEEE, The Institute of Electrical and Electronics Engineers: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

BT: Baja tensión.

NTC: Norma técnica colombiana.

OR: Operador de red.

Plt: Severidad del flicker de larga duración.

Pst: Severidad del flicker de corta duración.

PCC: Punto de conexión común.

STN: Sistema de transmisión nacional.

STR: Sistema de transmisión regional.

SDL: Sistema de distribución local.

THD: Distorsión armónica total.

THD_v: Distorsión armónica total en tensión.

THD_i: Distorsión armónica total en corriente.

TDD: Distorsión total de demanda.

VFD: Variador de frecuencia.

UPS: Sistema de alimentación ininterrumpida.

Contenido

Introducción 16

1. Planteamiento del problema 18

2. Justificación 19

3. Objetivos 20

 3.1 OBJETIVO GENERAL. 20

 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 20

4. Alcance 21

Capítulo 1..... 22

5. Marco teórico 22

 5.1 LA INCIDENCIA DE LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA POTENCIA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO
 MEDIANTE EL USO DE VFD DE SEIS PULSOS. 22

 5.1.1 Distorsión armónica de la onda de tensión. 23

 5.1.2 Efectos de los armónicos. 23

 5.1.3 Evaluación de los armónicos. 25

 5.1.4 Armónicos de tensión (thv)..... 26

 5.1.5 Armónicos de corriente (thdi)..... 27

 5.1.5.1 Metodología de evaluación de armónicos..... 27

 5.2 ASPECTOS NORMATIVOS APLICADOS A ARMÓNICOS..... 28

 5.2.1 Estándar internacional ieee std 519 de 2014..... 29

 5.2.2 Regulación colombiana..... 29

 5.2.2.1 CREG 070 de 1998. 30

 5.2.2.2 NTC 5000 de 2002..... 31

5.2.2.3 NTC 1340 de 2004.....	31
5.2.2.4 CREG 024 de 2005.....	32
5.2.2.5 NTC 5001 de 2008.....	33
5.3 PROBLEMAS EN EQUIPOS CAUSADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA.....	34
5.3.1 Transformador.....	34
5.3.1.1 Transformador de potencia tridevanado.....	35
5.3.1.2 Autotransformador.....	35
5.3.2 Motores.....	35
5.3.2.1 Motor ca.....	36
5.3.2.2 Motor cc.....	37
5.3.3 Electrónica de potencia.....	37
5.3.3.1 Convertidores.....	38
5.3.3.2 Rectificador.....	40
5.3.3.3 Ups.....	41
5.3.3.4 Variador de frecuencia de 6 pulsos y 12 pulsos.....	44
5.3.3.5 Arrancador suave.....	47
5.3.4 Máquinas de soldadura.....	47
5.3.5 Luminarias de tecnología led.....	48
Capítulo 2.....	49
6. Materiales y métodos.....	49
6.1 MODELACIÓN DE VARIADOR DE VELOCIDAD.....	51
6.1.1 Variador de frecuencia de 6 pulsos.....	52
6.1.1.1 Rectificador.....	53

6.1.1.2 Bus cc.....	55
6.1.2 Inversor.....	55
6.1.3 Variador de frecuencia de 12 pulsos.....	55
6.2 FILTRO PASIVO (PASA BAJAS).....	56
6.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE CIRCUITOS USANDO SIMULINK.....	56
6.4 COMPARACIÓN DE RESULTADO DE SIMULACIÓN VS CASO DE ESTUDIO REAL.....	56
Capítulo 3.....	58
7. Análisis de resultados	58
7.1 MODELACIÓN DE VARIADOR DE VELOCIDAD.....	59
7.1.1 Bus cc.....	61
7.1.2 Inversor.....	61
7.2 VARIADOR DE VELOCIDAD DE 12 PULSOS.....	63
7.3 RECTIFICADOR.....	64
7.4 FILTRO PASIVO (PASA BAJAS).....	67
7.5 RESULTADO DE SIMULACIÓN.....	69
7.6 RESULTADO DE CASO DE ESTUDIO REAL.....	73
7.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN VS MEDICIÓN.....	75
7.8 RESPUESTA A SOLUCIONES.....	76
7.8.1 Cambio tecnología por variador de frecuencia de 12 pulsos.....	77
7.8.2 Instalación filtro pasivo.....	79
7.9 CUADRO COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO.....	81
8. Conclusiones	83
9. Referencias.....	84

Lista de tablas y figuras

Tablas

TABLA 1. VALORES DE REFERENCIA DE THDV. 26

TABLA 2. FRECUENCIA ACEPTABLE. 32

TABLA 3. LÍMITES MÁXIMOS DE DISTORSIÓN TOTAL DE TENSIÓN..... 32

TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE PERTURBACIONES DE CALIDAD DE POTENCIA SEGÚN SU DURACIÓN. 33

TABLA 5. LÍMITES DE DISTORSIÓN. 33

TABLA 6. DATOS MOTOR 150 HP CONECTADO EN VFD..... 69

TABLA 7. DATOS MOTOR 150 HP CONECTADO EN ARRANCADOR SUAVE..... 69

TABLA 8. RESULTADO ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE TENSIÓN Y THDV..... 70

TABLA 9. RESULTADO DE ARMÓNICOS INDIVIDUALES DE CORRIENTE Y THDI..... 71

TABLA 10. RESULTADO DE ERROR EN ARMÓNICOS DE CORRIENTE..... 77

TABLA 11. CUADRO COMPARATIVO DE PRECIOS DE TECNOLOGÍAS. 83

Figuras

FIGURA 1. FORMA DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE UNA CARGA LINEAL Y CARGA NO LINEAL DE UN INVERSOR. 22

FIGURA 2. REGULACIÓN COLOMBIANA DE CALIDAD DE LA POTENCIA (ROJAS, 2014)..... 30

FIGURA 3. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (JÜRGEN STUMPP, 2011)..... 37

FIGURA 4. TOPOLOGÍA DE UNA APLICACIÓN DE FUENTE ÚNICA. 38

FIGURA 5. CONVERTIDOR DE POTENCIA. 39

FIGURA 6. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN INVERSOR EN PUENTE MONOFÁSICO..... 39

FIGURA 7. CLASIFICACIONES DE CIRCUITOS RECTIFICADORES..... 40

FIGURA 8. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA UPS FUERA DE LÍNEA. 42

FIGURA 9. DIAGRAMA DE BLOQUE DE UPS INTERACTIVO EN LÍNEA. 43

FIGURA 10. DIAGRAMA DE BLOQUE DE UPS EN LÍNEA. 43

FIGURA 11. RECTIFICADOR DE PUENTE DE DIODO DE SEIS PULSOS..... 45

FIGURA 12. RECTIFICADOR SCR. 45

FIGURA 13. RECTIFICADOR ACTIVO FRONTAL. 46

FIGURA 14. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL FACTOR DE POTENCIA. 47

FIGURA 15. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL BALASTRO LED..... 49

FIGURA 16. ORGANIGRAMA DE METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y ANÁLISIS. 51

FIGURA 17. MODELO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE SIMULINK. AC-DC-AC CONVERTER. 52

FIGURA 18. MODELO DE DISPARO DE 6 PULSOS PARA FUNCIONAMIENTO DEL PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO. 52

FIGURA 19. ESTRUCTURA DEL VARIADOR SIMULADO DE 6 PULSOS. 53

FIGURA 20. TREN DE PULSOS PARA ACTIVACIÓN DE TIRISTORES. 54

FIGURA 21. PARÁMETROS DE ENTRADA DEL BLOQUE DE GENERACIÓN DE PULSOS (6 PULSOS)..... 54

FIGURA 22. PARÁMETROS DEL BLOQUE DE PUENTE UNIVERSAL. 55

FIGURA 23. DIAGRAMA UNIFILAR DE ESTACIÓN DE SERVICIOS..... 57

FIGURA 24. DIAGRAMA UNIFILAR DE ESTACIÓN DE SERVICIO EN SIMULINK..... 58

FIGURA 25. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MEDICIÓN Y SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE TENSIÓN. 59

FIGURA 26. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MEDICIÓN Y SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE CORRIENTE. 59

FIGURA 27. MODELO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE SIMULINK. AC-DC-AC CONVERTER. 60

FIGURA 28. MODELO DE DISPARO DE 6 PULSOS PARA FUNCIONAMIENTO DEL PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO. 60

FIGURA 29. PARÁMETROS CAPACITANCIA E INDUCTANCIA DEL BUS CC..... 61

FIGURA 30. PARÁMETROS DEL BLOQUE DE GENERACIÓN PWM..... 62

FIGURA 31. FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ESPECTRO DE FRECUENCIA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, VFD 6 PULSOS..... 62

FIGURA 32. ESTRUCTURA DEL VARIADOR SIMULADO DE 12 PULSOS. 63

FIGURA 33. TRANSFORMADOR TRIDEVANADO. CONFIGURACIÓN D-Y-D..... 64

FIGURA 34. GENERADOR DE PULSOS A Y B, PARA ACTIVACIÓN DE TIRISTORES..... 65

FIGURA 35. TREN DE PULSOS PARA ACTIVACIÓN DE TIRISTORES PARA R1 Y R2 RESPECTIVAMENTE. 65

FIGURA 36. FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ESPECTRO DE FRECUENCIA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ENTRADA RECTIFICADOR 1..... 66

FIGURA 37. FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ESPECTRO DE FRECUENCIA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ENTRADA RECTIFICADOR 2..... 66

FIGURA 38. FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, ESPECTRO DE FRECUENCIA DE TENSIÓN Y CORRIENTE, VFD 12 PULSOS..... 67

FIGURA 39. FILTRO PASIVO. 68

FIGURA 40. ESPECTRO DE FRECUENCIA DE CORRIENTE (IZQ. AGUAS ARRIBA DEL FILTRO; DER. ENTRADA DEL VFD)..... 68

FIGURA 41. DIAGRAMA UNIFILAR DE ESTACIÓN DE SERVICIOS EN SIMULINK. 70

FIGURA 42. GRÁFICA DE FORMA DE ONDA Y ESPECTRO DE ARMÓNICOS DE TENSIÓN. SIMULACIÓN DIAGRAMA UNIFILAR..... 72

FIGURA 43. GRÁFICA DE FORMA DE ONDA Y ESPECTRO DE ARMÓNICOS EN CORRIENTE. SIMULACIÓN
 DIAGRAMA UNIFILAR..... 72

FIGURA 44. FORMA DE ONDA DE TENSIÓN..... 73

FIGURA 45. ESPECTRO DE ARMÓNICOS EN TENSIÓN. 73

FIGURA 46. FORMA DE ONDA DE CORRIENTE..... 74

FIGURA 47. ESPECTRO DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE 74

FIGURA 48. DIAGRAMA UNIFILAR DE ESTACIÓN DE SERVICIO CON VFD 12 PULSOS..... 77

FIGURA 49. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE
 TENSIÓN, SOLUCIÓN VFD 12 PULSOS. 78

FIGURA 50. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE
 TENSIÓN, SOLUCIÓN VFD 12 PULSOS. 78

FIGURA 51. DIAGRAMA UNIFILAR DE ESTACIÓN DE SERVICIO CON FILTRO PASIVO..... 79

FIGURA 52. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE
 TENSIÓN, CON FILTRO PASIVO. 80

FIGURA 53. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE
 CORRIENTE, CON FILTRO PASIVO. 80

FIGURA 54. ESPECTRO DE FRECUENCIA DE CORRIENTE EN LA ENTRADA DEL VFD DE 6 PULSOS. ... 81

Introducción

La evolución de la electrónica de potencia, las necesidades de automatizar procesos en la industria y la necesidad de ahorrar energía para garantizar procesos eficientes son una tendencia actual en la industria. No obstante, esta automatización implica la inclusión en los sistemas eléctricos de dispositivos que operan con electrónica de potencia, los cuales causan distorsión y deterioro de las variables eléctricas de un sistema afectando tanto los equipos como a sistemas eléctricos aledaños a la instalación.

En adición, debido a la problemática del calentamiento global y en ámbito económico, se ha presentado como solución para el uso racional de la energía los variadores de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés: *Variable Frequency Drive*), siendo el uso más común los variadores de frecuencia de seis pulsos, como solución para arranque y control de motores de grande y mediano consumo de potencia, además en los centros empresariales y otros sectores para el control de flujo de agua, ascensores, escaleras eléctricas, entre otros.

Los armónicos logran ocasionar pérdidas por calentamiento entre las bobinas y disminución en la vida útil en los transformadores, motores, pérdidas de sincronismo del reloj en las tarjetas electrónicas, problemas por corrientes de fuga, corrientes de modo común, corriente reflejada, incremento en la resistividad de los conductores, aumento de la corriente total RMS, entre otros.

Este proyecto propone evaluar las técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por los variadores de frecuencia de seis pulsos utilizando la herramienta SIMULINK de MATLAB para la caracterización de las componentes armónicas generadas por variadores de frecuencia tanto de seis como de doce pulsos.

En el capítulo 1 contiene aspectos para la estructuración del trabajo de grado presentando el planteamiento del problema, justificación, alcances y objetivos. De manera seguida se presenta el marco teórico donde se presenta la fundamentación de los efectos armónicos producidos por los

variadores de frecuencia. En el capítulo 2 se describe la metodología considerada donde se presentan las técnicas, consideraciones y herramientas utilizadas para la elaboración de la investigación. Por último, el capítulo 3 arroja los resultados de investigación que permiten modelar el caso de simulación de filtro armónico, la reducción de los armónicos 5, 7, 11 y 13 en el sistema eléctrico considerado.

1. Planteamiento del problema

Con la constante evolución de la electrónica de potencia y la necesidad de implementar soluciones de ahorro energético (Díaz-perez, Gomez charris, Silva-ortega, & Noriega-angarita, 2017), debido a la problemática del calentamiento global y en ámbito económico, se ha presentado como solución para el uso racional de la energía los variadores de frecuencia, siendo el uso más común los variadores de frecuencia de seis pulsos, como solución para arranque y control de motores de grande y mediano consumo de potencia, además en los centros empresariales y otros sectores para el control de flujo de agua, ascensores, escaleras eléctricas, entre otros (Hoyos Velasco, Candelo, & Silva Ortega, 2018; Quispe, López, Ferreira, & Sousa, 2018).

El uso de esta tecnología se ha incrementado con la automatización en los procesos industriales y la electrónica de potencia centrado en el mejoramiento continuo de la producción y procedimientos de calidad en las líneas de manufactura (Silva, Ospino, & Balbis, 2013), pensando únicamente en el ahorro energético generado por la implementación de VFD, sin tener presente en la mayoría de los casos los problemas de calidad de potencia causados por esta tecnología, como lo es la distorsión armónica en las ondas de tensión y corriente (Vladimir Sousa, Herrera, Quispe, Viego, & Gómez, 2017).

Estos efectos no se tienen presentes en el momento del diseño de sistemas de eficiencia energética. Por lo que esta nueva temática crea inquietudes para comenzar a disminuir la incertidumbre por fallas en el sistema eléctrico de cada sector, partiendo de esta crítica, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo identificar la mejor opción para la reducción del efecto de los armónicos producidos por los VFD de seis pulsos evaluando diferentes técnicas?

2. Justificación

Este estudio tiene como objetivo la reducción de los efectos de los armónicos de tensión y corriente por medio de simulaciones en el software de MATLAB (Simulink) los efectos que producen los VFD de seis pulsos en los sistemas eléctricos, simulando el circuito aplicando filtros pasivos, reactancias o cambio de tecnología con VFD de doce pulsos, seleccionando la mejor opción técnico-económica la evaluación del estado de la calidad de potencia en la instalación. Se basó en la normativa colombiana NTC 5001 y el estandar internacional IEEE Std 519 de 2014 (IEEE Std 519, 2014).

Mediante el uso de los estándares de verificación para el estado de la calidad de potencia, la simulación cumpliría con los requisitos mínimos para el análisis y propuesta de solución. Por lo que se presenta los bloques realizados en Simulink, a partir de la introducción de datos de los equipos, protecciones, conductores, entre otras variables necesarias en el área de estudio. Mediante esta simulación se tendrá garantía del estado y posibles efectos por los armónicos producidos por los VFD del sistema.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General.

Evaluar las técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por los variadores de frecuencia de seis pulsos y la solución técnico-económica en el caso de estudio.

3.2 Objetivos Específicos.

Caracterizar los armónicos generados por los variadores de frecuencia de seis pulsos y sus efectos.

Analizar las técnicas principales para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia.

Desarrollar modelos de simulación de los variadores de frecuencia de seis pulsos y de las técnicas para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia.

Identificar la mejor opción técnico-económica para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia mediante un caso de estudio, empleando los modelos de simulación.

4. Alcance

En el siguiente trabajo de grado se analizará las técnicas principales para la reducción de los efectos de los armónicos generados por variadores de frecuencia, se desarrollará un modelo de simulación de los variadores de frecuencia de seis pulsos. Por último, se identificará la mejor opción técnica-económica para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia mediante un caso de estudio, empleando un modelo de simulación.

Capítulo 1.

5. Marco teórico

5.1 La incidencia de los problemas de calidad de la potencia en el sistema eléctrico mediante el uso de VFD de seis pulsos.

En la actualidad se utiliza en las instalaciones eléctricas VFD para el arranque de motores y para el control de velocidad de estos, de acuerdo con la necesidad en el proceso de producción o en la instalación. Sin tener en cuenta las afecciones en calidad de potencia generado por el uso de los VFD de seis pulsos.

Según (Mora, 2010), en los últimos años se ha incrementado la preocupación por optimizar el uso de la energía eléctrica, tanto en la parte de producción como en los usuarios finales. Los avances de la electrónica de potencia han permitido aumentar la eficiencia de las máquinas eléctricas rotativas, constituidos por cargas no lineales como se muestra en la **Figura 1. Forma de onda de tensión y corriente de una carga lineal y carga no lineal de un inversor.**, los cuales deterioran la calidad de la energía dentro de las instalaciones eléctricas.

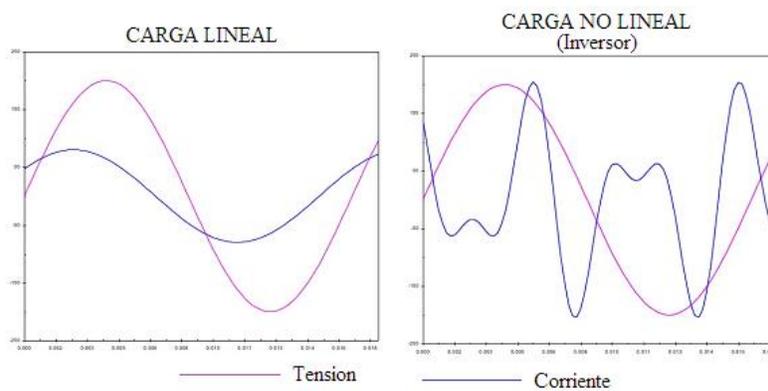


Figura 1. Forma de onda de tensión y corriente de una carga lineal y carga no lineal de un inversor. Fuente: Elaboración propia

Los equipos basados en la electrónica de potencia, son fuentes emisoras de distorsión armónica en la red (60Hz), bajo ciertas condiciones deterioran la magnitud, la forma de onda, la amplitud, la simetría del voltaje, se denomina cargas no lineales (Mario Salvador, 2006).

Según (Santos, 2012) los armónicos constituyen tensiones o corrientes sinusoidales, cuyas frecuencias son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental para la cual el sistema de suministro eléctrico está diseñado para trabajar (IEEE Std 519, 2014). Esta perturbación da como resultado la distorsión de la forma de onda, provocado por dispositivos con cargas no lineales, conectados al sistema eléctrico. Entre estas cargas no lineales se encuentran los convertidores estáticos de potencia, los dispositivos de descargas en forma de arcos eléctricos, los dispositivos magnéticos saturados y en menor medida, las máquinas rotatorias (IEEE Std 519, 2014).

5.1.1 Distorsión armónica de la onda de tensión.

Es la distorsión periódica de las ondas de tensión, modelable como el contenido adicional de ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia de suministro, acompañando la componente fundamental (Componente cuya frecuencia es igual a la de suministro). Este fenómeno es el resultado de cargas no lineales en el STN, STR y/o SDL. Tanto los transportadores del Sistema de Transmisión Nacional (STN), como los operadores de Red (OR), deberán cumplir las exigencias establecidas en la tabla 2, basada en el Estándar IEEE 519 de 2014 (CREG 024, 2005).

5.1.2 Efectos de los armónicos.

El grado de tolerancia de los armónicos está determinado por la susceptibilidad de las cargas a estos. Los equipos eléctricos menos afectados por la presencia de armónicos son aquellos cuya función fundamental es generar calor, como es el caso de los hornos, mientras que los elementos más afectados, son aquellos diseñados para trabajar con ondas de tensiones y corrientes

perfectamente sinusoidales. Entre este tipo de equipos se encuentran los de comunicación o los procesadores de datos (IEEE Std 519, 2014).

Es importante destacar, que aun en los casos donde las cargas son menos susceptibles a la presencia de armónicos, estos son dañinos, por ejemplo, en los hornos eléctricos, los armónicos producen sobrecalentamiento en los dieléctricos o estrés por tensión en los aislamientos, disminuyendo el ciclo de vida útil (IEEE Std 519, 2014).

Los principales componentes de un sistema de potencia son afectados en mayor o menor medida por la presencia de armónicos. En los transformadores, incremento de las pérdidas en el núcleo (corrientes circulantes en el hierro), incremento de las pérdidas en el cobre (efecto proximidad, efecto skin y efecto Joule), incremento en la temperatura, deterioro en el aislamiento (en especial si la variación de la tensión en el tiempo es muy rápida dV/dt), aumento de la corriente RMS, aumento en el ruido debido a la vibración del hierro laminado del núcleo, además los armónicos de Eddy provocan un incremento en las pérdidas de cobre y en las pérdidas por flujo de dispersión, mientras que los armónicos de tensión producen un incremento en las pérdidas de núcleo (Foucault) que generan cambios en la gráfica de histéresis del transformador (Estrada, 2017).

En los alimentadores del sistema de potencia, el flujo de corrientes no sinusoidales, puede provocar calentamiento y la disminución en la capacidad de conducción del 65% a un 40% del área de conducción del material, también los produce el efecto Joule el cual produce el aumento de la resistividad (redistribución no uniforme de la densidad de corriente sobre el área transversal del conductor, Efecto Skin, Efecto Proximidad). Estos fenómenos dependen del diámetro del conductor, la frecuencia de la corriente circulante, la resistividad del conductor, la permeabilidad magnética y el aumento de la corriente total RMS; Debido al aporte que hace cada componente armónica sobre la corriente total (Estrada, 2017).

En los capacitores, el efecto de los armónicos radica en la posibilidad que se genere el efecto de resonancia, el cual produce calentamiento dañando los bancos de capacitores (Estrada, 2017).

Los equipos electrónicos son susceptibles a la mala operación causada por la distorsión armónica. Estos equipos frecuentemente son dependientes de la exactitud en el cruce por cero de la tensión. La distorsión armónica produce el corrimiento del cruce por cero de la tensión o del punto en que una fase de la tensión comienza a ser mayor que otra fase. Estos dos puntos son críticos para muchos tipos de circuitos electrónicos de control y su desplazamiento produce una mala operación (IEEE Std 519, 2014), produciendo cambios en el reloj del dispositivo.

En los motores, los principales efectos de las corrientes y tensiones armónicas están en el aumento del calentamiento y de las pérdidas, así como el incremento del ruido y las vibraciones. Los efectos son susceptibles a daño debido a fuertes valores de dV/dt (Tasa de cambio de la Tensión), armónicos de Secuencia Positiva (aumento del torque de salida), armónicos de secuencia negativa en donde frenará el motor produciendo calentamiento (torques pulsantes, frenado y vibración). Armónicos de secuencia cero (disipan su energía en forma de calor en el motor). Esto trae consigo la disminución de la eficiencia del motor y su vida útil (Estrada, 2017).

5.1.3 Evaluación de los armónicos.

El efecto de los armónicos de tensión en un sistema de potencia se puede evaluar a partir de la determinación de la distorsión armónica total (THD), según la ecuación siguiente:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} V_k^2}}{V_{fund}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Dónde:

k : Orden del armónico; THD : Distorsión armónica total (%); V_k : Tensión del armónico de orden superior k (V); V_{fund} : Tensión de la componente fundamental (V).

Otra forma de evaluar el contenido de armónicos en un sistema, es mediante el factor de distorsión de tensión (FDT) determinado por la ecuación siguiente (Cummings, 1986).

$$FDT = \frac{V_k}{V_{fund}} \cdot 100$$

Dónde:

FDT: Factor de distorsión individual de tensión (%).

5.1.4 Armónicos de tensión (THv).

Según (NTC 5001, 2008), los armónicos de tensión son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz). Los armónicos de tensión no deben sobrepasar los siguientes valores de referencia.

Tabla 1.

Valores de referencia de THDv.

Rango de Tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica total THDv (%)
1 KV < Vn ≤ 69 KV	3,0	5,0
69 KV < Vn ≤ 161 KV	1,5	2,5
Vn ≥ 161 KV	1,0	1,5

Fuente: Elaboración propia

Según (Santos, 2012), el término Distorsión Armónica Total (THD, siglas en inglés), es usado para definir los efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos. Este puede ser definido como THD de tensión o THD_i de corriente y se expresa matemáticamente como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2}}{V_1} * 100 \quad [\%]$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} * 100 \quad [\%]$$

Donde.

V_n: Tensión para el armónico n [V].

V₁: Tensión del primer armónico [V].

I_n : Corriente para el armónico n [A].

I_1 : Corriente del primer armónico [A].

5.1.5 Armónicos de corriente (THDi).

Según (NTC 5001, 2008), las cargas no lineales conectadas al sistema de suministro eléctrico producen corrientes armónicas que se propagan al sistema de potencia y causan distorsiones armónicas de tensión que afectan a otros usuarios.

5.1.5.1 Metodología de evaluación de armónicos.

El periodo de evaluación será de una (1) semana. En condiciones normales de operación, los percentiles que se calculan a continuación para la distorsión individual de corriente (Dh) y la distorsión total de demanda (TDD), para cada fase, no deben sobrepasar los valores de referencia. La distorsión individual de corriente (Dh) y la distorsión total de demanda (TDD) (NTC 5001, 2008), son calculadas de la siguiente forma:

Distorsión armónica individual de corriente (Dh):

$$Dh = \frac{Ih}{I1} \times 100\%$$

La distorsión total de demanda TDD se define como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2 h}}{IL} \times 100\%$$

En donde:

Ih = Magnitud de la corriente armónica individual (amperios rms).

h = orden del armónico (a menos que aplique una condición específica, h será como mínimo igual a 40).

IL = Corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms).

La distorsión armónica total de corriente THDi se define como:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2 h}}{I_1} \times 100\%$$

$$TDD = THDi \frac{I_1}{IL}$$

En donde

Ih = Magnitud de la corriente armónica individual (amperios rms).

h = Orden del armónico (a menos que aplique una condición específica, h será como mínimo igual a 40).

I_1 = Magnitud de la componente de fundamental (corriente rms).

IL = Corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental - amperios rms).

5.2 Aspectos normativos aplicados a armónicos.

Los problemas armónicos son abordados en el estándar IEEE std 519 de 2014 como referente para analizar las tensiones y corrientes armónicas generadas en equipos, procesos y sistemas eléctricos. En Colombia se establece un marco regulatorio compuesto por distintos entes, los más relevantes son el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). ICONTEC es una organización sin ánimo de lucro que se encarga de la normalización en el país para el desarrollo sostenible de las organizaciones, por lo que presta servicios de educación en metrología, entre otros. Están las Normas Técnicas Colombianas (NTC), específicamente las referentes a la calidad de potencia: NTC 5000 de 2002 y NTC 5001 de 2008. La CREG es una entidad creada por el gobierno nacional la cual tiene como objetivo principal garantizar la calidad, la cobertura del suministro y expansión de los servicios de energía eléctrica, gas natural y gas licuado en el país (Rojas, 2014).

5.2.1 Estándar internacional IEEE std 519 de 2014.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada durante la investigación se identifica gran aporte normativo sobre calidad de la potencia en el standard std 519 de 2014, donde se establecen las prácticas recomendadas y requisitos para el control armónico en sistemas eléctricos de potencia, se utiliza como guía en el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales, establece unos límites para el funcionamiento en estado estable de los sistemas eléctricos de potencia y para el sistema de abastecimiento de la energía, principalmente límites de distorsión total e individual de tensión y de corriente. En los equipos como los convertidores estáticos de potencia eléctrica son las cargas no lineales más grandes y se utilizan en la industria para diversos fines, como sistema de alimentación ininterrumpida, variador de velocidad, arrancadores suaves entre otros. Estos dispositivos son útiles porque pueden convertir AC A DC, DC A DC, DC A AC y AC A AC (IEEE Std 519, 2014).

5.2.2 Regulación Colombiana.

Resume los rangos de evaluación en Colombia con respecto a la calidad de la potencia como lo muestra la Figura 2, cada una establece parámetros técnicos y regulaciones que deben cumplir todos los sistemas eléctricos en Colombia desde la generación hasta el usuario final.

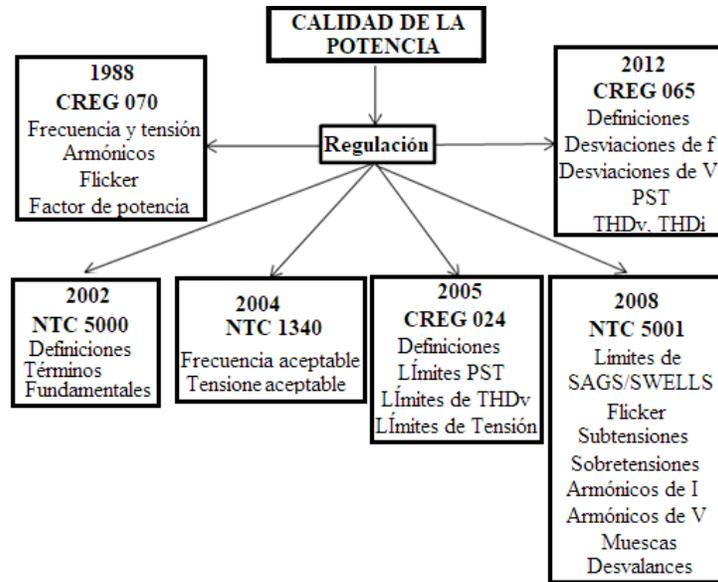


Figura 2. Regulación colombiana de calidad de la potencia (Rojas, 2014).
Fuente: Elaboración propia

5.2.2.1 CREG 070 de 1998.

Según (CREG 070, 1998), la frecuencia nominal del SIN es 60 Hz y su rango de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones normales de operación. El OR y los Usuarios deben tener en cuenta que en estados de emergencia, fallas, déficit energético y períodos de restablecimiento, la frecuencia puede oscilar entre 57.5 y 63.0 Hz por un período de tiempo de quince (15) Segundos, en concordancia con lo establecido en los numerales 2.2.5 y 5.1 del Código de Operación incluido en el Código de Redes (Resolución CREG 025 de 1995). Las tensiones en estado estacionario a 60 Hz y sus variaciones permisibles, son las establecidas en la norma NTC 1340 de 2004, o aquella que la modifique o sustituya.

La resolución 070 de 1998 hace referencia en el tema calidad de la potencia en el siguiente caso:

- **El Contenido de Armónicos de las Ondas de Tensión y Corriente.** Son el contenido de ondas con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia normal de suministro (60 Hz) y son el resultado de cargas no lineales en el STR y /o SDL. Tanto el OR como los usuarios

conectados a su red deberán cumplir con la norma IEEE STD 519 de 2014 o la que la modifique o sustituya.

- **Distorsión armónica** Para limitar los efectos de las distorsiones en la forma de las ondas de tensión y de corriente de los STR's y /o SDL's, el contenido de armónicos de los equipos de los usuarios conectadas en los niveles de tensión menor a 1 kV, mayor o igual a 1kV menor a 30kV, mayor o igual a 30kV y menor a 57,5 kV, mayor o igual a 57.5 kV y menor a 220 kV, deberán cumplir con lo establecido en la Norma IEEE std 519 de 1992 o aquella que la modifique o sustituya. Las normas técnicas nacionales o en su defecto las internacionales que regulan esta materia, primarán sobre las normas internas de las empresas y serán de obligatorio cumplimiento como norma mínima.

5.2.2.2 NTC 5000 de 2002.

La calidad de la potencia eléctrica es afectada por diferentes fenómenos electromagnéticos que ocurren en las redes eléctricas. Estas perturbaciones en su mayoría son causadas por fallas, descargas atmosféricas, cargas no lineales, maniobras y operaciones en el sistema, entre otras. Según la (NTC 5000, 2002) estos fenómenos se clasifican en: Armónicos, Flicker, Sags, Swells, Interrupciones de tensión, Notching.

- **Variaciones de frecuencia.** Estos fenómenos electromagnéticos ocasionan daños o funcionamientos incorrectos de los elementos conectados al sistema eléctrico, que se ven reflejados en daños en los productos de un proceso, salidas del servicio de energía y/o reinicias de los procesos automatizados (Ángel, 2005).

5.2.2.3 NTC 1340 de 2004.

Esta norma aborda mínimos conceptos de calidad de potencia, sus temáticas centrales son las tensiones y frecuencias nominales en sistema de energía eléctrica en redes de servicio público

(NTC 1340, 2013). La frecuencia nominal de la tensión suministrada debe ser 60 Hz. En condiciones normales de suministro, el valor medio de la frecuencia fundamental medida durante 10 s en redes de distribución debe estar de acuerdo con lo establecido en la tabla 2. El intervalo de medida debe ser mínimo de una semana. Los valores de frecuencia tomados cada 10 min se agruparán para el intervalo de medida, de tal forma que el 95 % y el 100 % de todos los datos registrados, se encuentre dentro de los rangos permisibles de la Tabla 2, respectivamente (NTC 1340, 2013).

Tabla 2.

Frecuencia aceptable.

Tipo de red	Frecuencia aceptable durante el 95 % de una semana	Frecuencia aceptable durante el 100 % de una semana
Redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado.	Desde 59,8 Hz hasta 60,2 Hz	Desde 57,5 Hz hasta 63 Hz
Redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado (redes de distribución en regiones no interconectada e islas)	Desde 58,8 Hz hasta 61,2 Hz	Desde 51 Hz hasta 69 Hz

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.4 CREG 024 de 2005.

La CREG 024 de 2005 hace énfasis a los siguientes fenómenos calificadores, lo cual miden la Calidad de la Potencia (CPE) suministrada por un operador de red (OR):

Tabla 3.

Límites máximos de Distorsión Total de tensión.

Tensión del Sistema	THDv Máximo (%)
Niveles de tensión 1, 2 y 3	5.0
Nivel de Tensión 4	2.5
STN	1.5

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los niveles de tensión corresponden a los definidos por la Resolución CREG 082 de 2002 o aquellas que la modifiquen, sustituyan o complementen (CREG, 2005, Resolución CREG-024, 9. P 10).

5.2.2.5 NTC 5001 de 2008.

En La Tabla 4, se resumen los tipos de perturbaciones que afectan la calidad de la potencia eléctrica, de acuerdo con la duración de los fenómenos y en la Tabla 6, los límites de distorsión (NTC 5001, 2008).

Tabla 4.

Clasificación de perturbaciones de calidad de potencia según su duración.

Perturbaciones	Tipo
Larga duración o permanentes	Armónicos de tensión Armónicos de corriente
Lentas	Sags Swells
Rápidas	Variaciones de frecuencia Sobretensiones transitorias

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.

Límites de distorsión.

Límites de distorsión			
	Aplicaciones especiales *	Sistema general	Sistema dedicado †
Profundidad de la muesca	10%	20%	50%
THD (Tensión)	3%	5%	10%
Área de la muesca (AN) ††	16400	22800	36500

NOTA: El valor de AN para sistemas diferentes a 480 V deben ser multiplicados por V/480

* Hospitales y aeropuertos

† Un sistema dedicado exclusivamente al rectificador de carga

†† En tensión microsegundos.

Nota: Los límites son recomendados para sistemas de baja tensión en la cual el área de la muesca es fácil de medir en un osciloscopio. (ICONTEC, 2008, NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica, 38. P 60).

5.3 Problemas en equipos causados por variadores de frecuencia.

5.3.1 Transformador.

El flujo de corrientes con alto contenido armónico genera calentamientos adicionales de los devanados del transformador y, por consiguiente, un aumento de pérdidas por efecto joule durante la exposición a variaciones de frecuencia de la corriente circulante distorsionada (J. Desmet, 2005). Por consiguiente, bajo estas condiciones, para garantizar que las temperaturas máximas de operación no superen los límites, el transformador se debe operar por debajo de sus valores nominales de corriente (Díaz, 2014).

Por otra parte, los transformadores de distribución que alimentan cargas industriales manejan corrientes con alto contenido armónico (Jorge Iván Silva-ortega, Candelo-becerra, Umaña-ibañez, Mejia-taboada, & Palacio-bonill, 2016). Muchos de estos transformadores han sido construidos solo para soportar el aumento de temperatura debido a las corrientes parásitas a frecuencia nominal de 60 Hz, es decir, gran parte de los transformadores de distribución tienen factor K igual a 1, por lo tanto es importante determinar el factor K, el cual se define como un factor opcional que puede ser utilizado en transformadores y que indica la capacidad que tiene un transformador para manejar corrientes no sinusoidales (Gómez, 2016). El factor K se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(\text{pu})^2 h^2$$

En donde:

I_h (pu): es la corriente RMS, para la armónica de orden (por unidad).

h: corresponde al orden de la componente armónica.

5.3.1.1 Transformador de potencia tridevanado.

El transformador de potencia es un dispositivo eléctrico estático que consiste en un devanado, o dos o más devanados acoplados, con o sin un núcleo magnético, para introducir el acoplamiento mutuo entre los circuitos eléctricos. Los transformadores se usan ampliamente en sistemas de energía eléctrica para transferir energía por inducción electromagnética entre circuitos a la misma frecuencia, generalmente con valores modificados de tensión y corriente (IEEE Std C57.12.80, 2010).

5.3.1.2 Autotransformador.

A diferencia del transformador, el autotransformador se utiliza como solución debido a que tiene un solo bobinado sobre el núcleo, por lo tanto, conforma dos devanados en una sección común o núcleo (IEEE Std C57.12.80, 2010). El autotransformador es un transformador de potencia en el que un devanado, conocido como el devanado común o paralelo, se comparte entre el circuito de alta tensión (HV) y el circuito de baja tensión (LV). Como parte del sistema de transmisión de potencia, en servicio, el autotransformador está expuesto a diversos esfuerzos de tensión y corriente (Filipović-Grčić, 2014).

5.3.2 Motores.

El motor eléctrico se basa en la interacción entre fenómenos eléctricos y magnéticos (V. Sousa, Viego, Gómez, Quispe, & Balbis, 2016; Vladimir Sousa, Hernández, Quispe, Gómez, & Viego, 2017; Valencia, Quispe, & Sousa, 2014). El motor se compone de bobinas (el rotor) dispuestas encima de imanes fijos (el estator). Se genera un campo magnético alrededor de las

bobinas cuando la corriente eléctrica fluye a través de él, que interactúa con el campo de los imanes y hace que las bobinas giren (Pums, 2016). Existen dos tipos de motores eléctricos en CA (corriente alterna) y CC (corriente continua).

5.3.2.1 Motor CA.

En los motores de CA modernos, la corriente se aplica a la parte estacionaria del motor y el imán está en el rotor, la corriente variable en el estator genera un campo magnético rotativo (a través de la ley de Ampere) que interactúa con el campo magnético del rotor, excitando el rotor para producir el giro (Quispe et al., 2018; Jorge I Silva-ortega, Cervantes-bolivar, Isaac-millan, & Valencia-choa, 2018; Sousa-Santos, 2015). Los motores de CA actuales vienen con varias opciones para generar el campo magnético del rotor. En algunos, el rotor tiene imanes permanentes; en otros, el rotor lleva electroimanes accionados por una fuente de alimentación de CC externa; en otros (motores de inducción), el rotor simplemente capta los campos magnéticos inducidos del campo magnético del estator (Moyer, 2010). En la Figura 3, muestra lo tipos de motores en corriente alterna (CA).

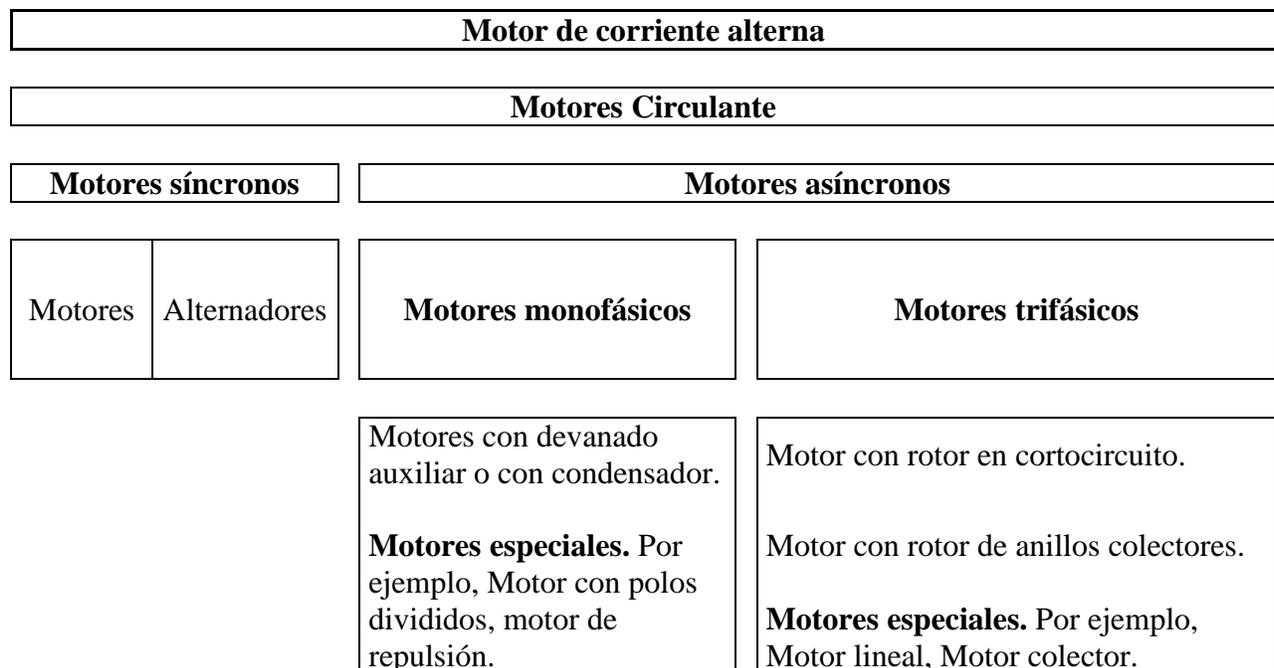




Figura 3. Motores de corriente alterna (Jürgen Stumpp, 2011). Fuente: Elaboración propia

5.3.2.2 Motor CC.

La velocidad de rotación de un motor de corriente continua está para producir una velocidad variable del motor. Los motores de CC también se pueden diseñar para girar a cualquier velocidad deseada para una tensión de alimentación fija, a diferencia de los motores de CA, están limitados a solo ciertas velocidades de rotación directamente relacionada con su tensión de alimentación, que puede variarse dentro de cierto rango (Moyer, 2010).

5.3.3 Electrónica de Potencia.

La electrónica de potencia permite transformar la electricidad entre distintas frecuencias y tensiones de forma segura, eficiente y rentable. La posibilidad de controlar los motores de forma más eficiente con electrónica de potencia como aplicaciones con variador de frecuencia, representa un gran potencial de ahorro en términos de recursos y emisiones (Aguilar, 2004).

Algunas aplicaciones de la electrónica de potencia sería la conversión de energía de una o más fuentes de CA o CC a una o más cargas de CA o CC, con capacidades bidireccionales. En la mayoría de los sistemas de electrónica de potencia, esta conversión se logra con dos módulos funcionales llamados etapa de control y etapa de potencia (Chakraborty, 2013). La Figura 4 muestra la topología de una aplicación de fuente única.

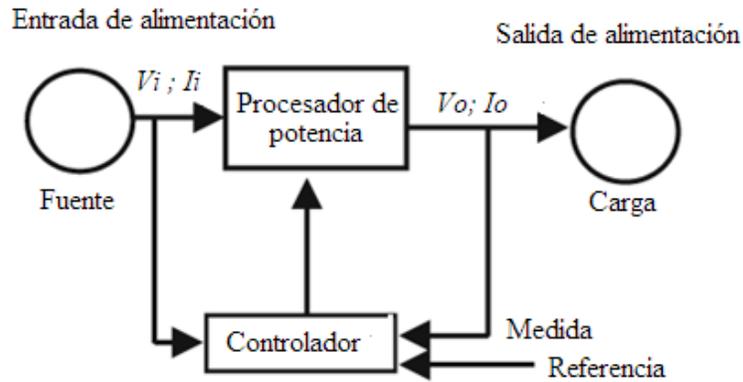


Figura 4. Topología de una aplicación de fuente única. Fuente: *Elaboración propia*

El convertidor de energía opera la transferencia de potencia de la entrada a la salida, o viceversa, y está constituido por dispositivos semiconductores de potencia como diodos o tiristores que actúan como conmutadores, más dispositivos pasivos (inductor y condensador). El controlador es responsable de operar los interruptores de acuerdo con algoritmos específicos que monitorean las cantidades físicas medidas a la entrada y/o salida del sistema (Chakraborty, 2013).

5.3.3.1 Convertidores.

Un convertidor de energía procesa un flujo de energía entre dos fuentes, es decir, generalmente entre un generador y una carga, como se ilustra en la Figura 5 (Hoyos Velasco et al., 2018). Los convertidores electrónicos de potencia son circuitos en modo de conmutación que procesan la potencia entre dos sistemas eléctricos que utilizan conmutadores de semiconductores de potencia. Los sistemas eléctricos pueden ser de CC o CA (Chakraborty, 2013). Los convertidores de electrónica de potencia se dividen en cuatro categorías, es decir, convertidores CA-CC, CA-CA, CC-CC y CC-CA (Justo, 2013). El estudio de reducción de los efectos de los armónicos producidos por VFD presentado, se basó en los convertidores de onda de tensión y corriente de CA-CC y CC-CA

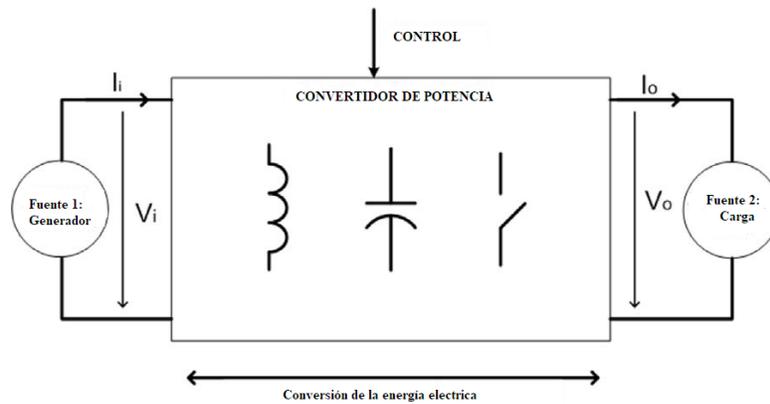


Figura 5. Convertidor de potencia. Fuente: Elaboración propia

- **Convertidor CC-CA:** también descrito como " Inversor " es un circuito que convierte una fuente de CC en una tensión alterna sinusoidal para suministrar cargas de CA, controlar motores de CA o incluso conectar dispositivos de CC que están conectados a la red de forma similar a un convertidor de CC / CC, la conexión de la entrada a un inversor hacia una fuente rígida es similar a la de una batería, célula solar o pila de combustible, también puede proceder de un enlace de CC intermedio que puede suministrarse desde una fuente de CA.

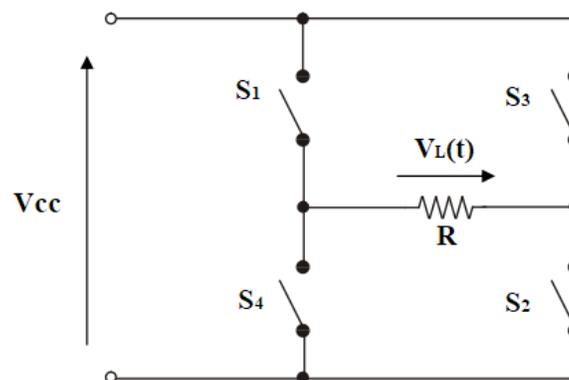


Figura 6. Estructura básica de un inversor en puente monofásico. Fuente: Elaboración propia

- **Convertidor CA-CC:** este tipo de convertidor también se conoce como " Rectificador ". Por lo general, la entrada de CA al circuito es una fuente de tensión sinusoidal que opera a 120 V, 60 Hz o 230 V, 50 Hz, que se utilizan para aplicaciones de distribución de energía. El voltaje de CA se rectifica en una tensión unidireccional de CC, que puede usarse directamente para suministrar energía a una carga resistiva de CC o controlar un motor de CC. En algunas aplicaciones, la tensión de CC se somete a una conversión adicional utilizando un convertidor CC / CC o CC / CA.

5.3.3.2 Rectificador.

Los Rectificadores de CA / CC pueden clasificarse ampliamente en función del tipo de fuente de CA y el tipo de interruptor de semiconductor se utiliza como se muestra en la Figura 7. Los rectificadores se usan generalmente en aplicaciones monofásicas o trifásicas. Los interruptores que se usan en los diseños del rectificador pueden ser dispositivos de diodos o tiristores (Chakraborty, 2013).

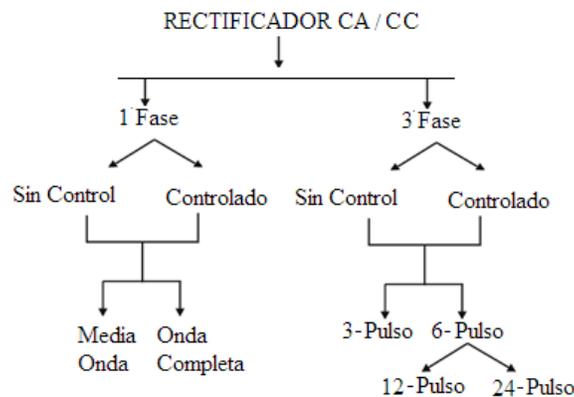


Figura 7. Clasificaciones de circuitos rectificadores. Fuente: Elaboración propia

Los rectificadores monofásicos se pueden clasificar como circuitos de media onda o de onda completa. Los rectificadores trifásicos se clasifican en función del número de impulsos de la tensión de salida rectificada, es decir, rectificadores de 3 impulsos, 6 pulsos, 12 pulsos o más

generalmente 3×2^n - pulsos (donde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$). El número de pulsos es la relación entre la frecuencia fundamental de la salida del rectificador y la frecuencia de la entrada de CA (Chakraborty, 2013).

5.3.3.3 UPS.

El sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) proporciona energía limpia, acondicionada e ininterrumpible a las cargas sensibles tales como las computadoras de las aerolíneas, los centros de datos, los sistemas de comunicación y los sistemas de soporte médico en hospitales, etc. Generalmente, la salida de la UPS debe regularse sinusoidalmente con bajo distorsión armónica total (TDD), independientemente de los cambios en la tensión de entrada y los cambios abruptos en la carga conectada al sistema. Además, el tiempo de respuesta de los transitorios es bajo, desde el modo en línea hasta el modo alimentado por batería y viceversa, factor de potencia unitario, alta confiabilidad, alta eficiencia, bajo costo, bajo peso y tamaño pequeño, etc. son otras consideraciones esenciales en la UPS. En general, puede clasificarse como un sistema estático donde utiliza convertidores e inversores de electrónica de potencia para procesar, almacenar y entregar energía en fallas de red (Aamir Muhammad, 2016).

Clasificación de UPS.

Dependiendo de la configuración topológica, la UPS se clasifica como UPS fuera de línea, UPS interactivo en línea y UPS en línea (Aamir Muhammad, 2016).

- 1. UPS fuera de línea.** Consta de un cargador de batería, un interruptor estático y un inversor como se muestra en la Figura 8. Un filtro y un aumento de presión a veces usan la salida del UPS para evitar el ruido y la perturbación de la línea antes de ser suministrada por la salida del UPS. Durante el funcionamiento en modo normal, un cargador de batería cargará el banco de baterías y, al mismo tiempo, la carga será

alimentada por la alimentación de la línea de CA principal. El inversor está en el modo de espera durante este modo. Cuando falla la energía el interruptor estático conecta la carga al inversor y la energía es alimentada por la batería a través del inversor. El tiempo de conmutación del conmutador estático normalmente es inferior a 10 ms, lo que no afecta a la carga de trabajo normal (Aamir Muhammad, 2016).

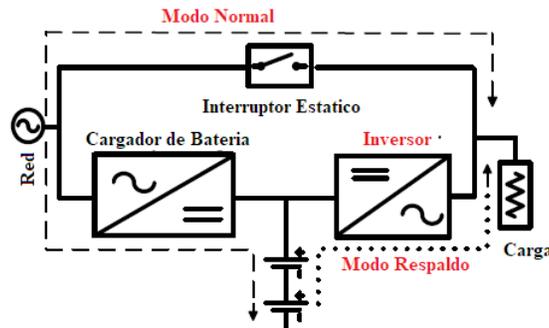


Figura 8. Diagrama de bloque del sistema UPS fuera de línea.
Fuente: Elaboración propia

2. **UPS interactivo en línea.** La UPS interactiva en línea consta de un conmutador estático, convertidor/inversor bidireccional y un banco de baterías como se muestra en la Figura 9. El convertidor/inversor bidireccional conecta el banco de baterías a la carga. Durante el modo normal de operación, la línea de CA principal suministra la energía a la carga y al convertidor/inversor bidireccional carga la batería. Durante la falla de la red, el interruptor estático desconecta la carga del suministro principal y el convertidor/inversor bidireccional suministra la energía a la carga. La UPS interactivo de línea tiene la ventaja de tener un bajo costo, tamaño pequeño y alta eficiencia. La única limitación es que no proporciona ninguna regulación de tensión durante el modo normal de operación (Aamir Muhammad, 2016).

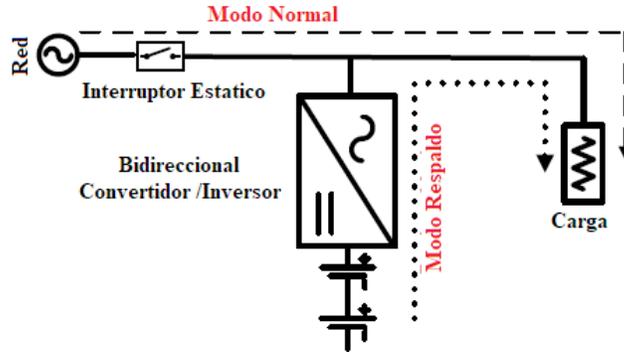


Figura 9. Diagrama de bloque de UPS interactivo en línea.
Fuente: *Elaboración propia*

3. **UPS en línea.** Consta de un rectificador, un inversor y un interruptor estático como se muestra en la Figura 10. Durante el modo normal de operación, el rectificador carga las baterías y mantiene el voltaje constante del circuito intermedio. Mientras el inversor convierte la tensión del circuito intermedio a la corriente alterna requerida para alimentar la carga. Durante la falla de energía, el contactor magnético (CM) desconecta la línea de CA, pero el inversor sigue suministrando energía a la carga desde el banco de la batería sin interrupción. Por lo tanto, el inversor sigue funcionando en ambos modos. El inversor suministra energía limpia y acondicionada al interruptor de derivación. Dicho sistema tiene la ventaja de proporcionar aislamiento galvánico de los transitorios y picos generados dentro de la red de líneas.

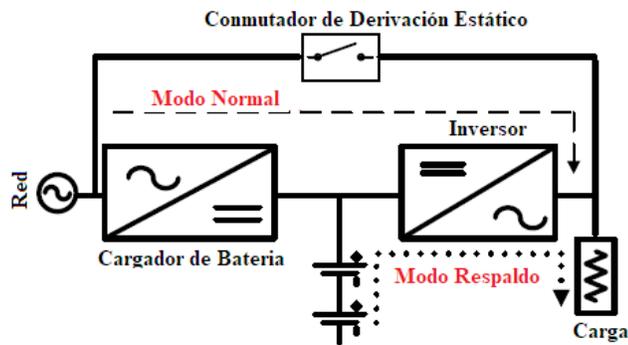


Figura 10. Diagrama de bloque de ups en línea. Fuente: *Elaboración propia*

5.3.3.4 Variador de frecuencia de 6 pulsos y 12 pulsos.

Está conformado por tres etapas de potencia, conocidas como puente rectificador, puente de corriente continua y puente inversor. El puente rectificador compuesto generalmente de diodos o tiristores convierte la tensión de entrada de corriente alterna a corriente continua rectificada; el puente de corriente continua compuesto de capacitores (condensadores) estabiliza la tensión rectificada para mantener un valor de tensión relativamente constante y continuo; el puente inversor compuesto de IGBTs (transistores bipolares de compuerta aislada) recibe una señal de tensión de corriente continua y mediante la imposición de un tren de pulsos, entrega al motor una tensión de corriente alterna de tensión y frecuencia variable (WEG, 1989).

Para poder cambiar la frecuencia, el variador requiere ejecutar múltiples tareas. Una de las tareas fundamentales de un variador de frecuencia es la modulación senoidal de ancho de pulso SPWM (Senoidal Pulse Width Modulation) (Córdoba, 2018).

La función del variador es convertir una tensión y frecuencia fijas de una fuente de energía eléctrica en una tensión y frecuencia variables para controlar un motor de CA. Cualquier variador de frecuencia (VFD) consta de tres secciones: el rectificador, el bus de CC y el inversor (Santos et al., 2013; V Sousa et al., 2015; Vladimir Sousa, Herrera, et al., 2017). La sección de rectificador se utiliza para convertir la tensión de línea de CA entrante fija en una tensión de bus de CC. Las unidades de baja potencia usan un rectificador de diodos y resistencias para cargar los condensadores del bus. Se requieren dos rectificadores para cada fase de potencia. La representación del circuito para esta tecnología de accionamiento (Shudarek, 2018), como se muestra en la Figura 11 .

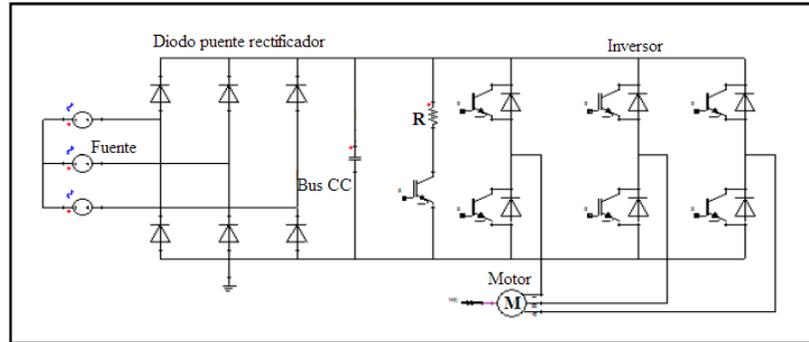


Figura 11. Rectificador de puente de diodo de seis pulsos.
Fuente: Elaboración propia

Las unidades de potencia media y alta utilizan rectificadores controlados por silicio (SCR) para controlar la carga de los condensadores del bus. Un estrangulador de enlace y condensadores de bus de CC en las unidades forman un filtro que suaviza el voltaje de salida del rectificador en una tensión de CC constante. Un dispositivo de frenado dinámico opcional en estos variadores permite que la energía regenerativa de la carga se disipe en una resistencia externa cuando el variador está frenando, la Figura 12 muestra la representación del circuito en la tecnología de accionamiento. Otro tipo de rectificador se llama convertidor o rectificador de entrada activo. Se usa una sección de convertidor en las unidades para regular el flujo de potencia entre la línea de CA y el bus de CC (Shudarek, 2018).

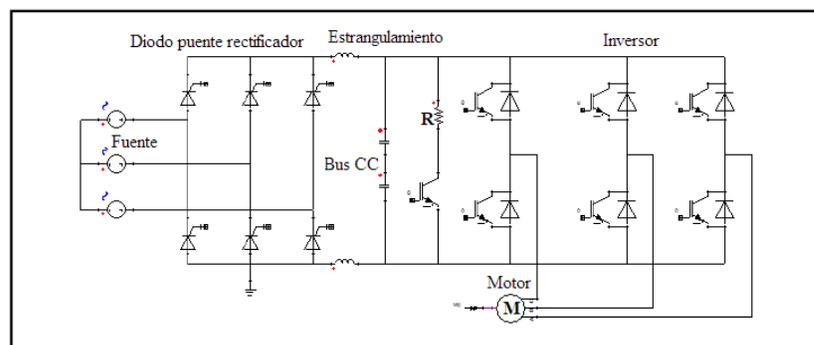


Figura 12. Rectificador SCR. *Fuente:* Elaboración propia

El convertidor usa un puente de transistor bipolar con compuerta aislada (IGBT) para rectificar la tensión de línea de CA en una tensión de bus de CC. Esta sección también regenera energía del bus de CC a la línea de CA cuando el disco está frenando. La representación del circuito para esta tecnología de accionamiento (Shudarek, 2018), como se muestra en la Figura 13.

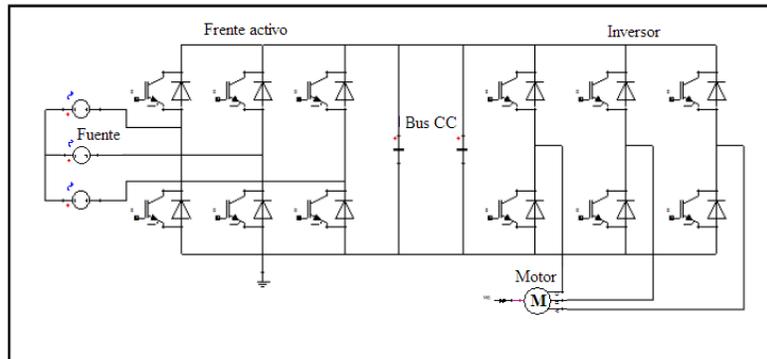


Figura 13. Rectificador activo frontal. Fuente: Elaboración propia

La presencia de variadores de frecuencia distorsiona las lecturas de factor de potencia e incrementa la lectura de potencia aparente sobre todo en contadores de tipo electrónico. En términos generales el efecto de los armónicos sobre el factor de potencia es el de disminuirlo ya que aumenta la potencia aparente total (José Dariel Arcila, 2014).

El factor de potencia en presencia de armónicos está dado por:

$$F.P = \frac{P}{S} = \frac{P}{V * I_{RMS}} = \frac{P}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}$$

En la Figura 14, se muestra la representación gráfica del factor de potencia en presencia de armónicos. La potencia reactiva Q está dada por las componentes fundamentales de corriente y tensión, mientras que los contenidos armónicos generan la componente D (José Dariel Arcila, 2014).

En este caso:

$$S_{total}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

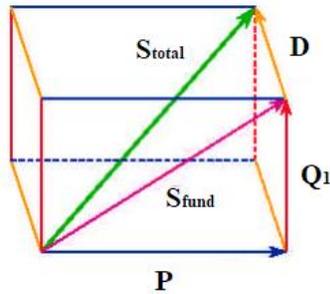


Figura 14. Representación gráfica del factor de potencia. Fuente: Elaboración propia

5.3.3.5 Arrancador suave.

Un arrancador suave no cambia la frecuencia o la velocidad como un (VFD). El arrancador aumenta la tensión de manera escalonada aplicada al motor desde la tensión inicial hasta la tensión máxima. Inicialmente para evitar sacudidas repentinas durante el arranque, el equipo inicia pausadamente con respecto a la tensión y frecuencia a su vez aumenta el par del motor para que comience a acelerarse. Uno de los beneficios de este método de arranque es la posibilidad de ajustar el torque a la necesidad exacta, ya sea que la aplicación esté cargada o no. El uso de un arrancador suave reducirá la corriente de arranque y evitará caídas de tensión en la red. También reducirá el par de arranque y la tensión mecánica en el equipo, lo que reduce la necesidad de servicio y mantenimiento. El arrancador suave puede realizar una parada suave, eliminando el golpe de ariete y las sobretensiones en los sistemas de bombeo y evitando daños al material frágil en las cintas transportadoras (ABB, 2012).

5.3.4 Máquinas de soldadura.

El proceso de soldadura se genera mediante el arco eléctrico, que significa que la corriente eléctrica que se genera entre el electrodo y la pieza de trabajo debido a la tensión (diferencial de

potencial que se genera entre el electrodo y el material base) permitiendo la generación de calor (Carlos Alberto, 2015). A continuación, algunos tipos de tecnologías:

- **Tecnología tiristor:** corrientes de soldadura variables contralados a través de diodos (SCR), que permite el uso de corrientes de soldadura a muy bajo amperaje, el control a distancia y la falta de piezas móviles con equipos de tipo "estado sólido".
- **Tecnología inversores:** Tecnología que permite controlar los corrientes de soldadura variables a través del inversor, ofreciendo una variación de corriente de soldadura con menor consumo de energía y mayor eficiencia eléctrica. Además, los inversores son equipos compactos y ligeros.
- **Tecnología sinérgica:** utiliza la tecnología inversor y microprocesador que permite el uso de programas de soldadura preseleccionados (Castolin Eutectic, 2013).

5.3.5 Luminarias de tecnología led.

El sistema de iluminación en la construcción puede tomar hasta 15-20% del uso eléctrico general. Las lámparas LED tienen muchas ventajas, como un menor consumo de energía, un ciclo de vida prolongado y un aspecto respetuoso con el medio ambiente debido a que no tiene componentes tóxicos. Sin embargo, el LED necesita un controlador de conmutación para que la lámpara cree iluminación. Este dispositivo causa interferencia que no es deseable para el sistema eléctrico, debido a que se debe tener en cuenta el impacto de la calidad de la potencia que genera el sistema de iluminación LED (Bunjongjit, 2017).

Los LED requieren una fuente de corriente constante a partir de una fuente de baja tensión CC, obtenida de la red eléctrica de CA. Por lo tanto, es necesario usar un convertidor para regular el voltaje y controlar la corriente aplicada a los LED. Los convertidores de reducción, impulso, retorno y resonancia son bien conocidos en la literatura como una fuente de

alimentación para los LED. La Figura 15, muestra un diagrama de bloques del balastro LED de bajo voltaje típico con control de regulación.

Incluye el voltaje de entrada de la línea de CA, típicamente 220-240 VCA 50/60 Hz, un filtro EMI para bloquear el ruido de conmutación generado por el circuito, un circuito de control atenuable, un rectificador con condensador de suavizado, un convertidor de fuente de corriente constante controlado por PWM para CC Conversión CA y una matriz de LED. Además, la corriente de entrada puede ser cambiada por el circuito del regulador para variar la salida de luz. Como las potencias nominales de carga son bajas en lámparas LED, las directivas que rigen la inyección de armónicos no son particularmente estrictas, por lo tanto, los circuitos de control de factor de potencia pueden o no encontrarse en balastos de lámparas LED de baja tensión. Sin embargo, para reducir los armónicos generados y mejorar el factor de potencia, es posible introducir un filtro pasivo de entrada (Uddin, 2012).

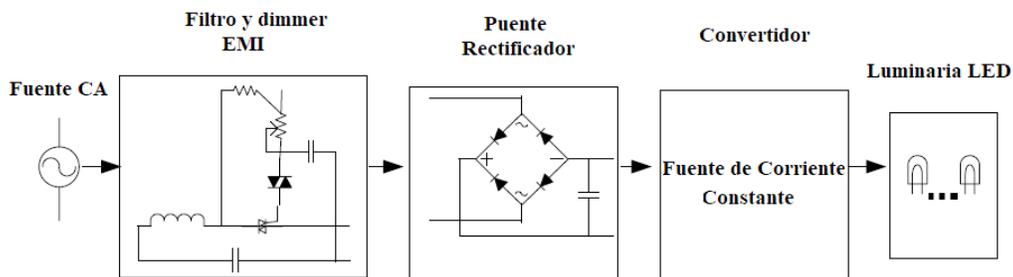


Figura 15. Diagrama de bloques del balastro LED. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 2.

6. Materiales y métodos

En la presente investigación, se realizó el estudio y análisis de armónicos generados por variadores de frecuencia de seis pulsos, con la finalidad de estudiar los efectos y métodos de

reducción de los armónicos en tensión como en corriente. Se modeló el variador de frecuencia de seis pulsos como el productor de armónicos, para el efecto de reducción de armónicos, se modeló el filtro pasivo y reactancias para la mitigación y por cambio tecnológico el variador de frecuencia de doce pulsos. Para la modelación y simulación en el software de simulación de MATLAB Simulink (Silva-Ortega, Hernandez-Herrera, & Gomez-Sandoval, 2015), se realizó por personal certificado en el ámbito de calidad de potencia (Power Quality Solutions por Schneider Electric).

La toma de datos y análisis de datos se llevó a cabo con el software de MATLAB, Simulink V9.2.0.538062. El estudio para la comparación de los resultados obtenidos en la medición con los estándares que rigen los parámetros de calidad de potencia se realizó con datos exportados del Simulink en Excel 2016.

Los circuitos desarrollados en el software de simulación de MATLAB (Simulink), se modelaron haciendo uso de los bloques de ejemplo internos de Simulink y realizando modificaciones con el objetivo de lograr una aproximación de los resultados de simulación con respecto a los datos expuestos en el estándar IEEE Std 399 de 1997. El desarrollo aplicado para el estudio y análisis de armónicos y como reducirlos se realizó como se muestra en la Figura 16.

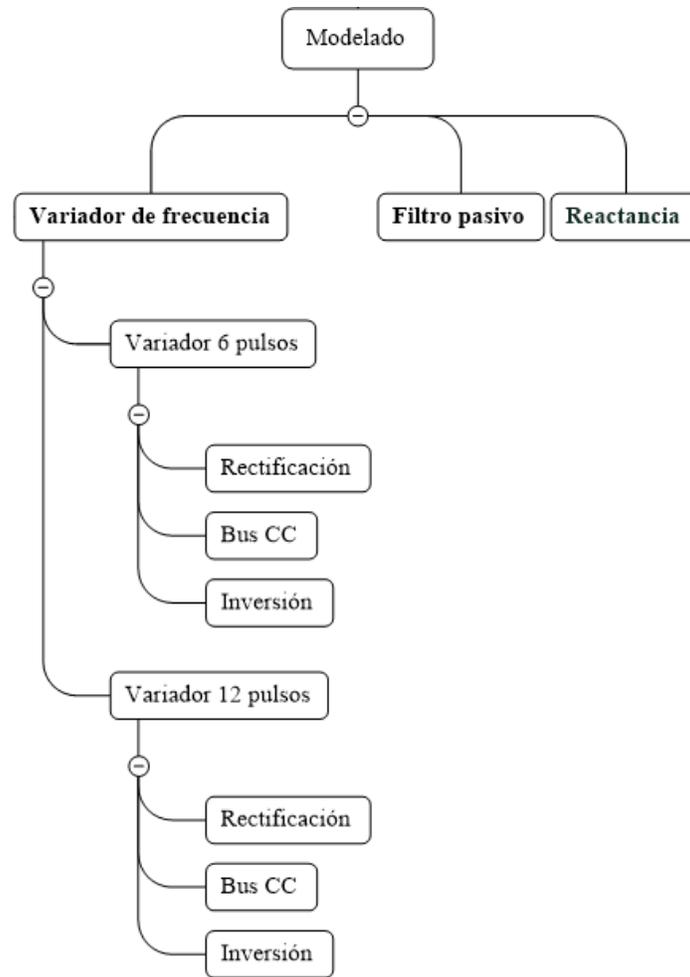


Figura 16. Organigrama de metodología de estudio y análisis. Fuente: Elaboración propia

6.1 Modelación de variador de velocidad.

La estructura del variador de velocidad se diseñó a partir del modelo de electrónica de potencia de Simulink de MATLAB, específicamente del convertidor CA-CC-CA, véase Figura 17, cambiando el rectificador por defecto por un bloque de puente universal, parametrizado el dispositivo de electrónica de potencia como tiristor y adicionando el bloque de disparo del nuevo bloque mostrado en la Figura 18. Para el control de velocidad del variador de empleó un generador PWM, con frecuencia fija a 60 Hz.

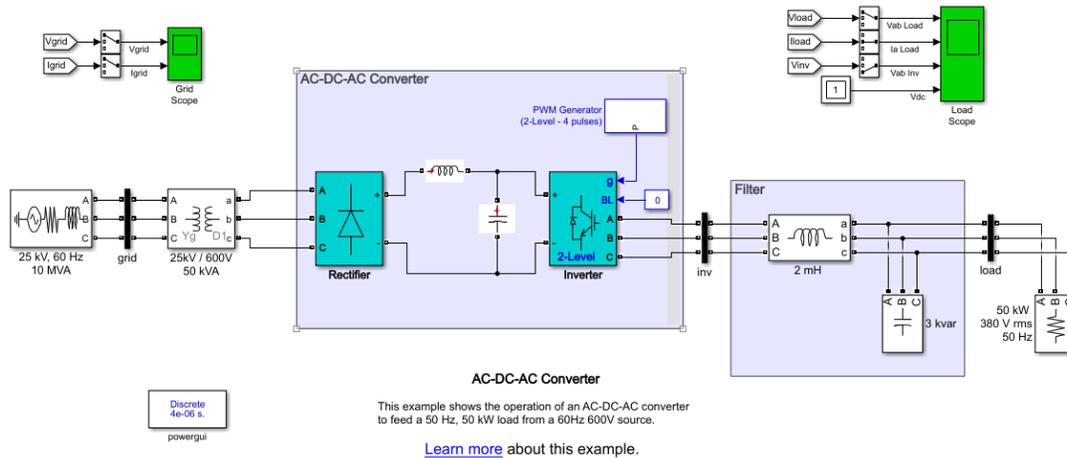


Figura 17. Modelo de electrónica de potencia de Simulink. AC-DC-AC Converter.
Fuente: Elaboración propia

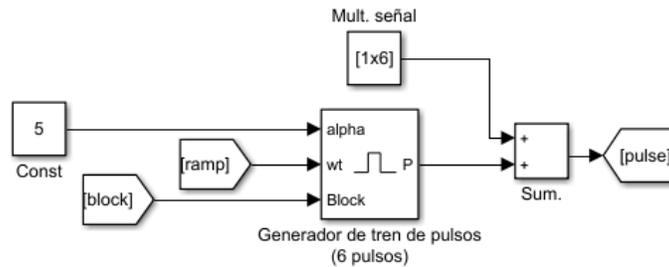


Figura 18. Modelo de disparo de 6 pulsos para funcionamiento del puente rectificador trifásico.
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de estudio se llevó a cabo la construcción del circuito para un variador de velocidad de 6 pulsos y otro circuito para el variador de velocidad de 12 pulsos. El bloque de simulación en tiempo powergui se configuró en 4e-6 para el estudio de variables discretas y la configuración de parámetros de simulación en opciones de respuesta se usó el modelo trapezoidal y tiempos de simulación de hasta 10 segundos en estado estacionario.

6.1.1 Variador de frecuencia de 6 pulsos.

El variador de 6 pulsos fue desarrollado haciendo uso de la estructura básica de composición, el cual consta de la etapa de rectificación (CA/CC), el bus CC y la etapa de inversión (CC/CA), como se muestra en la Figura 19. El bus CC fue modificado con relación a la configuración de

inductancia y capacitancia, donde estos valores se establecen de acuerdo con los valores mostrados por los fabricantes (dentro de lo permitido por las normativas). Para poder establecer los valores de tensión en CC deseados para el correcto funcionamiento del inversor y sostenimiento de la carga. En el inversor solo se modificó el valor de la frecuencia del bloque PWM (de 50 Hz a 60 Hz) para la activación de los transistores de potencia (IGBT), para generar las ondas de salida en tensión y corriente de acuerdo con lo deseado, teniendo en cuenta que los valores de activación del sistema de inversión se toman a frecuencia nominal para Colombia de 60 Hz.

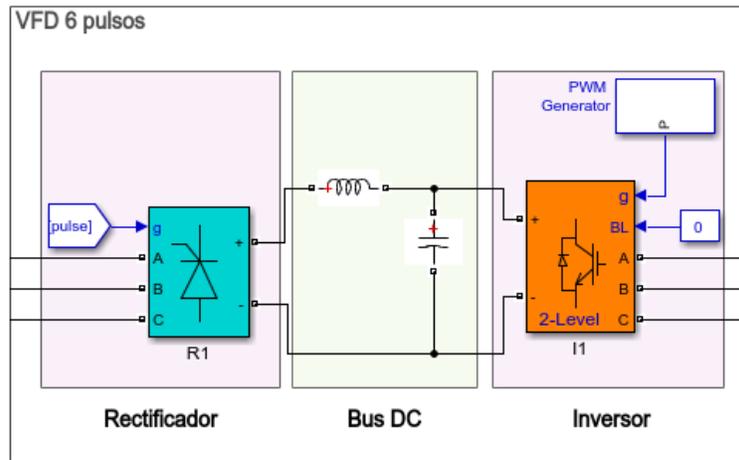


Figura 19. Estructura del variador simulado de 6 pulsos. Fuente: Elaboración propia

6.1.1.1 Rectificador.

Para la simulación de la etapa de conversión de onda CA-CC se utilizó un bloque de puente universal (R1) configurado con tiristores, como se muestra en la Figura 18, generando un tren de pulsos por ciclo, como se muestra en la Figura 20, para el disparo de los tiristores se generó con el bloque de generación de pulsos, como se muestra en la Figura 18, usando el bloque de rampa y un proceso de cálculo para la obtención de la frecuencia (ω), como se muestra en la Figura 21, un con el fin de lograr la frecuencia del sistema trifásico y desfase de ondas, dando como

resultado el proceso de rectificación de onda completa, obteniendo a la salida del rectificador una onda en tensión en CC.

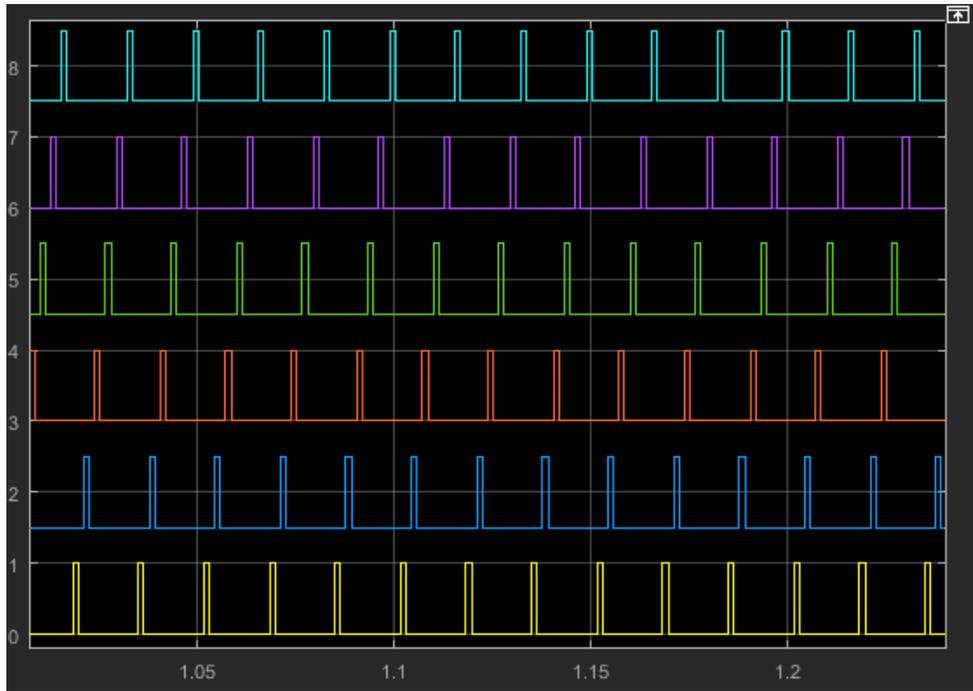


Figura 20. Tren de pulsos para activación de tiristores. Fuente: Elaboración propia

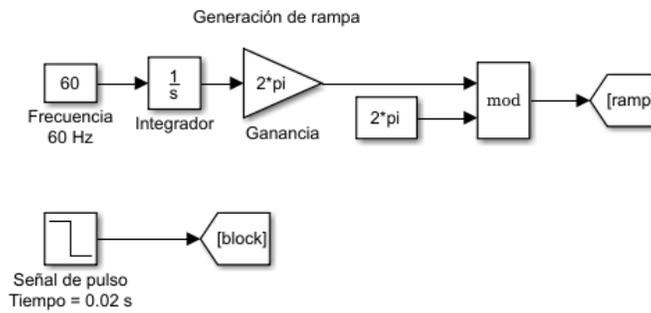
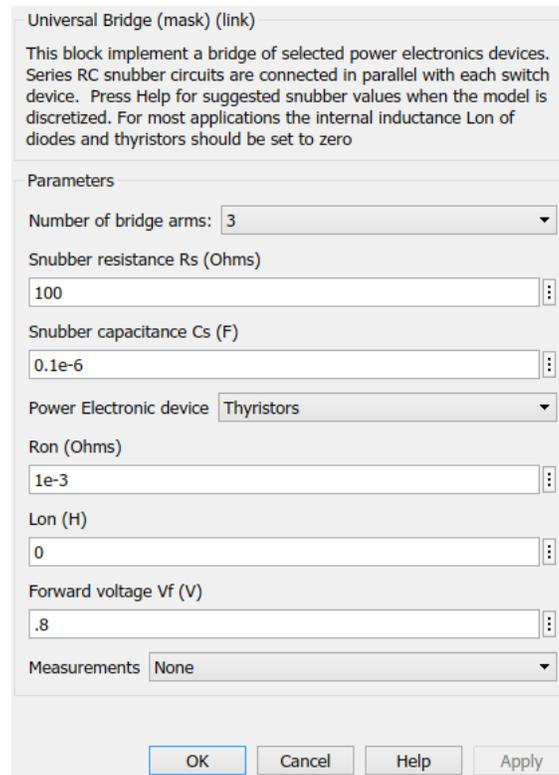


Figura 21. Parámetros de entrada del bloque de generación de pulsos (6 pulsos). Fuente: Elaboración propia

Los parámetros utilizados para la simulación del rectificador se muestran en la Figura 22.



Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance L_{on} of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance R_s (Ohms)
100

Snubber capacitance C_s (F)
0.1e-6

Power Electronic device Thyristors

Ron (Ohms)
1e-3

Lon (H)
0

Forward voltage V_f (V)
.8

Measurements None

OK Cancel Help Apply

Figura 22. Parámetros del bloque de puente universal. Fuente: Elaboración propia

6.1.1.2 Bus CC.

El bus CC de la aplicación se diseñó con la configuración LC a la salida del rectificador para el rizado y mejora de la señal de tensión y corriente en CC, como se muestra en la Figura 19, partiendo de los datos entregados por los fabricantes, expuestos en el estándar IEC 439 Part 1 de construcción de variadores de velocidad.

6.1.2 Inversor.

Para la simulación de la etapa de conversión de onda CC-CA.

6.1.3 Variador de frecuencia de 12 pulsos.

El variador de velocidad 12 pulsos se desarrolló con base al variador de velocidad de 6 pulsos, con la diferencia en la parte de rectificación y alimentación de estos, se diseñó con dos rectificadores de 6 pulsos, activados los tiristores con un par de generador de pulsos desfasados

entre sí, la integración de alimentación de los rectificadores con un transformador tridevanado con entrada en delta, y salida en estrella con tierra salida y la otra salida en delta con un desfase entre estas de 30 grados, con el fin de mitigar los armónicos 5° y 7°.

6.2 Filtro pasivo (pasa bajas).

Se desarrolló en el software de simulación de MATLAB un filtro pasivo del tipo pasa bajas, sintonizado en el 5° armónico a un 90% del valor de 300 Hz (a una frecuencia de 270 Hz), con el objetivo de mitigar la generación de armónicos del variador de velocidad, haciendo énfasis al desarrollo teórico para la obtención de los valores de resistencia e inductancia necesarios para el desarrollo de éste.

6.3 Procedimiento para la obtención de circuitos usando SIMULINK.

El procedimiento para la obtención de los circuitos de estudio para generación de armónicos por uso de variadores de velocidad se realizó de la siguiente manera:

1. Se realizó la simulación del variador de frecuencia de 6 pulsos demostrando la funcionalidad de este y la distorsión armónica que genera, partiendo de la ecuación $h=np\pm 1$, tal como se muestra en la Figura 20 y la Figura 21, teniendo más influencia en los armónicos individuales 5° y 7°.
2. De igual manera se simuló el variador de 12 pulsos mostrando la ecuación de mayor incidencia los armónicos 11 y 13, como se muestra en la Figura 42 y Figura 43.
3. Seguido se hizo la simulación del filtro pasivo pasa baja, con la finalidad de interrumpir los armónicos generados por el variador de velocidad de 6 pulsos, mitigando de esta manera los armónicos mayores al 5°.

6.4 Comparación de resultado de simulación vs caso de estudio real.

Se realizó el estudio base de comparación con el estudio de medición de calidad de potencia en una estación de servicio de gas vehicular, utilizando un analizador de redes de la empresa

DRANETZ, donde solo se seleccionó de las variables analizadas (transferidas a Excel) el THDv, THDi, armónicas individuales de tensión y corriente, en uno de los eventos demarcados por generación de armónicos y las gráficas de tendencia de tensión y corriente, para poder realizar nuestro análisis en MATLAB.

El estudio se realizó en base al diagrama unifilar, como se muestra en la Figura 23, el cual fue montado en Simulink de MATLAB.

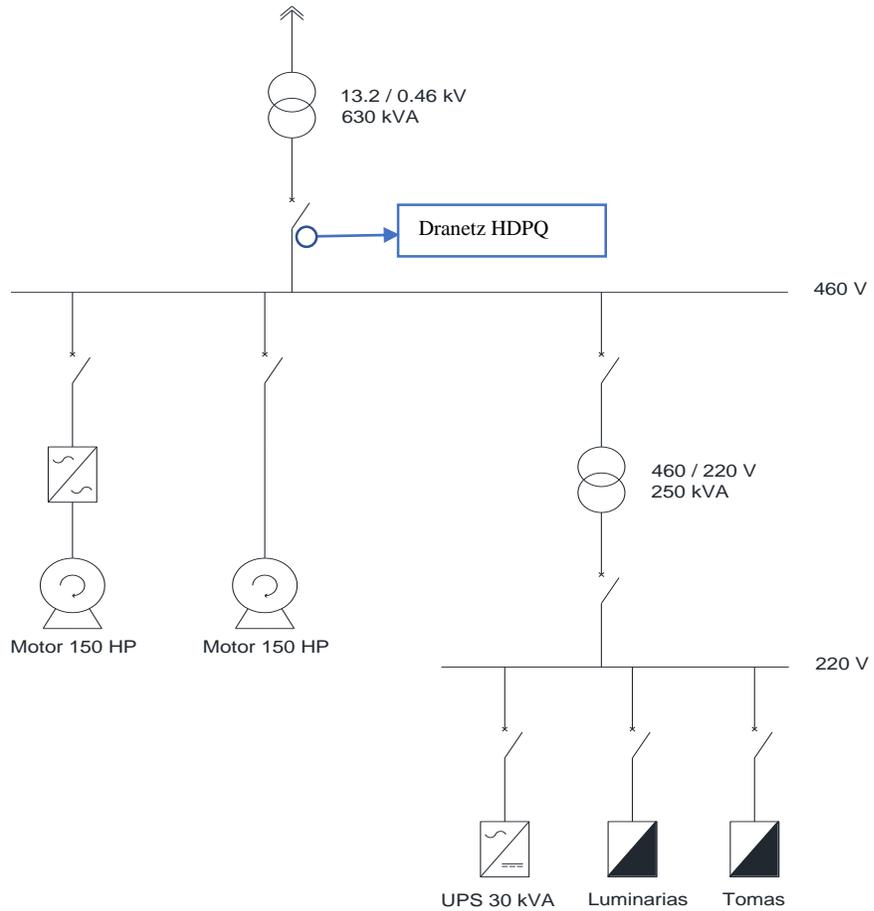


Figura 23. Diagrama unifilar de estación de servicios.
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3.

7. Análisis de resultados

Montado el circuito de estudio, como lo muestra la Figura 23, en el software de simulación de MATLAB, se procedió a analizar los resultado obtenidos en Excel, y se compararon estos con los datos obtenidos en la medición de la estación de servicios, donde se desarrolló una tabla de porcentaje de error de las variables necesarias para el objeto de estudio y se llega a la conclusión de la viabilidad del proyecto de análisis y propuesta de solución.

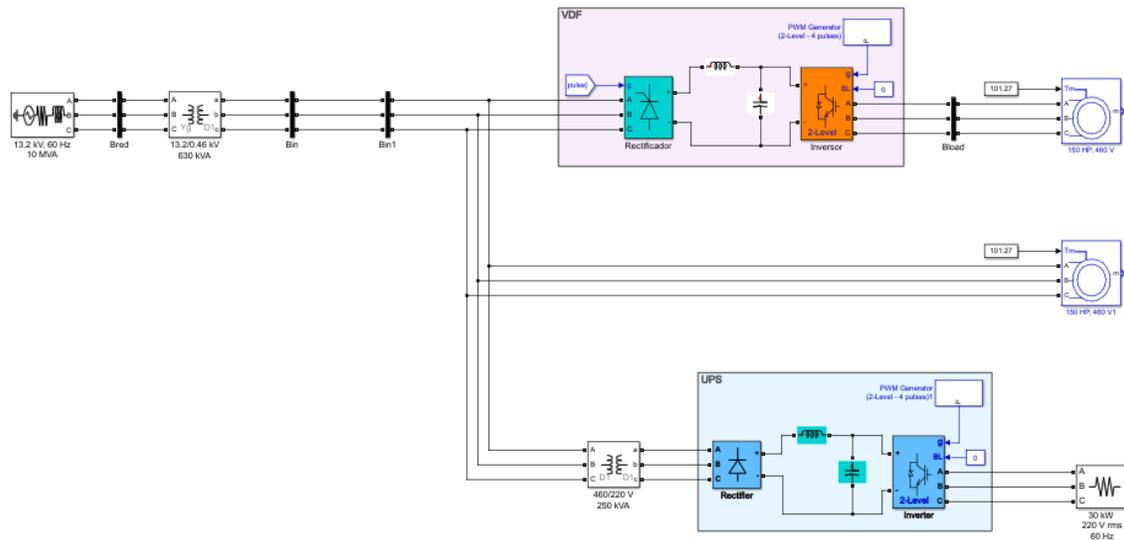


Figura 24. Diagrama unifilar de estación de servicio en Simulink.
Fuente: Elaboración propia

Realizado el estudio con el analizador de redes Dranetz y la simulación en el software de simulación de Matlab se obtienen los resultados para el espectro de frecuencia en tensión, como muestra la Figura 25, para el espectro de frecuencia de corriente, como muestra la Figura 26.

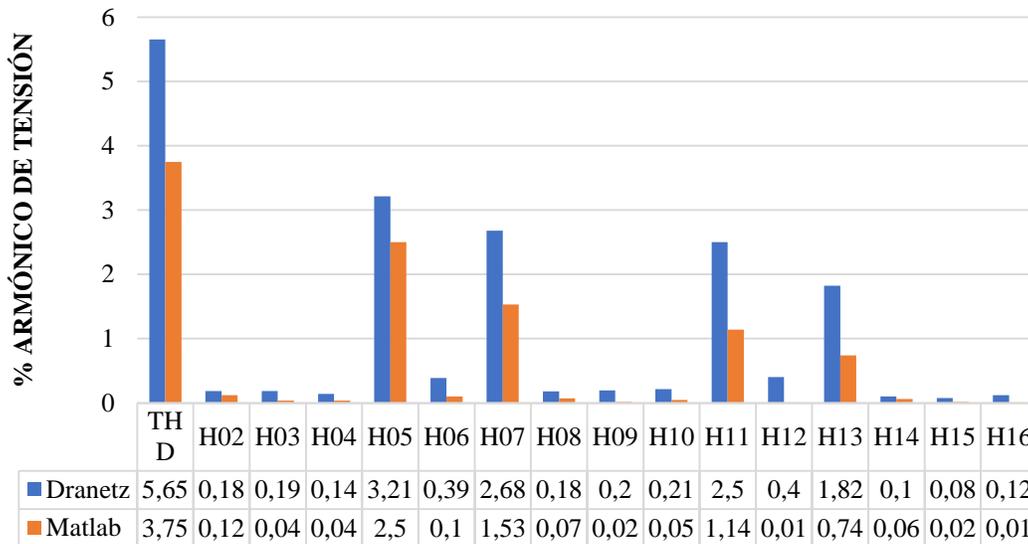


Figura 25. Comparación de resultados de medición y simulación del espectro de frecuencia de tensión. Fuente: Elaboración propia

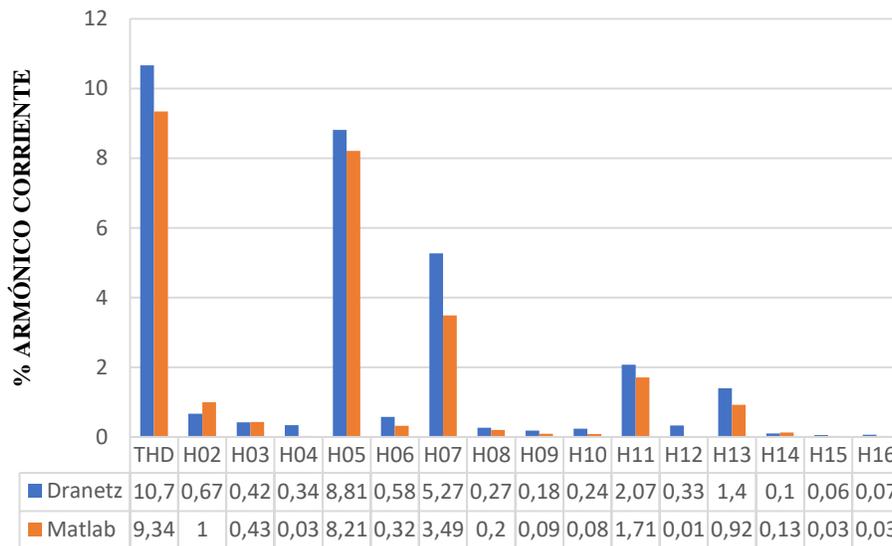


Figura 26. Comparación de resultados de medición y simulación del espectro de frecuencia de corriente. Fuente: Elaboración propia

7.1 Modelación de variador de velocidad.

La estructura del variador de velocidad se diseñó a partir del modelo de electrónica de potencia de Simulink de MATLAB, específicamente del convertidor CA-CC-CA, como muestra

Figura 27, cambiando el rectificador por defecto por un bloque de puente universal, parametrizado el dispositivo de electrónica de potencia como tiristor y adicionando el bloque de disparo del nuevo bloque mostrado en la Figura 28. Para el control de velocidad del variador de empleó un generador PWM, con frecuencia fija a 60 Hz.

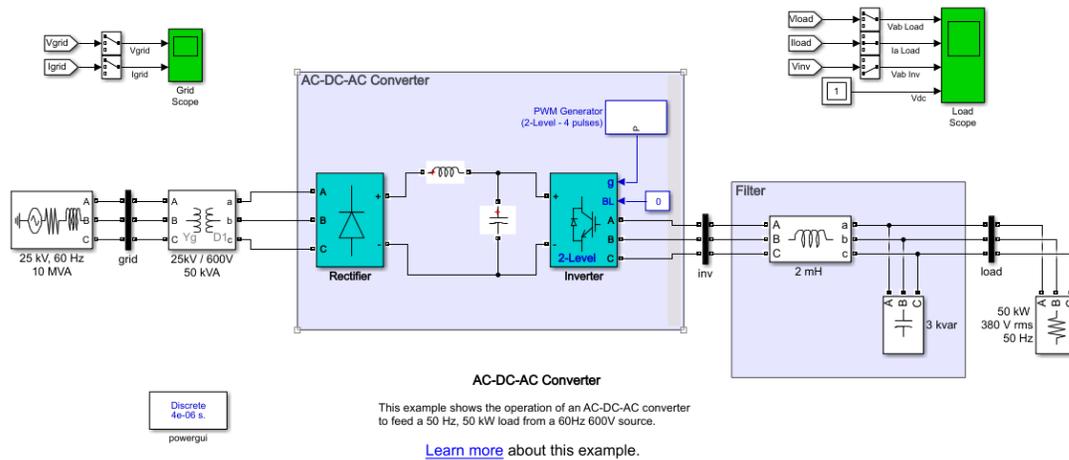


Figura 27. Modelo de electrónica de potencia de Simulink. AC-DC-AC Converter. Fuente: Elaboración propia

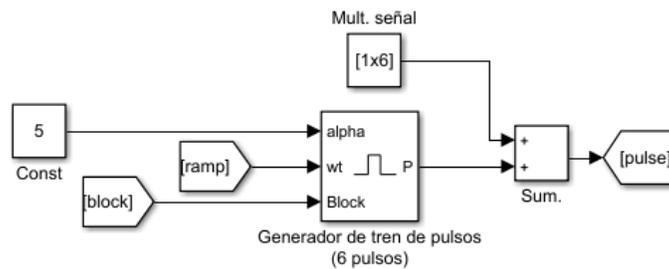


Figura 28. Modelo de disparo de 6 pulsos para funcionamiento del puente rectificador trifásico. Fuente: Elaboración propia

Para el caso de estudio se llevó a cabo la construcción del circuito para un variador de velocidad de 6 pulsos y otro circuito para el variador de velocidad de 12 pulsos. El bloque de simulación en tiempo powergui se configuró en 4e-6 para el estudio de variables discretas y la configuración de parámetros de simulación en opciones de respuesta se usó el modelo trapezoidal y tiempos de simulación de hasta 10 segundos en estado estacionario.

7.1.1 Bus CC.

El bus CC de la aplicación se diseñó con la configuración LC a la salida del rectificador para el rizado y mejora de la señal de tensión y corriente en CC, como se muestra en la Figura 19, partiendo de los datos entregados por los fabricantes, expuestos en el estándar IEC 439 Parte 1 de construcción de variadores de velocidad. Con los valores típicos mostrados en la Figura 29.

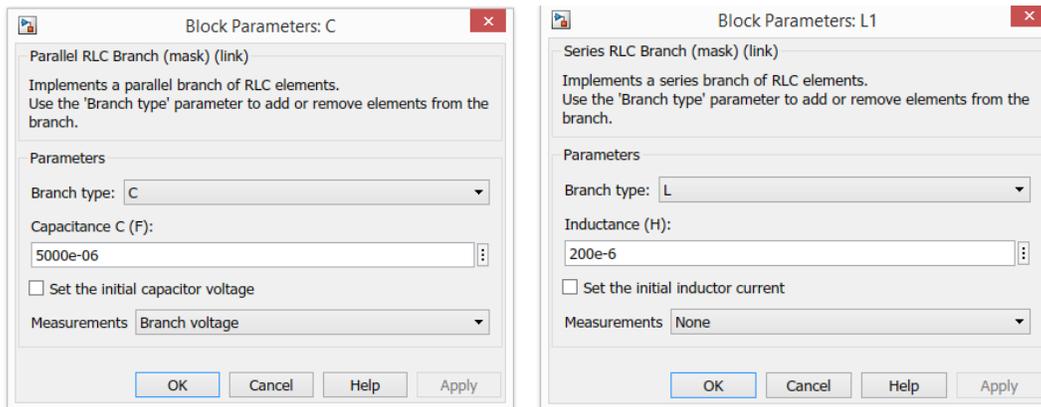


Figura 29. Parámetros capacitancia e inductancia del Bus CC. Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Inversor.

Para la simulación de la etapa de conversión de onda CC-CA se utilizó el bloque inversor con configuración de 6 transistores IGBT activados por un generador de señales PWM, el cual es utilizado para la modulación de la frecuencia de trabajo (para el estudio se programa a 60 Hz) como se muestra la configuración en la Figura 30.

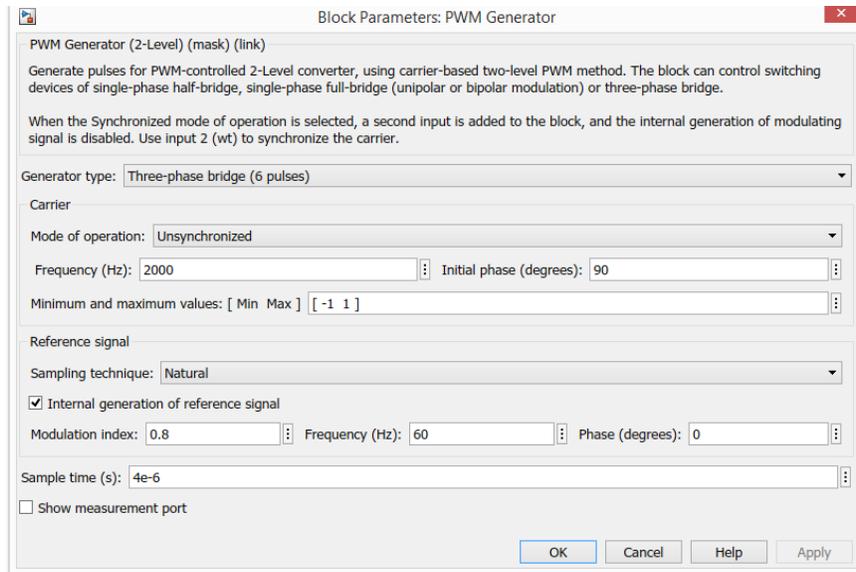


Figura 30. Parámetros del bloque de generación PWM. Fuente: Elaboración propia

Simulado el sistema del VFD de 6 pulsos se han obtenido el espectro en frecuencia de los armónicos individuales en tensión y corriente, además de las muestras de las formas de onda distorsionada de tensión y corriente, como se muestra en la Figura 31.

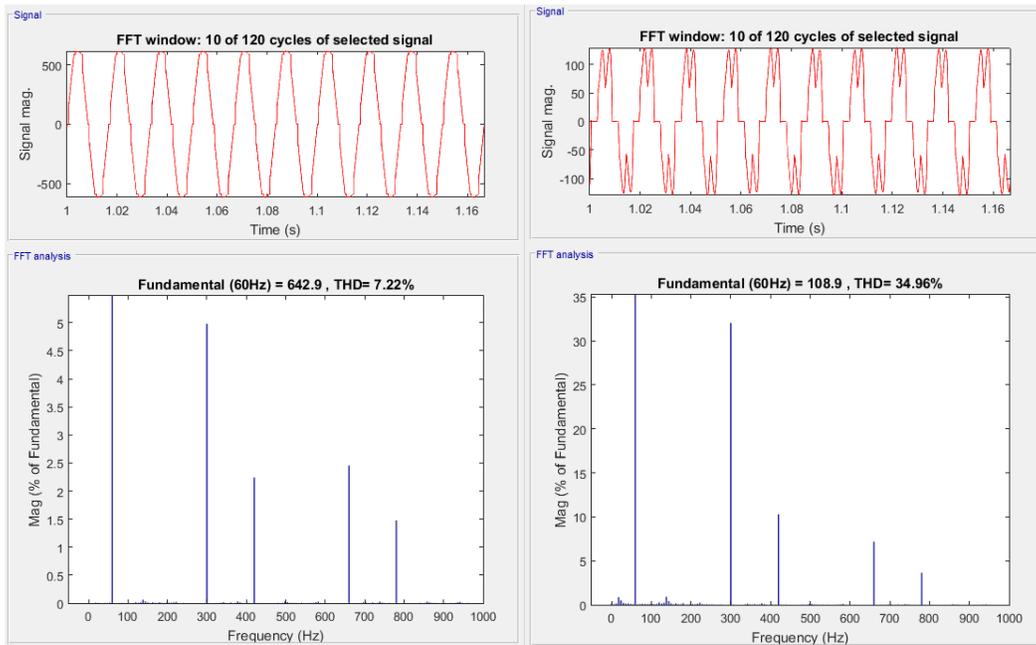
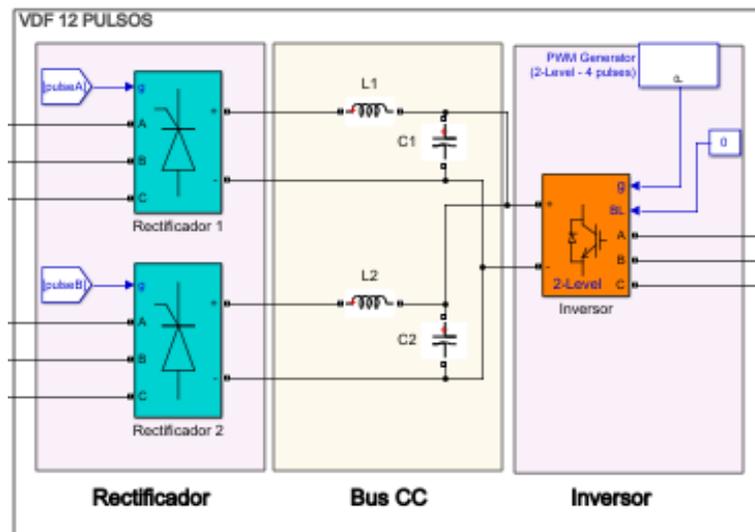


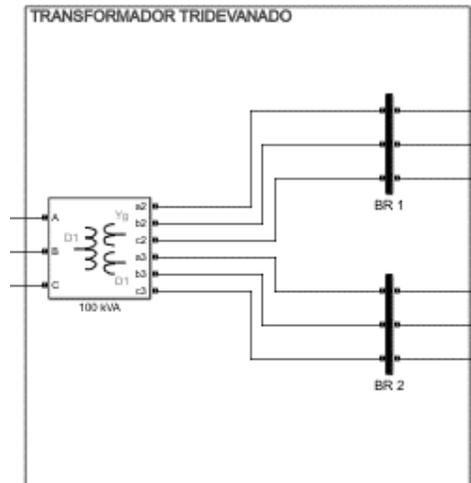
Figura 31. Formas de onda de tensión y corriente, espectro de frecuencia de tensión y corriente, VFD 6 pulsos. Fuente: Elaboración propia

7.2 Variador de velocidad de 12 pulsos.

El variador de velocidad 12 pulsos se desarrolló con base al variador de velocidad de 6 pulsos, como se muestra en la Figura 32, con la diferencia en la parte de rectificación y alimentación de estos, dado que esta etapa se diseñó con dos rectificadores de 6 pulsos, activados los tiristores con un par de generador de pulsos desfasados entre sí, la integración de alimentación de los rectificadores con un transformador tridevanado con entrada en delta, y salida en estrella con tierra salida y la otra salida en delta con un desfase entre estas de 30 grados, como se muestra en la Figura 33, con el fin de mitigar los armónicos 5° y 7°.



*Figura 32. Estructura del variador simulado de 12 pulsos.
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 33. Transformador tridevanado. Configuración D-Y-D.
Fuente: Elaboración propia*

7.3 Rectificador.

Para la simulación de la etapa de conversión de onda CA-CC se utilizó dos bloques de puente universal (R1, R2) configurado con tiristores, como se muestra en la Figura 32, generando un tren de pulsos por ciclo A y B, para el disparo de los tiristores se generó con el bloque de generación de pulsos, como se muestra en la Figura 34, usando el bloque de rampa y un proceso de cálculo para la obtención de la frecuencia (ω) con el fin de lograr la frecuencia del sistema trifásico y desfase de ondas, dando como resultado el proceso de rectificación de onda completa, obteniendo a la salida de los rectificadores una onda en tensión en CC. Configurando R1 y R2 con los parámetros mostrados en la Figura 30.

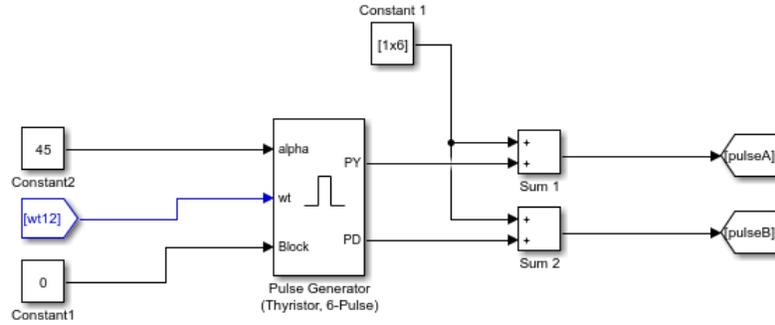


Figura 34. Generador de pulsos A y B, para activación de tiristores. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en la etapa de rectificación la gráfica de pulsos para la activación de los tiristores para la conversión de señal CA-CC, como se muestra en la Figura 35.

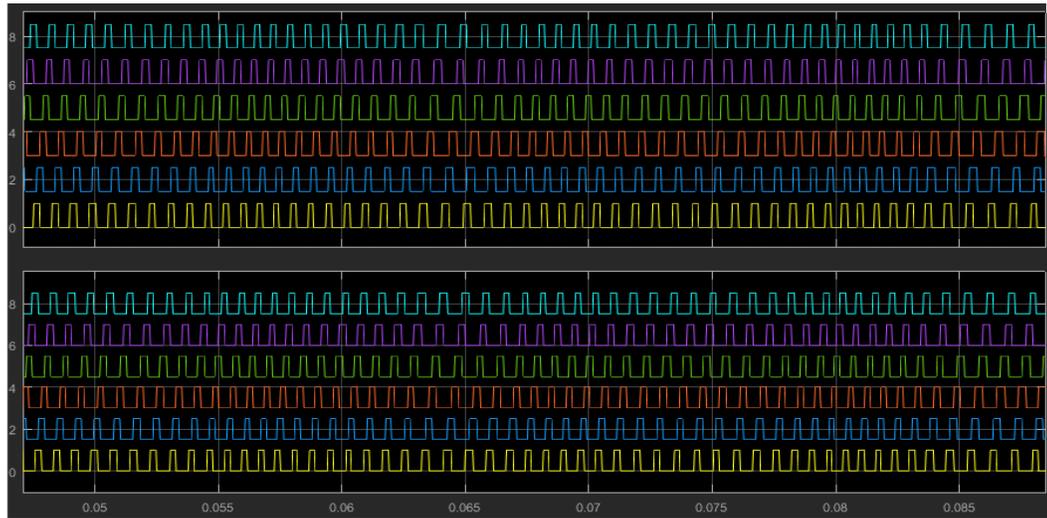


Figura 35. Tren de pulsos para activación de tiristores para R1 y R2 respectivamente. Fuente: Elaboración propia

Obteniendo el espectro de armónicos de tensión y corriente, además de las señales de onda distorsionadas en el rectificador 1, como muestra la Figura 36, y en el rectificador 2 como se muestra en la Figura 37.

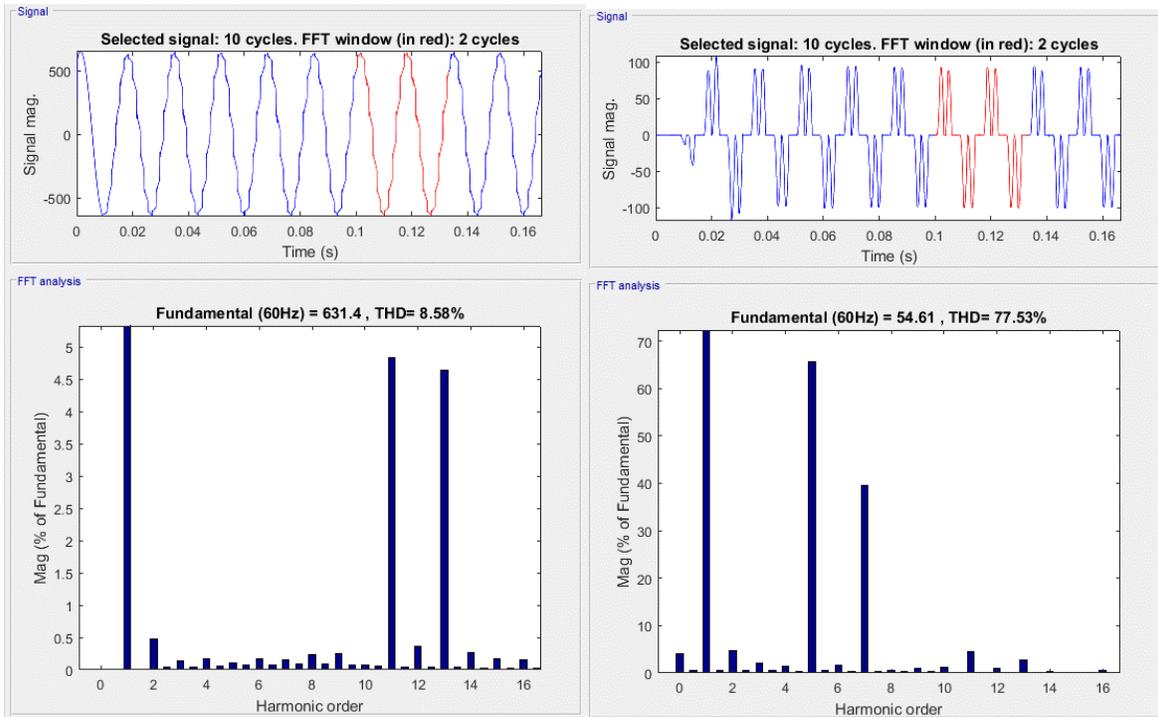


Figura 36. Formas de onda de tensión y corriente, espectro de frecuencia de tensión y corriente, entrada Rectificador 1. Fuente: Elaboración propia

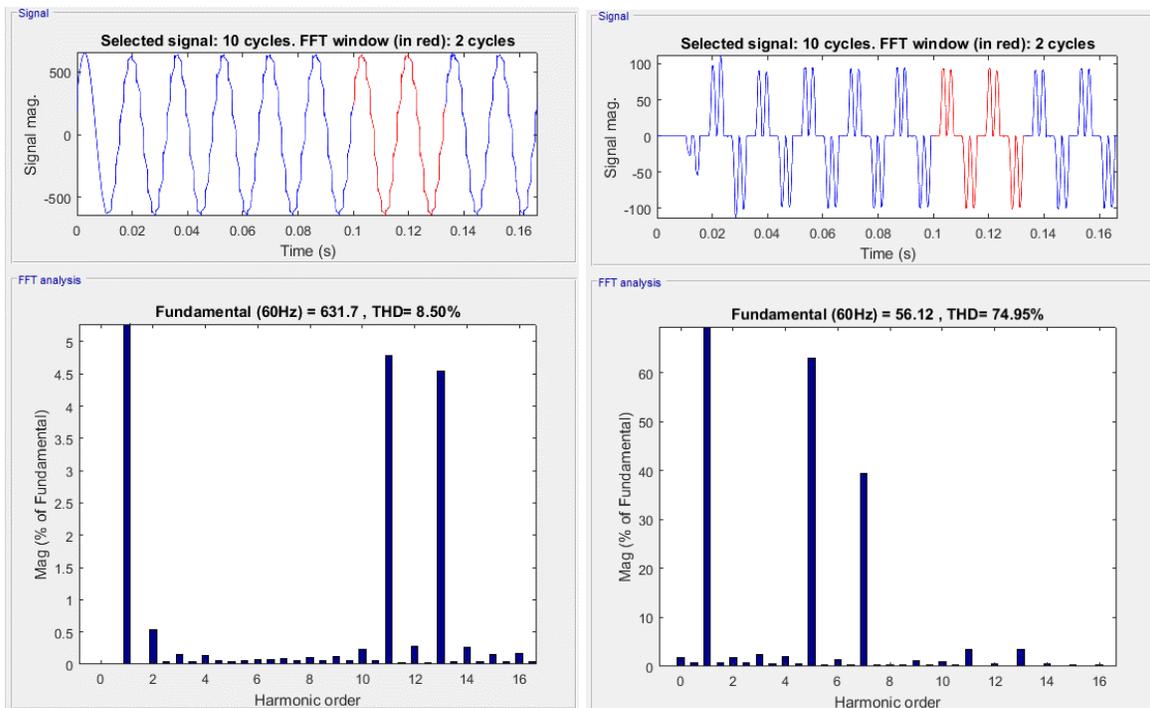


Figura 37. Formas de onda de tensión y corriente, espectro de frecuencia de tensión y corriente, entrada Rectificador 2. Fuente: Elaboración propia

Para la simulación del Bus CC y el inversor se utilizó la misma configuración del variador de 6 pulsos, teniendo en cuenta la conexión en paralelo de las salidas de rectificación R1 y R2, como se muestra en la Figura 32.

Simulado el sistema del VFD de 12 pulsos se han obtenido el espectro en frecuencia de los armónicos individuales en tensión y corriente, además de las muestras de las formas de onda distorsionada de tensión y corriente en la entrada del transformador tridevanado, como se muestra en la Figura 38.

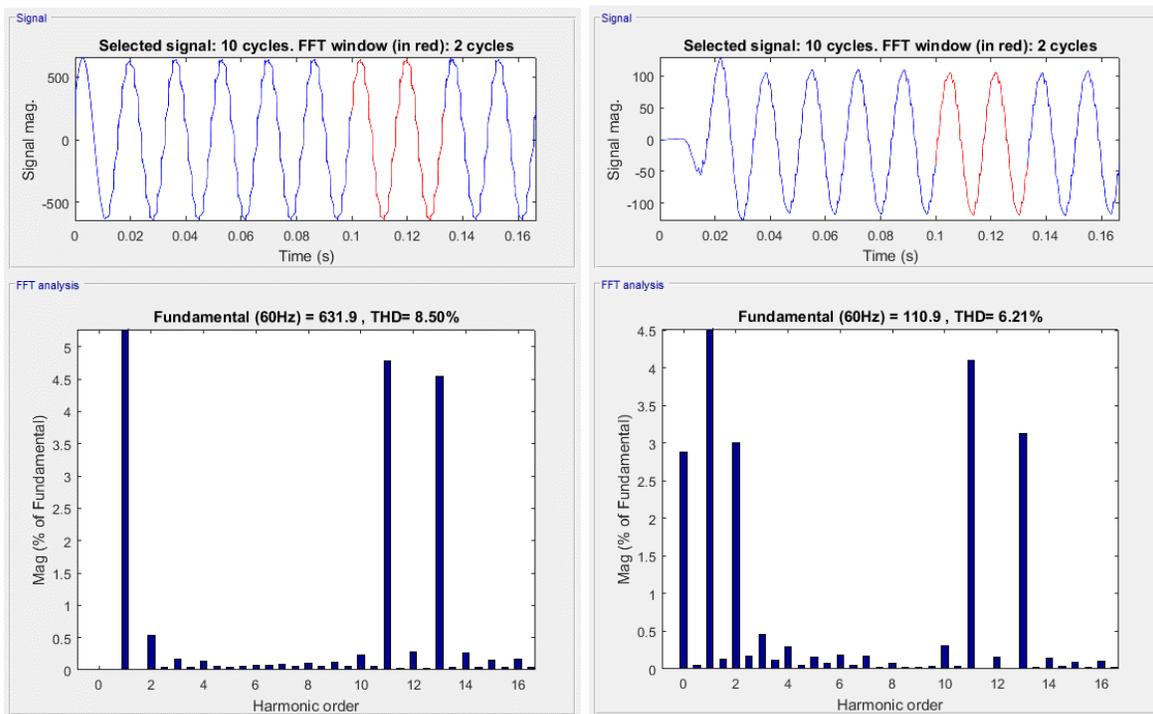


Figura 38. Formas de onda de tensión y corriente, espectro de frecuencia de tensión y corriente, VFD 12 pulsos. Fuente: Elaboración propia

7.4 Filtro pasivo (pasa bajas).

Se desarrolló en el software de simulación de MATLAB un filtro pasivo del tipo pasa bajas, véase Figura 39, sintonizado al 5° armónico a un 94% de su valor (300 Hz, siendo este a 282 Hz), con el objetivo de mitigar el 5° armónicos producido por el VFD, haciendo énfasis al

desarrollo teórico para la obtención de los valores de resistencia e inductancia necesarios para el desarrollo de éste.

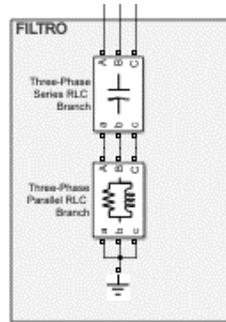


Figura 39. Filtro pasivo. Fuente: Elaboración propia

Simulado el sistema del filtro pasivo se han obtenido el espectro en frecuencia de los armónicos individuales en corriente, además de las muestras de las formas de onda distorsionada aguas arriba del filtro y en la entrada del VDF, como se muestra en la Figura 40, logrando mitigar la magnitud del armónico 5^o y sucesivo de este.

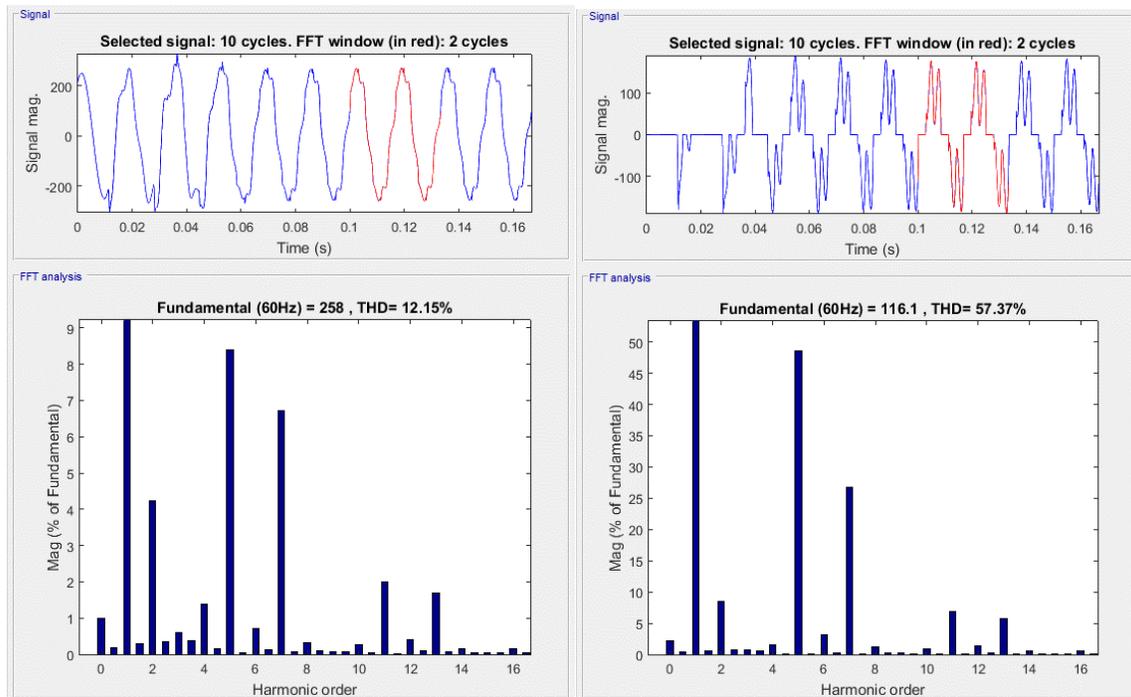


Figura 40. Espectro de frecuencia de corriente (izq. Aguas arriba del filtro; der. Entrada del VFD). Fuente: Elaboración propia

7.5 Resultado de simulación.

Utilizando el diagrama unifilar de la Figura 41, se obtienen los valores de armónicos de individuales de tensión y valor del THDv, como muestra la Figura 42, y los armónicos individuales de corriente y valor del THDi, como muestra la Figura 43.

Tabla 6.

Datos motor 150 HP conectado en VFD.

Motor 1 - VFD	
Parámetro	Valor o característica
Potencia VFD	150 HP
Frecuencia	60 Hz
Tensión	440 - 460 V
Corriente	140,61 A
Torque	101,27
Factor de potencia	85%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.

Datos motor 150 HP conectado en Arrancador suave.

Motor 2 - VFD	
Parámetro	Valor o característica
Potencia VFD	150 HP
Frecuencia	60 Hz
Tensión	440 - 460 V
Corriente	140,61 A
Torque	101,27
Factor de potencia	85%

Fuente: Elaboración propia

De los datos de la Tabla 6 y Fuente: Elaboración propia

Tabla 7, se realizó la simulación para la obtención de los datos necesarios para el análisis de generación de armónicos por el uso del variador de velocidad, además de la incidencia de la UPS de 30 kVA que se muestra en el diagrama unifilar de la Figura 41.

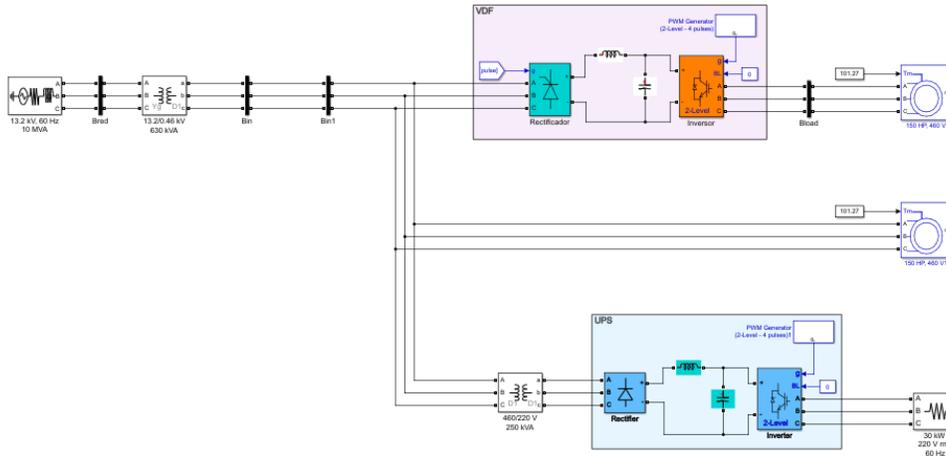


Figura 41. Diagrama unifilar de estación de servicios en Simulink.
Fuente: Elaboración propia

Teniendo por resultado los datos de la

Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 8.

Resultados de armónicos individuales de tensión y THDv.

Orden de Armónico	Porcentaje de armónico [%]
THD	3,75
H02	0,12
H03	0,04
H04	0,04
H05	2,5
H06	0,1
H07	1,53
H08	0,07
H09	0,02
H10	0,05
H11	1,14
H12	0,01

H13	0,74
H14	0,06
H15	0,02
H16	0,01

Tabla 9.

Resultado de armónicos individuales de corriente y THDi.

Orden de Armónico	Porcentaje de armónico [%]
THD	3,75
H02	0,12
H03	0,04
H04	0,04
H05	2,5
H06	0,1
H07	1,53
H08	0,07
H09	0,02
H10	0,05
H11	1,14
H12	0,01
H13	0,74
H14	0,06
H15	0,02
H16	0,01

Fuente: Elaboración propia

Los anteriores valores se encuentran reflejados en la Figura 42 y Figura 43. Donde se puede evidenciar los armónicos individuales más recurrentes de acuerdo con lo establecido en la teoría y en los estándares.

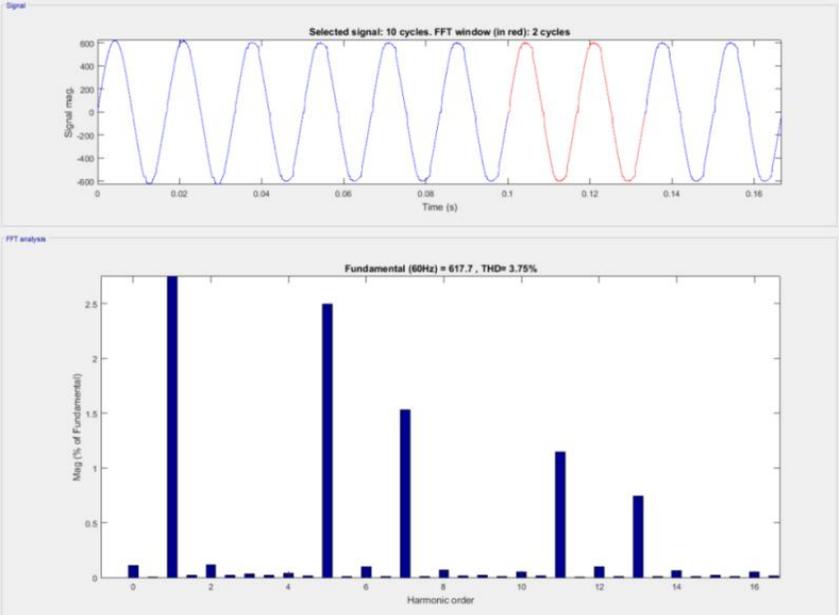


Figura 42. Gráfica de forma de onda y espectro de armónicos de tensión. Simulación diagrama unifilar. Fuente: Elaboración propia

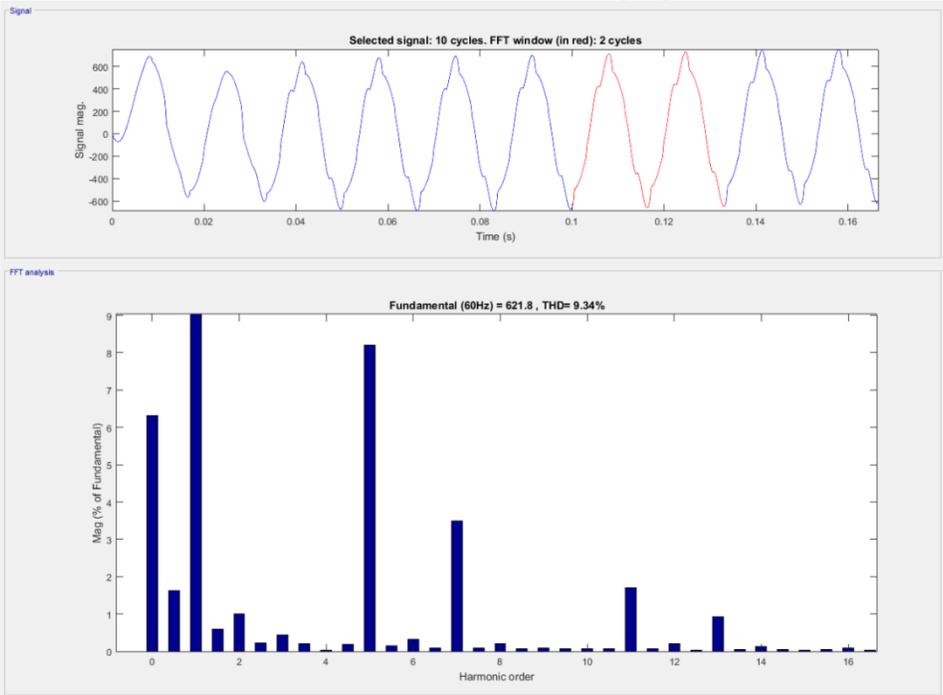


Figura 43. Gráfica de forma de onda y espectro de armónicos en corriente. Simulación diagrama unifilar. Fuente: Elaboración propia

7.6 Resultado de caso de estudio real.

Aplicando la normativa internacional de IEEE Std 1159 de 1995, THD de tensión debe estar por debajo del 8% para niveles de tensión inferiores a 1kV. En la Figura 45, se evidencia que el valor porcentual de distorsión armónica en tensión es de 5.65% (Línea B), la cual se toma de referencia para la comparación con los datos de simulación. Valor que se encuentra dentro del rango establecido. Además, se evidencia la presencia de armónicos individuales de tensión como el 5° y 7°, con 3.21% y 2.67% respectivamente. Deformando la onda de tensión como se muestra en la Figura 44.

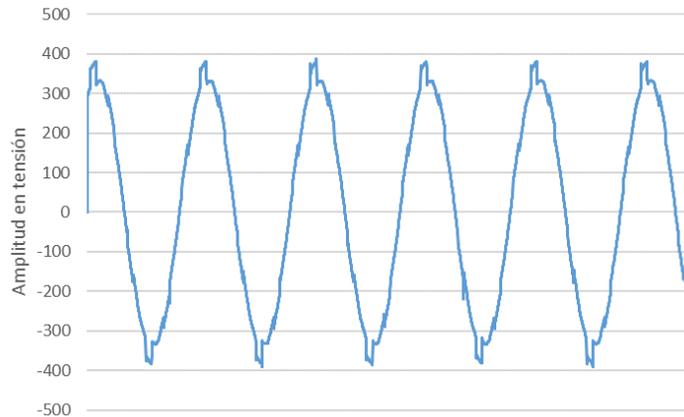


Figura 44. Forma de onda de tensión. Fuente: Elaboración propia

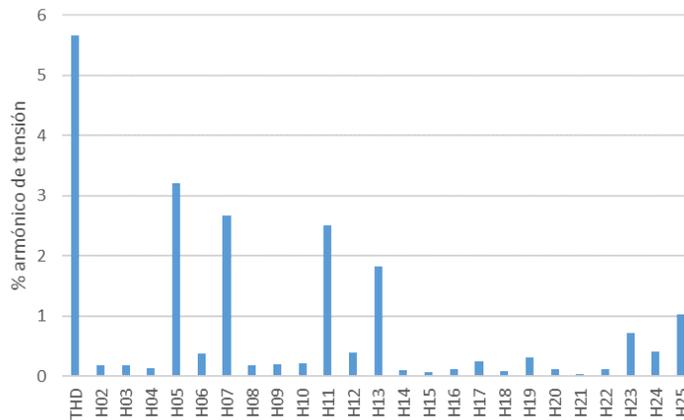


Figura 45. Espectro de armónicos en tensión. Fuente: Elaboración propia

Aplicando la normativa internacional de IEEE Std 1159 de 1995, THD de corriente debe estar por debajo del 20%. En la Figura 47, se evidencia que el valor porcentual de distorsión armónica en corriente es de 10.66% (Línea B), la cual se toma de referencia para la comparación con los datos de simulación. Valor que se encuentra dentro del rango establecido. Además, se evidencia la presencia de armónicos individuales de tensión como el 5° y 7°, con 8.81% y 5.26% respectivamente. Deformando la onda de corriente como se muestra en la Figura 46.

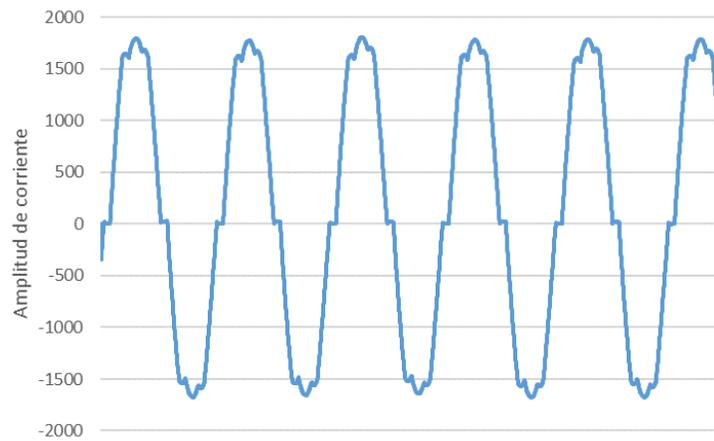


Figura 46. Forma de onda de corriente. Fuente: Elaboración propia

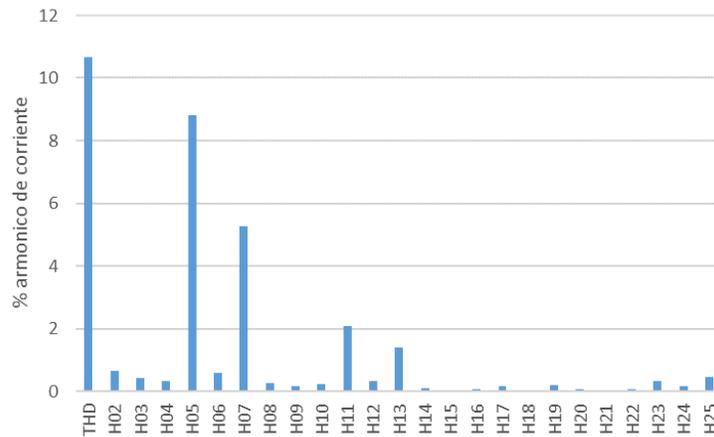


Figura 47. Espectro de armónicos de corriente. Fuente: Elaboración propia

7.7 Análisis de resultados de simulación vs medición.

De acuerdo con los datos obtenidos se hace notoria la similitud de los datos obtenidos en la simulación teniendo como referencia los datos obtenidos por el analizador de redes DRANETZ HDPQ VISA (Dranetz, 1834). Donde discrepo las variaciones o alzas en los datos reales para la simulación donde se tomó los datos de luminarias y otras conexiones dentro de la S/E y oficinas que aportan a los valores de armónicos en la red de distribución interna de la estación de servicio. Sabiendo esto se puede decir que los circuitos para la simulación y estudio de armónicos generados por variadores de velocidad mostrados en este trabajo pueden ser utilizados para análisis y planteamiento de soluciones a problemas de calidad de potencia basados en disturbios por variadores de velocidad.

Como se observa en la Tabla 10, el estudio se concentró en el análisis de las armónicas individuales tanto en tensión como en corriente en el 5°, 7°, 11 y 13. Con el fin de revisar el comportamiento de aporte de armónicos del variador de velocidad.

Tabla 10.

Resultado de error en armónicos de corriente.

	Treal	Tsim	% Error
THD	10,662	9,34	12,40%
H02	0,6655	1	50,26%
H03	0,4232	0,43	1,61%
H04	0,342	0,03	91,23%
H05	8,811	8,21	6,82%
H06	0,5818	0,32	45,00%
H07	5,265	3,49	33,71%
H08	0,26826	0,2	25,45%
H09	0,18372	0,09	51,01%
H10	0,24136	0,08	66,85%
H11	2,0717	1,71	17,46%
H12	0,3265	0,01	96,94%
H13	1,403	0,92	34,43%
H14	0,09889	0,13	31,46%
H15	0,05583	0,03	46,27%
H16	0,06838	0,03	56,13%

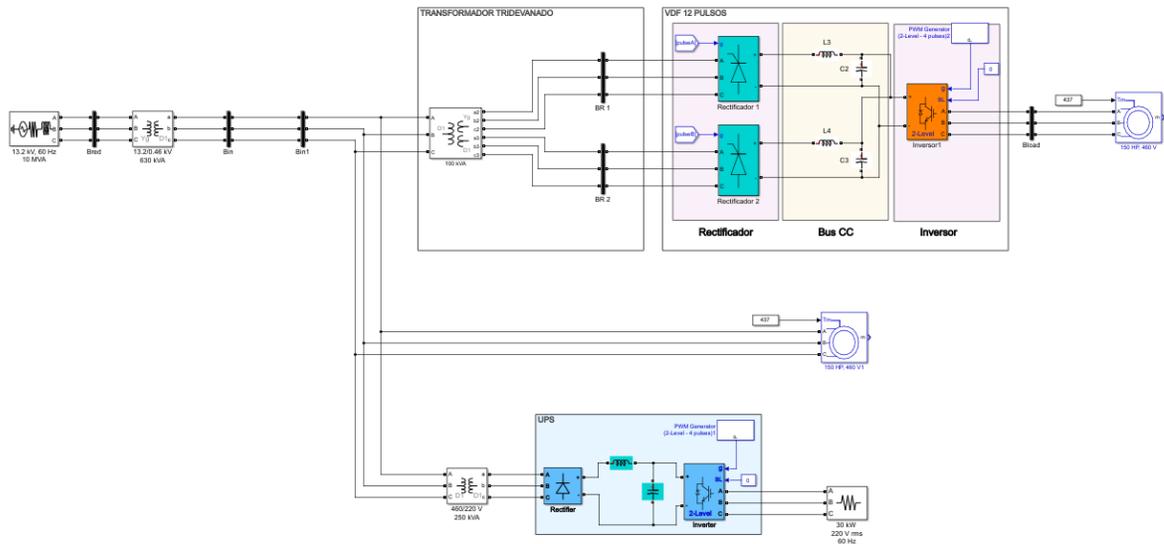
Fuente: Elaboración propia

7.8 Respuesta a soluciones.

En esta etapa se simularon dos sistemas como métodos para la reducción de los efectos producidos por los armónicos. Siendo la primera solución propuesta, el cambio de tecnología por un variador de frecuencia de 12 pulsos, con el fin de eliminar los armónicos 5° y 7°, los cuales son los que producen mayor efecto en las máquinas rotativas, SAI debido a l porcentaje elevado del TDD, entre otros equipos, mejorando así la calidad de la forma de onda de tensión y corriente del sistema eléctrico. La segunda solución propuesta fue la instalación de un filtro pasivo sintonizado a un 90% del 5° armónico, con el fin de mitigar del armónico 5° en adelante y evitar problemas mayores de resonancia.

7.8.1 Cambio tecnología por variador de frecuencia de 12 pulsos.

De acuerdo con el diagrama unifilar mostrado en la Figura 19, se procedió al cambio del VFD de 6 pulsos por el VFD de 12 pulsos como se muestra en el diagrama unifilar en la Figura 48, simulado en el software Simulink de Matlab.



*Figura 48. Diagrama unifilar de estación de servicio con VFD 12 pulsos.
Fuente: Elaboración propia*

Simulado el nuevo sistema de carga, se obtuvo los resultados para el espectro de frecuencia en tensión, como muestra la Figura 49, y para el espectro de frecuencia de corriente, como muestra la Figura 50.

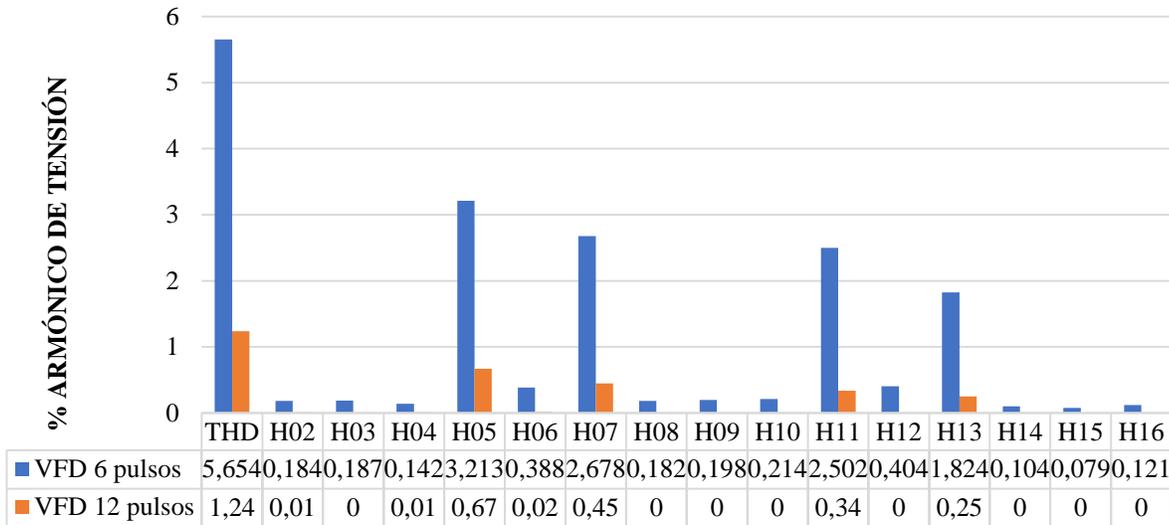


Figura 49. Comparación de resultados de simulación del espectro de frecuencia de tensión, solución VFD 12 pulsos. Fuente: Elaboración propia

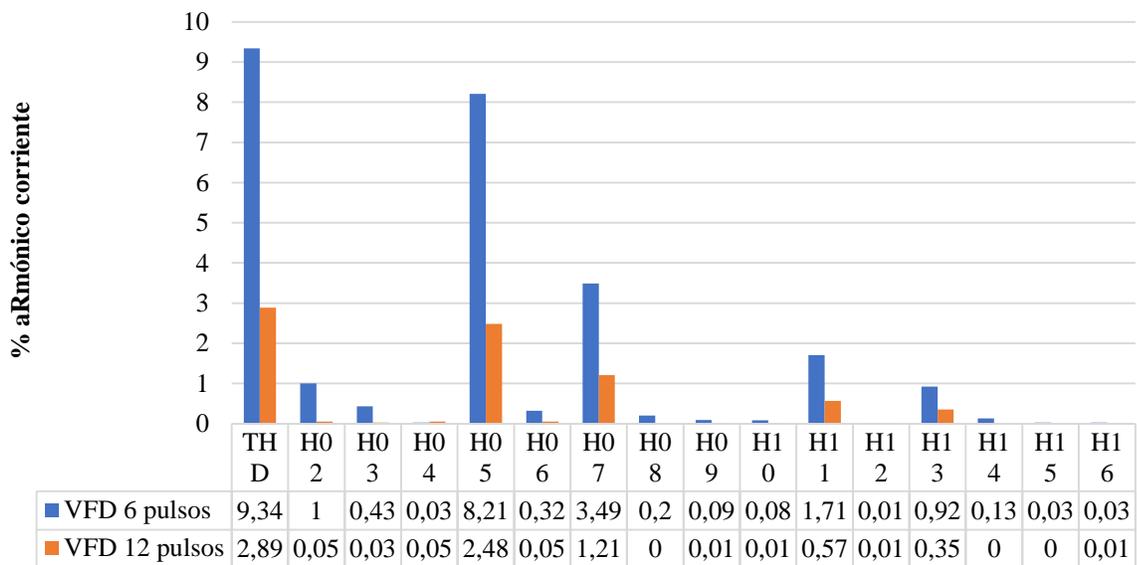
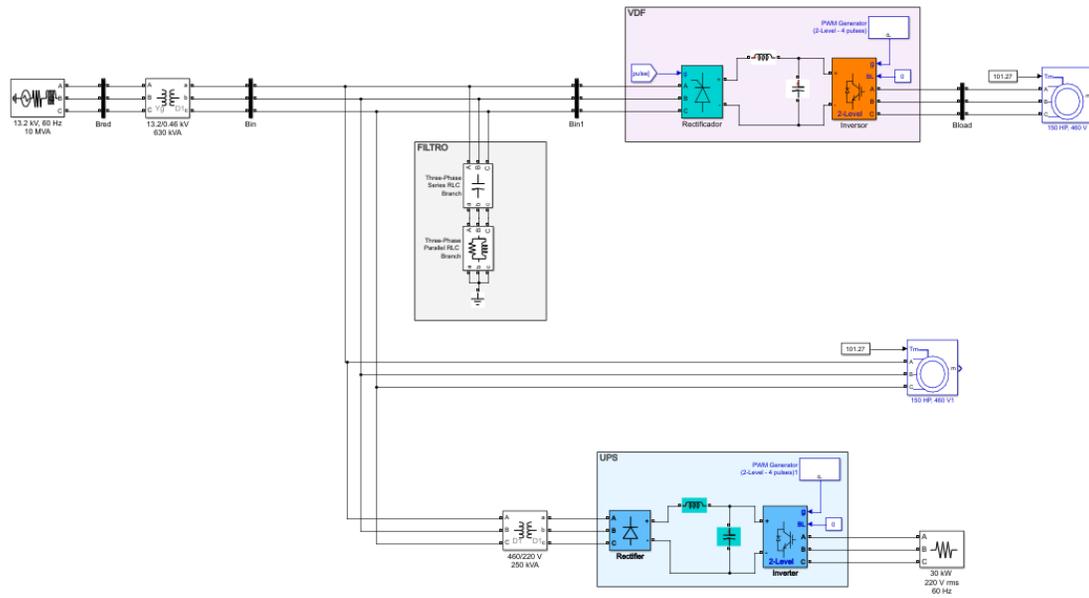


Figura 50. Comparación de resultados de simulación del espectro de frecuencia de tensión, solución VFD 12 pulsos. Fuente: Elaboración propia

De las Figura 25 y Figura 26, se puede decir que la aplicación del cambio de tecnología dio resultados para la mitigación de los armónicos individuales 5° en un 69.8% y del 7° en un 65.3%, teniendo en cuenta que estos valores no tienden a cero por la presencia del SAI tal como se muestra en el diagrama unifilar, como muestra la Figura 48.

7.8.2 Instalación filtro pasivo.

De acuerdo con el diagrama unifilar mostrado en la Figura 41, se procedió a la instalación de un filtro pasivo aguas arriba del VFD de 6 pulsos, como se muestra en el diagrama unifilar en la Figura 51, simulado en el software Simulink de Matlab.



*Figura 51. Diagrama unifilar de estación de servicio con filtro pasivo.
Fuente: Elaboración propia*

Simulado el nuevo sistema de carga con el filtro pasivo a la entrada del VFD de 6 pulsos, se obtuvo los resultados para el espectro de frecuencia en tensión, como muestra la Figura 52 y para el espectro de frecuencia de corriente, como muestra la Figura 53.

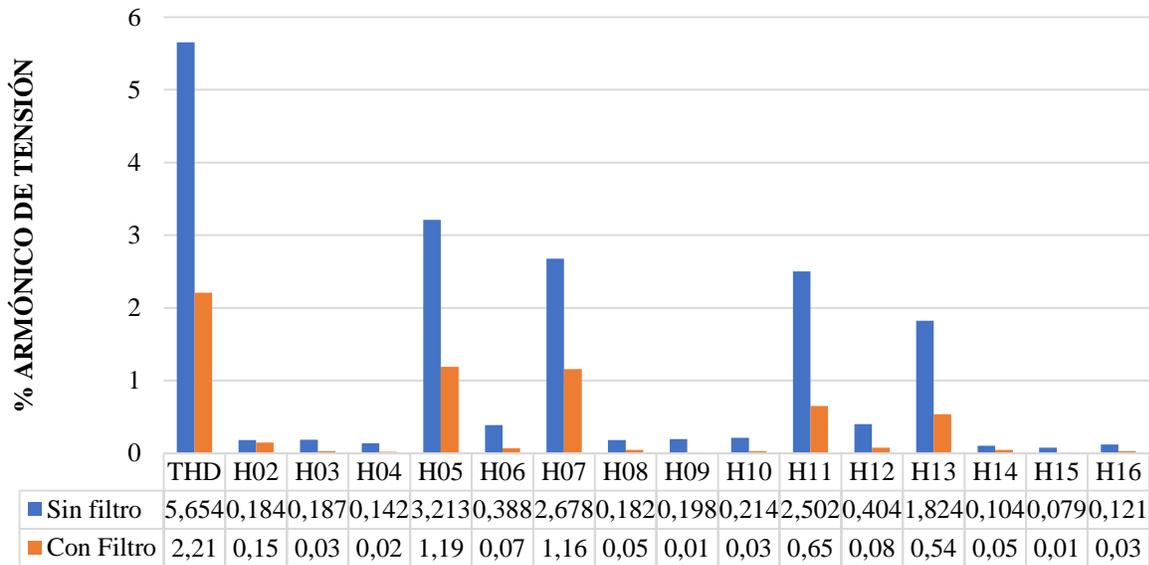


Figura 52. Comparación de resultados de simulación del espectro de frecuencia de tensión, con filtro pasivo. Fuente: Elaboración propia

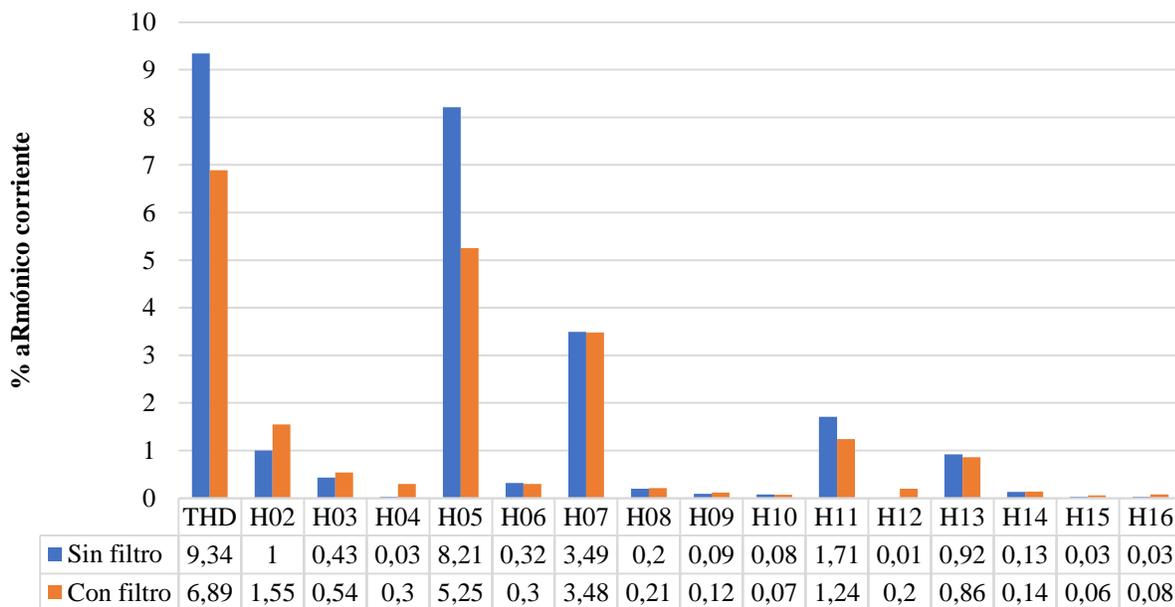


Figura 53. Comparación de resultados de simulación del espectro de frecuencia de corriente, con filtro pasivo. Fuente: Elaboración propia

Teniendo presente que los porcentajes de armónicos de corriente aguas arriba del VFD para el 5° y 7° armónico, como muestra la Figura 54, se encuentran por encima del 40% y 25%

respectivamente, la cual se corrige con la aplicación del filtro pasivo para la mitigación del 5° armónico.

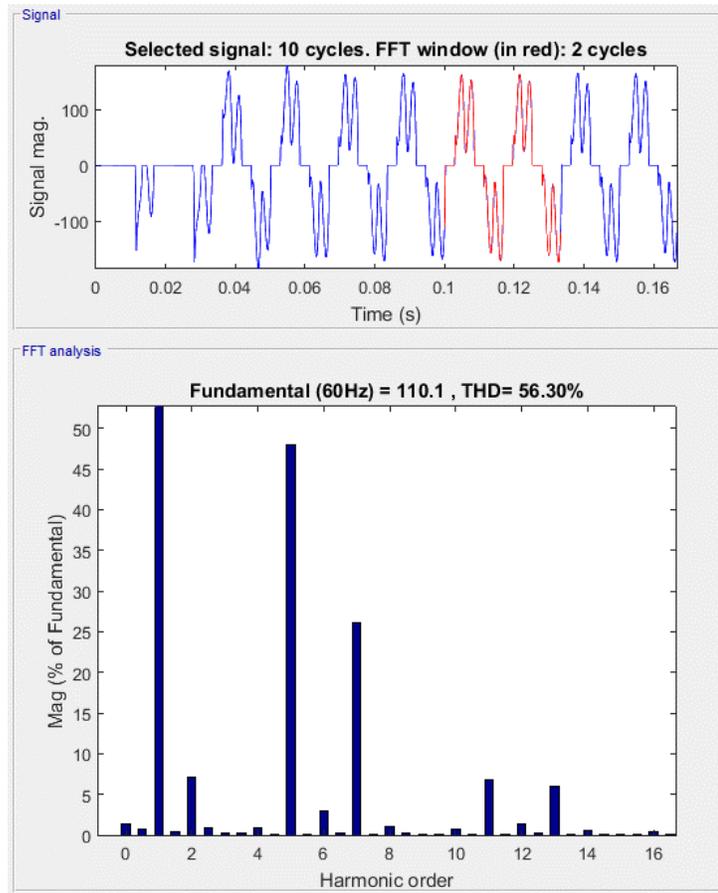


Figura 54. Espectro de frecuencia de corriente en la entrada del VFD de 6 pulsos.
Fuente: Elaboración propia

7.9 Cuadro comparativo técnico-económico.

Para el sistema revisado en el presente trabajo la solución aplicada corresponde a la instalación del filtro pasivo, directamente en el VFD de 6 pulsos del sistema actual, de acuerdo con el diagrama unifilar, tanto en diferencia de precios como en calidad de servicio y solución como lo muestra la tabla 11.

Tabla 11.

Cuadro comparativo de precios de tecnologías.

EQUIPO	MARCA	POTENCIA (HP)	PRECIO (EUROS)	PRECIO (COP)
Filtro pasivo	SCHNEIDER	150	€ 25.512	\$ 76.537.350
Variadores de frecuencia línea SVX (6 pulsos)	EATON	150		\$ 89.647.600
Variadores de frecuencia línea DG1 (12 pulsos)	EATON	150		\$ 101.709.500

Fuente: Elaboración propia

8. Conclusiones

El presente documento permitió evaluar las técnicas de reducción del efecto de los armónicos producidos por los variadores de frecuencia de seis pulsos utilizando la herramienta SIMULINK de MATLAB para la caracterización de las componentes armónicas generadas por variadores de frecuencia tanto de seis pulsos. Lo anterior permitió la caracterización de los armónicos generados en los equipos eléctricos por variadores de frecuencia de seis pulsos al igual que identificar en la literatura los efectos de estos en los sistemas eléctricos.

La investigación también consideró la revisión de técnicas para la reducción de los efectos armónicos generados en variadores de frecuencia considerando lo contemplado en el estándar internacional IEEE std 519 de 2014 y los documentos normativos nacionales tales como la CREG 070 de 1998 y las normas técnicas colombianas NTC 5000, NTC 5001 donde se consideran las contribuciones armónicas en instalaciones de uso final.

Se desarrollaron simulaciones de variadores de frecuencia de seis pulsos y de las técnicas para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia utilizando SIMULINK (MATLAB), logrando identificar la mejor opción técnica-económica para la reducción de los efectos de los armónicos generados por los variadores de frecuencia mediante el caso de estudio considerado. Se logró demostrar mediante la modelación y el caso de simulación de filtro armónico, la reducción de los armónicos 5, 7 11 y 13 en el sistema eléctrico considerado.

9. Referencias

- Aamir Muhammad. (2016). Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1395–1410. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.335>
- ABB. (2012). Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 543–550. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020>
- Aguilar, D. (2004). Semiconductores de potencia. *Universidad Jaén*, 36.
- Ángel, M. (2005). MONITORIZACIÓN DE INTERRUPCIONES y, (2).
- Bunjongjit, S. (2017). Analysis of harmonics in indoor Lighting System with LED and fluorescent luminaire. *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017*, 2129–2132. <http://doi.org/10.1109/IFEEC.2017.7992380>
- Carlos Alberto. (2015). Soldadura basica.
- Castolin Eutectic. (2013). Equipos de soldadura.
- Chakraborty, S. (2013). *Fundamentals of Power Electronics. Green Energy and Technology* (Vol. 59). <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-5104-3>
- Córdoba, S. (2018). Desarrollo de un variador de velocidad trifásico : enfoque de programación multitarea Develop of speed three-phase variator : proگرامing focused on multitasking, 26, 213–224.
- CREG 024. (2005). Resolución CREG 024 de 2005. *Resolución CREG-024*, 10.
- CREG 070. (1998). Resolución CREG 070 de 1998, 63.
- Cummings, P. G. (1986). Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22(6),

1121–1126. <http://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504843>

Díaz-perez, S., Gomez charris, Y., Silva-ortega, J., & Noriega-angarita, E. (2017). Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de America Latina. *Espacios*, 38(58), 22–34.

Díaz, R. (2014). Recomendaciones Prácticas para la Evaluación de la Carga de un Transformador Sometido a Corrientes No Sinusoidales. *Inge Cuc*, 10(1), XX–XX.

Dranetz. (1834). Plataforma de Energía (EP1).

Estrada, E. (2017). Efectos de los armonicos.

Filipović-Grčić, D. (2014). Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*.

<http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.11.005>

Gómez, J. (2016). Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal. *Tecnura*, 20(48), 29–40.

<http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a02>

Hoyos Velasco, F. E., Candelo, J. E., & Silva Ortega, J. I. (2018). Performance evaluation of a DC-AC inverter controlled with ZAD-FPIC. *Inge Cuc*, 14(1), 9–18.

<http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.01>

IEEE Std 519. (2014). IEEE Std 519-2014. *ANSI/IEEE Std. 519, 2014*.

<http://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

IEEE Std C57.12.80. (2010). *IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers. IEEE Std C57.12.80-2010 (Revision of IEEE Std C57.12.80-2002)* (Vol.

2010). <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5672286>

J. Desmet. (2005). *Selección y Clasificación de los Transformadores*.

- José Dariel Arcila. (2014). Armónicos En Sistemas Eléctricos. *Ieb S.a*, 1–26.
- Jürgen Stumpp. (2011). Motores de corriente alterna. *Departamento de SAP*, 0–25.
- Justo, J. J. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 387–405.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067>
- Mario Salvador. (2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones.
- Mora, B. (2010). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*. Xi. Núm, 2, 189–198.
- Moyer, E. J. (2010). Basics on electric motors, 11.
- NTC 1340, N. (2013). NTC 1340, (571).
- NTC 5000, N. (2002). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5000, 51.
- NTC 5001, N. (2008). NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica, (571), 60.
- Pums, W. (2016). The rise of the electric motor. *World Pumps*. [http://doi.org/10.1016/S0262-1762\(16\)30133-X](http://doi.org/10.1016/S0262-1762(16)30133-X)
- Quispe, E. C., López, I. D., Ferreira, F. J. T. E., & Sousa, V. (2018). Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(3), 1412–1422. <http://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1412-1422>
- Rojas, H. (2014). Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos. *Ingeniería*, 19(2), 6–11. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2014.2.a07>

- Santos, V. S. (2012). *Procedimiento para determinar la eficiencia de motores asincrónicos en presencia de desbalance y armónicos en la tensión.*
- Santos, V. S., Quispe, C., Member, S., Góm, J. R., Viego, P. R., Jurado, A., ... Orm, I. I. P. R. F. (2013). Bacterial Foraging Algorithm Application for Induction Motor Field Efficiency Estimation under Harmonics and Unbalanced Voltages. In *International Electric Machines & Drives Conference* (pp. 1108–1111). Chicago: IEEE.
- Shudarek, T. (2018). Harmonic filter topologies for low DC bus capacitance of 6-pulse rectifier front end adjustable speed drives. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2018–March*, 2315–2322.
<http://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341339>
- Silva-ortega, J. I., Candelo-becerra, J. E., Umaña-ibañez, S. F., Mejia-taboada, M. A., & Palacio-bonill, A. R. (2016). Power Distribution Transformers using Natural Ester Fluids as Dielectric and Coolant. *Inge Cuc*, 12(2), 79–85.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.08>
- Silva-ortega, J. I., Cervantes-bolivar, B., Isaac-millan, I. A., & Valencia-ochoa, G. (2018). Demand Energy Forecasting Using Genetic Algorithm to Guarantee Safety on Electrical Transportation System. *Chemical Engineering Transactions*, 67, 787–792.
<http://doi.org/10.3303/CET1867132>
- Silva-Ortega, J. ivan, Hernandez-Herrera, H., & Gomez-Sandoval, E. (2015). Evaluation and Modeling of the Variation of Electromagnetic Field on the Cross Section of a Transmission Line Using Finite Difference Method. *Systematics, Cybernetics and Informatics*, 13(3), 89–93.
- Silva, J., Ospino, A., & Balbis, M. (2013). Set of Elements, Parameters and Considerations to

Get Successful Inclusion of the Smart Grids in Colombian Power Systems. In *IMETI 2013* (Vol. 5, pp. 125–134).

Sousa-Santos, V. (2015). *presencia de desbalance y armónicos en la tensión Procedimiento para determinar la eficiencia de motores asincrónicos en presencia de desbalance y armónicos en la tensión Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Especialidad : In.* Universidad Central de las Villas.

Sousa, V., Hernández, H., Quispe, E. C., Gómez, J. R., & Viego, P. R. (2017). Analysis of harmonic distortion generated by PWM motor drives. In *3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017* (pp. 1–6). bogotá: IEEE.
<http://doi.org/10.1109/PEPQA.2017.7981644>

Sousa, V., Herrera, H. H., Quispe, E. C., Viego, P. R., & Gómez, J. R. (2017). Harmonic distortion evaluation generated by PWM motor drives in electrical industrial systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(6), 3207–3216.
<http://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3207-3216>

Sousa, V., Viego, P. R., Gómez, J. R., Quispe, E. C., & Balbis, M. (2016). Shaft Power Estimation in Induction Motor Operating under Unbalanced and Harmonics Voltages. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2309–2315. <http://doi.org/10.1109/TLA.2016.7530427>

Sousa, V., Viego, P. R., J. R, G., mez, Quispe, E. C., & Balbis, M. (2015). Estimating induction motor efficiency under no-controlled conditions in the presences of unbalanced and harmonics voltages. In *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 567–572).
<http://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7400434>

Uddin, S. (2012). An Analysis of Harmonics from LED Lamps, (June), 837–840.

Valencia, D., Quispe, E., & Sousa, V. (2014). Estudio del efecto de la distorsión armónica de tensión sobre la operación del motor trifásico de inducción en estado estacionario.

Energética, 43(Junio), 67–77.

WEG. (1989). Automatización electrónica y calidad de potencia, 5.