

**MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO
EN EL CONTROL PREDICTIVO DE
CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE
POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO
EN EL CONTROL PREDICTIVO DE
CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE
POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: BRYAN FERNANDO TANA ÁLVAREZ
TUTOR: SILVANA FABIOLA VARELA CHAMORRO

Quito -Ecuador
2022

Bryan Fernando Tana Álvarez

MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Bryan Fernando Tana Álvarez (Y'1996– J'05). Realizó sus estudios de nivel secundario en Unidad Educativa Municipal “Oswaldo Lombeyda” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la mitigación de armónicos basado en el control predictivo de corriente mediante un filtro de potencia activo conectado al sistema de distribución. btanaa@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Silvana Fabiola Varela Chamorro (Y'1975). Se graduó en Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2001 y de Máster en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente se encuentra trabajando como docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Transitorios Eléctricos, Sistemas de Distribución. svarela@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bryan Fernando Tana Álvarez con documento de identificación N° 1724383334 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Bryan Fernando Tana Álvarez
1724383334

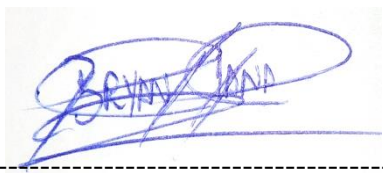
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Bryan Fernando Tana Álvarez con documento de identificación No. 1724383334, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Mitigación de armónicos basado en el control predictivo de corriente mediante un filtro de potencia activo conectado al sistema de distribución”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Bryan Fernando Tana Álvarez

1724383334

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Silvana Fabiola Varela Chamorro con documento de identificación N° 1713565818, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, realizado por Bryan Fernando Tana Álvarez con documento de identificación N° 1724383334, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Silvana Fabiola Varela Chamorro, MSc
1713565818

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco Teórico	3
	2.1 Fluctuaciones, Desequilibrio y Calidad de Energía.....	3
	2.1.1 Armónicos.....	3
	2.1.2 Efectos de los Armónicos en la Red	4
	2.1.3 Distorsión Armónica Total (THD)	5
	2.1.4 Comportamiento de la Distorsión Armónica y Eficacia de Energía	5
	2.2. Calidad de Energía en el Sistema Eléctrico.....	5
	2.3. Métodos de Compensación Armónica	6
	2.3.1 Filtro de Potencia Pasivo	6
	2.3.2 Filtro Activo de Potencia	6
	2.4. Inversor Trifásico	7
	2.5. Control Predictivo de Corriente	7
	2.5.1 Control Predictivo Basado en Modelos Para Inversores.....	8
	2.6. Control del Convertidor MPC.....	8
	2.6.1 Características a Tener en Cuenta Para el Control del MPC	8
	2.6.2 Esquema General de Control del Modelo MPC.....	9
	2.6.3 Principio de Operación del MPC	9
3	Planteamiento del Problema.....	10
	3.1 Modelamiento del Sistema de Prueba IEEE de 37 Barras	11
	3.2 Modelación de la Carga no Lineal en el Sistema	11
	3.3 Modelamiento del Filtro de Potencia Activo del Sistema	12
	3.4 Modelamiento del Controlador Predictivo de Corriente.....	13
4	Análisis de resultados	13
	4.1 Caso de Estudio.....	15
	4.1.1 Sistema de 37 barras en estado estable.....	15
	4.1.2 Carga no lineal conectada al transformador	15
	4.1.3 Resultados aplicando el filtro de potencia activo al transformador	17
	4.2.1 Carga no lineal alejada del transformador conectada en la barra 728	19
	4.2.2 Resultados con el filtro de potencia activo a la barra 728 del sistema.....	21
	4.3 Resultados del controlador predictivo de corriente del sistema.....	22
5	Conclusiones.....	23
	5.1 Trabajos futuros	24
6	Referencias.....	24

6.1 Matriz de Estado del Arte	27
6.2 Resumen de Indicadores	30
7 Anexos.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de oscilaciones armónicas debido a cargas no lineales.....	5
Figura 2: Esquema de un filtro pasivo conectado en paralelo.....	6
Figura 3: Esquema de un filtro activo conectado en paralelo.....	7
Figura 4: Esquema básico de un inversor trifásico.....	7
Figura 5: Esquema general del control MPC utilizado para inversores.....	9
Figura 6: Esquema de un controlador predictivo MPC.....	9
Figura 7: Diagrama de flujo para el sistema de mitigación de armónicos.....	10
Figura 8: Bloque del transformador de 4.8[kV] del sistema de 37 barras	11
Figura 9: Bloque parámetros de la barra del sistema de 37 barras.....	11
Figura 10: Bloque parámetros de línea del sistema de 37 barras	11
Figura 11: Bloque parámetros de carga del sistema de 37 barras	11
Figura 12: Carga no lineal	12
Figura 13: Inversor trifásico con formado por un puente de diodos	12
Figura 14: Filtro activo de potencia	13
Figura 15: Subsistema del filtro activo de potencia	13
Figura 16: Subsistema del MPC de corriente.....	13
Figura 17: Sistema de 37 barras con filtro de potencia activo para mitigar armónico.....	14
Figura 18: Sistema de distribución de 37 barras IEEE.....	15
Figura 19: Señal de voltaje del sistema de 37 barras en estado estable	15
Figura 20: Señal de voltaje del transformador conectado a una carga no lineal.....	16
Figura 21: Señal de corriente del transformador conectado a una carga no lineal.....	16
Figura 22: Espectro armónico de voltaje del transformador del sistema de 37 barras.....	16
Figura 23: Espectro armónico de corriente del transformador del sistema de 37 barras.....	17
Figura 24: Señal de corriente de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.....	18
Figura 25: Señal de voltaje de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.....	18
Figura 26: Espectro armónico de corriente del transformador con filtro de potencia activo... ..	18
Figura 27: Espectro armónico de voltaje del transformador con filtro de potencia activo	19
Figura 28: Señal de corriente de la barra 728 con perturbación por armónicos.....	19
Figura 29: Señal de voltaje de la barra 728 con perturbación por armónicos	19
Figura 30: Espectro armónico de corriente de la barra 728 del sistema de 37 barras	20

Figura 31: Espectro armónico de voltaje de la barra 728 del sistema de 37 barras	20
Figura 32: Señal de corriente de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo	21
Figura 33: Señal de voltaje de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo	21
Figura 34: Espectro armónico de voltaje de la barra 728 con filtro de potencia activo.....	21
Figura 35: Espectro armónico de corriente de la barra 728 con filtro de potencia activo.....	22
Figura 36: Señal de corriente del MPC del sistema de 37 barras.....	22
Figura 37: Señal de corriente del MPC conectado al transformador.	23
Figura 38: Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	30
Figura 39: Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	30
Figura 40: Indicador de solución - Estado del arte.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Niveles permisibles de armónicos según norma EN50160.....	4
Tabla 2: Comparación del porcentaje de armónicos en corriente con el analizador FFT	17
Tabla 3: Comparación del porcentaje de armónicos en voltaje con el analizador FFT	17
Tabla 4: Datos de THD de corriente del transformador según la norma EN50160 con FFT ..	18
Tabla 5: Datos de THD de voltaje del transformador según la norma EN50160 con FFT.....	19
Tabla 6: Filtro activo aplicando en la barra 728 con voltaje.....	20
Tabla 7: Filtro activo aplicando en la barra 728 con corriente.....	20
Tabla 8: Corriente en el transformador conectado con el filtro activo de potencia.	21
Tabla 9: Voltaje en el transformador conectado con el filtro activo de potencia.....	22
Tabla 10: Porcentaje de armónicos en diferentes escenarios	22
Tabla 11: Matriz estado del arte	27
Tabla 12: Datos de cargas del sistema IEEE de 37	31
Tabla 13: Datos del transformador del sistema IEEE de 37 barras.....	31
Tabla 14: Datos de las longitudes de líneas del sistema IEEE de 37 barras	31

MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Resumen

El siguiente documento presenta la investigación y el análisis del contenido armónico que puede presentar un sistema eléctrico de potencia de 37 barras estandarizado por la IEEE, la simulación y el análisis se lo realiza mediante el software MATLAB/Simulink, en el cual se analizará dos escenarios en los cuales el primero punto de estudio es el análisis de la influencia de la carga no lineal y la mitigación de la distorsión armónica en un nodo cerca del transformador, en este escenario se analizará el sistema en condiciones normales de operación, el nodo conectado a una carga no lineal y por último la aplicación del filtro de potencia activo en el sistema con la carga no lineal. El segundo escenario representa la influencia de la carga no lineal en un nodo distante al transformador, en este punto de estudio se analizará el sistema conectado a la carga no lineal en un nodo lejos del transformador y también la aplicación del filtro de potencia al sistema con una carga no lineal, para este escenario el análisis se realizará en un nodo distante al transformador, también se puede realizar el estudio de un control predictivo de corriente, el cual reflejará una señal de forma cuadrática, al tratar de minimizar el error futuro de la corriente. Los análisis de la distorsión armónica que se realizarán en el sistema de prueba serán analizados y mediante las gráficas de espectro de armónico se podrá observar el porcentaje de THD que presentan a lo largo de la simulación.

Palabras Clave: Armónicos, Filtro activo de potencia, distorsión armónica, análisis de Fourier, MPC, Sistema eléctrico de potencia, mitigación de armónicos.

Abstract

The following document presents the investigation and analysis of the harmonic content that an electrical power system of 37 bars standardized by the IEEE can present, the simulation and analysis is carried out using the MATLAB/Simulink software, in which two scenarios will be analyzed in which the first point of study is the analysis of the influence of the non-linear load and the mitigation of the harmonic distortion in a node near the transformer, in this scenario the system will be analyzed in normal operating conditions, the node connected to a non-linear load and finally the application of the active power filter in the system with the non-linear load. The second scenario represents the influence of the non-linear load in a node far from the transformer, in this point of study the system connected to the non-linear load in a node far from the transformer will be analyzed and also the application of the power filter to the system with a non-linear load, for this scenario the analysis will be carried out in a node distant from the transformer, the study of a predictive control of current can also be carried out, which will reflect a signal in a quadratic way, trying to minimize the future error of the stream. The analyzes of the harmonic distortion that will be carried out in the test system will be analyzed and through the harmonic spectrum graphs it will be possible to observe the percentage of THD that they present throughout the simulation.

Keywords: Harmonics, Active Power Filter, Fourier Analysis, MPC, Electrical Power System, Harmonic Mitigation.

1 Introducción

A través de los años con el constante crecimiento de la tecnología y también el uso de la electrónica de potencia, junto con la eficiencia energética y la calidad de energía ha surgido o se han convertido en cuestiones clave el mantener un buen suministro energético, pero la principal causa de que no exista una buena eficiencia o calidad energética es la distorsión armónica la cual se genera debido a las cargas no lineales.[1]

La implementación de cargas no lineales y también de filtros de potencia activos crean desestabilidad y de igual manera estabilidad, por lo general esto sucede en los sistemas industriales en los cuales se utilizan motores trifásicos creando perturbaciones en el sistema, y es ahí cuando actúan los filtros de potencia activa y pasiva como un método para contrarrestar la perturbación armónica.[1]

La formación de corrientes o voltajes en el sistema eléctrico de distribución crea dificultades o inconvenientes de los cuales resaltan el aumento de pérdidas de potencia, errores en la medición de equipos, sobretensiones, y equipos de protección con fallas en sus componentes.

Dentro del sistema de distribución se propone realizar la simulación de un sistema de 37 barras en el cual se deberá crear escenarios para poder asimilar la cantidad de armónicos que se puede inyectar en el sistema, y a su vez se implementa un método de filtrado para que las perturbaciones puedan ser rectificadas haciendo que el sistema trabaje de manera más eficaz.[2]

Las cargas no lineales generan armónicos siendo esta la principal problemática de la calidad de energía, debido a esto los sistemas presentan perturbaciones en la red ya sea de corriente o voltaje, causando así pérdidas de eficiencia en los equipos, perturbaciones, sobrecargas no deseadas en los transformadores, provocando varios

escenarios de pérdidas por el contenido armónico que pueda llegar a producirse en el sistema.[1]

La propagación de las cargas no lineales produce el consumo de corriente no armónica, produciendo una perturbación en su forma de onda, es por esta razón que actualmente existen cargas industriales, comerciales y residenciales en las que se realizan controles intensivos basados en la electrónica de potencia, en donde tienen más fuentes emisoras de distorsión armónica en la red.[3]

Para la solución de los problemas de perturbación armónica que se propaga en un SEP, se emplean métodos los cuales compensan la propagación de armónicos, como los filtros de potencia activo y también los filtros de potencia pasivo, teniendo en cuenta que los filtros pasivos son menos estabilizadores, debido a que no se les permite compensar más allá de su frecuencia normal o sintonizada.[4]

Los filtros activos de potencia tienen o están conformados por amplificadores o transistores, inductores, capacitores, de los cuales los inductores no se utilizan tan frecuentemente en los filtros activos debido a que sus componentes resistivas son de elevada magnitud, también se pueden clasificar según la conexión con la red, lo cual puede ser en serie o paralelo a la carga del sistema.[4]

Los filtros presentan elementos que ayudan a rectificar la señal de onda como los rectificadores o inversores trifásicos, se conforman a partir de elementos semiconductores.[5]

El sistema de prueba está relacionado con el controlador de corriente predictivo, el cual se basa en un MPC (Model Predictive Control), este control designa una estrategia de predicción la cual es un conjunto de métodos los cuales son utilizados en un proceso para obtener la señal reduciendo la función objetivo, en este caso el control de corriente predictivo

reduce el error futuro y define el mejor estado de la corriente.[6]

El documento esta detallado de la siguiente manera: en la sección del marco teórico se detalla todo el contenido que abarca la calidad de energía, fluctuaciones, armónicos, cargas no lineales, controladores predictivos MPC, filtros de potencia e inversores trifásicos, en la sección tres se detalla el planteamiento del problema, modelamiento del sistema de prueba, carga no lineal, modelamiento del MPC y filtro activo de potencia, en la cuarta sección se detallan los resultados en la cual se presenta todos los resultados que se obtienen a partir de la simulación del sistema de 37 barras estandarizado por la IEEE, se detallan los análisis de la barra conectada con una carga no lineal y el filtro que ayuda a mitigar la distorsión armónica, en la quinta sección se detallan las conclusiones donde se analiza los resultados obtenidos conforme a lo realizado en el sistema, y en la sexta sección se presenta las referencias utilizadas a en todo el documento.

2 Marco teórico

La distorsión armónica es un inconveniente que surge en los sistemas eléctricos de distribución, en los cuales los armónicos causan afectaciones al sistema de potencia, generando altos niveles de distorsión armónica, para poder mitigar estas perturbaciones del sistema, se necesita de la implementación de un sistema de potencia activo para que así los valores de distorsión sean anulados o reducidos, rectificando las señales de corriente y corriente del sistema.

2.1 Fluctuaciones, Desequilibrio y Calidad de Energía.

La calidad y la eficiencia de energía eléctrica es muy importante para la sociedad actual y también que es muy importante para su desarrollo económico, debido a esto se tiene que el sistema eléctrico de potencia

debería brindar un buen servicio con el usuario final.[7]

Sin embargo, la propagación de nuevos equipos electrónicos ha ido afectando en la calidad de la energía originando o creando perturbaciones o distorsiones en su forma de la señal de onda, la cual provoca efectos como el calentamiento los transformadores y el calentamiento de equipos que a su vez también producen interrupciones en el suministro de energía.[7]

Estas afectaciones que afectan la calidad de la energía son también llamadas fluctuaciones o perturbaciones, como pueden ser fluctuaciones de voltaje, flickers, y desequilibrios los cuales son producidos el contenido armónico en el sistema de distribución.[7]

-Fluctuaciones de tensión

Estas fluctuaciones son una serie de variaciones de tensión o variaciones cíclicas de tensión, y debido a estas variaciones también se tienen las variaciones de luminancia del alumbrado y debido a estas fluctuaciones se produce el fenómeno ocular conocido como parpadeo o flicker.[8]

-Desequilibrio de tensión

El desequilibrio se produce debido a las fluctuaciones armónicas que se producen en sistema de distribución, estado en el cual el valor de los voltajes de las fases o los desfases no sean iguales.[8]

2.1.1 Armónicos

Los armónicos son fluctuaciones o corrientes eléctricas los cuales afectan o producen perturbaciones deteriorando la calidad de energía, generalmente son generados por cargas no lineales en la red de distribución.[9]

El nivel de distorsión armónica ha aumentado drásticamente debido al aumento del número de aparatos o

dispositivos electrónicos que están conectados en la red de distribución.[9]

Estos armónicos no solo causan la degradación del factor de potencia, sino que también perjudica el rendimiento de un sistema de energía y a la vez también causan otros problemas graves como el sobrecalentamiento de equipos, errores de medición, fallas de dispositivos sensibles y condensadores que se queman.[9]

Así que, por lo tanto, los armónicos deben estar por debajo de ciertos límites o normas los cuales no deberán sobrepasar los valores establecidos.[9]

Generalmente los armónicos no se producen o no se distribuyen por la empresa de distribución de energía, en este caso son producidos por los consumidores, es debido a esto que los armónicos son clasificados por niveles según normas establecidas. Con la tabla 1 se puede presentar los límites establecidos para la distorsión armónica impar bajo la norma EN50160.[10]

Tabla 1. Niveles permisibles de armónicos según la norma EN50160

Parámetro	EN 50160	IEEE 519
%THD	8%	8%
3° Armónico	5%	5%
5° Armónico	6%	5%
7° Armónico	5%	5%
9° Armónico	1.5%	5%
11° Armónico	3.5%	5%

Los armónicos generalmente se definen de la siguiente manera:

Amplitud: Se refiere a el valor o magnitud del voltaje o la corriente del armónico, por lo general tiene un pequeño margen de porcentaje en la señal fundamental.[11]

Fase: Esta característica se refiere a el valor del ángulo que se presenta entre el armónico y la fundamental.[11]

Orden: Esta característica menciona que el valor de su frecuencia se refiere al valor de su frecuencia la cual refiere a la frecuencia fundamental, es decir que un armónico de tercer orden posee una frecuencia que es tres veces superior a la frecuencia fundamental, $3 \times 60 \text{ Hz}$ que es igual a 180 Hz .[11]

2.1.2 Efectos de los Armónicos en la Red

Un aspecto fundamental de la calidad y eficiencia de la energía eléctrica es generar y transportar al máximo la energía activa tratando de ayudar a las cargas de energía que fluctúan y no son productivas como la energía de distorsión o fluctuación que se produce debido a la presencia de armónicos, estas fallas pueden ser las siguientes:[12]

- Se produce el aumento de la potencia que se transporta, empeorando de esta manera el factor de potencia de la red.
- Conductores con sobrecarga
- Equipos y maquinas con sobrecargas y fallas
- Desequilibrio en el sistema eléctrico de potencia.
- Falla en el funcionamiento de relés de protección.
- Reducción de la impedancia de los condensadores, provocando así el fallo de la batería autorregulada la cual está instalada para ayudar a compensar la corrección del factor de potencia.

Los efectos de los armónicos dependen de la igualdad que tiene la carga no lineal y la carga total del sistema, de tal manera que se debe controlar la distorsión armónica dentro de las normas y los límites establecidos.[12]

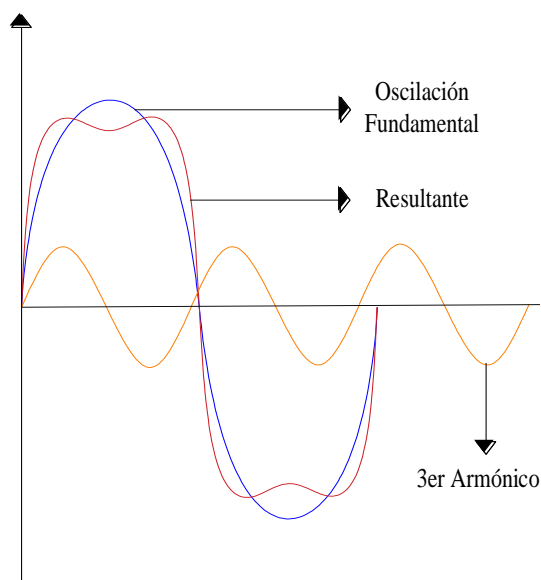


Figura 1. Representación de oscilaciones armónicas debido a cargas no lineales [autor].

2.1.3 Distorsión Armónica Total (THD)

El THD representa la medición del valor de las componentes armónicas de las ondas distorsionadas, y también representa el valor de los índices armónicos relativos a la fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

I_h = Magnitud de la armónica individual
 h = Orden Armónico

I_L = Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, esta corriente se calcula como el promedio de demanda de corriente con el máximo mensual.[13]

Las mediciones generalmente son utilizadas para calcular el índice armónico en las formas de ondas. En el cual un indicador es utilizado comúnmente en la distorsión armónica total es el THD, el cual puede ser calculado para la señal de voltaje o corriente.[13]

2.1.4 Comportamiento de la Distorsión Armónica y Eficacia de Energía

La distorsión armónica es uno de los problemas o también llamada perturbación la cual afecta a la calidad de energía, la cual puede ser causada por dispositivos no lineales activos y pasivos en un sistema de potencia. La corriente armónica es la causa directa de la tensión armónica y su distorsión, y por lo tanto es necesario determinar un límite de distorsión de corriente apropiado.[14]

La distorsión armónica total de corriente (THDI) produce una perturbación de corriente promedio a lo largo del tiempo. Sin embargo, este índice no siempre es útil para predecir el impacto de una corriente armónica en la red.[14]

Los pequeños valores de RMS con alta distorsión de corriente aumentan la THDI, mientras que a su vez tienen un impacto insignificante en el voltaje armónico general distorsión. Por lo tanto, es más conveniente expresar la distorsión total de la corriente en valores por unidad.[14]

2.2 Calidad de Energía en el Sistema Eléctrico

La calidad de energía de un sistema de distribución, es fundamental, pero debido a ciertos fenómenos se han producido fallas o perturbaciones en el sistema, debido a este problema la calidad de energía no ha ido en aumento por el uso continuo de cargas no lineales.[15]

La problemática de la calidad de la energía se refiere que existe una amplia variedad de perturbaciones y disturbios eléctricos los cuales se caracterizan por que la corriente y el voltaje presentan desequilibrios en un momento de tiempo determinado.[16]

Estas perturbaciones o fenómenos eléctricos son problemas que se presentan

en las señales eléctricas, variaciones de magnitud con respecto a su valor nominal durante un cierto intervalo de tiempo.[16]

2.3 Métodos de Compensación Armónica

A partir de la existencia de armónicos dentro de la red de distribución, nace la necesidad de crear soluciones para estas distorsiones o también llamadas armónicos, analizando y buscando alternativas para reducir los efectos que producen en la red.[17]

Las oscilaciones armónicas indican el alcance de las distorsiones de una señal, para ello se pueden implementar métodos de compensación de armónicos los cuales ayudan en la reducción de armónicos y en la compensación de la carga, para lo cual se proponen distintos métodos de compensación.[18]

Se tiene a continuación métodos o técnicas en los cuales se encuentra el acondicionamiento activo o pasivo.

-Compensación Pasiva

Esta compensación es también llamada acondicionamiento pasivo el cual no busca mitigar las distorsiones de corrientes armónicas en el sistema, sino que trata de ordenar los elementos del sistema eléctrico de potencia para que de esta manera los equipos puedan ser menos sensibles ante la presencia de armónicos.[18]

-Compensación Activa

Este método de compensación se realiza mediante el montaje de sistemas de acondicionamiento en el cual las líneas como transformadores están conectados en manera especial.[18]

2.3.1 Filtro de Potencia Pasivo

Los filtros pasivos tienen la función de ayudar a suprimir los armónicos en la red,

sin embargo, estos métodos en si no eliminan totalmente la distorsión armónica de corrientes, es decir que tratan de que se mantengan en un rango tolerable.[18]

Los armónicos pueden ser reducidos de una manera eficiente y para mitigar las corrientes armónicas se pueden utilizar filtros pasivos conectados en paralelo, estos consisten en que sus ramas LC están conectadas en paralelo con la carga.[18]

Estos filtros presentan una impedancia muy baja para el armónico en donde esta sintonizado el filtro, es decir el filtro presenta una impedancia de cero y debido a esto el filtro absorbe y mitiga el armónico de interés.[19]

El filtro de potencia pasivo puede frenar la perturbación armónica en la red, es así que le filtro consta de un elemento inductor, un elemento capacitor conectados en paralelo a la carga no lineal como lo muestra la figura 2 del esquema.[20]

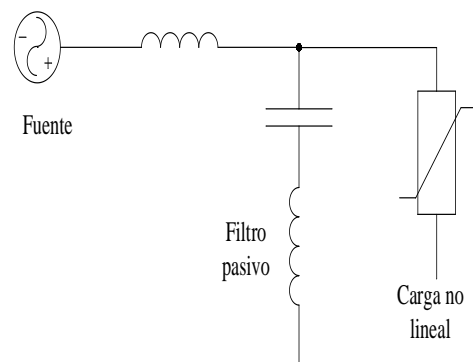


Figura 2. Esquema de un filtro pasivo conectado en paralelo [autor].

2.3.2 Filtro Activo de Potencia

El filtro de potencia activo consiste básicamente en que inyecta en el punto de conexión, esta carga tiene un componente no activo de compensación y también consta de un componente activo para eliminar las pérdidas en el filtro.[21]

Es así que un rectificador de potencia está compuesto por dispositivos semiconductores los cuales permiten que exista un flujo de energía entre la red eléctrica y el elemento de almacenamiento mediante el control de su estado de conmutación. [21]

En la figura 3 se puede observar el esquema del filtro de potencia activo, en la cual se puede apreciar sus correspondientes elementos conectados, en esta figura se observa un elemento inductivo L conectado en serie y también en paralelo a la carga no lineal.[22]

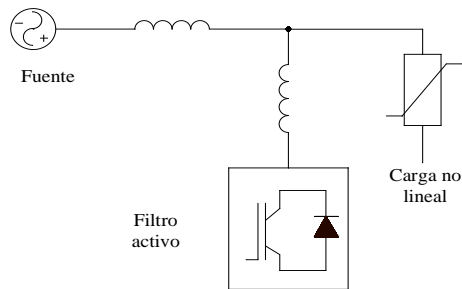


Figura 3. Esquema de un filtro activo conectado en paralelo.

El filtro conectado en paralelo debe lograr que la corriente de la fuente se mantenga de manera estable, es decir su forma debe ser una onda sinusoidal, sin embargo, debido a las cargas no lineales se puede llegar a distorsionarse creando fluctuaciones en el sistema.[22]

Por otro lado, la conexión en paralelo del filtro activo de potencia inyecta al instante una corriente la cual tiene componente armónica, es decir es de la misma amplitud que la de la carga, pero se opone a la de la fase.[22]

De esta manera el principio de operación del filtro activo tiene su funcionamiento de acuerdo a un control de lazo cerrado de un inversor, el cual tiene la función de inyectar en la red la corriente o tensión de acuerdo a la norma establecida, esta corriente o voltaje mantiene de forma activa la

corriente que circula por la fuente libre de perturbación armónica.[23]

2.4 Inversor Trifásico

Un inversor trifásico es aquel que consta de una entrada y salida, como puede ser una entrada de voltaje DC, el cual puede tener o entregar a la salida tres fases, estos inversores por lo general son utilizados o aplicados en sistemas de alta potencia.[24]

Estos inversores pueden tener diferentes topologías o modulaciones las cuales poseen a su vez ventajas y desventajas tales como las aplicaciones que tienen más aceptación que en otras.[24]

La representación más común que tienen los inversores trifásicos es la de tipo puente la cual consta de tres ramales, cada uno consta también con dos semiconductores de potencia.[24]

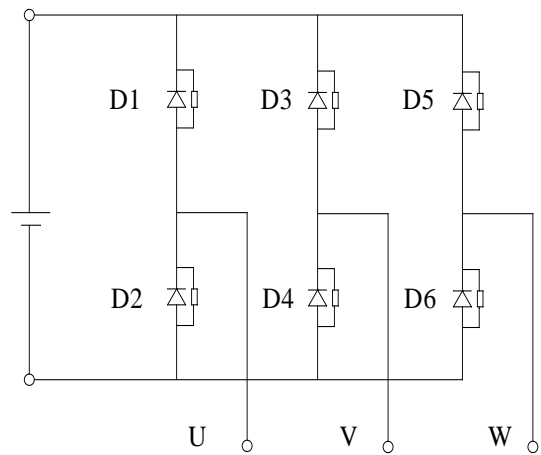


Figura 4. Esquema básico de un inversor trifásico.

2.5 Control Predictivo de Corriente

El control de corriente realiza una comparación con las corrientes que son atraídas con las corrientes de referencia, de esta manera se genera la señal de control la cual sirve como entrada para modular el ancho de pulso.[25]

El control de corriente predictivo utilizada rectificadores una estrategia en la que el control orientado se aplica como

estrategia para el control de la cual por mucho tiempo fue la estrategia del control el cual se centraba más en máquinas de corriente continua las cuales estaban conectadas a convertidores conmutados.[25]

El control predictivo de corriente es uno de los algoritmos más utilizados debido a su efectividad, este algoritmo tiene en consideración su rápida respuesta, tiene compensación del tiempo de retardo, posee cero errores de estado estacionario y completa compatibilidad para adaptarse a sistemas digitales.[25]

2.5.1. Control Predictivo Basado en Modelos Para Inversores

El modelo de control predictivo se puede implementar basándose en modelos MPC, los cuales tiene varias ventajas que son apropiadas para el control de inversores, es decir se los puede utilizar en una gran variedad de procesos; de esta manera se puede decir que son aplicables en sistemas multivariados.[26]

Las estrategias de control predictivo se pueden definir como un grupo de métodos de control las cuales comparten una característica común entre sí, la cual son requeridas para plantear el modelo matemático de la planta para predecir el comportamiento futuro y así seleccionar la acción de control apropiada.[26]

Una de las características más acordes del MPC es en sí la posibilidad de incluir múltiples objetivos en el diseño del controlador, es decir que en los convertidores esto se puede aplicar al control de corriente, control de voltaje y flujo de potencia.[26]

2.6 Control del Convertidor MPC

La característica más llamativa del MPC (model-based predictive control) es el

manejo del control predictivo, es decir se basa en el modelo de predicción de las salidas del proceso que están sobre un horizonte de tiempo futuro.[27]

Es así que las predicciones del control son utilizadas para calcular la acción de control para resolver un proceso de optimización incorporando varios procesos que se diversifican en tipos de restricciones.[27]

La técnica del MPC es aplicada también a convertidores que tienen en su variante de estados finitos FCS-MPC, el cual no necesita de moduladores debido a que este modelo incorpora en sí la característica discreta de los convertidores de potencia.[28]

Como su nombre lo indica el MPC trata de utilizar el control predictivo pero ajustado a un modelo el cual permite relacionar la corriente del inversor con la corriente del capacitor y la carga.[29]

Es así que de esta manera el objetivo del MPC es el control de la tensión entregada a la carga, esto permite tener un campo más amplio de aplicaciones en donde se pueda tener una mejor forma de onda con una menor distorsión armónica y a su vez permita obtener una mayor magnitud de tensión a la salida.[29]

2.6.1. Características a Tener en Cuenta Para el Control del MPC

Para el diseño del control de un rectificador utilizando el MPC se pueden identificar los siguientes métodos:

- El modelamiento del rectificador en el cual se pueden identificar todas formas y estados de conmutación y también identificar la relación que tiene con los voltajes y corrientes de entrada y salida.[30]

- Se debe definir la función de costo la cual permita representar el comportamiento deseado del sistema.[30]
- Se puede obtener de modelos de tiempo discreto los cuales que permitan la predicción del comportamiento futuro de las variables a controlar. [30]

2.6.2. Esquema General de Control del Modelo MPC

La implementación de un MPC conlleva un escenario en el cual se deberá representar el esquema general de control del modelo MPC, el cual deberá ser aplicado generalmente a convertidores se representa detalladamente a continuación en la Figura 5.

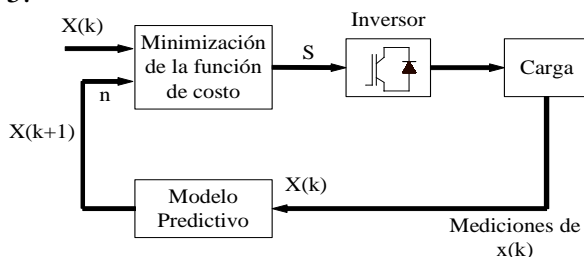


Figura 5. Esquema general de control MPC utilizado para inversores.

En este esquema, se utilizan las variables $x(k)$ las cuales tienen el modelo de predecir para calcular las predicciones, $x(k+1)$ de las variables controladas en las que para cada una de las n posibles actuaciones, es decir, estados de voltaje, corrientes o conmutación.[31]

Estas predicciones utilizan la función de costo para evaluar y de esta manera se puede saber cuáles son los valores de referencia de $x(k)$ y también cuales son las restricciones, y en base a eso, se selecciona cual es la forma más óptima de S para ser aplicada al inversor. [31]

2.6.3. Principio de Operación del MPC

La estrategia de todos los controladores predictivos que pertenecen a la familia de los MPC se caracteriza debido a las siguientes características: [32]

- Predice cual es el comportamiento de las variables controladas en todos sus estados de conmutación.
- Evalúa y analiza cual es la función de costo para la predicción.
- Selecciona cual es el estado de conmutación que permita minimizar la función de costo.

Al implementar la estrategia de predicción se evalúa cuáles son las salidas futuras para obtener un horizonte el cual es determinado como “N”, y también es llamado horizonte de predicción, de esta manera se puede predecir cuál es el instante “t” utilizando el modelo del proceso. [33]

En el esquema que se puede apreciar en la figura 6 se utiliza la notación matemática del proceso del MPC, esta anotación se describe de la siguiente manera:[34]

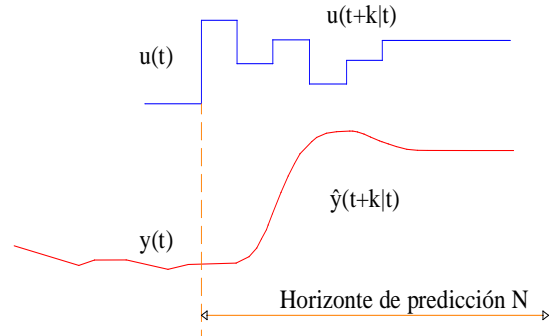


Figura 6. Esquema de un controlador predictivo MPC [autor].

- t : representa el tiempo como un índice discreto el cual puede ser ($t = 0,1,2, \dots$).
- $u(t)$: representa la entrada del proceso de esta manera representa la variable manipulada.
- $y(t)$: representa la salida del proceso, es decir representa la variable controlada.
- $u(t + k|t)$: esta expresión representa los valores futuros de la entrada, los cuales son calculados en el tiempo (t).

- $u(t + k|t)$: esta expresión representa los futuros valores de la salida con base en:
 - Mediciones que están disponibles en el instante
 $t: \{y(t), y(t - 1) \dots, u(t - 1), u(t - 2), \dots\}$
 - Valores futuros de la entrada en el instante
 $t: \{u(t), u(t + 1|t), \dots\}$

Para cada instante de tiempo “actual”(t), se predice la salida del proceso $y(t + k)$ el cual está sobre un horizonte de tiempo. $k = 1 \dots N$. [34]

3 Planteamiento del Problema

El análisis del sistema de prueba se realiza de acuerdo al sistema implementado, en este caso el estudio se procede a realizarlo en un sistema de 37 barras conectadas entre sí por líneas modeladas mediante la configuración IEEE, en el cual se deberá inyectar armónicos con la ayuda de una carga no lineal, y a su vez se deberá implementar un filtro de potencia activo el cual podrá eliminar los armónicos del sistema.

La figura 7 expresa un flujograma en el cual muestra los pasos que se deberán seguir para que el sistema pueda ser simulado de acuerdo a varios escenarios, los cuales son establecidos de acuerdo al avance del sistema, debido a esto se crean variables para determinar cuáles son los parámetros de las líneas y analizar la perturbación en el sistema.

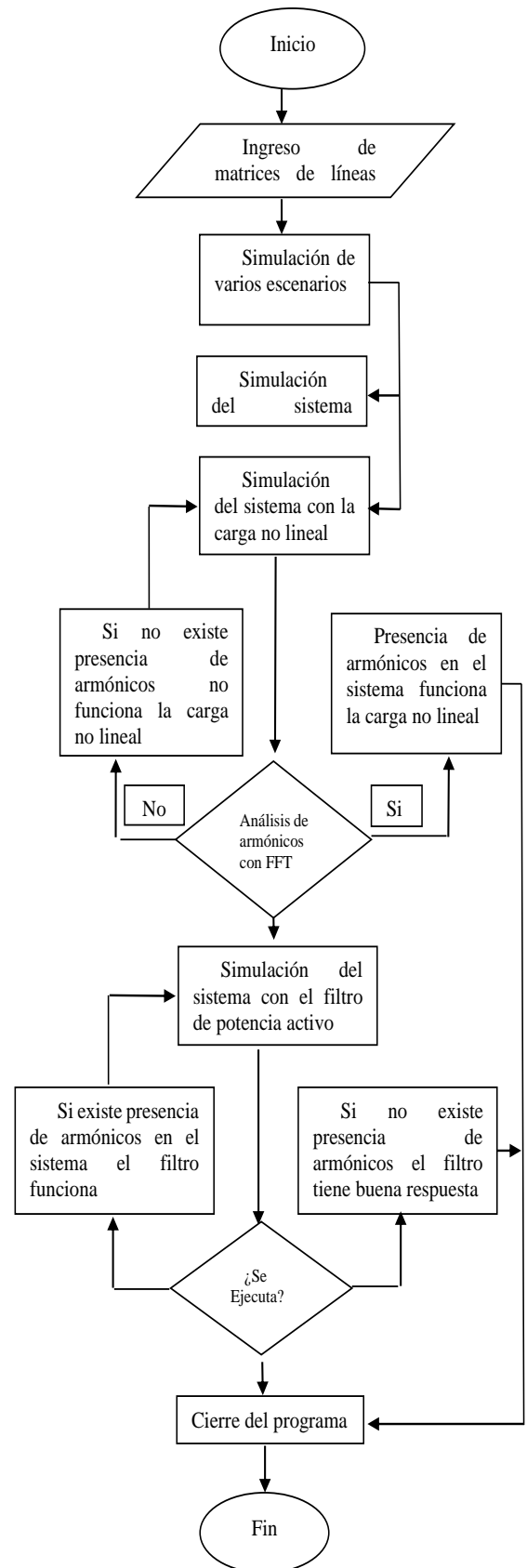


Figura 7. Diagrama de flujo para el sistema de mitigación de armónicos [autor].

3.1 Modelamiento del Sistema de Prueba IEEE de 37 Barras

El sistema de prueba para el análisis será el de 37 barras el cual esta estandarizado por la IEEE, en él se realizará pruebas de acuerdo a los parámetros en el preestablecidos en el sistema.

La fuente del sistema está comprendida de acuerdo a una subestación de transformación, cuando el sistema es simulado y según los datos propuestos este tiene que reducir su carga y para esto se propone utilizar un bloque de fuente trifásica de 4.8kV línea a línea como generador slack, como se observa en la figura 8.

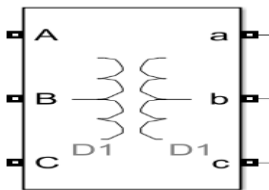


Figura 8. Bloque del transformador de 4.8 [kV] del sistema de 37 barras.

El análisis del sistema en si es simulado con el programa Simulink, en el cual los nodos del sistema se representan con el bloque de carga como se observa en la figura 9, para esto se configura el nivel de voltaje adecuado conforme lo indicado en el datasheet del sistema.

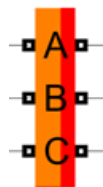


Figura 9. Bloque parámetros de la barra del sistema de 37 barras.

Los parámetros para cada línea son definidos por un bloque de medidas distribuidas como se observa en la figura 10. Para esto se debe configurar el nivel de voltaje, y también se deben ingresar las matrices que corresponden a las

susceptancias y reactancias las cuales son calculadas con anterioridad.

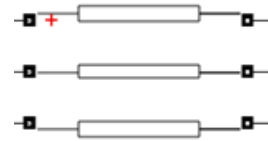


Figura 10. Bloque parámetros de línea del sistema de 37 barras.

Por último, las cargas que están conectadas en cada barra se analizan y se realiza la simulación del sistema tota, las cargas están representadas por un bloque de carga trifásica en serie, las cuales son RLC como se observa en la figura 11, estos elementos son definidos principalmente por niveles de potencia que tiene cada elemento y también el tipo de carga a la que corresponde, todo esto se debe realizar conforme a los datos preestablecidos del sistema.

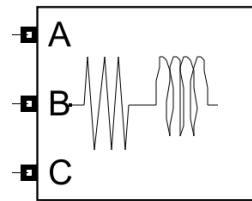


Figura 11. Bloque parámetros de carga del sistema de 37 barras.

3.2 Modelamiento de la Carga no Lineal en el Sistema

El modelamiento de la carga no línea en el sistema es necesaria para que se puedan generar o inyectar armónicos, de esta manera los armónicos que puedan existir en el sistema serán más notables debido a la conexión de la carga, es así que la carga no lineal se la puede ubicar en cualquier barra del SEP, generando en esa barra armónicos los cuales podrán ser analizados en las barras contiguas, de esta manera se podrían crear escenarios en los cuales se podría observar cómo afectan a la estabilidad del sistema.

Para poder inyectar los armónicos en el sistema se deberá realizarlo a través de un inversor trifásico el cual será conectado a las barras en el SEP, este inversor se compone de un puente de diodos los cuales están conectados en paralelo, además también consta de elementos RL y a su vez de elementos RL trifásicos.

La Figura 12 representa el bloque que contiene la carga no lineal, dentro se crea un subsistema el cual está constituido por un inversor trifásico es utilizado para generar los armónicos en el sistema.

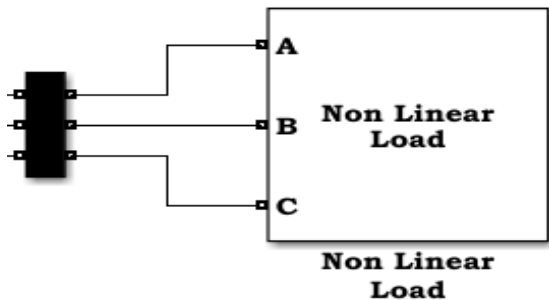


Figura 12. Carga no lineal.

La figura 13 representa el inversor trifásico el cual está formado por un puente de diodos, los cuales también están conectados a elementos resistivos e inductivos.

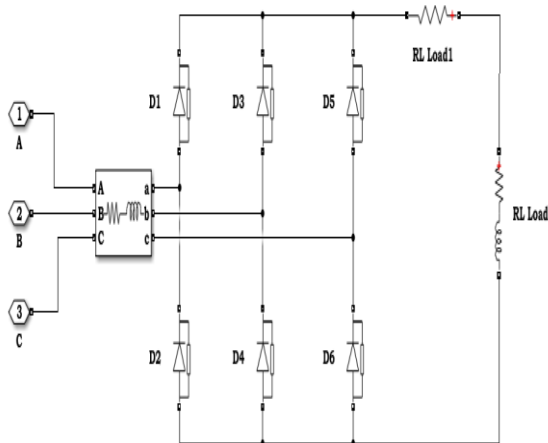


Figura 13. Inversor trifásico con formado por un puente de diodos.

La función del inversor trifásico es rectificar las señales trifásicas de voltaje

para así obtener un voltaje de corriente directa, este puente inversor conectado a sus elementos resistivos e inductivos generan contenido armónico el cual crea perturbación a las formas de onda de voltaje, así como la forma de onda de la corriente.

3.3 Modelamiento del Filtro de Potencia Activo en el Sistema

El propósito del filtro de potencia activo es la reducción del contenido armónico que se genera en el sistema, la carga no lineal conectada al sistema produce una distorsión entre la corriente y el voltaje, es decir el filtro debe tratar de mantener la forma de la corriente que circula por el sistema sea senoidal y que el voltaje también lo sea.

De esta manera el filtro activo de potencia reduce la corriente armónica en la barra en la que se conecte la carga, mientras más cerca este el filtro de la barra contaminada con armónicos este será más efectivo, equilibrando la corriente y el voltaje, también corrige el factor de potencia.

La parte de rectificación se la realiza con ayuda del inversor el cual mediante un bloque rectificador trifásico que está conectado a puente de diodos logra generar armónicos en el sistema y para que estos no se propaguen se conecta a la entrada del filtro la carga no lineal y así el filtro logra reducir las perturbaciones.

La figura 14 representa al filtro activo de potencia el cual será implementado dentro de un subsistema al igual como se observa la figura 15 se aprecia el subsistema del filtro de potencia activo el cual se encuentra formando un bloque de conexión dentro de él se puede observar entradas y salidas las cuales se conectan al sistema y también a la carga no lineal por medio de barras trifásicas de medición.

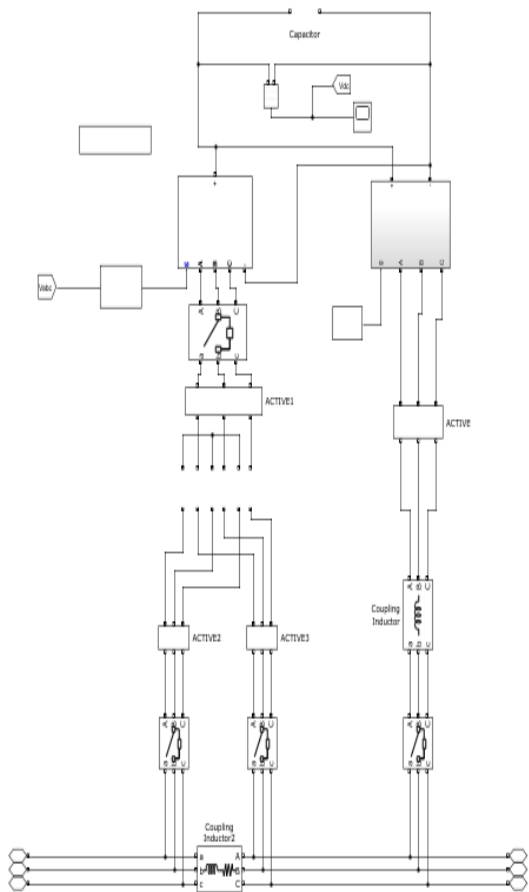


Figura 14. Filtro activo de potencia.

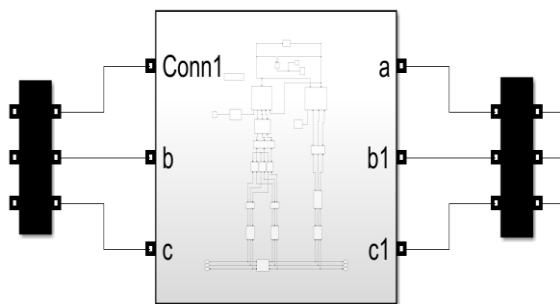


Figura 15. Subsistema del filtro activo de potencia.

3.4 Modelamiento del Controlador Predictivo de Corriente

El controlador predictivo reduce la falla en estado futuro de la corriente obteniendo el mejor estado, se caracteriza porque en cada instante de tiempo se utiliza un modelo con valores y entradas conocidos hasta que ese instante pueda calcular las salidas que se predicen a lo largo de un horizonte de predicción el cual es una variable controlada.

La figura 16 representa el subsistema que se encuentra dentro del filtro de potencia activo, el cual cumple la función un controlador de corriente predictivo, el cual tiene por característica ser un controlador óptimo, es decir actúa en el instante actual, y se basa en la predicción del comportamiento que tendrá a futuro un proceso.

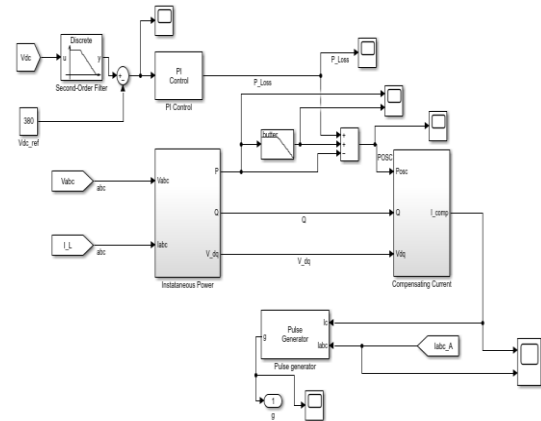


Figura 16. Subsistema del MPC de corriente.

4 Análisis de resultados

De acuerdo a la simulación realizada en el software Matlab/Simulink se han realizado pruebas en diferentes tipos de escenarios en los cuales se realiza el respectivo análisis. Para la realización del estudio se requiere analizar cómo influye la presencia de contenido armónico en el sistema de prueba el cual sería el sistema de 37 barras.

Con el análisis de cada escenario que será propuesto se podrá analizar mediante el analizador de Fourier, el cual analiza cual es el porcentaje de THD que presenta el sistema durante la simulación.

En el sistema de prueba se determinó tres escenarios en los cuales se analiza cómo se vería afectado el sistema cuando se le conecta una carga no lineal a una barra alejada del sistema, también se aplicará la carga no lineal a la salida del transformador y de igual manera al generador, de la misma manera se podrá ver cómo actúa el filtro de potencia activo mitigando los armónicos generados por la carga no lineal en el sistema.

SISTEMA IEEE DE 37 BARRAS CON FILTRO DE POTENCIA ACTIVO PARA MITIGAR ARMÓNICOS

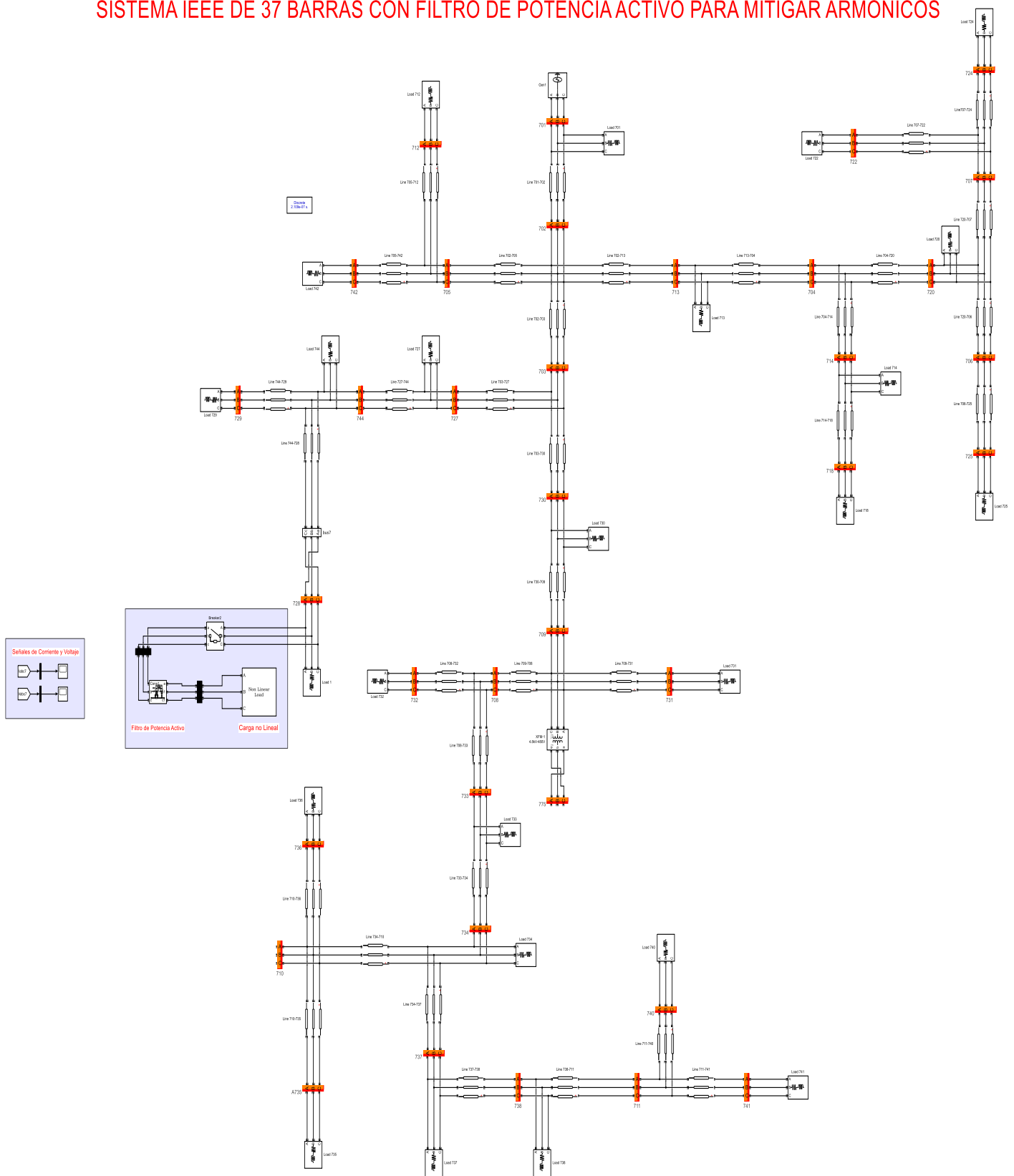


Figura 17. Sistema de 37 barras con filtro de potencia activo para mitigar armónicos.

La figura 17 muestra el sistema de 37 barras IEEE completo, conectado con el filtro de potencia activo y la carga no lineal, al igual que todos sus componentes, el diseño se lo realizo a partir del diagrama del sistema de prueba de la IEEE.

4.1 Caso de Estudio

Para el análisis de la perturbación armónica se propone realizar un sistema de 37 barras conectadas entre sí por líneas en base a los parámetros estandarizados por la IEEE. Para la generar armónicos en el sistema se debe utilizar la implementación de una carga no lineal la cual desestabilizara al sistema.

En la figura 18 se puede observar el modelo de prueba de 37 barras el cual cumple con ciertos parámetros estandarizados por la IEEE, con el modelo de prueba se podrá realizar las correctas simulaciones en los escenarios que serán propuestos.

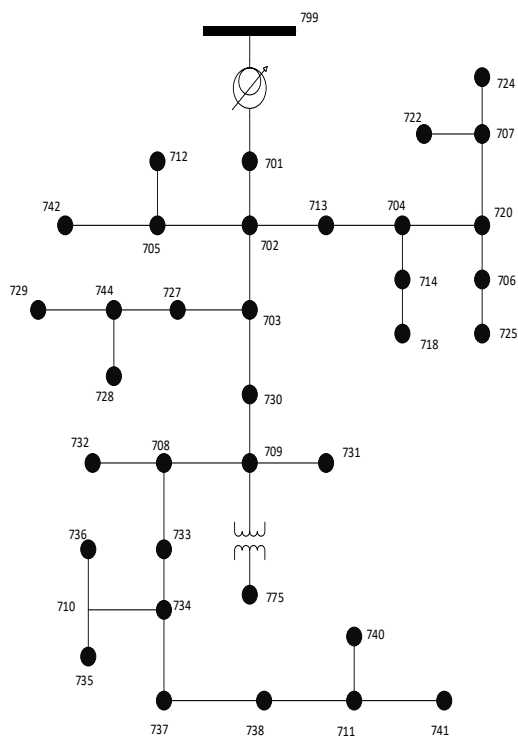


Figura 18. Sistema de distribución de 37 barras IEEE.

El modelo de la simulación se implementa a través del análisis del sistema IEEE de 37 barras, el cual está basado principalmente en un sistema de distribución ubicado en la ciudad de California, el cual trabaja a un voltaje de 4.8 [kV].

4.1.1 Sistema de 37 barras en estado estable

En la figura 19 se puede observar que la forma de onda del voltaje es estable, es sinusoidal, para este caso la corriente no se considera debido a que no existe en el sistema una carga asociada que pueda producir una onda de corriente, por lo cual el sistema está trabajando en condiciones de trabajo estable.

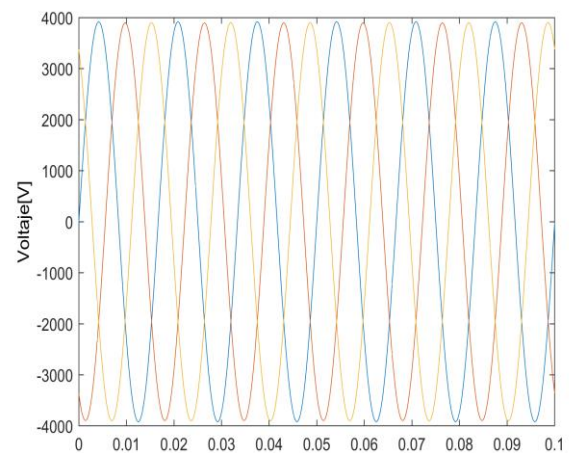


Figura 19. Señal de voltaje del sistema de 37 barras en estado estable.

4.1.2 Carga no lineal conectada al transformador

Para producir la perturbación de armónicos en el sistema se deberá conectar una carga no lineal, la cual inyectará armónicos en la barra seleccionada para así generar ondas de voltaje y corriente con armónicos.

Las figuras 20 y 21 representan el voltaje y la corriente del transformador, en las cuales se conectó la carga no lineal a la salida del transformador que opera a 4.8 [kV], en cada grafica se puede apreciar que

existe perturbación en la forma de onda del voltaje y la corriente, de esta manera se da a entender que el sistema no trabaja correctamente de manera óptima.

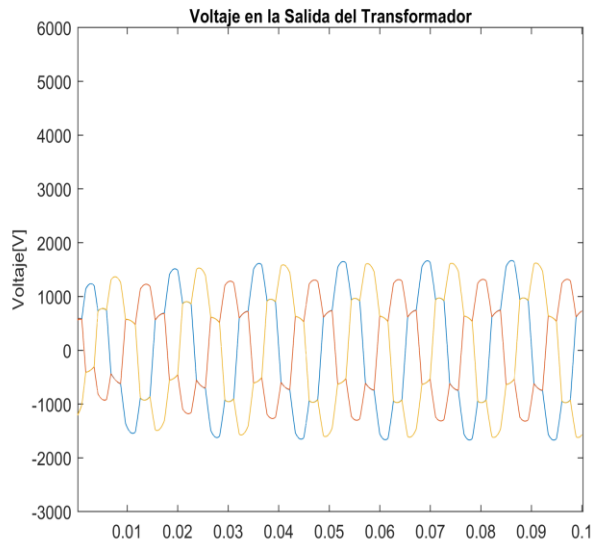


Figura 20. Señal de voltaje del transformador conectado a una carga no lineal.

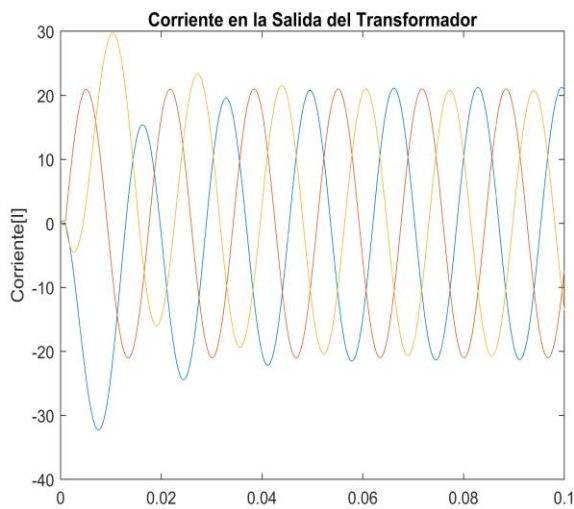


Fig21. Señal de corriente del transformador conectado a una carga no lineal.

La figura 22 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de voltaje que presenta el transformador que opera a 4.8 [kV],

Al momento de conectar una carga no lineal en la salida de sus terminales, esta carga afecta en el voltaje produciendo una distorsión de la forma de onda sinusoidal del voltaje del transformador, haciendo que el sistema no opere de forma óptima.

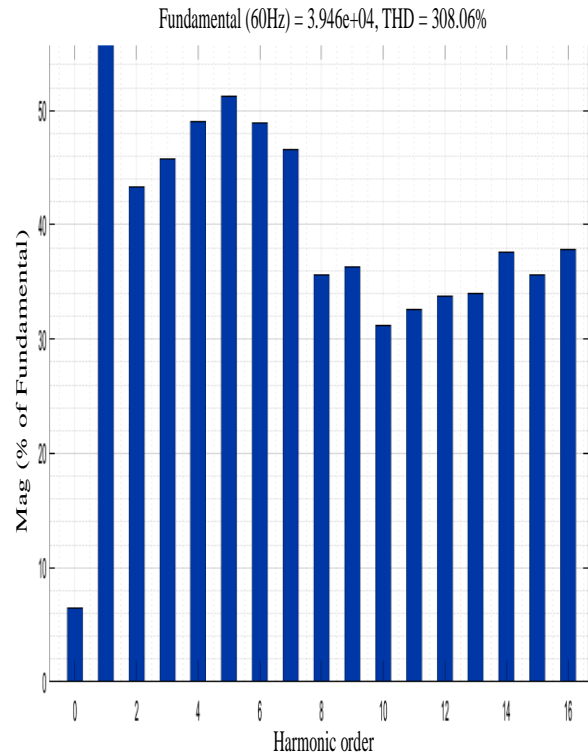


Figura 22. Espectro armónico de voltaje del transformador del sistema de 37 barras.

La tabla 2 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 308.66%, el cual está fuera de los parámetros permisibles, debido a que la carga no lineal produce perturbaciones esta inyecta armónicos, generando así desfases en la forma de onda de la corriente,

En la cual los armónicos 3, 5, 7, 9 y 11 superan los valores establecidos que corresponden a la norma EN 50160, el exceso de armónicos en el transformador puede provocar el aumento de las pérdidas y también el aumento de la temperatura en sus aislamientos, produciendo que el transformador sea retirado.

Tabla 2. Comparación del porcentaje de armónicos en voltaje del transformador con el analizador FFT

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	308.06%
3 armónico	5%	45.75%
5 armónico	6%	51.20%
7 armónico	5%	46.55%
9 armónico	1.5%	36.29%
11 armónico	3.5%	32.59%

La figura 23 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de corriente del transformador que opera a 4.8 [kV],

Al momento de conectar una carga no lineal en la salida de sus terminales, esta carga afecta la forma de onda de la corriente produciendo una perturbación, aunque no es muy notoria tiene cierto contenido armónico.

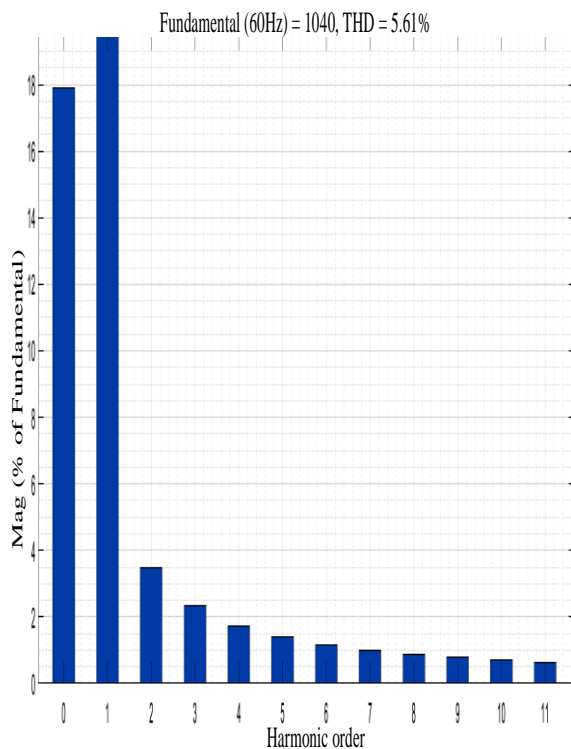


Figura 23. Espectro armónico de corriente del transformador del sistema de 37 barras.

La tabla 3 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 5.61%, este porcentaje es bajo debido a que la corriente es pequeña cuando se conecta una carga no lineal a los terminales del transformador, debido a que la carga no lineal produce perturbaciones esta inyecta armónicos, generando así desfases en la forma de onda de la corriente, en la cual el índice de armónicos no sobrepasa el valor permisible de acuerdo a la norma pero si existe un pequeño rastro perturbando la forma de onda de corriente del sistema.

Tabla 3. Comparación del porcentaje de armónicos en corriente del transformador con el analizador FFT

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	5.61%
3 armónico	5%	2.33%
5 armónico	6%	1.40%
7 armónico	5%	1.00%
9 armónico	1.5%	0.78%
11 armónico	3.5%	0.63%

4.1.3 Resultados con el filtro de potencia activo al transformador

Las figuras 24 y 25 representan el voltaje y la corriente del transformador, en las cuales el filtro de potencia activo se conecta a las terminales de salida del transformador.

El filtro de potencia activo se conecta a la carga no lineal para eliminar el contenido armónico de las señales de onda de voltaje y corriente que presentan perturbación debido a la carga no lineal, en cada grafica se puede apreciar que las formas de onda son más estables que cuando se aplicaba la carga no lineal, de esta manera el sistema trabaja de esta manera más óptima.

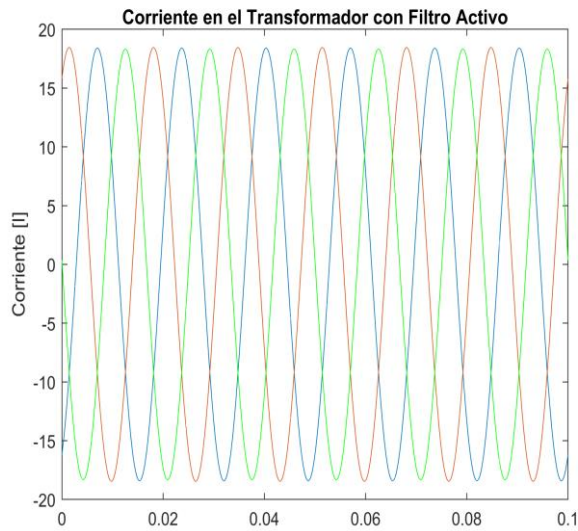


Figura 24. Señal de corriente de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.

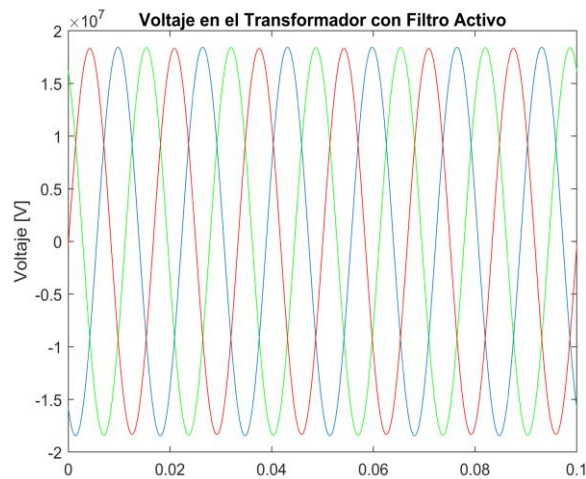


Figura 25. Señal de voltaje de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.

La figura 26 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de corriente del transformador que opera a 4.8 [kV],

El filtro se conecta a las salidas del transformador reduciendo así el índice armónico de corriente, de esta manera el porcentaje del THD reduce a un valor de 0.01%, permaneciendo de esta manera el sistema más estable y en condiciones óptimas.

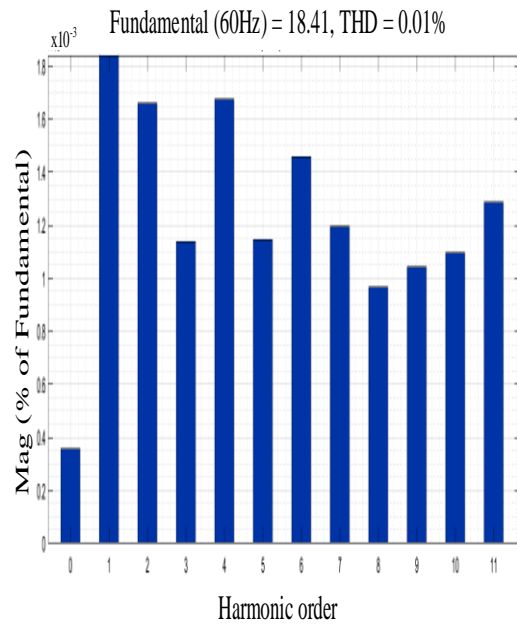


Figura 26. Espectro armónico de corriente del transformador con filtro de potencia activo.

La tabla 4 representa el espectro armónico de corriente, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 0.01%, este porcentaje es debido a que el filtro actúa sobre el armónico y la corriente no presenta perturbaciones en la forma de onda.

Tabla 4. Datos de THD de corriente del transformador según la norma EN50160 con FFT

Parámetro	EN50160	FFT
%THD	8%	0.01%

La figura 27 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de corriente del transformador que opera a 4.8 [kV], el filtro se conecta a las salidas del transformador reduciendo así el índice armónico de voltaje, de esta manera el porcentaje del THD reduce a un valor de 0.01%, permaneciendo de esta manera el sistema más estable y en condiciones óptimas.

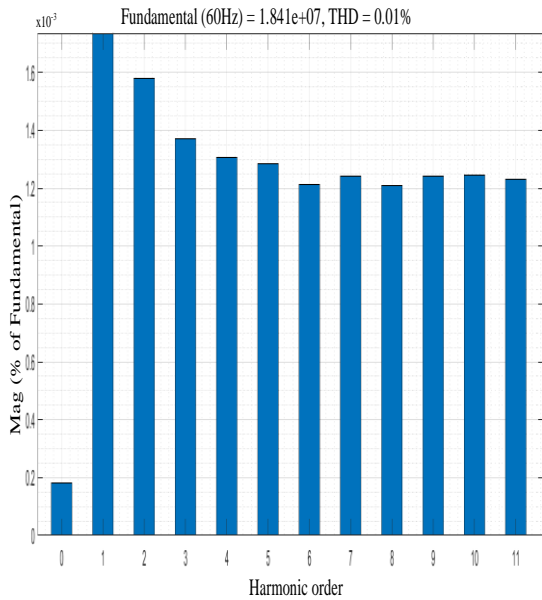


Figura 27. Espectro armónico de voltaje del transformador con filtro de potencia activo.

La tabla 5 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 0.01%, este porcentaje es debido a que el filtro actúa sobre el armónico y el voltaje no presenta perturbaciones en la forma de onda.

Tabla 5. Datos de THD de voltaje del transformador según la norma EN50160 con FFT

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	0.01%

4.2.1 Carga no lineal alejada del transformador conectada en la barra 728

El análisis del siguiente escenario es el sistema de prueba de 37 barras con la carga no lineal, esta carga inyecta armónicos en una barra lejos del transformador, es así que se conecta la carga no lineal en una barra 728 del sistema, esto produce armónicos los cuales afectan la forma de onda del voltaje y la corriente, creando perturbaciones por toda la barra y las barras contiguas, haciendo que el sistema no trabaje en óptimas condiciones.

En las figuras 28 y 29 se observa cómo actúa la carga no lineal en el sistema, esta carga conectada en la barra 728 afecta al voltaje y la corriente creando perturbaciones como se puede ver a lo largo de la simulación.

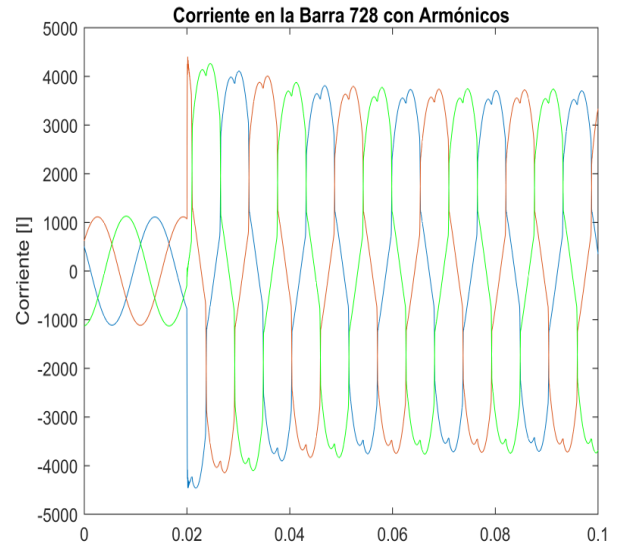


Figura 28. Señal de corriente de la barra 728 con perturbación por armónicos.

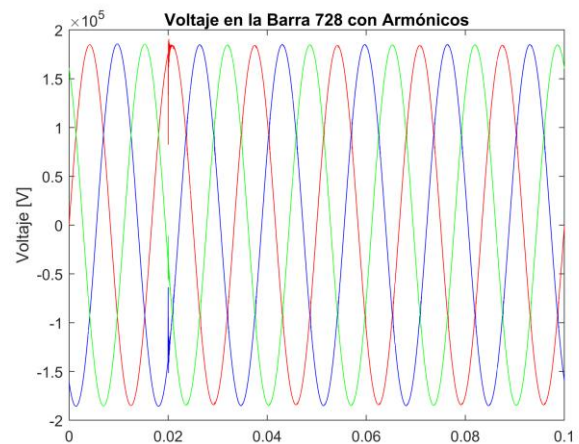


Figura 29. Señal de voltaje de la barra 728 con perturbación por armónicos.

En este caso la forma de onda de la corriente se deforma al inyectar los armónicos creando una gran perturbación para el sistema, y en el caso del voltaje no representa tanta deformación de onda, pero esto provoca que el sistema no trabaje de manera óptima específicamente en la barra 728.

La figura 30 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de corriente que se presenta en la barra 728 del sistema de prueba de 37 barras.

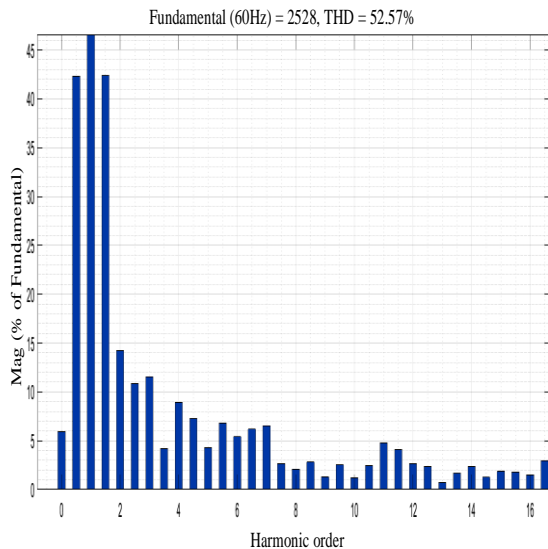


Figura 30. Espectro armónico de corriente de la barra 728 del sistema de 37 barras.

La tabla 6 representa el espectro armónico de corriente, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 52.57%, el cual está fuera de los parámetros permisibles, debido a que la carga no lineal produce perturbaciones esta inyecta armónicos, generando así desfases en la forma de onda de la corriente, en la cual los armónicos 3, 7, 9 y 11 superan los valores establecidos que corresponden a la norma EN 50160.

Tabla 6. Comparación del porcentaje de armónicos en corriente con el analizador FFT

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	52.57%
3 armónico	5%	11.57%
5 armónico	6%	4.31%
7 armónico	5%	6.56%
9 armónico	1.25%	1.27%
11 armónico	3.5%	4.78%

La figura 31 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de voltaje que se presenta en la barra 728 del sistema de prueba de 37 barras.

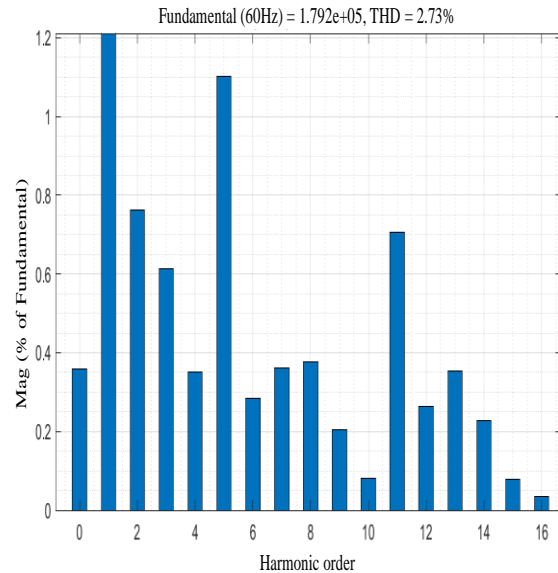


Figura 31. Espectro armónico de voltaje de la barra 728 del sistema de 37 barras.

La tabla 7 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 2.73%, este porcentaje de armónicos en el voltaje es muy bajo, debido a que la carga en la corriente es más grande, estos armónicos afectan un poco en la forma de onda del voltaje, pero no son tan visibles en su desfase, debido a que la carga no lineal produce perturbaciones en la cual el armónico que predominan en la barra es el de quinto orden.

Tabla 7. Comparación del porcentaje de armónicos en voltaje con el analizador FFT

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	2.73%
3 armónico	5%	0.61%
5 armónico	6%	1.10%
7 armónico	5%	0.36%
9 armónico	1.5%	0.20%
11 armónico	3.5%	0.71%

4.2.2 Resultados aplicando el filtro de potencia activo a la barra 728 del sistema

El objetivo del filtro de potencia activo es reducir el contenido armónico que se presenta en la corriente y voltaje, para ello el filtro es conectado en paralelo a la barra donde presentan perturbaciones.

Las figuras 32 y 33 representan el voltaje y la corriente de la barra 728, en la cual se conectó el filtro de potencia activo en paralelo a la barra del sistema, el filtro está constituido por un inversor el cual rectifica las señales de corriente y voltaje, desfasándola 180 grados y eliminando el contenido armónico haciendo que el sistema trabaje de manera óptima.

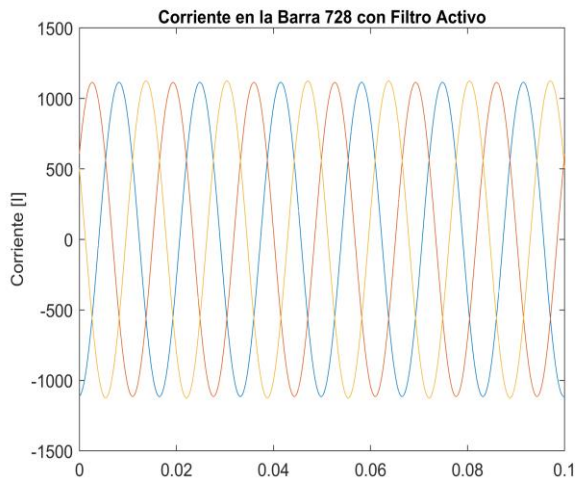


Figura 32. Señal de corriente de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.

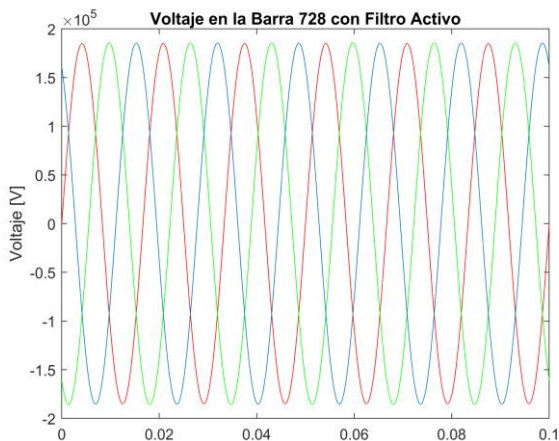


Figura 33. Señal de voltaje de la barra 728 aplicando el filtro de potencia activo.

La figura 34 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de voltaje de la barra 728 del sistema a la cual se le aplico el filtro y la carga no lineal, de esta manera se puede observar que el filtro actúa sobre la carga no lineal reduciendo así los armónicos inyectados a la barra y al sistema, de esta manera el sistema vuelve a operar en condiciones óptimas.

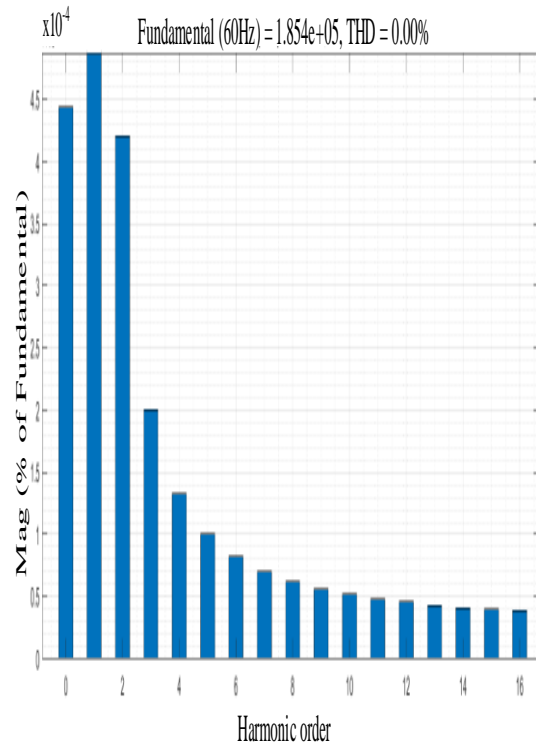


Figura 34. Espectro armónico de voltaje de la barra 728 con filtro de potencia activo.

La tabla 8 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 0%, este porcentaje es debido a que el filtro actúa sobre el armónico y el voltaje no presenta perturbaciones en la forma de onda.

Tabla 8. Filtro activo aplicado en la barra 728 con voltaje

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	0%

La figura 35 representa el espectro armónico el cual es analizado con el FFT de Simulink del sistema de prueba, el espectro representa el índice armónico de corriente de la barra 728 del sistema a la cual se le aplico el filtro y la carga no lineal, de esta manera se puede observar que el filtro actúa sobre la carga no lineal reduciendo así los armónicos inyectados a la barra y al sistema, de esta manera el sistema vuelve a operar en condiciones óptimas.

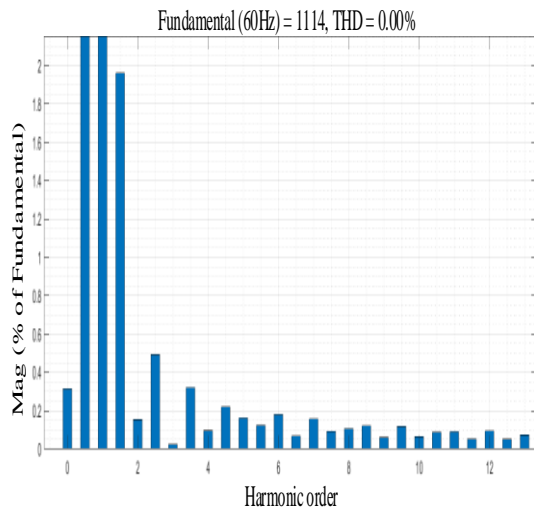


Figura 35. Espectro armónico de corriente de la barra 728 con filtro de potencia activo.

La tabla 9 representa el espectro armónico de voltaje, el cual al ser analizado con el FFT presenta un THD de 0%, este porcentaje es debido a que el filtro actúa sobre el armónico y la corriente no presenta perturbaciones en la forma de onda.

Tabla 9. Filtro activo aplicado en la barra 728 con corriente

Parámetro	EN 50160	FFT
%THD	8%	0%

La tabla 10 representa un resumen de los escenarios en los que se realizó las pruebas con la carga no lineal y la implementación del filtro de potencia activo, en la tabla se detalla el porcentaje de THD del sistema de acuerdo a la corriente y voltaje obtenido con el espectro armónico.

Tabla 10 Porcentaje de Armónicos en diferentes escenarios

Escenarios	THD (V)	THD (I)
Sin	0%	0%
Perturbación		
Barra 728 con carga no lineal	52.57%	2.73%
Transformador de 4.8[kV] con carga no lineal	308.06%	5.61%
Barra 728 con filtro de potencia activo	0%	0%
Transformador de 4.8[kV] con filtro de potencia activo	0.01%	0.01%

4.3 Resultados del controlador predictivo de corriente del sistema

La figura 36 representa la señal de corriente del controlador predictivo, en el cual se puede observar que el control predictivo minimiza el error futuro de la corriente definiendo el mejor estado, la señal determina los instantes de muestreo del sistema indicando una señal de tipo cuadrática debido al ancho de pulso generado en la simulación, la gráfica del controlador predictivo presenta desfases en la señal de inda sinusoidal de la corriente, creando tiempos de predicción en los cuales se podría mover la gráfica dependiendo de la corriente que pueda predecir el controlador predictivo.

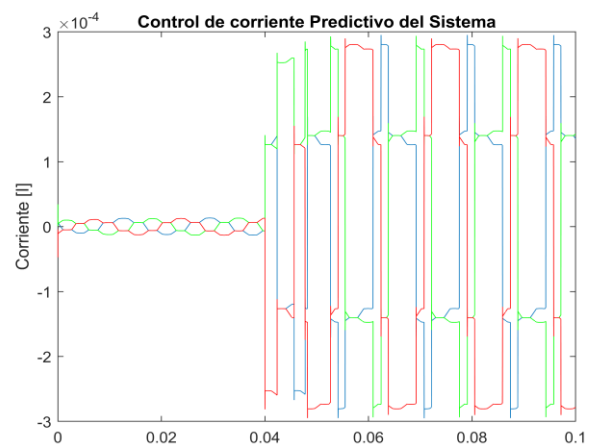


Figura 36. Señal de corriente del MPC del sistema de 37 barras.

La figura 37 representa la señal de corriente del controlador predictivo, en este caso conectado al transformador de 4.8 [kV], en esta grafica se puede observar que el controlador predictivo de corriente analiza y define el estado de la señal, en este caso el controlador indica la señal de muestreo en la cual se aprecia la señal de tipo cuadrática debido al ancho de pulso generado por la simulación, se ve detalladamente que a medida que aumenta el tiempo de simulación las ondas de corriente se distorsionan, lo que hace que el controlador se anticipe a una respuesta controlando ese instante teniendo en cuenta lo que hará la señal de corriente del transformador en el futuro

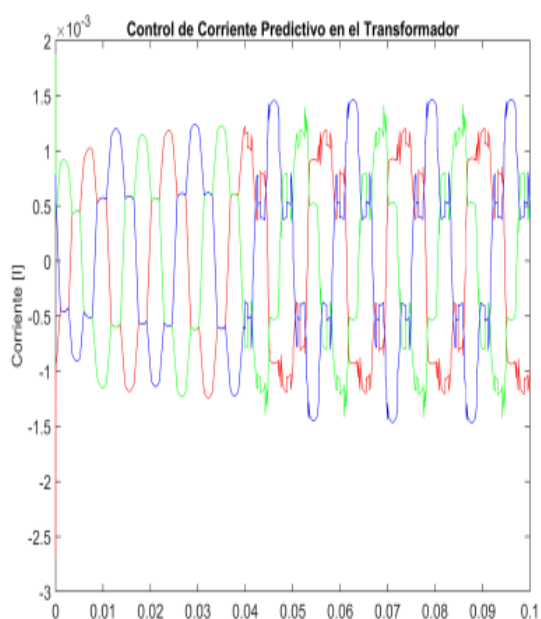


Figura 37. Señal de corriente del MPC conectado al transformador.

5 Conclusiones

Al finalizar el análisis y la simulación del sistema de 37 barras se logró obtener valores y porcentajes de las señales de corriente y voltaje de dos escenarios propuestos, en los cuales:

El punto de estudio del primer escenario del análisis del sistema de prueba de 37

barras presentaba un sistema estable, en el cual todos los parámetros fueron establecidos de acuerdo a los parámetros del sistema de 37 barras de la IEEE, en este escenario la simulación es estable, no presenta perturbaciones en las ondas de voltaje, y la señal de corriente no se tomó en cuenta debido a que no presenta una carga no lineal asociada al sistema.

En el primer escenario se presenta el análisis del sistema con una carga no lineal, la cual se conecta al centro del transformador provocando así que se inyecten armónicos en las salidas del mismo, de esta manera las señales de onda de voltaje y corriente presentaron perturbaciones las cuales hacían que el sistema no trabajara de manera óptima, en este caso la señal de corriente presentó un índice elevado de armónicos los cuales fueron analizados con el analizador FFT presentando un valor de THD de 308.66%, en cambio el voltaje presentaba un valor de THD de 5.61%, este valor no representaba mucho pero se observó que aun así la forma de onda del voltaje presentaba perturbación.

También en el primer escenario se obtuvieron resultados después de haber realizado la conexión del filtro de potencia activo mediante la carga no lineal, el filtro trabaja para eliminar o mitigar la presencia de armónicos en el transformador, dando así un THD de voltaje y corriente de 0.01%, es decir los valores de corriente y voltaje regresaron a trabajar en condiciones óptimas.

El segundo escenario representa el análisis de la influencia de la carga no lineal en un nodo distante, es decir la carga no lineal se conectó en el nodo 728, en el cual se pudo observar que la distorsión armónica afectaba a las señales de onda de voltaje y corriente, haciendo que el sistema se desestabilice y no trabaje de manera eficaz, al momento de analizar los valores de

armónicos que afectaban al sistema se observó que la corriente y el voltaje no se veían afectados y sus valores no sobresalían más de lo normal.

Durante el análisis del segundo escenario se procedió a conectar el filtro de potencia activo para que este pueda contrarrestar la distorsión armónica en el sistema, cuando el filtro es aplicado las señales de onda de voltaje y corriente vuelven a permanecer estables, en los cuales debido a la carga no lineal presentaba perturbaciones.

El analizador FFT se utilizó en ambos escenarios para obtener resultados, en el caso del análisis del filtro del nodo 728 se obtuvieron porcentajes de THD de 0%, controlando así el voltaje y la corriente del sistema.

5.1 Trabajos futuros

Los logros que se pudieron obtener en la presente análisis e investigación sugieren que se debería continuar trabajando en nuevos métodos para realizar el estudio de varias cargas no lineales en el sistema de prueba.

Determinar cómo influiría la conexión de varios filtros y cargas no lineales en el sistema y analizar cómo se podría mitigar la emisión de armónicos en el sistema.

Determinar como el sistema de prueba se puede adaptar a otros tipos de filtrado los cuales se acoplen con las cargas no lineales y así observar cómo pueden mitigar los armónicos para que el sistema pueda trabajar de manera óptima y estable.

6 Referencias

[1] P. Ramon Pinyol, “ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN,” 2016.
[2] C. Rios, M. Aristizabal, and R. Gallego, “ANÁLISIS DE

ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,” pp. 2–6, 2003.

- [3] M. C. Mario, S. Esparza González, M. C. Jesús, A. M. Guerrero, M. C. Luis, and A. C. Ramos, “Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones Nota de Divulgación,” 2006.
[4] C. Caballero, L. Cortez, G. Muñoz, and J. Castañeda, “Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo,” 2016. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
[5] J. Mendoza and C. Limones, “DISEÑO DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CON CONVERTIDOR REDUCTOR,” 2019.
[6] E. F. Camacho and C. Bordons, “CONTROL PREDICTIVO: PASADO, PRESENTE Y FUTURO,” 2004.
[7] A. Berrios Villalba, “Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario,” pp. 83–107, 2016.
[8] J. Meléndez, S. Herraiz, and J. Colomer, “Calidad de onda en el servicio eléctrico,” *Automática e Instrumentación*, pp. 1–7, 2005.
[9] M. Alhasheem, P. Mattavelli, and P. Davari, “Harmonics mitigation and non-ideal voltage compensation utilizing active power filter based on predictive current control,” *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 13, pp. 2782–2793, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0985.
[10] M. Campaña, J. Quinteros, and P. Masache, “Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en el transformador trifásico de 300kVA, que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Campus Sur,” 2021.

- [11] F. O. J. RUIZ, "Metodologías para Identificar Fuentes Armónicas en Sistemas Eléctricos," *Acit*, vol. 67, no. 6, pp. 14–21, 2007.
- [12] J. J. Fourier, "Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica," 2016.
- [13] E. Téllez Ramírez, "Distorsión Armónica," *Automatización Productividad Y Calidad S.a. De C.V.*, no. 222, pp. 1–31, 2008.
- [14] J. C. H. Heredia, "Determinación de la potencia de cargas no lineales," p. 318, 1997.
- [15] J. T. Prieto and S. Eduardo, "Estrategias efectivas para mejorar la calidad del servicio de energía eléctrica de un sistema de distribución eléctrico," vol. 2, no. 2, pp. 89–93, 2013.
- [16] H. Rodríguez, P. Sánchez, and F. Jurado, "Mejoramiento de la calidad de energía mediante un dispositivo de energía regulable," no. 2334–2501, p. 10, 2019.
- [17] A. Gutiérrez, "ANÁLISIS DE MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS CON FILTROS ACTIVOS," vol. 3, no. September, 2007.
- [18] Contreras 1998, *Análisis y diseño de filtros activos serie e híbridos para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica*, no. January 2011. 2010. [Online]. Available: <http://www.oei.es/congreso2014/contenedor.php?ref=memorias>
- [19] G. M. AE, "Análisis y diseño de filtros activos serie e híbridos para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica," no. 2, pp. 1–3, 2003.
- [20] Y. Ma, F. Hong, X. Zhou, and Z. Gao, "An Overview on Harmonic Suppression," *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*, no. 50877053, pp. 4943–4948, 2018, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407987.
- [21] O. R. Devesa, "Método de Control de Filtros Activos de Potencia Paralelo Tolerante a Perturbaciones de la Tensión de Red," *Crítica-Revista Hispanoamericana de Filosofía*, pp. 1–72, 2010.
- [22] P. Cárdenas and F. Jiménez, "Filtro activo de potencia en paralelo análisis y diseño," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 14, pp. 17–25, 2009.
- [23] C. G. Carreño, P. D. M. Leoben, C. Alberto, G. Estrada, J. Francisco, and M. Moreno, "Diseño y simulación de un filtro activo de potencia para la eliminación de armónicos," *In Vestigium Ire*, vol. 3, no. 1, 2010.
- [24] F. Medina, "Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia.," p. 106, 2021.
- [25] D. Murillo-Yarce, A. Alzate-Gómez, and A. Escobar-Mejía, "Análisis comparativo del control predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables," *Tecnológicas*, vol. 21, no. 41, pp. 45–62, 2018, doi: 10.22430/22565337.714.
- [26] P. Santis, "Diseño De Estrategias De Control Predictivo Multi-Objetivo Diseño De Estrategias De Control Predictivo Multi-Objetivo," 2016.
- [27] M. Contreras and J. Zambrano, "Performance Analysis of a Linear Model Predictive Controller on processes affected by static nonlinearities," 2021.
- [28] S. A. Verne, "Control Predictivo del Convertidor Multinivel con Enclavamiento por Diodos y sus Aplicaciones en Media Tensión," 2012.
- [29] J. López, "Control predictivo en convertidores de corriente multi-nivel para aplicaciones HVDC," pp. 1–57, 2017.

- [30] M. G. Judewicz, "Control predictivo generalizado de inversores conectados a red," no. March, p. 13, 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/303769619_Control_predictivo_generalizado_de_inversores_conectados_a_red
- [31] J. Tisza, F. Santos, and J. Arteaga, "Bidirectional and bifunctional three-phase converter using FCS-MPC control for distributed generation hybrid systems," *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2020, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.418.
- [32] L. G. González Morales, A. Espinoza, and R. Guerrero, "Implementación del algoritmo MPC a un inversor de dos niveles para un motor trifásico de inducción," *Maskay*, vol. 10, no. 2, p. 64, 2020, doi: 10.24133/maskay.v10i2.1679.
- [33] E. F. Camacho and C. Bordons, "CONTROL PREDICTIVO: PASADO, PRESENTE Y FUTURO," 2004.
- [34] S. D. Fernando, "¿Qué es el Control Predictivo y Hacia dónde se Proyecta? What is the Predictive control and to Where it is Planning?" 2013.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 11: Matriz de estado del arte.

MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN																									
DATOS				TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTA PARA RESOLUCION DE LA PROBLEMÁTICA				SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas estables a las diferentes perturbaciones encontradas	Operación Armónica	Eficiencia energética	Efectos de armónicos causados en la red	Sistemas de prueba	Fluctuaciones y calidad de energía	Filtros de potencia	Rectificadores trifásicos	Sistemas de control predictivos y modelos	Control de inductor mediante la utilización del MPC	Cargas no lineales	Efectos de los armónicos en la red	Modelos de control predictivo y perturbación eléctricas	Sistemas de control MPC	Distorsión armónica	Inversores trifásicos	Espectro de armónico	Fluctuaciones de tensión o flicker	Relación de la distorsión armónica total (THD)	Propagación de armónicos	Mitigación de armónicos	Rectificadores de señales de ondas propuestas
1	2016	Armónicos, causas, efectos y minimización	1	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐
2	2003	ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICO	29	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐
3	2006	Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones Nota de Divulgación	8	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐
4	2016	Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo	6	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒
5	2019	DISEÑO DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO CON CONVERTIDOR REDUCTOR	0	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6	2004	CONTROL PREDICTIVO: PASADO, PRESENTE Y FUTURO, ”	108	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

7	2016	Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario	46	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□
8	2005	Calidad de onda en el servicio eléctrico," Automática e Instrumentación	1	□	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□
9	2020	Harmonics mitigation and non-ideal voltage compensation utilizing active power filter based on predictive current control	10	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□
10	2021	Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en el transformador trifásico de 300kVA, que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Campus Sur	0	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗
11	2007	Metodologías para Identificar Fuentes Armónicas en Sistemas Eléctricos	1	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗
12	2016	Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica	3	✗	✗	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗
13	2008	Automatización Productividad Y Calidad S.a. De C. V	23	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□
14	1997	Determinación de la potencia de cargas no lineales	2	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□
15	2013	Estrategias efectivas para mejorar la calidad del servicio de energía eléctrica de un sistema de distribución eléctrico	4	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
16	2019	Mejoramiento de la calidad de energía mediante un dispositivo de energía regulable	4	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
17	2007	ANÁLISIS DE MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS CON FILTROS ACTIVOS	0	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
18	2011	Análisis y diseño de filtros activos serie e híbridos para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica	4	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
19	2003	Análisis y diseño de filtros activos serie e híbridos para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica	4	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
20	2018	An Overview on Harmonic Suppression," Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference	2	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
21	2010	Método de Control de Filtros Activos de Potencia Paralelo Tolerante a Perturbaciones de la Tensión de Red	5	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
22	2009	Filtro activo de potencia en paralelo análisis y diseño," Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada	7	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□

MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

23	2010	Diseño y simulación de un filtro activo de potencia para la eliminación de armónicos." In Vestigium Ire	1	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
24	2021	Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia	0	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
25	2018	Análisis comparativo del control predictivo de corriente en convertidores VSI empleados en la conexión a red de energías renovables." Tecnológicas,	5	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
26	2016	Diseño De Estrategias De Control Predictivo Multi-Objetivo Diseño De Estrategias De Control Predictivo Multi-Objetivo	5	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
27	2021	Performance Analysis of a Linear Model Predictive Controller on processes affected by static nonlinearities	1	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
28	2012	Control Predictivo del Convertidor Multinivel con Enclavamiento por Diodos y sus Aplicaciones en Media Tensión	3	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
29	2017	Control predictivo en convertidores de corriente multi-nivel para aplicaciones HVDC	1	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
30	2016	Control predictivo generalizado de inversores conectados a red	3	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
31	2020	Bidirectional and bifunctional three-phase converter using FCS-MPC control for distributed generation hybrid systems," Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology	1	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
32	2020	Implementación del algoritmo MPC a un inversor de dos niveles para un motor trifásico de inducción	1	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
33	2004	CONTROL PREDICTIVO: PASADO, PRESENTE Y FUTURO	108	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
34	2013	S. D. Fernando, "¿Qué es el Control Predictivo y Hacia dónde se Proyecta? What is the Predictive control and to Where it is Planning?"	27	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
		Cantidad		6	15	3	4	9	6	7	8	10	7	12	1	20	10	10	4	4	4	5	6	7	7

6.2 Resumen de Indicadores

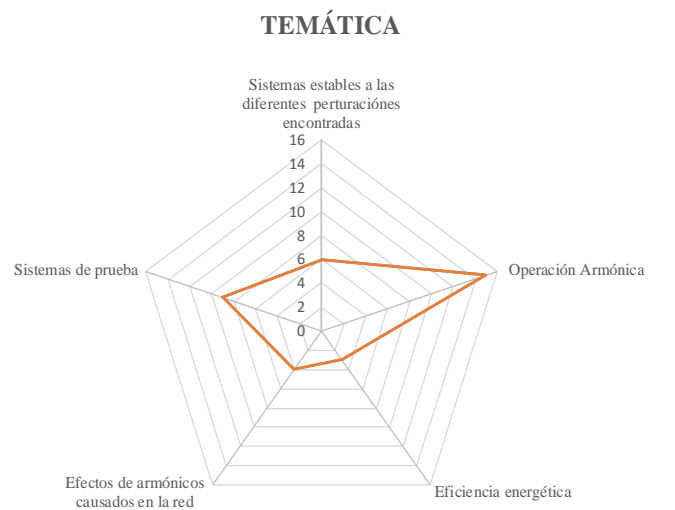


Figura 38. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

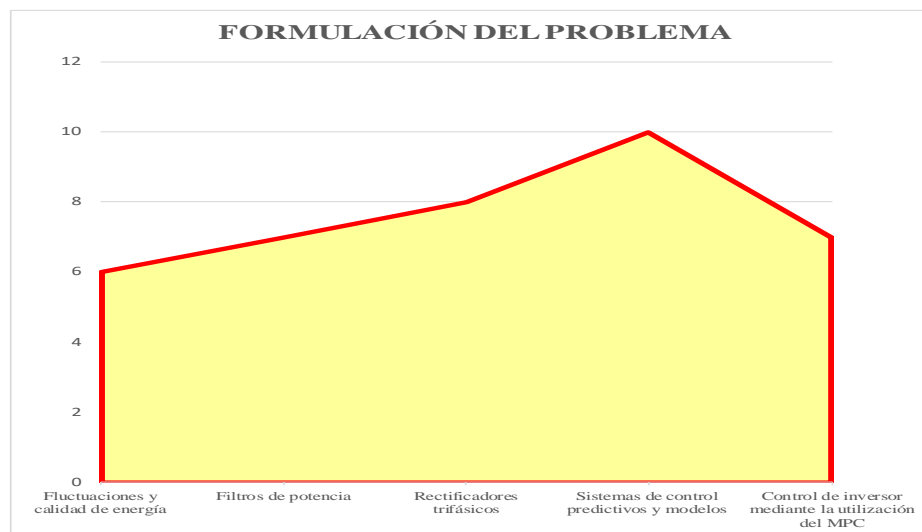


Figura 39. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

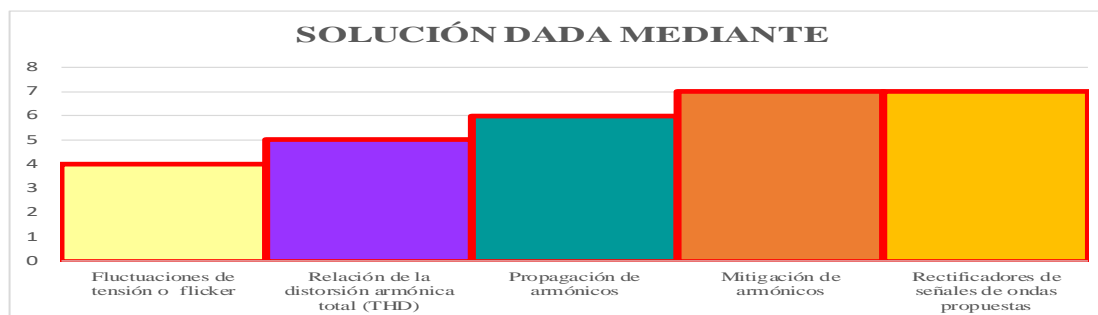


Figura 40. Indicador de solución - Estado del arte.

7 Anexos

Tabla 12. Datos de cargas del sistema IEEE de 37 barras

Node	Load Model	Ph-1 kW	Ph-1 kVAr	Ph-2 kW	Ph-2 kVAr
701	D-PQ	140	70	140	70
712	D-PQ	0	0	0	0
713	D-PQ	0	0	0	0
714	D-I	17	8	21	10
718	D-Z	85	40	0	0
720	D-PQ	0	0	0	0
722	D-I	0	0	140	70
724	D-Z	0	0	42	21
725	D-PQ	0	0	42	21
727	D-PQ	0	0	0	0
728	D-PQ	42	21	42	21
729	D-I	42	21	0	0
730	D-Z	0	0	0	0
731	D-Z	0	0	85	40
732	D-PQ	0	0	0	0
733	D-I	85	40	0	0
734	D-PQ	0	0	0	0
735	D-PQ	0	0	0	0
736	D-Z	0	0	42	21
737	D-I	140	70	0	0
738	D-PQ	126	62	0	0
740	D-PQ	0	0	0	0
741	D-I	0	0	0	0
742	D-Z	8	4	85	40
744	D-PQ	42	21	0	0
Total		727	357	639	314

Tabla 13. Datos del transformador del sistema IEEE de 37 barras

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation	2,500	230 D	4.8 D	2	8
XFM -1	500	4.8 D	.480 D	0.09	1.8

Tabla 14. Datos de las longitudes de líneas del sistema IEEE de 37 barras

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
01	702	960	722
702	705	400	724
702	713	360	723
702	703	1320	722
703	727	240	724
703	730	600	723
704	730	80	724
704	720	800	723
705	742	320	724
705	712	240	724
706	725	280	724
707	724	760	724
707	722	120	724
708	733	320	723
708	732	320	724
709	731	600	723
709	708	320	723
710	735	200	724
710	736	1280	724
711	741	400	723
711	740	200	724
713	704	520	723
714	718	520	724
720	707	920	724
720	706	600	723
727	744	280	723
730	709	200	723
733	734	560	723
734	737	640	723
734	710	520	724
737	738	400	723
738	711	400	723
744	728	200	724
744	729	280	724
775	709	0	XFM-1
799	701	1850	721