



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE 16 BARRAS CON UN FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS

AUTOR:

JUAN FELIPE HERNÁNDEZ CASTILLO

DIRECTOR:

M.SC. VÍCTOR MANUEL GARRIDO



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
COLOMBIA
NORTE DE SANTANDER
PAMPLONA
FECHA**

**SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE 16 BARRAS CON UN FILTRO PASIVO DE
ARMÓNICOS**

**AUTOR:
JUAN FELIPE HERNÁNDEZ CASTILLO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:
M.SC. VÍCTOR MANUEL GARRIDO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
COLOMBIA
NORTE DE SANTANDER
PAMPLONA
FECHA**

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, es dedicado a mi Mamá, mi Papá, mi Abuela, y a toda mi familia, por el apoyo incondicional que me han brindado, pues son el motor que me inspira e impulsa a seguir avanzando, y seguir luchando por las metas que aun hacen falta.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por iluminarme con la lámpara del cielo el camino, pues es el, la guía y luz de mi vida, la fuerza que me orienta a superar cada una de las barreras que se han interpuesto; a mi familia entera, por el constante apoyo y motivación, que me brindaron para culminar con esta importante etapa de mi vida.

Agradecer a todos los docentes, pedagogos y grandes ingenieros que tuve como mentores, pues fueron ellos, los cuales, a través de la buena enseñanza, me ayudaron a tallar mi camino. Y, por último, mi sincero agradecimiento a todas las personas, que aportaron un granito de arena a mi formación.

RESUMEN

El uso de las cargas no lineales en la actualidad, genera efectos negativos en la red de potencia, esto contribuye a generar desequilibrios y problemas de calidad de la energía. Esta investigación se centra en implementar un filtro pasivo en la simulación del sistema IEEE de 16 buses con contenido armónico, con el objetivo de mitigar los problemas de distorsión, que se presentan en este. La simulación se llevó a cabo en el software Digsilent Power Factory, que permitió implementar el filtro previamente diseñado, configurado y ubicado a partir de unas técnicas, que permitirán evaluar el comportamiento del filtro como solución a la distorsión de la forma de onda por circulación de armónicos.

Palabras claves: Sistemas Eléctricos de Potencia, Sistema IEEE 16 buses, armónicos, filtros pasivos, distorsión, calidad de la energía, cargas lineales y no lineales, compensación armónica.

ABSTRACT

The use of non-linear loads today generates negative effects on the power network, this contributes to generating imbalances and power quality problems. This research focuses on implementing a passive filter in the simulation of the IEEE 16-bus system with harmonic content, in order to reduce the distortion problems that occur in it. The simulation was carried out in the Digsilent Power Factory software, which was able to implement the filter previously designed, configured and located based on techniques that will allow evaluating the behavior of the filter as a solution to the distortion of the waveform due to the circulation of harmonic circulation.

Keywords: Electrical Power Systems, IEEE 16 bus system, harmonics, passive filters, distortion, power quality, linear and non-linear loads, harmonic compensation.

CONTENIDO

1. CAPÍTULO I-INTRODUCCIÓN	8
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.1.2 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.2.3 ACOTACIONES	9
1.3 MARCO TEÓRICO.....	9
1.3.1 GENERALIDADES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	9
1.3.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	10
1.3.2.1 GENERADORES ELÉCTRICOS	10
1.3.2.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	10
1.3.2.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	10
1.3.2.4 BARRAS.....	10
1.3.2.5 CARGAS ELÉCTRICAS.....	11
1.3.3 FLUJO DE POTENCIA	11
1.3.4 ARMÓNICOS	11
1.3.4.1 CAUSAS DE PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	11
1.3.4.2 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	12
1.3.4.3 CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	12
1.3.4.4 ESTÁNDAR IEEE 519 PARA EL CONTROL Y LIMITACIÓN ARMÓNICA.....	12
1.3.5 FILTROS PASIVOS.....	13
1.4 ESTADO DEL ARTE	13
2. CAPITULO II- METODOLOGÍA	18
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	18
2.2 CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES DE LA METODOLOGÍA	19
2.3 CASOS DE ESTUDIO PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS CON DISTORSIÓN ARMÓNICA	19
2.3.1 PRUEBA DE CONTROL PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS	19

2.3.2 CASO DE ESTUDIO: 6 CARGAS LINEALES Y 3 NO LINEALES.....	22
2.3.3 CASO DE ESTUDIO: 4 CARGAS LINEALES Y 5 NO LINEALES.....	25
2.3.4 ELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO PARA CALCULAR E IMPLEMENTAR EL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS.....	28
2.4 CALCULAR EL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS A EMPLEAR PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES	28
2.4.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA TÉCNICA DE DISEÑO DEL FILTRO PASIVO	28
2.4.2 DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DEL FILTRO PASIVO	31
2.4.3 CONFIGURACIONES Y UBICACIONES DE LOS FILTROS PASIVOS SHUNT EN EL SISTEMA IEEE 16 BARRAS	38
2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES	40
2.5.1 SIMULACIÓN DE LOS FILTROS PASIVOS EN EL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES	40
2.5.2 RESULTADOS DEL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES	42
3. CAPÍTULO III-RESULTADOS	47
3.1 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COMPENSACIÓN DEL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS	47
3.2 ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	50
3.2.1 IMPACTO INVESTIGATIVO	50
3.2.2 IMPACTO ECONÓMICO	50
4. CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de potencia IEEE 16 barras en Digsilent. [Autor].....	18
Figura 2. Forma de onda de la señal de tensión en la barra 7. [Autor].....	23
Figura 3. Forma de onda de la señal de corriente en la barra 7. [Autor].....	23
Figura 4. Distorsión armónica presente en la barra 7. [Autor]	24
Figura 5. Forma de onda de la señal de tensión en la barra 12. [Autor].....	26
Figura 6. Forma de onda de la señal de corriente de la carga no lineal en la barra 12. [Autor].	27
Figura 7. Flujo de carga armónico en sistema IEEE de 16 buses. [Autor]	27
Figura 8. Tipos de filtros pasivos generalmente usados en SEP. [38]	29
Figura 9. Respuesta del sistema IEEE 16 buses a la frecuencia. [Autor]	32
Figura 10. Respuesta a la frecuencia en las barras 3, 8 y 14. [Autor]	33
Figura 11. Armónicas Resonantes en las barras 3, 8 y 14. [Autor].....	34
Figura 12. THD presente en barra 8 Sin filtro vs Con filtro. [Autor]	37
Figura 13. Filtro pasivo de simple sintonía en configuración Y. [Autor]	39
Figura 14. Sistema IEEE 16 buses con filtro pasivo en barra con cargas no lineal. [Autor].....	40
Figura 15. Parámetros RLC del filtro en Digsilent Power Factory. [Autor].....	41
Figura 16. Señal de tensión en la barra 12 Sin Filtro vs. Con Filtro. [Autor]	42
Figura 17. Señal de corriente en la barra 12 Sin Filtro vs. Con Filtro. [Autor].....	43
Figura 18. Formas de onda de tensión en los buses críticos después de la implementación del filtro pasivo. [Autor].....	43
Figura 19. THD en barras de AT sin filtro vs con filtro. [Autor]	44
Figura 20. THD en barras de MT sin filtro vs con filtro. [Autor]	44
Figura 21. Análisis de frecuencia en la barra 12 Sin Filtro vs Con Filtro. [Autor]	45
Figura 22. THD en barras de AT estandarizado a la norma IEEE 519-2014. [Autor]	48
Figura 23. THD en barras de MT estandarizado a la norma IEEE 519-2014. [Autor]	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Limites de Distorsión Armónica Bajo la Norma IEEE 519-2014 [20].....	12
Tabla 2 Datos de los generadores eléctricos [Autor], [6], [11], [17], [12]	19
Tabla 3 Datos de los transformadores eléctricos [Autor], [6], [11], [17], [12].....	19
Tabla 4 Datos de las líneas de transmisión [Autor], [6], [11], [17], [12]	20
Tabla 5 Datos nominales e iniciales de las barras del SEP [Autor], [6], [11], [17], [12]	20
Tabla 6 Resultados del flujo de carga en la prueba de control sección 1 [Autor].....	21
Tabla 7 Resultados del flujo de carga en la prueba de control sección 2 [Autor].....	21
Tabla 8 Datos de cargas para caso de estudio: 6 lineales y 3 no lineales [Autor].....	22
Tabla 9 THD en el sistema IEEE 16 barras [Autor].....	24
Tabla 10 Datos de las cargas en caso de estudio: 4 lineales y 5 no lineales [Autor].....	25
Tabla 11 THD presente en las barras del sistema [Autor].....	26
Tabla 12 Flujo de carga armónico para diseño del filtro [Autor]	31
Tabla 13 Inyección de armónicos por cargas no lineales a la red. [Autor], [38], [40], [41]	35
Tabla 14 Datos iniciales para cálculo del filtro pasivo en la barra 8 [Autor].....	35
Tabla 15 Datos para cálculos de filtros pasivos de armónicos [Autor]	37
Tabla 16 Valores RLC de los filtros pasivos a partir del método analítico [Autor]	38
Tabla 17 Parámetros RLC de los filtros pasivos a implementar [Autor]	40
Tabla 18 Resultados del flujo de carga armónico para el sistema con el filtro implementado [Autor]	46
Tabla 19 Limites de Distorsión Armónica de la IEEE 519-2014 centrada en los niveles de tensión de interés [20]	47
Tabla 20 Resumen del THD en barras de AT comparando el límite establecido por la IEEE [Autor]	48
Tabla 21 Resumen del THD en barras de MT comparando el límite establecido por la IEEE [Autor]	49

1. CAPÍTULO I-INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A través de los últimos años se ha evidenciado el incremento de la demanda de energía eléctrica, debido al avance y perfeccionamiento cada vez más de los dispositivos tecnológicos que encontramos tanto en la industria como en nuestros hogares, no obstante, para el correcto funcionamiento de estos equipos, las compañías operadoras de red, deben de suministrar la energía eléctrica con los más altos estándares de calidad de acuerdo a la normatividad vigente. La calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones del voltaje eficaz suministrado al usuario. Esta presencia de armónicos en una red eléctrica es la causante de varios problemas como lo son: los disparos de interruptores automáticos, la reducción del factor de potencia, sobrecalentamientos y degradamiento de los elementos aislantes tanto en máquinas eléctricas estáticas como rotativas, pérdidas de energía, paradas en procesos de producción automático y entre otros efectos que pueden tener consecuencias mayores que van desde la pérdida de los activos como pérdida de vidas humanas. Dentro de las técnicas para reducir y mitigar los efectos de los armónicos en los sistemas de potencia, encontramos el uso de filtros pasivos, donde el uso de estos es un caso de estudio debido a la inestabilidad del sistema eléctrico de potencia. [1], [2], [3]

1.1.2 JUSTIFICACIÓN

A consecuencia del incremento de la demanda energética, los sistemas eléctricos de potencia se ven afectados por cargas conectadas a este, normalmente del tipo no lineal; el problema de suministrar energía eléctrica a este tipo de cargas, son las consecuencias y efectos bastante negativos para el sistema de potencia. Una de estas consecuencias es la presencia de armónicos en las redes de transmisión, distribución, y elementos propios del sistema eléctrico de potencia, los armónicos se generan por el comportamiento típico o natural de las cargas no lineales, que presentan una distorsión en la forma de onda de corriente. Esta inyección de armónicos al sistema, por parte de las cargas típicas del sistema de potencia, tiene efectos negativos como el aumento de pérdidas de potencia activa, incremento de la temperatura en máquinas eléctricas estáticas, rotativas, cables de conexión, degradación del aislamiento en equipos y cables alimentadores, saturación de los transformadores, desbalances de tensión y entre otros. A causa de lo expuesto anteriormente se vuelve importante contar con procedimientos para limitar o eliminar el contenido armónico en el sistema, esto se logra implementado un filtro pasivo cuyo objetivo es restringir considerablemente la aparición de corrientes armónicas en el sistema de potencia. [4], [5]

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar una simulación del sistema IEEE 16 barras con filtro pasivo de armónicos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer los casos de estudio para el sistema IEEE 16 barras con distorsión armónica.
2. Calcular el filtro pasivo de armónicos a emplear para el sistema IEEE 16 buses.
3. Implementar el filtro pasivo de armónicos en la simulación del sistema IEEE 16 buses.
4. Validar los resultados obtenidos de la compensación del filtro pasivo de armónicos en la simulación del sistema IEEE 16 barras.

1.2.3 ACOTACIONES

La simulación se llevará a cabo en alguno de estos softwares, como lo son Digsilent Power Factory, ETAP o Matlab.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 GENERALIDADES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

El desarrollo de un país, en la actualidad, depende de varios factores, tanto sociales, educativos, económicos, entre otros; uno de los factores que puede afectar el crecimiento de un país, es la productividad de la industria nacional, empresas que diariamente, extraen, producen, fabrican, distribuyen, grandes cantidades de materiales, suministros y entre otros; que se necesitan para el avance de una nación. A medida que crece una nación, su demanda energética se eleva; y por ello se hace necesario contar con sistemas eléctricos de potencia adecuados que logren suplir la demanda de energía eléctrica que necesitan todos los usuarios conectados a este, para que no se detenga la productividad, y su desarrollo. Los sistemas eléctricos de potencia están divididos en 4 etapas que son, generación, transmisión, distribución y uso final; En cada una de estas etapas, podemos encontrar diversos tipos de máquinas y elementos que conforman el sistema, como lo son, máquinas síncronas, transformadores de potencia, líneas de transmisión, barrajes, interruptores de potencia; y entre otros elementos que son complementos adicionales que permiten y ayudan al correcto funcionamiento bajo estándares y normativas de calidad. [6]

1.3.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia se puede definir como una gran red eléctrica, que consta de ciertas máquinas y elementos que permiten suministrar, transferir, y consumir la energía eléctrica en los grandes centros de carga; desde el punto de generación del sistema. Entre estos elementos tenemos[7]:

1.3.2.1 GENERADORES ELÉCTRICOS

Los generadores son máquinas eléctricas rotativas, que transforman la energía mecánica, que proviene de alguna fuente primaria (energía solar, hidráulica, eólica, geotérmica, mareomotriz, biomasa y entre otras) en energía eléctrica, siendo el único elemento activo y de mayor importancia del sistema eléctrico de potencia, además de entregar potencia real, este se encarga del control primario de tensiones y de inducir la frecuencia nominal a la que opera el sistema. [8], [9]

1.3.2.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión, es el elemento pasivo que se encarga del transporte de energía a niveles de alta tensión, desde los centros de generación, hacia las grandes cargas del sistema. Se dice que es una rama pasiva, ya que su modelo circuital, contiene unos parámetros de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia, que afectan la capacidad de transporte de potencia de la línea, en función de la longitud de esta. [10], [11]

1.3.2.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El transformador de potencia, es una máquina eléctrica estática y es un elemento principal del sistema eléctrico de potencia; se encarga de elevar o reducir los niveles de tensión en cada una de las etapas, para así suministrar energía con alta eficiencia y rendimiento, desde el punto de generación hacia el uso final de esta. El modelo circuital permite analizar a detalle las pérdidas que este puede tener a través de su impedancia interna. [12]

1.3.2.4 BARRAS

Las barras o nodos, en el sistema eléctrico de potencia, son un punto de conexión común donde 2 o más elementos están conectados, este permite la transferencia de energía a las ramas conectadas al sistema. Generalmente existen tres tipos de barras para analizar el SEP, entre estas tenemos la barra de referencia o “slack”, donde conocemos el voltaje y el ángulo de este; barra PQ, donde conocemos los valores de potencia activa y reactiva de la carga y la barra PV, donde conocemos la potencia activa y mediante métodos de compensación y generación, conocemos el voltaje. [11], [13]

1.3.2.5 CARGAS ELÉCTRICAS

Es el elemento al final de la etapa del sistema eléctrico de potencia, donde se hace uso final de la energía eléctrica, por parte de los usuarios, residenciales, comerciales e industriales, dicha energía se transforma en trabajo útil, que facilita la realización de muchas acciones diarias por parte de los usuarios. Entre las cargas normalmente tenemos 2 tipos:

1.3.2.5.1 CARGA LINEAL

Una carga lineal es del tipo pasiva, usualmente entre estas tenemos, las resistencias, inductores y capacitores, se le llama lineal porque el voltaje y la corriente están relacionadas por una impedancia constante. [14]

1.3.2.5.2 CARGA NO LINEAL

Son aquellas cargas que han surgido debido al avance de la electrónica de potencia, y la rápida implementación de estas en las industrias, áreas comerciales e incluso aplicaciones residenciales, estas cargas poseen una impedancia variable a través del tiempo, lo que a su vez hace que demandan una corriente distorsionada no sinusoidal. [15]

1.3.3 FLUJO DE POTENCIA

El flujo de potencia es un análisis que utiliza métodos numéricos para resolver el problema de la no linealidad del sistema, esto se emplea para obtener valores en tiempo real de las unidades eléctricas que son de extrema importancia en la operación y control de la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Los resultados principales de este análisis iterativo son la potencia activa, reactiva, voltaje y ángulo de desfase en cada barra del sistema, además se pueden obtener del análisis de los datos principales, las corrientes de línea, pérdidas en líneas de transmisión, aporte de reactivos al sistema en líneas muy largas. El análisis se realiza mediante datos de partida como la potencia compleja consumida por las cargas y el suministro de potencia al sistema. [16], [17]

1.3.4 ARMÓNICOS

Los armónicos de señales eléctricas, son las componentes sinusoidales de la señal, por lo tanto, esta se repite en el tiempo, siendo su frecuencia un múltiplo entero de la frecuencia fundamental; las armónicas se originan a causa de las cargas no lineales conectadas al sistema de potencia, causando una distorsión de la forma de onda fundamental, dicha distorsión puede tomar un valor cuantitativo mediante un criterio llamado “distorsión armónica total”. [1], [18]

1.3.4.1 CAUSAS DE PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

A causa del avance y la rápida inserción de la electrónica de potencia cada vez más notoria en la industria, el avance tecnológico y la demanda energética creciente año tras año y cargas comerciales de potencia significativa para el sistema de potencia, tenemos el uso de ciertos elementos en estos ambientes como las lámparas fluorescentes, lámparas led, variadores de velocidad, reguladores de velocidad ajustables, hornos de arco, hornos de inducción,

convertidores de potencia, equipos de soldadura, ejes de motores desalineados, saturación en núcleos afectando el circuito magnético de las maquinas eléctricas estáticas y rotativas; el uso de estos equipos afectan la forma de onda de tensión, contribuyendo a traer diferentes efectos negativos en la red de suministro de energía eléctrica. [18], [19]

1.3.4.2 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un contenido armónico crítico en los sistemas eléctricos de potencia, puede generar consecuencias negativas en las redes eléctricas, trayendo consigo problemas como pérdidas por calentamiento excesivo en conductores, calentamiento en los neutros de sistemas de baja tensión, disminución de la vida útil de equipos, disminución del factor de potencia verdadero, sobrecargas en transformadores, calentamiento en devanados de motores eléctricos, pérdida del aislamiento en elementos dieléctricos, errores en lectura de medidores, vibración en equipos, interferencia en señales de control; y entre otros efectos que son nocivos para la red de suministro; para reducir la distorsión armónica en el sistema, se puede realizar mediante filtros pasivos que eliminan estas señales indeseables. [1]

1.3.4.3 CALIDAD DE LA ENERGÍA

Se puede entender como calidad de la energía eléctrica, al suministro continuo y libre de variaciones del valor RMS de la tensión, sin deformación en la forma de onda y sin presentar desviaciones de la frecuencia de operación; la atención continua y acciones de mantenimiento por parte de las empresas operadoras de energía eléctrica, genera estabilidad en la señal de suministro, reducción de pérdidas y una mayor eficiencia para los equipos eléctricos. [1], [18]

1.3.4.4 ESTÁNDAR IEEE 519 PARA EL CONTROL Y LIMITACIÓN ARMÓNICA

El estándar IEEE 519-2014 es una norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, que, a base de la práctica y experimentación de sus científicos, estos recomiendan y reúnen unos requisitos, para el control de armónicos en sistemas de potencia, a través de unos valores cuantitativos en los que se debe de encontrar el contenido armónico total del sistema y otros indicadores de interés. [20]

Tabla 1 Límites de Distorsión Armónica Bajo la Norma IEEE 519-2014 [20]

Bus Voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total Harmonic Distortion THD (%)
$V \leq 1\text{kV}$	5.0	8.0
$1\text{ kV} < V \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$161\text{kV} < V$	1.0	1.5 ^a

1.3.5 FILTROS PASIVOS

Los filtros pasivos de potencia, son utilizados para la mitigación de los armónicos y reducir el efecto de estos en los sistemas de potencia, funcionan bajo el principio de resonancia, que ofrece un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, dicho filtro se puede sintonizar para reducir el efecto de armónicos de cualquier orden, además puede proporcionar energía reactiva al sistema a la frecuencia fundamental. Este se construye a partir de elementos pasivos como capacitores, inductores y resistores, que se pueden clasificar por su configuración en filtros de única sintonía, doble sintonía, pasa altos. [21], [22]

1.4 ESTADO DEL ARTE

- Artículo 1. En este artículo, el autor se centró en investigar un diseño óptimo de un filtro pasivo de potencia, que contribuirá a mejorar el indicador de capacidad de almacenamiento, el cual es limitado por presencia de armónicos en sistemas con generación distribuida renovables. Obteniendo como resultado, que el filtro pasivo mejora la capacidad de almacenamiento del sistema, con un indicador de capacidad de almacenamiento del 54.34%, frente a un sistema no compensado con un indicador del 30.16%. No obstante, el filtro cumple con los términos de eficiencia y precisión de optimización, pero mantener un nivel alto de capacidad de almacenamiento en sistemas con generación distribuida conlleva a un gran costo en la implementación del filtro. [23]
- Artículo 2. En la siguiente investigación, los autores mediante la implementación de un filtro pasivo, logran mitigar las señales armónicas no deseadas en un sistema de potencia, que contiene un variador tipo convertidor de AC/DC, que se encarga de los accionamientos del motor de molino de desbaste y el motor del molino de acabado. Los investigadores diseñan un filtro pasivo sintonizado para los armónicos característicos de la carga, para solucionar la distorsión de la forma de onda de voltaje, y mediante una inyección de reactivos al sistema, compensan la caída de tensión. Obteniendo como resultados, un sistema de banco de filtros pasivos de armónicos, que compensa óptimamente el sistema de accionamiento de los motores, proporcionando una solución al contenido armónico y compensación de la potencia reactiva. [24]
- Artículo 3. Esta investigación se centra en optimizar, la asignación y diseño de los filtros pasivos de sintonía simple, en los sistemas de distribución de la energía eléctrica, con el objetivo de reducir la distorsión armónica total, elevar el factor de potencia, evitar desviaciones del perfil de tensión y entre otros problemas que afecten la calidad del suministro. Esta optimización se logra a través de un algoritmo genético, el cual es una técnica de optimización en la que se minimiza una función objetivo, esta técnica determina, la ubicación del filtro, tipo de conexión, y parámetros técnicos para cada fase del sistema. De esta manera la investigación contribuye a solucionar los problemas de calidad de la energía mediante filtros pasivos de única sintonía, ubicados y sintonizados mediante un algoritmo genético. [25]

- Artículo 4. En el departamento de electricidad de la Universidad Estatal de Malang, existen armónicos de 5 órdenes diferentes y de alto valor presentes en la red eléctrica, que causan que el indicador de distorsión armónica individual de tensión (VIHD) sea superior al 5%. Los autores plantean solucionar este problema, mediante la implementación de un filtro pasivo, pero es difícil reducir el THD presente, ya que un filtro pasivo solo mitiga un orden armónico dominante o más alto. Dentro de las estrategias que utilizaron los investigadores, fue utilizar la combinación de varios filtros pasivos y bancos de capacitores para reducir el contenido armónico presente y elevar el factor de potencia, llegando a concluir, que una combinación de varios filtros pasivos de potencia, reduce el THD presente en la red a un valor del 4.69%. [26]
- Artículo 5. Los autores presentan una metodología para asignar estratégicamente filtros pasivos de potencia en las barras de un sistema de distribución, con el fin de reducir la cantidad de barras que excedan los límites de distorsión armónica total, y evitar el aumento de contenido armónico en otros nodos, debido a una incorrecta ubicación del filtro en el sistema eléctrico de potencia. Mediante el algoritmo de optimización NSGA II, se logra obtener una estrategia, que reduce el THD presente en los sistemas de distribución desbalanceados, esta, consiste en implementar unidades de filtros pasivos monofásicos, con el fin de brindar una solución óptima a cada fase del sistema, demostrando que dicha práctica, es óptima y da mejores resultados, que instalar filtros pasivos trifásicos en nodos críticos. [27]
- Artículo 6. Los investigadores desean implementar un filtro pasivo que cumpla con parámetros adecuados, que logre reducir la distorsión armónica total, en el sistema de distribución de 11 kV de Al-Itihad que se deriva de la subestación Zubayr en Basora, en Irak. Mediante la simulación de dicho sistema de potencia, se plantea, poner a prueba tres tipos de filtros, de sintonía simple, de doble sintonía y filtro pasivo tipo "C", con el objetivo de verificar, cual configuración reduce el THD a valores aceptables y eleva el factor de potencia del sistema. Teniendo como resultados, que todas las configuraciones de filtros que se pusieron a prueba, redujeron el THD a valores permitidos según la normatividad, aunque el filtro pasivo de potencia tipo "C", fue el que mejor presentó resultados, mostrando una reducción bastante considerable en la distorsión armónica total del sistema. [28]

- Artículo 7. Los autores de esta investigación, plantean utilizar la técnica “Particle Swarm Optimization (PSO)”, como una solución óptima a la ubicación y diseño de un filtro pasivo de sintonía simple dentro de un sistema de distribución radial. Demostrando que la eficacia del método, consiste en el tipo de sistema y escenarios a trabajar, esta estrategia puede ser un enfoque sólido para solucionar los problemas de calidad de la energía en los sistemas de potencia. [29]
- Artículo 8. Los autores centran su investigación, en demostrar, cuál de las numerosas técnicas de optimización, permite diseñar un filtro pasivo de potencia que mitigue el contenido armónico presente en sistemas de potencia, y compense energía reactiva a este. Teniendo como resultados que las técnicas de optimización proporcionan, una herramienta que facilita el dimensionamiento óptimo del filtro, pero uno de los métodos más potentes para encontrar los parámetros respectivos del filtro necesario según el sistema, es el de “Class Topper Optimization (CTO)”. [30]
- Artículo 9. La reconfiguración del sistema de distribución, es una técnica que se implementa para reducir las pérdidas de la red, pero esta puede afectar el perfil de tensión e indicadores de calidad de la energía. Los autores centran su investigación en realizar un estudio de planificación de filtros pasivos de armónicos que logren brindar soluciones óptimas para problemas de calidad de la energía, para las diferentes topologías que pueda presentar el sistema de distribución. El estudio, toma como punto de partida, los perfiles de carga diarios y las diferentes configuraciones que pueda tomar el sistema, de esta manera, mediante dos núcleos de algoritmo genético, resuelven la planificación del filtro pasivo con las reconfiguraciones que pueda tomar la red eléctrica. Teniendo como resultados, que ignorar las diferentes topologías que pueda tomar la red, en el estudio de planificación, puede resultar en elevaciones de algunos indicadores de calidad de la energía, violando las normativas vigentes. [31]
- Artículo 10. En este artículo, los autores presentan un diseño de un filtro pasivo de armónicos de cuarto orden, para reducir la distorsión de demanda total, utilizando un algoritmo llamado “espiral de cuervo”. Este algoritmo funciona mediante un mecanismo de búsqueda en espiral que mejora la convergencia y tiene una buena capacidad de exploración; para efectuar el diseño del filtro, se tienen en cuenta varios indicadores de calidad de la energía, pérdida de potencia activa, factor de potencia verdadero y de desplazamiento. Mostrando resultados que confirman la efectividad del algoritmo “espiral de cuervo” para el correcto dimensionamiento del filtro pasivo. [32]

- Artículo 11. Los autores en la investigación, presentan un método de diseño de filtros pasivos de múltiples brazos, aplicando el algoritmo de “búsqueda de cuervos” con el objetivo de minimizar la distorsión armónica total de tensión y corriente, para ello se tomó como caso de estudio, una planta industrial petroquímica en Egipto. Para solucionar los problemas de calidad de la energía en esta planta, los autores ponen a prueba todos los métodos convencionales que ayudan a dimensionar el filtro. Mostrando como resultados, que los métodos convencionales presentan una desventaja notoria; el método de “búsqueda de cuervos”, es el más óptimo y presenta los valores más bajos de distorsión armónica al implementarse el filtro dimensionado por este en el sistema de estudio, de esta manera, la planta petroquímica estaría cumpliendo con los índices exigidos de calidad de la energía, según la normatividad que aplique. [33]
- Artículo 12. Los filtros pasivos nos proporcionan características como alta eficiencia, baja complejidad, topologías diferentes, menor costo y facilidad de instalación. Los autores utilizan el algoritmo de optimización “Cuckoo”, con el objetivo de diseñar filtros pasivos optimizados que logren reducir efectivamente el contenido armónico no deseado, evitando que un mal dimensionamiento pueda amplificar la cantidad de armónicos presentes en un sistema eléctrico de potencia. A partir de los parámetros del sistema de potencia e indicadores de calidad de la energía, los resultados muestran que el algoritmo empleado, cumple satisfactoriamente con el dimensionamiento de un filtro pasivo óptimo y efectivo para solucionar problemas de calidad de la energía. [34]
- Artículo 13. Los autores centran la investigación en el diseño y aplicación de un filtro pasivo de armónicos, de única sintonía, para reducir la distorsión armónica total presente en un sistema de potencia de una ferroviaria. En dicho sistema de potencia, las cargas de tracción, producen armónicos masivos, que generaron fallas severas en equipos eléctricos de la subestación alimentadora y disparo de los interruptores automáticos. Para solucionar el contenido armónico, los investigadores proponen un filtro pasivo sintonizado de alto rendimiento, con el fin de mitigar la distorsión armónica y la resonancia en paralelo presente en el sistema. Obteniendo como resultado principal, que el filtro que se propuso a partir de datos de campo, ofrece un rendimiento óptimo. [35]

- Artículo 14. Los sistemas eléctricos de potencia que tienen cargas ferroviarias tienden a tener problemas por resonancias, estas pueden causar problemas de calidad de la energía para el sistema de tracción y alimentación externa. Los investigadores plantean diseñar un filtro pasivo para suprimir los modos resonantes, la distorsión de voltaje, armónicos de baja frecuencia y entre otros problemas de calidad de la energía. Esto para controlar y optimizar el sistema de suministro de energía de tracción obteniendo resultados exitosos, logrando la compensación y mitigación del contenido armónico y amortiguamiento de la resonancia, mediante un filtro de tercer armónico de banda estrecha y un filtro de banda ancha. [36]
- Artículo 15. Este artículo presenta el diseño de un filtro pasivo de alto orden que podrá ser incorporado en sistemas de energía distribuida, basándose en la técnica de optimización de enjambres de partículas. El autor se centra en diseñar un filtro pasivo amortiguado de tercer orden y filtro trampa como caso de estudio, el algoritmo se encarga de hallar los valores óptimos de las ramas pasivas del filtro, con el fin de mitigar el contenido armónico, y optimizar el dimensionamiento del filtro además ofrece ventajas, como variedad de soluciones para un mismo problema, diseño del filtro adecuado para cumplir con las normativas de calidad de la energía. Los resultados mostraron la efectividad del filtro diseñado a partir de la técnica de optimización, reduciendo el THD y entre otros problemas de calidad de la energía, demostrando que la técnica de optimización utilizada, logra un diseño óptimo del filtro pasivo. [37]

En este apartado, se mostraron las ventajas de implementar filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia e incluso aplicaciones específicas, como es el caso de sistemas de potencia ferroviarios; concluyendo, los métodos más acertados para el dimensionamiento y la ubicación, de uno, o varios filtros pasivos, es utilizar una técnica heurística o la técnica analítica. De esta manera con el correcto diseño del filtro, se evitaría una mala compensación y resonancias paralelas resultantes, por filtros no optimizados, de esta manera se estaría compensando problemas de calidad de la energía presentes en las redes eléctricas. Además, los autores expresan que los filtros pasivos, deben ser ubicados, en los nodos con niveles críticos de inyección armónica al sistema o lo más cerca posible a estos puntos, bajo esta técnica, los filtros tienen un resultado bastante efectivo para compensar todo el sistema de potencia.

2. CAPITULO II- METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el siguiente apartado, se describirá la metodología a emplear, la cual consiste en la selección de un sistema eléctrico de potencia, la red eléctrica escogida fue la de IEEE 16 barras, esta se utilizará para el cálculo y estudio del flujo de potencia en sistemas con inyección armónica a causa de cargas no lineales. La presencia de armónicos en la red tiene efectos perjudiciales que degradan el rendimiento del sistema, para esto, se plantea solucionar los problemas de calidad de la energía, implementando un filtro pasivo en el sistema de IEEE de 16 barras, para mitigar la distorsión armónica y mantener el sistema en niveles permisibles bajo los indicadores de la norma IEEE 519-2014. [3]

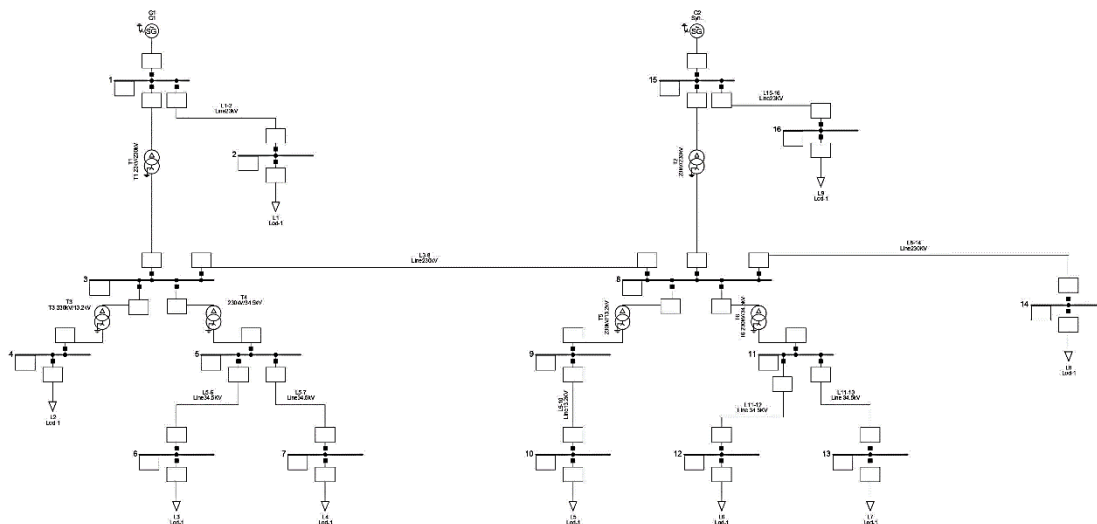


Figura 1. Sistema de potencia IEEE 16 barras en Digsilent. [Autor]

Para el dimensionamiento y ubicación del filtro, se utilizará la potencia reactiva y la tensión nominal a la que este operará para compensar el sistema. Los datos del análisis del flujo de potencia en el sistema con contenido armónico, permitirán encontrar la reactancia del filtro, con la que se calculará, las reactancias inductivas y capacitivas, para brindar un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas, y estas sean inyectadas al sistema de puesta a tierra. El filtro a utilizar, será el filtro shunt o en derivación, que se ubicará en las barras con el THD más crítico, con el objetivo de mitigar y cumplir los indicadores del estándar IEEE 519-2014. [3]

2.2 CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES DE LA METODOLOGÍA

El presente trabajo considera al software Digsilent Power Factory, como la única herramienta tecnológica para el desarrollo de la simulación e implementación de un filtro pasivo de armónicos en un sistema de potencia IEEE de 16 barras; Además se usarán otras herramientas tecnológicas que ayuden al desarrollo de la investigación.

2.3 CASOS DE ESTUDIO PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS CON DISTORSIÓN ARMÓNICA

2.3.1 PRUEBA DE CONTROL PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS

Esta prueba se realizó con el objetivo de verificar el funcionamiento y flujo de carga del sistema IEEE de 16 barras ante la presencia de cargas lineales. Con el fin de establecer cuál es el comportamiento del sistema ante cargas constantes; se planteó un sistema de 16 buses con dos generadores eléctricos, seis transformadores, entre los cuales, dos, son elevadores de tensión, y cuatro, son reductores de voltaje, tiene nueve líneas de transmisión, que varían entre cortas, medias y largas; y tiene nueve cargas lineales, consumiendo potencia activa y reactiva del sistema; los datos característicos de los elementos del sistema de potencia, se mostraran a continuación.

Tabla 2 Datos de los generadores eléctricos [Autor], [6], [11], [17], [12]

	DATOS DEL GENERADOR			
	Snom (MVA)	Vnom (KV)	Xd (%)	FP
1	300	23	100	0.95
2	300	23	100	0.95

Tabla 3 Datos de los transformadores eléctricos [Autor], [6], [11], [17], [12]

	DATOS DE TRANSFORMADORES			
	Snom (MVA)	M (KV/KV)	Vcc (%)	G.H.
1	300	23/230	10	DYn5
2	300	23/230	10	DYn5
3	0.6	230/13.2	8	DYn5
4	25	230/34.5	10	DYn5
5	1.5	230/13.2	6	DYn5
6	35	230/34.5	10	DYn5

Tabla 4 Datos de las líneas de transmisión [Autor], [6], [11], [17], [12]

	DATOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION					
	Tipo de Línea	Longitud (Km)	Vnom (KV)	Resistencia (Ω /Km)	Reactancia (Ω /Km)	Capacitancia (μ F/Km)
L1-2	Corta	20	23	0.0195	0.2375	--
L5-6	Corta	50	34.5	0.021	0.2638	--
L5-7	Corta	40	34.5	0.0198	0.2488	--
L3-8	Larga	400	230	0.125	0.4	0.0094
L9-10	Corta	10	13.2	0.0186	0.22619	--
L8-14	Media	150	230	0.05	0.41846	0.0094
L11-12	Corta	60	34.5	0.025	0.29028	--
L11-13	Corta	30	34.5	0.0199	0.24504	--
L15-16	Corta	20	23	0.0185	0.23486	--

Tabla 5 Datos nominales e iniciales de las barras del SEP [Autor], [6], [11], [17], [12]

Bus	DATOS NOMINALES E INICIALES DE LAS BARRAS						
	Tipo	Vnom(KV)	$\Theta(^{\circ})$	PG (MW)	PC (MW)	QG (MVA _R)	QC (MVA _R)
1	Slack	23	0	--	0	--	0
2	PQ	23	--	0	0.85	0	0.526
3	PQ	230	--	0	--	0	--
4	PQ	13.2	--	0	0.361	0	0.224
5	PQ	34.5	--	0	--	0	--
6	PQ	34.5	--	0	9	0	4.35
7	PQ	34.5	--	0	6.65	0	2.18
8	PQ	230	--	0	--	0	--
9	PQ	13.2	--	0	--	0	--
10	PQ	13.2	--	0	0.68	0	0.51
11	PQ	34.5	--	0	--	0	--
12	PQ	34.5	--	0	6.8	0	4.21
13	PQ	34.5	--	0	10.2	0	6.32
14	PQ	230	--	0	190	0	62.45
15	PV	23	--	100	0	--	0
16	PQ	23	--	0	0.8	0	0.6

En base a los parámetros nominales de los diferentes elementos, y las condiciones iniciales del sistema de potencia IEEE de 16 barras, planteados en las tablas anteriores. Mediante el uso de Digsilent Power Factory, se simulará la prueba de control, para realizar el estudio del flujo de carga, y analizar los resultados del sistema ante cargas lineales. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 6 Resultados del flujo de carga en la prueba de control sección 1 [Autor]

Bus	FLUJO DE POTENCIA-PRUEBA DE CONTROL			
	Vnom (KV)	Vmag (KV)	Vmag (p.u.)	$\Theta(^{\circ})$
1	23	23	1	0
2	23	22,87551	0,9945876	-0,4173107
3	230	233,1448	1,013673	146,9642
4	13,2	12,9636	0,9820907	-5,809044
5	34,5	33,7239	0,9775043	-6,690996
6	34,5	31,39508	0,9100022	-12,87942
7	34,5	32,84411	0,9520031	-10,02675
8	230	237,4692	1,032475	121,2224
9	13,2	13,35298	1,01159	-30,27156
10	13,2	13,25597	1,00424	-30,73874
11	34,5	34,32613	0,9949604	-31,51596
12	34,5	31,48582	0,9126325	-37,47012
13	34,5	32,64683	0,946285	-35,15914
14	230	208,8349	0,9079778	107,7608
15	23	24,84	1,08	-27,24962
16	23	24,71357	1,074503	-27,57962

Tabla 7 Resultados del flujo de carga en la prueba de control sección 2 [Autor]

Bus	FLUJO DE POTENCIA-PRUEBA DE CONTROL					
	PG (MW)	QG (MVA _R)	PC (MW)	QC (MVA _R)	Pi (MW)	Qi (MVA _R)
1	161,9025	-36,21626	0	0	161,9025	36,75212
2	0	0	0,85	0,5267827	0,85	0,5267827
3	0	0	0	0	161,0518	55,76688
4	0	0	0,36125	0,2238826	0,36125	0,2238826
5	0	0	0	0	15,7925	8,334905
6	0	0	9	4,358899	9	4,358899
7	0	0	6,65	2,185749	6,65	2,185749
8	0	0	0	0	214,5112	146,0168
9	0	0	0	0	0,680764	0,5193004
10	0	0	0,68	0,51	0,68	0,51
11	0	0	0	0	17,1775	12,65325
12	0	0	6,8	4,214262	6,8	4,214262
13	0	0	10,2	6,321391	10,2	6,321391
14	0	0	190	62,44998	190	62,44998
15	90	155,7794	0	0	90	155,7794
16	0	0	0,8	0,6	0,8	0,6

Analizando los resultados del flujo de carga, presentados en la tabla 6 y 7, se puede concluir que los perfiles de tensión, en cada una de las barras, está dentro de los límites de tolerancia del ± 0.1 p.u., sugeridos por la norma; además, la cargabilidad en los diferentes elementos del sistema, no supera el 80%; indicando que cada componente, se encuentra en condiciones de operación estable.

2.3.2 CASO DE ESTUDIO: 6 CARGAS LINEALES Y 3 NO LINEALES

Para este caso de estudio, se planteará el sistema IEEE de 16 barras, con presencia de 3 cargas no lineales, y 6 cargas lineales. Para realizar el estudio del flujo de carga con contenido armónico presente, los datos característicos de las máquinas y elementos del SEP, se conservarán para este y los demás casos de estudio. Para este caso particular los parámetros de las cargas lineales y no lineales, se presentarán a continuación.

Tabla 8 Datos de cargas para caso de estudio: 6 lineales y 3 no lineales [Autor]

Cargas	DATOS DE LAS CARGAS			
	Tipo	Snom (MVA)	FP	Barra de Ubicación
L1	Lineal	1	0.85	2
L2	No Lineal	0.425	0.85	4
L3	Lineal	10	0.9	6
L4	No Lineal	7	0.95	7
L5	No Lineal	0.85	0.8	10
L6	Lineal	8	0.85	12
L7	Lineal	12	0.85	13
L8	Lineal	200	0.95	14
L9	Lineal	1	0.8	16

En la tabla 8, se presentan las cargas L2, L4 y L5, las cuales son cargas no lineales, conectadas a las barras 4, 7 y 10, que inyectan corrientes armónicas que causan distorsión de la forma de onda, en las señales de tensión y corriente del sistema IEEE de 16 barras. Para apreciar la distorsión en la señal, causada por las cargas, se analizará las formas de onda de voltaje y corriente, en cualquiera de las barras donde haya presencia de cargas no lineales.

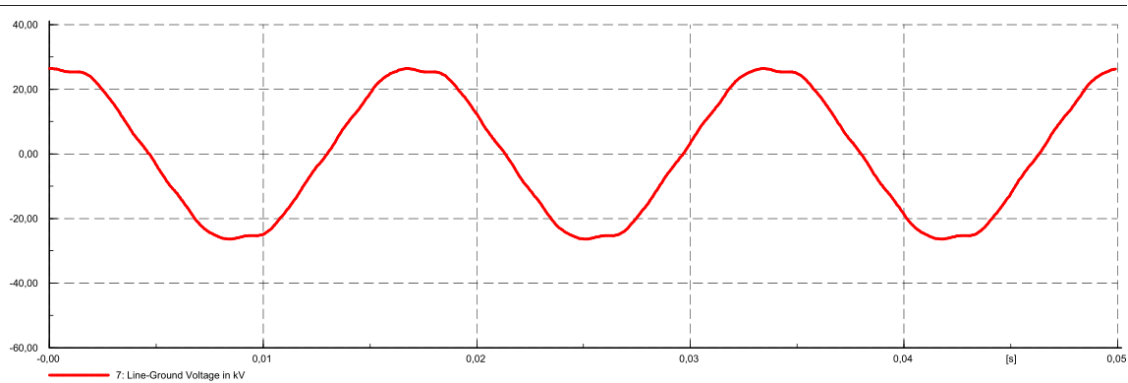


Figura 2. Forma de onda de la señal de tensión en la barra 7. [Autor]

En la figura 2, se puede apreciar la forma de onda del voltaje en la barra 7, la cual contiene una carga no lineal, esta afecta la señal de tensión al inyectar corrientes armónicas al sistema de potencia a causa de su funcionamiento característico. Se puede visualizar una señal no sinusoidal, con ligera distorsión. En la figura 3, se puede apreciar la forma de onda de la corriente de la carga no lineal, conectada a la barra 7, la cual es una señal no-sinusoidal, que afecta al sistema IEEE de 16 barras al ejercer su funcionamiento normal, induciendo contenido armónico en esta, y otras barras del sistema.

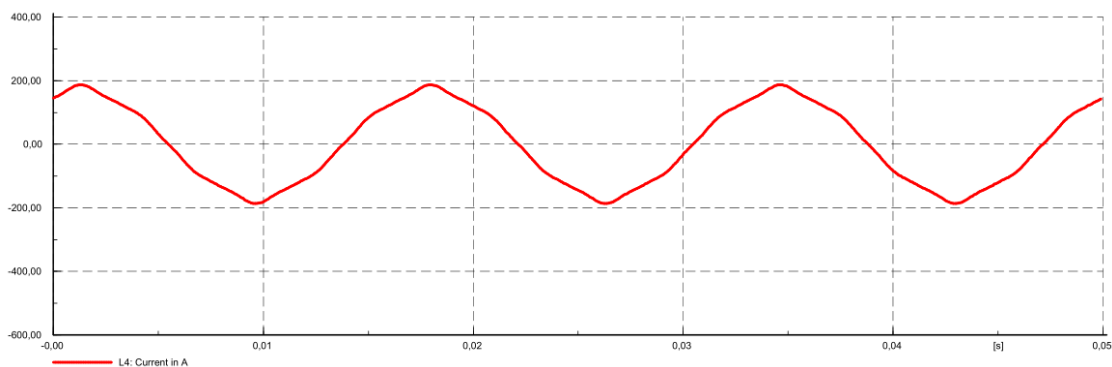


Figura 3. Forma de onda de la señal de corriente en la barra 7. [Autor]

A continuación, para el análisis del contenido armónico presente en el sistema IEEE de 16 barras, se analizará el THD presente en la barra 7, como muestra del impacto que generan las cargas no lineales en la calidad del suministro, causando problemas de distorsión de la forma de onda de alimentación. El THD presente en la barra 7, se puede ver en la figura 4.

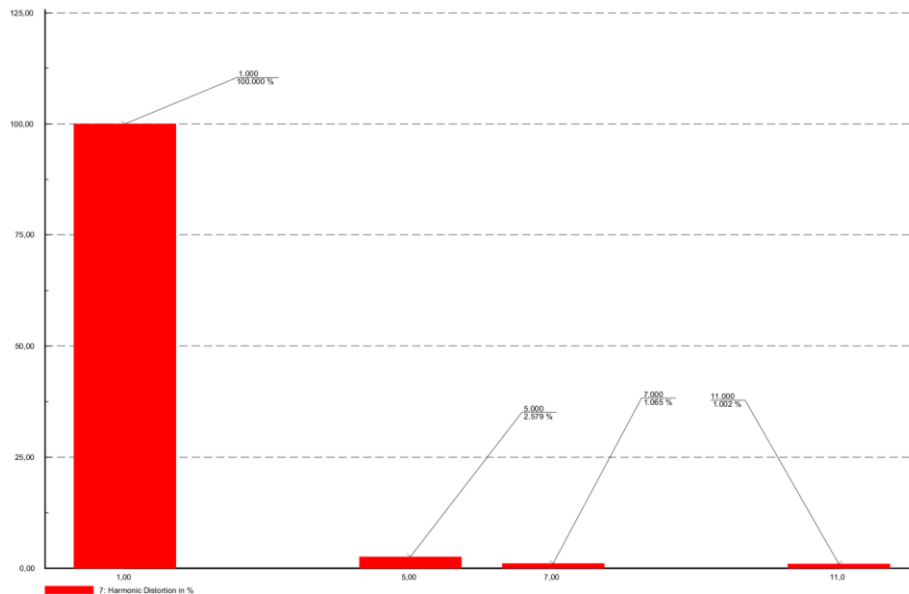


Figura 4. Distorsión armónica presente en la barra 7. [Autor]

Como se puede ver en la figura 4, para la barra 7, tenemos armónicos del orden 5, 7 y 11, los cuales tienen una magnitud no significativa, que se encuentra dentro de los rangos que estipula la IEEE 519-2014. Estos causan que el THD sea del 3%, siendo un valor estable para el sistema de potencia. El efecto de las cargas no lineales en sistemas de potencia, no solo comprende el análisis del nodo donde está ubicada dicha carga, ya que, al realizar dicha práctica, se estaría omitiendo o ignorando, el efecto de las corrientes armónicas, que se propagan por toda la red de potencia. Para evidenciar el efecto de los armónicos en el sistema, se presentará a continuación el flujo de potencia armónico, donde se mostrará a detalle la distorsión armónica total, presente en cada una de las barras.

Tabla 9 THD en el sistema IEEE 16 barras [Autor]

Bus	THD EN SISTEMA IEEE 16 BUSES		
	Vmag (KV)	Vmag (p.u.)	THD (%)
1	23	1,000011	0,4602612
2	22,87551	0,9945979	0,4555715
3	233,1448	1,013697	0,6813403
4	12,9636	0,982332	2,21681
5	33,7239	0,9775736	1,190729
6	31,39508	0,9100484	1,006954
7	32,84411	0,9524213	2,964586
8	237,4692	1,032488	0,5024919
9	13,35298	1,011633	0,9271968
10	13,25597	1,004314	1,211445
11	34,32613	0,9949717	0,4752704
12	31,48582	0,9126404	0,4160606
13	32,64683	0,946294	0,4368205
14	208,8349	0,9079863	0,433053
15	24,84	1,080006	0,3201583
16	24,71357	1,074509	0,3179714

De la tabla 9, podemos concluir, que las barras no contienen un THD crítico, de esta manera, este sistema estaría cumpliendo la normativa; Las barras donde se debe de tener prevención a través de mediciones y mantenimientos, son las 4, 5, 6, 7 y 10; no obstante, el THD permitido por la norma IEEE 519-2014, indica que, dependiendo del nivel de tensión, la distorsión armónica total, debe estar dentro de los límites, que la norma establece. Aunque en otras barras el THD este en niveles bajos, se deben considerar aun los efectos negativos que puede generar, no tener una compensación o solución a los problemas de calidad de la energía.

2.3.3 CASO DE ESTUDIO: 4 CARGAS LINEALES Y 5 NO LINEALES

Para este escenario de prueba, donde se tiene una mayor participación de cargas no lineales conectadas al sistema, se esperará, analizar los resultados del flujo armónico y los efectos que pueden generar los armónicos en la distorsión de la forma de onda. La demanda de energía por parte de las cargas conectadas a cada una de las diferentes barras del sistema, se mostrará a continuación.

Tabla 10 Datos de las cargas en caso de estudio: 4 lineales y 5 no lineales [Autor]

Cargas	DATOS DE LAS CARGAS			
	Tipo	Snom (MVA)	FP	Barra de Ubicación
L1	Lineal	1	0.85	2
L2	No Lineal	0.425	0.85	4
L3	Lineal	10	0.9	6
L4	No Lineal	7	0.95	7
L5	No Lineal	0.85	0.8	10
L6	No Lineal	8	0.85	12
L7	No Lineal	12	0.85	13
L8	Lineal	200	0.95	14
L9	Lineal	1	0.8	16

En la tabla 10, se puede evidenciar las cargas conectadas al sistema, entre las cuales, tenemos que la demanda de energía por parte de las cargas no lineales, se hacen en las barras 4, 7, 10, 12 y 13. Las cargas no lineales, demandan solo el 11.76% de la energía que se genera, sin considerar las pérdidas de potencia en los diferentes elementos, pero una baja demanda de energía, no asegura, que el sistema de potencia, no se vea afectado por la inyección de corrientes armónicas, los efectos que traen los armónicos, se ven reflejados en la cantidad de distorsión que se puede presentar, y analizando las formas de onda características, se puede evidenciar y analizar los efectos negativos de los armónicos, en el sistema de potencia.

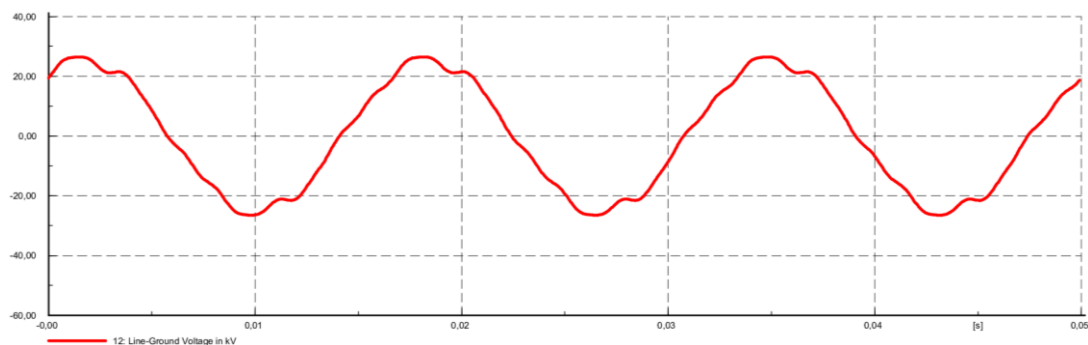


Figura 5. Forma de onda de la señal de tensión en la barra 12. [Autor]

En la figura 5, se puede evidenciar la distorsión presente en la señal de tensión, a causa de la carga no lineal, conectada al barraje 12, la cual es una señal no sinusoidal; la inyección de armónicos al sistema, causa una distorsión crítica en la fuente de alimentación. Se seleccionó la barra 12, para análisis de la distorsión en las señales características de interés, además, esta presenta el THD más alto, con un valor del 6.22%; en las otras barras se puede considerar valores críticos, ya que en algunas, supera el valor que la IEEE 519-2014, limita para ciertos niveles de tensión, ahora, en algunas barras, el límite exigido por la normativa se cumple en cuanto al indicador del THD, pero la IEEE designa, que también se deben de cumplir en los barrajes, los límites establecidos por armónico individual, Los resultados del THD en las barras del sistema, se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 THD presente en las barras del sistema [Autor]

BARRAS CON CARGAS NO LINEALES		
Bus	Vmag (p.u.)	THD (%)
4	0,9822973	2,051515
7	0,9526063	3,560352
10	1,004469	2,134088
12	0,9143963	6,220186
13	0,9472017	4,40277
OTRAS BARRAS DEL SEP		
1	1,000061	1,103933
2	0,994647	1,092747
3	1,013809	1,634186
5	0,9776977	1,989111
6	0,9101312	1,683616
8	1,032646	1,820713
9	1,011788	1,980886
11	0,9952559	2,437193
14	0,908093	1,593112
15	1,080073	1,160051
16	1,074574	1,152122

La tabla 11, muestra los resultados del flujo de potencia armónico, indicando los valores de THD, presentes en cada una de las barras del sistema, y además se evidencia la elevación del perfil de tensión en este caso de estudio. Para evidenciar la causa de la distorsión en la señal de tensión, se mostrará a continuación en la figura 6, la forma de onda de corriente, de la carga L6, conectada a la barra 12.

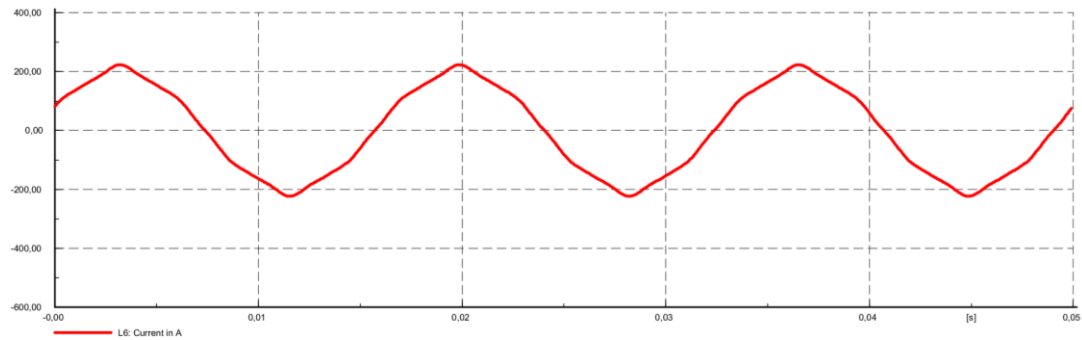


Figura 6. Forma de onda de la señal de corriente de la carga no lineal en la barra 12. [Autor]

De la figura 6, se puede evidenciar, que la señal tiene una forma de onda no-sinusoidal, que afecta críticamente la señal de tensión, causando problemas de distorsión armónica, en las diferentes barras. Además, se puede evidenciar en la figura 7, el diagrama unifilar del sistema IEEE de 16 barras con los resultados del flujo de carga armónico, mostrados en la tabla 10.

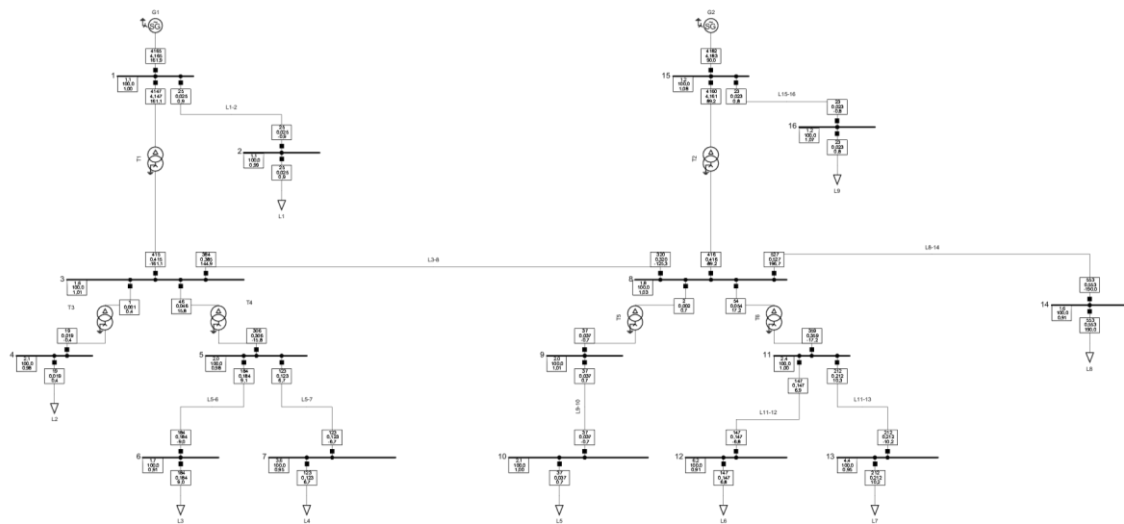


Figura 7. Flujo de carga armónico en sistema IEEE de 16 buses. [Autor]

2.3.4 ELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO PARA CALCULAR E IMPLEMENTAR EL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS

A partir de los datos obtenidos en los diferentes escenarios de prueba, se pudo evidenciar los resultados del contenido armónico total, presente en el sistema IEEE de 16 buses; analizando los casos de estudio aplicados, y sus diferentes resultados, se selecciona el caso de estudio: “4 cargas lineales y 5 no lineales”, argumentando la decisión, en base a los datos mostrados en la tabla 11, donde se puede evidenciar, valores críticos del contenido armónico, en las barras del sistema, causando pérdidas excesivas de energía, y violación de los límites establecidos por la IEEE 519-2014, requiriendo una solución o estrategia optima, que mitigue los problemas de la calidad del suministro. Además, añadiendo que este escenario es un caso de estudio típico, que se puede encontrar fácilmente en aplicaciones reales y contextualizando, que los sistemas de potencia modernos, por lo general, pueden presentar cargas mixtas.

2.4 CALCULAR EL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS A EMPLEAR PARA EL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES

2.4.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA TÉCNICA DE DISEÑO DEL FILTRO PASIVO

Las técnicas aplicables para el diseño de un filtro pasivo, consisten en técnicas analíticas y técnicas heurísticas, dichas técnicas se utilizan con el fin de brindar, un filtro optimizado, con un correcto dimensionamiento y ubicación dentro del sistema IEEE de 16 barras. Este trabajo se centrará en realizar un análisis de la técnica analítica, y con ayuda del software Digsilent Power Factory, se optimizará la ubicación del filtro pasivo dentro del sistema de potencia, con el fin de brindar una solución a los problemas de calidad de la energía presentes en el caso de estudio seleccionado. [22], [38]

Para detallar la técnica, se hace necesario realizar una pequeña introducción al concepto de filtro pasivo de armónicos, y los tipos comúnmente utilizados en los sistemas de potencia, para mitigar el efecto de las corrientes armónicas circulando por la red eléctrica. Los filtros pasivos son una combinación de elementos lineales, como los capacitores, resistores e inductores, que, dispuestos en una configuración específica, permiten sintonizar el filtro para la anulación del contenido armónico, y frecuencias resonantes específicas. [22], [38]

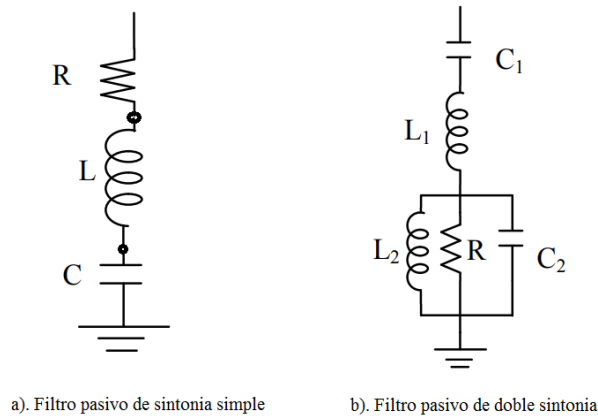


Figura 8. Tipos de filtros pasivos generalmente usados en SEP. [38]

En la figura 8, se puede evidenciar los dos tipos de filtros generalmente usados en sistemas eléctricos de potencia, estos filtros se sintonizan a frecuencias específicas, para anular armónicos específicos; su condición de baja impedancia, permite a los armónicos tener un camino a tierra, evitando que las pérdidas dentro del sistema, sean mayores. [38]

El siguiente apartado se centrará en diseñar un filtro de única sintonía. Mediante el flujo de carga armónica, podemos conocer el balance de potencia en cada barra del sistema, de esta manera, con la potencia reactiva, podemos calcular la compensación que debe realizar el filtro a frecuencia fundamental, esto a través de la ecuación (1). [21]

$$Q_{eff} = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (1)$$

Donde en (1), θ_1 y θ_2 , se relacionan con el factor de potencia actual en la barra y con el factor de potencia compensado, que se desea en el sistema. El dimensionamiento del filtro armónico, se logra a través de la ecuación (1), de la cual, obteniendo la compensación reactiva que debe realizar este, a la carga no lineal, podemos determinar el valor de la reactancia efectiva del filtro, y esto a través de la ecuación (2). [21], [39]

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{eff}} \quad (2)$$

A través de la ecuación (2), se puede calcular la impedancia del filtro a frecuencia fundamental, permitiendo encontrar las reactancias capacitivas e inductivas, a través de (3) y (4). [21], [22]

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff} \quad (3)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (4)$$

Para el filtro presentar un camino de baja impedancia a la frecuencia sintonizada, se debe de cumplir la expresión (5), la cual se puede comprobar mediante las ecuaciones (6) y (7). [22]

$$X_C = X_L \quad (5)$$

$$X_C(h) = \frac{X_C}{h} \quad (6)$$

$$X_L(h) = hX_L \quad (7)$$

De esta manera, la impedancia del filtro se puede determinar mediante la ecuación (8). [21]

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (8)$$

De (8), se puede concluir que ω , es la frecuencia angular a la que opera la red eléctrica, siendo la frecuencia fundamental, una variable que incide directamente sobre el valor de la impedancia; Los elementos R, C y L, se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones. [21], [22]

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (9)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (10)$$

$$R = \frac{X_L * h}{Q_f} \quad (11)$$

De la ecuación (11), podemos determinar que h, será la componente armónica específica que se desea mitigar, y la variable Q_f , será el factor de calidad, el cual tiene unos límites de recomendación, que se muestran en (12). [22]

$$20 < Q_f < 30 \quad (12)$$

Se puede expresar la reactancia característica del filtro, mediante la ecuación (13). [21]

$$X_n = \sqrt{X_C X_L} \quad (13)$$

De esta manera, a través de las ecuaciones expuestas en esta sección, se puede calcular analíticamente el filtro pasivo de potencia de única sintonía, que puede ser implementado en un sistema de potencia, con problemas de calidad de la energía.

2.4.2 DISEÑO Y SINTONIZACIÓN DEL FILTRO PASIVO

Para el diseño y sintonización del filtro pasivo de potencia, se tomará como sistema de prueba, el caso de estudio “4 cargas lineales y 5 no lineales”. Se realizará el flujo de carga armónica, para conocer el valor de la potencia activa y reactiva, la magnitud de tensión y nivel de THD, en las diferentes barras del sistema, los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12 Flujo de carga armónico para diseño del filtro [Autor]

FLUJO DE CARGA ARMONICO PARA DISEÑO DEL FILTRO				
BUS	VLL (KV)	THD (%)	P (MW)	Q (MVAR)
1	23	1,103933	161,9025	36,75212
2	22,87551	1,092747	0,85	0,5267827
3	233,1448	1,634186	161,0518	55,76688
4	12,9636	2,051515	0,36125	0,2238826
5	33,7239	1,989111	15,7925	8,334905
6	31,39508	1,683616	9	4,358899
7	32,84411	3,560352	6,65	2,185749
8	237,4692	1,820713	214,5112	146,0168
9	13,35298	1,980886	0,6807648	0,5193004
10	13,25597	2,134088	0,68	0,51
11	34,32613	2,437193	17,1775	12,65325
12	31,48582	6,220186	6,8	4,214262
13	32,64683	4,40277	10,2	6,321391
14	208,8349	1,593112	190	62,44998
15	24,84	1,160051	90	155,7794
16	24,71357	1,152122	0,8	0,6

De la tabla 12, se puede concluir que las cargas no lineales, conectadas al sistema IEEE de 16 barras, pueden generar circulación de armónicos por la red, afectando directamente otras barras del sistema, elevando críticamente el nivel de distorsión en las barras, sin presencia de cargas no lineales. El bus 12, presenta el nivel más crítico de THD, con un 6.22%; seguido a este bus, las barras con niveles críticos de distorsión, son las barras 3, 8 y 14, con niveles de THD del 1.63%, 1.82%, 1.59% respectivamente. Además, en la tabla 12, se señalan las barras 7 y 13, las cuales ante la normativa IEEE 519-2014, cumple con el nivel de THD, estas barras presentan incumplimiento en los niveles de distorsión armónica individual. Por lo que se hace necesario mitigar los armónicos y cumplir ante la normativa, para evitar penalizaciones. Además, al caso de estudio se le puede realizar, un barrido de frecuencia, para analizar las resonancias que se puedan presentar en el sistema IEEE 16 buses. La respuesta a la frecuencia del sistema, se puede evidenciar en la figura 9.

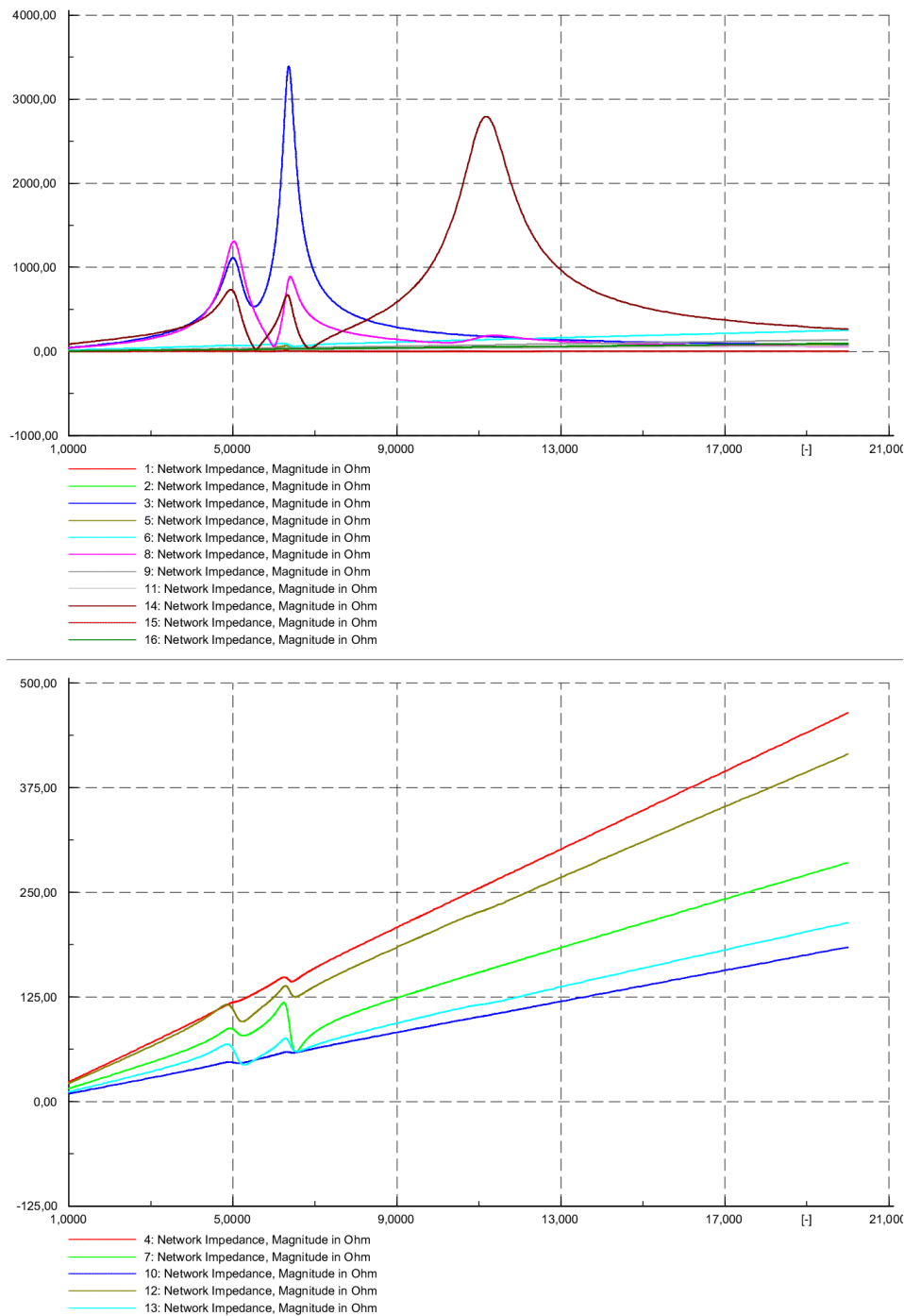


Figura 9. Respuesta del sistema IEEE 16 buses a la frecuencia. [Autor]

De la figura 9, la gráfica inferior muestra la respuesta a la frecuencia de las barras con cargas no lineales, presentándose resonancias paralelas, con una magnitud no tan elevada para armónicos del orden 1 al 20. La grafica superior resume la respuesta a la frecuencia, de las barras restantes en el sistema de 16 buses, donde tres de las barras presentan resonancias paralelas a ordenes específicos, de magnitud significativa, que se podrán apreciar a detalle, en la figura 10.

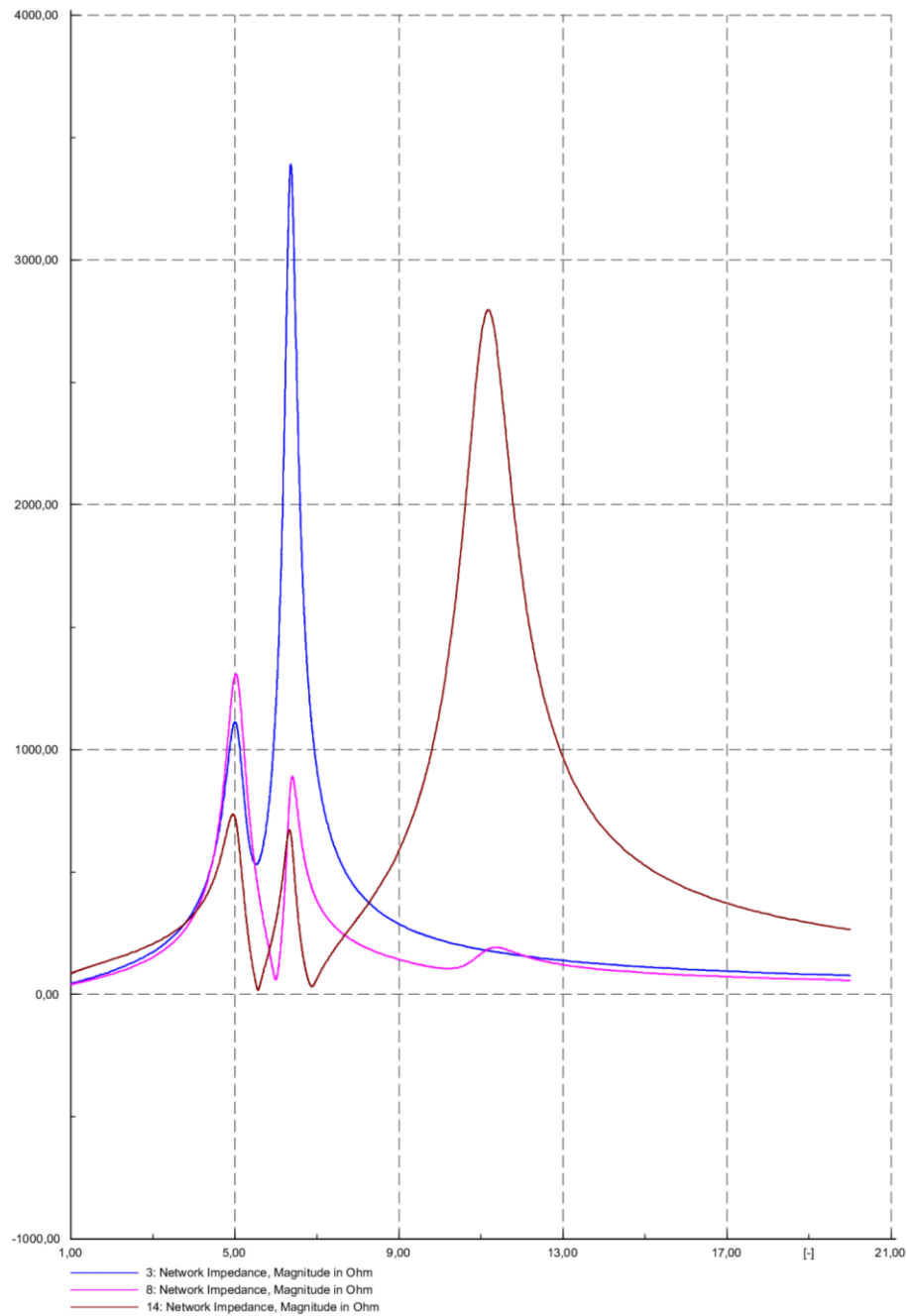


Figura 10. Respuesta a la frecuencia en las barras 3, 8 y 14. [Autor]

De la figura 10, las barras que presentan resonancias paralelas significativas, son la 3, 8 y 14, las cuales son barras de 230kV, estas barras, son el punto central del sistema IEEE 16 buses, de aquí se realiza el reparto de potencia a otros nodos del sistema; las ordenes armónicas a las cuales están resonando las impedancias del sistema, se pueden evidenciar en la figura 11.

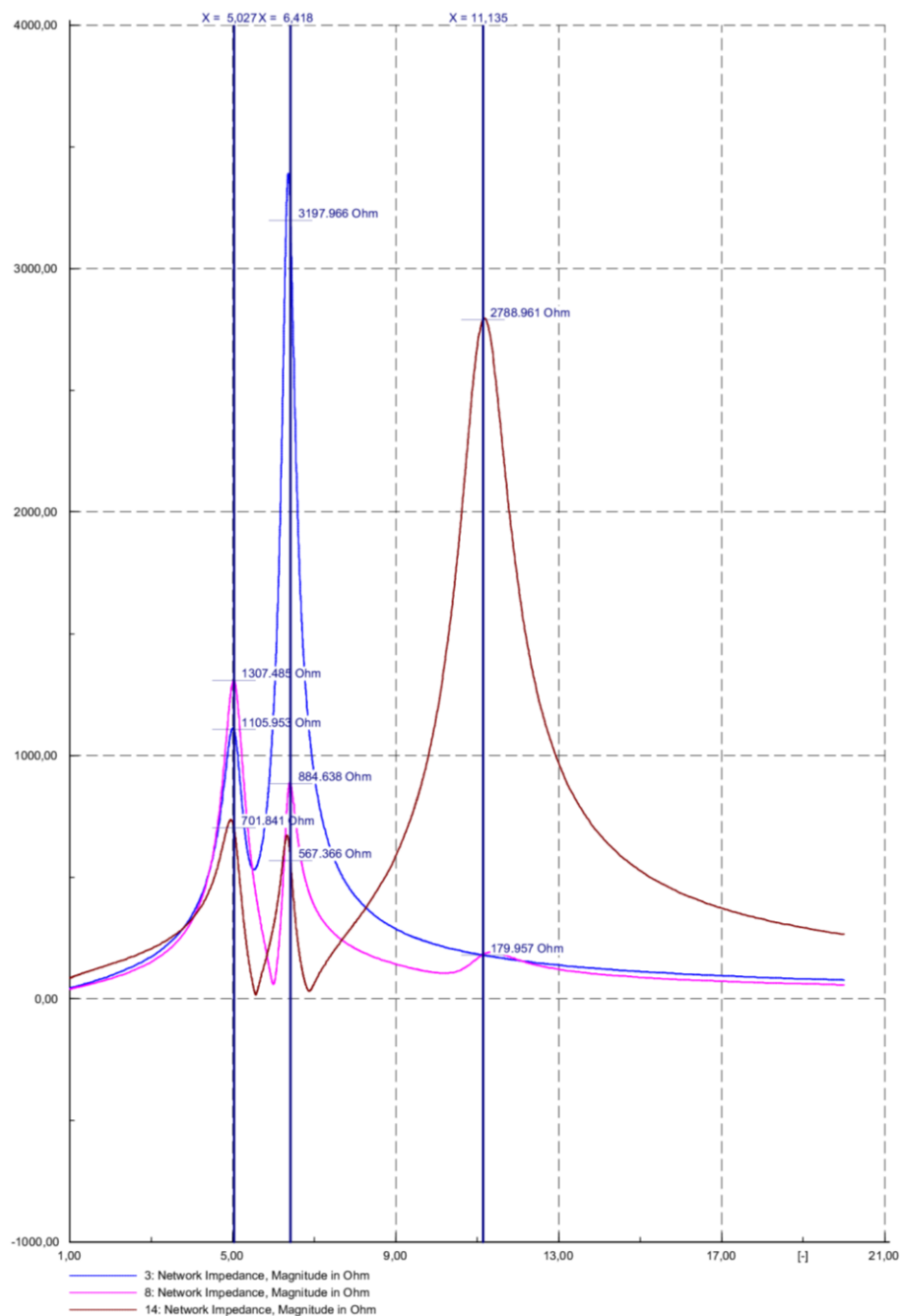


Figura 11. Armónicas Resonantes en las barras 3, 8 y 14. [Autor]

En la figura 11, se puede apreciar que las barras 3, 8 y 14, tienen armónicos resonantes a la misma frecuencia, con magnitud significativa; en este caso para análisis, el armónico resonante que tiene valor de $h=6.41$ en cada una de las barras, no tiene efecto en el sistema, ya que las cargas no lineales, no inyectan corrientes armónicas a la red de orden par. Sin embargo, los efectos que tienen los armónicos resonantes, como $h=5.02$ y $h=11.13$, a la impedancia del sistema, son de relevancia, teniendo efectos en la presencia de elevado contenido armónico, y elevación del perfil de tensión.

Para analizar el efecto de la resonancia, tomaremos como objeto de prueba, la barra 8, la cual, contiene cargas no lineales, aguas abajo de los transformadores, conectadas a los alimentadores de 13.2kV y 34.5kV, mediante una línea, con inyecciones de corrientes armónicas del orden que se especifica en la tabla 13. Las cantidades de inyección armónica que ingresan al sistema, se tomaron de los referentes expuestos en la tabla 13, de esta manera, se analizó los diferentes espectros típicos de armónicos, de cargas no lineales, y se programó a criterio del autor, el valor de inyección por orden armónica que ingresa al SEP.

Tabla 13 Inyección de armónicos por cargas no lineales a la red. [Autor], [38], [40], [41]

ORDEN ARMONICO	Cargas No Lineales (%Ifund)
5	4,5
7	2
11	1

Analizando la tabla 13, podemos evidenciar que las armónicas resonantes, como se mostraron en la figura 11, tendrían efectos perjudiciales en el sistema, ya que las cargas inyectan corrientes armónicas del orden 5 y 11. Estas resonancias paralelas, se tendrán en cuenta para diseñar el filtro, además se analizara, el THDv, en las barras 3 y 8, con el fin de realizar un correcto análisis, para mitigar la distorsión y reducir el efecto de las resonancias paralelas, y ubicar estratégicamente un filtro que compense, los alimentadores a 230kV.

Para reducir notablemente el efecto de los armónicos en el sistema, se planteará un diseño de filtros para cada barra con contenido critico de armónicos. Con ayuda de las ecuaciones descritas en la sección 2.4.1, se realizará un análisis del desarrollo del método analítico, diseñando un filtro de única sintonía para la barra 8, que mitigue el THD y la resonancia paralela, existente en este bus. Los datos serán tomados a partir, de la tabla 12, que muestra el flujo de carga y analizando el espectro de magnitud de los armónicos presentes. Continuo a este desarrollo del método analítico, se presentará un resumen de las características de diseño de los filtros que se pueden emplear en las barras con contenido critico de distorsión.

A partir de los datos del flujo de carga armónica, presentados en la tabla 12, y con los resultados del análisis de frecuencia, en la figura 11; tenemos los datos iniciales para diseñar el filtro pasivo de potencia, los cuales son mostrados en la tabla 14.

Tabla 14 Datos iniciales para cálculo del filtro pasivo en la barra 8 [Autor]

DATOS INICIALES PARA CALCULO DEL FILTRO PASIVO EN LA BARRA 8		
Potencia activa	P (MW)	214,51
Potencia reactiva	Q (MVAR)	146,02
Factor de potencia actual	FP1	0,826
Angulo del factor de potencia actual	θ_1 (°)	34,24367413
Factor de potencia deseado	FP2	0,95
Angulo del factor de potencia deseado	θ_2 (°)	18,19487
Armónica resonante del barrido de frecuencia	h	5
	h (6%)	4,7

En la tabla 14, se puede apreciar que la armónica que se desea sintonizar en el filtro, es la de orden 5^{to}, la IEEE 1531-2003 [42], sugiere que el ajuste de sintonización, se realice a un 6% menos de la orden armónica a eliminar, por esto, el cálculo de la sintonización del filtro se realizara, con la armónica h (6%). [22]

Con la ecuación (1) y (2), podemos calcular la potencia reactiva a inyectar por el filtro pasivo y la reactancia efectiva, teniendo los siguientes resultados.

$$Q_{eff} = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) = 214.51(\tan 34.24^\circ - \tan 18.19^\circ) = 75.514 \text{ MVAR} \quad (1a)$$

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_{eff}} = \frac{(230kV)^2}{75.514 \text{ MVAR}} = 700.532 \Omega \quad (2a)$$

Ahora, calculamos las reactancias capacitivas e inductivas, con (3) y (4), y mediante las expresiones (5), (6) y (7), comprobamos que las reactancias a la armónica sintonizada, sean iguales, con el objetivo de filtrar o mitigar el efecto de la frecuencia armónica, y proveer un camino de baja impedancia a tierra.

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff} = \left(\frac{4.7^2}{4.7^2 - 1} \right) * 700.532 \Omega = 733.748 \Omega \quad (3a)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{733.748 \Omega}{4.7^2} = 33.216 \Omega \quad (4a)$$

$$X_C(h) = \frac{X_C}{h}; X_C(4.7) = \frac{733.748}{4.7} = 156.11 \Omega \quad (6a)$$

$$X_L(h) = hX_L; X_L(4.7) = 4.7(33.216) = 156.11 \Omega \quad (7a)$$

$$X_C = X_L; X_C(4.7) = X_L(4.7); 156.11 = 156.11 \quad (5a)$$

De lo anterior en (5a), podemos concluir que el filtro, presentara baja impedancia, para la armónica sintonizada, permitiendo así, utilizar los valores encontrados de las reactancias capacitivas e inductivas en (3a) y (4a), para calcular el valor del condensador e inductor a implementar, mediante las ecuaciones (9) y (10); además se tomara como factor de calidad, un valor de 25, que ayudara a encontrar el valor del resistor a instalar mediante la ecuación (11).

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 733.748} = 3.615 \mu F \quad (9a)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{33.216}{2\pi * 60} = 88.108 \text{ mH} \quad (10a)$$

$$R = \frac{X_L * h}{Q_f} = \frac{33.216 * 4.7}{25} = 6.244 \Omega \quad (11a)$$

De esta manera, los parámetros RLC, del filtro pasivo de única sintonía a implementar en la barra 8 para mitigar la distorsión armónica, se presentan en (9a), (10a) y (11a). Se realizará un análisis del espectro de magnitud, para la comprobación del funcionamiento del filtro en esta barra, el resultado se muestra en la figura 12.

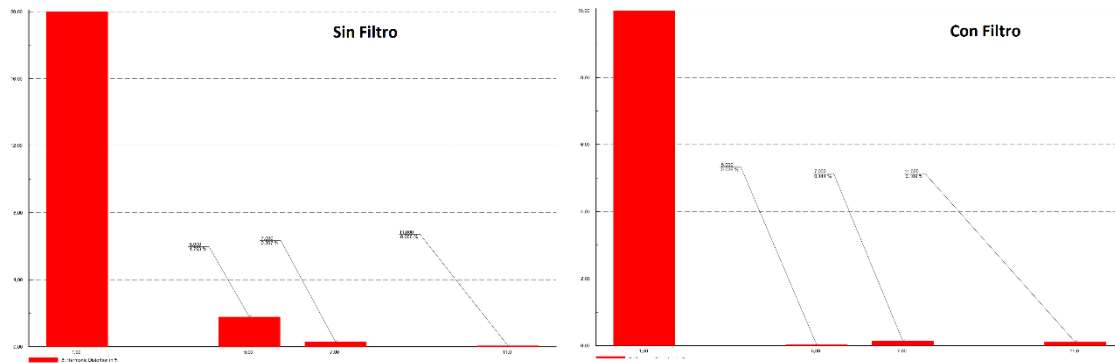


Figura 12. THD presente en barra 8 Sin filtro vs Con filtro. [Autor]

En la figura 12, se puede comprobar la efectividad del filtro de única sintonía, al realizarse una comparativa de la distorsión armónica en la barra 8, antes y después de la instalación del filtro, este tiene severidad con el 5^{to} orden armónico, al cual fue sintonizado, reduciendo su efecto del 1.79% al 0.026%, de esta manera, la barra 8, estaría cumpliendo con los límites que establece la IEEE 519-2014 para el THD y la distorsión armónica individual.

De lo anterior, podemos concluir que los filtros tienen severidad sobre el contenido armónico, reduciendo su valor, y eliminando armónicos específicos; a continuación, se resumirá en las tablas 15 y 16, los posibles filtros a implementarse, diseñados a través del método analítico, en cada una de las barras con elevada distorsión total armónica.

Tabla 15 Datos para cálculos de filtros pasivos de armónicos [Autor]

BUS	THD (%)	P (MW)	Q (MVAR)	FP1	θ_1 (°)	FP2	θ_2 (°)
3	1,634186	161,0518	55,76688	0,944953096	19,09926746	0,98	11,47834095
7	3,560352	6,65	2,185749	0,950000013	18,19487001	0,98	11,47834095
8	1,820713	214,5112	146,0168	0,826659082	34,24294095	0,95	18,19487234
12	6,220186	6,8	4,214262	0,849999972	31,78833365	0,98	11,47834095
13	4,40277	10,2	6,321391	0,850000047	31,78832554	0,95	18,19487234
14	1,593112	190	62,44998	0,95	18,19487234	0,98	11,47834095

De la tabla 15, podemos ver reflejado el cálculo de flujo armónico, en las barras con alto contenido crítico de distorsión, también se visualiza, que en el caso de los buses 3, 7 y 14, poseen factor de potencia de 0.95 antes de la compensación, para mitigar armónicos y compensar el sistema, en tal punto, se considera un factor de potencia deseado del 0.98, para lograr una visualización del filtro, en tal punto. En la barra 12, se plantea un factor de potencia de 0.98, para elevar a través del filtro la inyección de reactivos, notoriamente en ese punto.

Tabla 16 Valores RLC de los filtros pasivos a partir del método analítico [Autor]

BUS	Armónica a sintonizar						
	h	h (6%)	$X_c (\Omega)$	$X_L (\Omega)$	$R (\Omega)$	$L (H)$	$C (F)$
3	5	4,70	2402,3802	108,75	20,4457888	2,88E-01	1,10E-06
7	5	4,70	1492,3072	67,56	12,7004865	1,79E-01	1,78E-06
8	5	4,70	733,78387	33,22	6,24496913	8,81E-02	3,61E-06
12	5	4,70	439,98692	19,92	3,74456951	5,28E-02	6,03E-06
13	5	4,70	419,92764	19,01	3,57385228	5,04E-02	6,32E-06
14	5	4,70	2321,3659	105,09	19,7563053	2,79E-01	1,14E-06

En base a la tabla 16, se muestran los diseños obtenidos por el método analítico, de los filtros pasivos que pueden ser ubicados en las barras mostradas, para reducir el efecto de los armónicos. En la siguiente sección, se estudiarán las configuraciones y ubicaciones, que pueden tener algunos filtros dentro del sistema, para mitigar el THD presente en el sistema IEEE de 16 buses.

2.4.3 CONFIGURACIONES Y UBICACIONES DE LOS FILTROS PASIVOS SHUNT EN EL SISTEMA IEEE 16 BARRAS

Dentro de las estrategias de mitigación, utilizadas para solucionar la distorsión total armónica, encontramos los filtros pasivos, mencionados previamente en esta investigación. Estos filtros proveen caminos de baja impedancia para corrientes armónicas, y pueden estar sintonizados a frecuencias específicas, para anular armónicas de orden particular. La topología del filtro pasivo, en la cual se centra esta investigación, es de sintonía simple, la cual es un arreglo de elementos pasivos, como los condensadores, resistores e inductores; Este tipo de filtro provee supresión de un solo orden armónico específico, además, a frecuencia fundamental es útil para la compensación del factor de potencia. Pero la configuración y ubicación de este tipo de filtros, es sumamente importante, ya que, una mala práctica de ubicación, y configuración de los filtros, puede ocasionar resonancias paralelas que afecten directamente en la elevación del contenido armónico en otras barras del sistema. [43], [25]

Para solucionar los problemas de distorsión armónica en el sistema IEEE de 16 barras, se propone una configuración de filtros pasivos en estrella, sólidamente aterrizados a tierra, para la solución de los problemas de calidad de la energía, como, la mejora del perfil de tensión, elevación del factor de potencia y mitigación de distorsión armónica. [25]

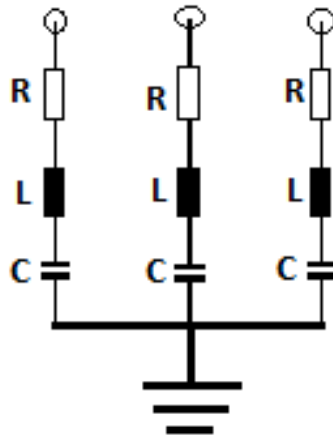


Figura 13. Filtro pasivo de simple sintonía en configuración Y. [Autor]

En la figura 13, podemos apreciar la configuración estrella, de un filtro de única sintonía. El efecto positivo que pueden tener los filtros pasivos dentro de un sistema de potencia, depende también de su ubicación dentro de la red, una errónea localización puede hacer que el filtro pasivo no tenga incidencia alguna en el sistema, y puede contribuir a elevar los problemas de distorsión.

En [43], el autor sugiere, que la ubicación de un filtro pasivo de armónicos dentro de las diferentes topologías de los sistemas de potencia, debe ser, en lo posible, lo más cerca de las fuentes de inyección armónicas, esto para evitar que los armónicos no afecten de manera significativa, el punto común de acoplamiento; además señala que un filtro ubicado distantes de los puntos con inyección armónica, puede contribuir a reducción de eficiencia en equipos eléctricos. En [39], el autor apoya esta técnica de configuración y ubicación del filtro, al expresar, que se deben considerar los casos donde los nodos tengan la máxima inyección de corriente armónica al sistema, ya que una carga variable, dificulta el dimensionamiento.

En base a los referentes expuestos anteriormente, se considera para esta investigación, configurar y ubicar el filtro pasivo, en el nodo o bus, con un nivel crítico de distorsión armónica total, para ello, se plantea ubicar un filtro, en la barra con elevada presencia crítica de armónicos, las cuales se mostraron a detalle en la tabla 15. A continuación en la figura 14, se mostrará el diagrama unifilar, del sistema de potencia de 16 barras, con la configuración y ubicación que se implementara para solucionar los problemas de calidad de la energía en el caso de estudio seleccionado.

Los datos presentados en la tabla 17, corresponden a los parámetros de los resistores, inductores y capacitores, que conforman el filtro pasivo de única sintonía, estos fueron diseñados y calculados bajo el método analítico, previamente expuesto en esta investigación, y fue ubicado en el sistema, bajo las estrategias de los referentes citados en la previa sección. A continuación, se mostrará en la figura 15, como se configuraron los filtros dentro del software Digsilent Power Factory, para la simulación con filtros pasivos del sistema IEEE de 16 barras.

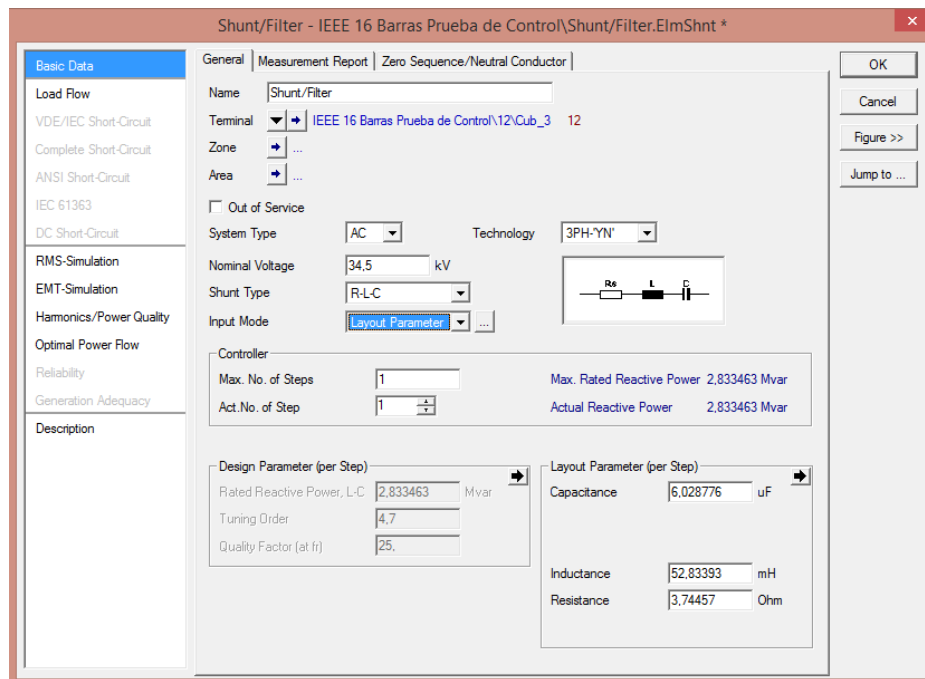


Figura 15. Parámetros RLC del filtro en Digsilent Power Factory. [Autor]

En la figura 15, se puede apreciar los parámetros y la configuración del filtro en Digsilent Power Factory, atendiendo, a una conexión en estrella aterrizada, además, se ingresaron los parámetros RLC, presentados en la tabla 17; esta figura muestra cómo se configuro el filtro para la barra 12, la cual tiene una magnitud de voltaje nominal de 34.5kV, y contiene la presencia de una carga no lineal que causa elevación de armónicos en esta y otras barras del sistema; de esta manera se programó y configuro el filtro en el punto crítico de inyección armónica al SEP.

2.5.2 RESULTADOS DEL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 16 BUSES

En esta sección, se mostrarán los resultados de la compensación armónica que realizara el filtro pasivo, al sistema IEEE de 16 barras; el diseño y ubicación del filtro pasivo, en la topología de la red, fue orientado mediante técnicas analíticas, y referentes de apoyo bibliográfico que orientaron a encontrar una solución para el caso de estudio planteado. A continuación, en la figura 16, se evidenciará, la señal de tensión después de instalar el filtro pasivo en la barra 12 del sistema.

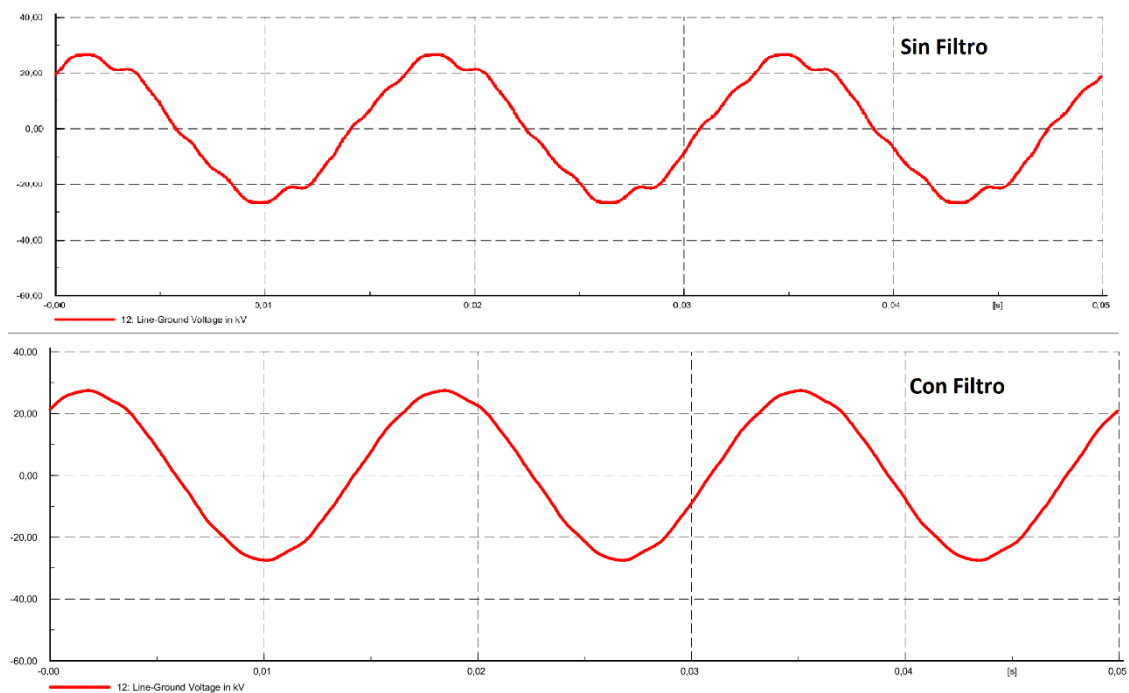


Figura 16. Señal de tensión en la barra 12 Sin Filtro vs. Con Filtro. [Autor]

De la figura 16, podemos concluir que después de la implementación del filtro, la señal tiene una forma de onda sinusoidal, con baja distorsión, evidenciando el impacto del filtro en los sistemas con presencia de armónicos. Es muy importante, contar con una señal de alimentación, bajo estándares de calidad óptimos; una señal altamente distorsionada, puede causar calentamientos excesivos, perdidas de elementos aislantes y entre otros efectos perjudiciales para elementos del SEP. A continuación, se mostrará en la figura 17, la señal de corriente de la carga conectada a la barra 12.

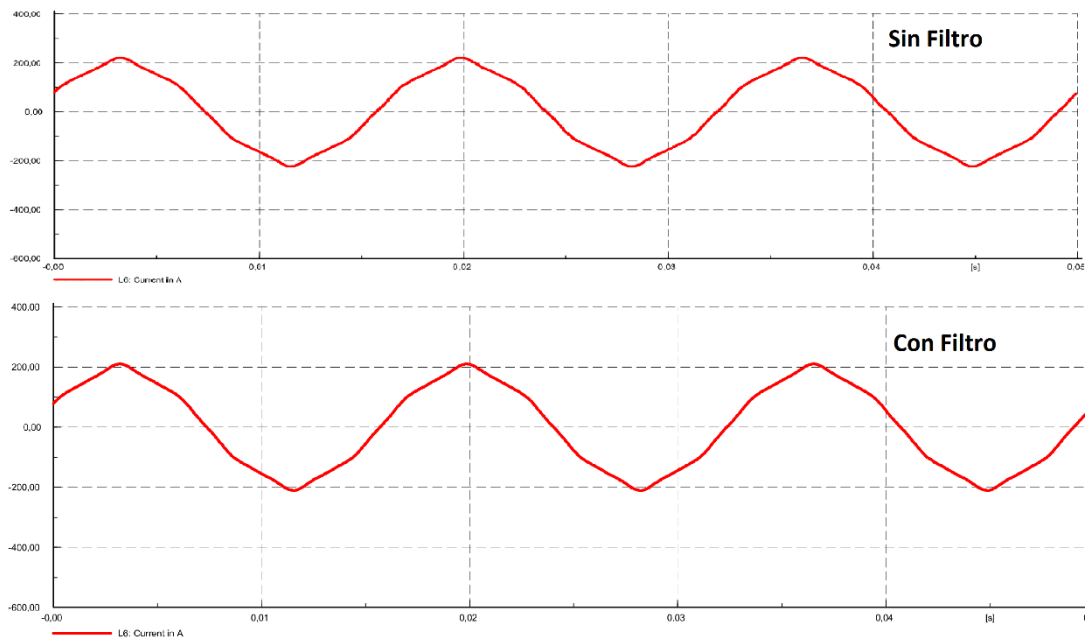


Figura 17. Señal de corriente en la barra 12 Sin Filtro vs. Con Filtro. [Autor]

En la figura 17, se puede notar una mejora parcial en los picos de corriente, más, sin embargo, la señal sigue siendo distorsionada, debido al funcionamiento típico o característico, de las cargas no lineales, el cual es inyectar corrientes armónicas al sistema, para efectuar su operación en el proceso que se implique. Ahora bien, se mostrará un resumen de las formas de onda en las barras con THD crítico antes de la implementación del filtro, para efectuar la mejora en el nivel de distorsión.

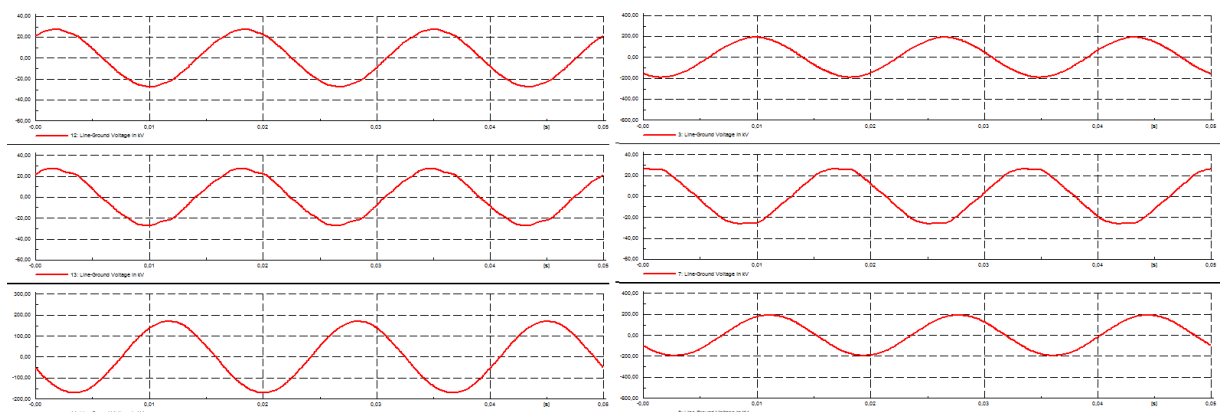


Figura 18. Formas de onda de tensión en los buses críticos después de la implementación del filtro pasivo. [Autor]

De la figura 18, podemos concluir que el filtro mejora notablemente la distorsión en las formas de onda, teniendo señales sinusoidales de voltaje, en las barras 3, 8, 12 y 14; en las barras donde notoriamente no se percibe una señal sinusoidal, la leve distorsión, se debe a que estas barras presentan niveles de THD que están por debajo de los límites de la normativa, pero el

bajo contenido armónico afecta levemente a las formas de onda. A continuación, en la figura 19, se mostrará el resumen del espectro de magnitud, en las barras con niveles de tensión de 230kV, y se hará una comparativa, entre los niveles armónicos, antes y después, de la instalación del filtro en el sistema de 16 buses.

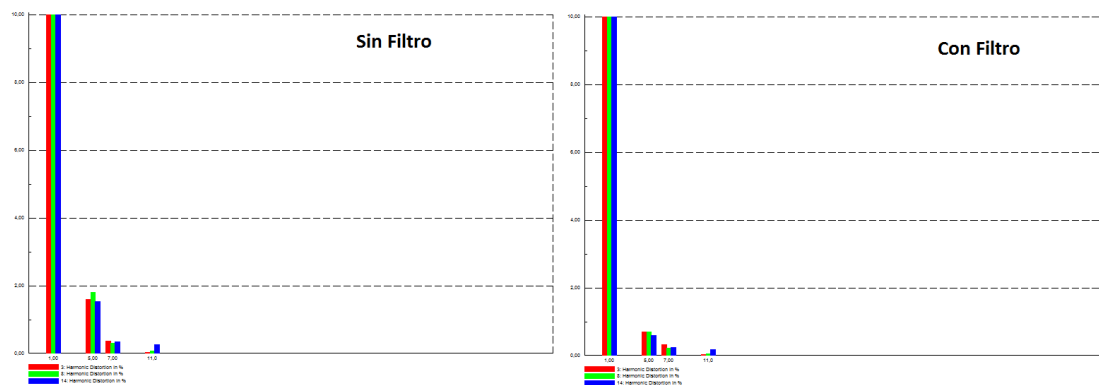


Figura 19. THD en barras de AT sin filtro vs con filtro. [Autor]

De la figura 19, podemos evidenciar como el filtro pasivo de armónicos, el cual se sintonizo al orden 5^{to}, suprime efectivamente este armónico en los niveles de distorsión del sistema, de esta manera, se evidencia otra vez más, que el filtro pasivo configurado a una sintonía en específico, es una buena técnica de solución a armónicos particulares. El sistema de estudio en el cual se centra esta investigación, solo posee tres barras, las cuales tienen un nivel de alta tensión, como parámetro de funcionamiento nominal; las otras barras del sistema, operan a niveles de media tensión, los cuales se encuentran, entre 13.2kV, 23kV y 34.5kV. Para analizar el espectro de magnitud de estas barras, se mostrará el contenido armónico en todas las barras en MT, para evidenciar el impacto del filtro en los buses restantes del sistema.

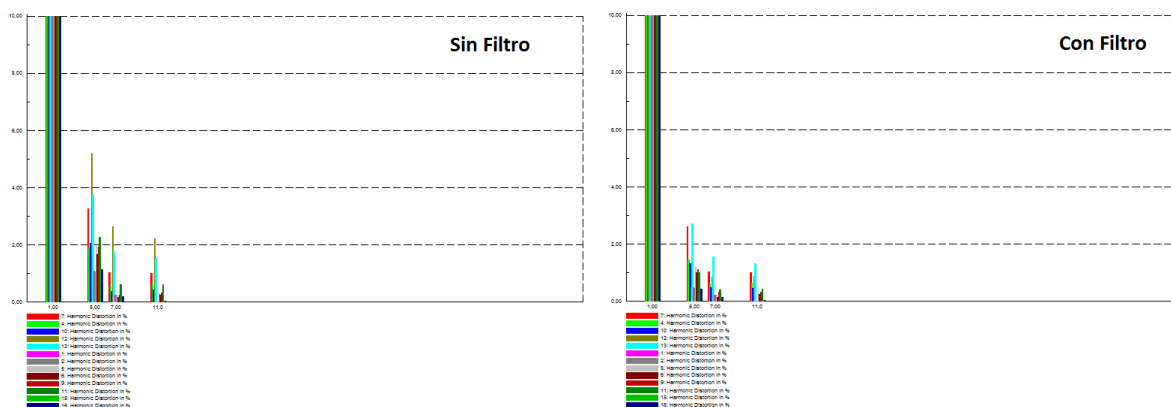


Figura 20. THD en barras de MT sin filtro vs con filtro. [Autor]

En la figura 20, podemos concluir que los armónicos de orden 5^{to}, son mitigados de eficaz manera, por el filtro pasivo ubicado en una de las barras críticas del sistema, lo que concluye que es una técnica óptima de ubicación, instalar filtros pasivos, en barras con inyección crítica de armónicos al sistema de potencia.

A continuación, se mostrarán los resultados del barrido de frecuencia aplicado a la barra de ubicación del filtro, el objetivo es validar la anulación de la resonancia paralela, en la orden sintonizada en el filtro pasivo.

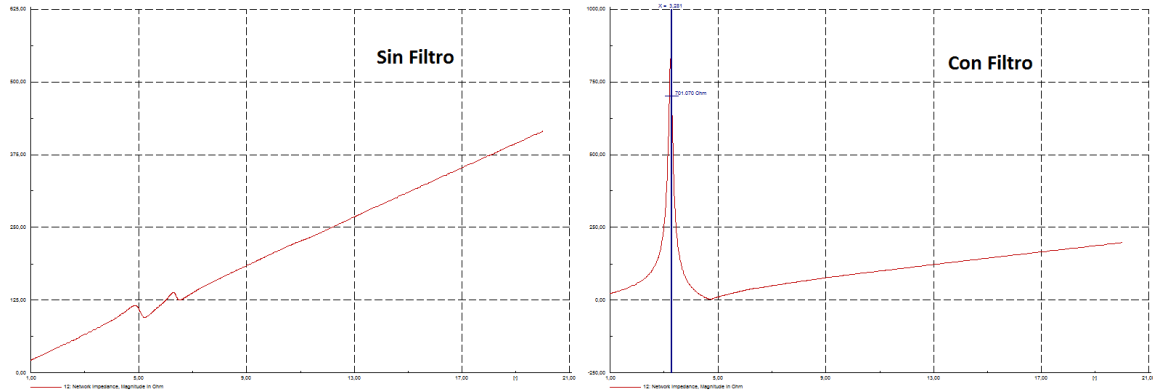


Figura 21. Análisis de frecuencia en la barra 12 Sin Filtro vs Con Filtro. [Autor]

De la figura 21, podemos concluir que la barra 12, presentaba una impedancia cada vez mayor ante un orden armónico mayor, antes de implementarse el filtro; una vez instalada la solución a problemas de distorsión armónica, en el punto crítico de inyección, se nota, que, ante la orden armónica, sintonizada en el filtro, se presenta una resonancia serie, que indica la efectividad del filtro de única sintonía, presentando a ordenes mayores, una impedancia mucho menor; la resonancia paralela que se puede apreciar una vez instalado el filtro, se encuentra en el orden 3^{ero}, ya que las cargas no inyectan armónicos de tercer orden, esta resonancia no será un problema para el sistema.

En esta sección, se presentó un breve resumen de los resultados de la implementación, del filtro pasivo de armónicos en el sistema IEEE de 16 barras, en la siguiente sección, se explicará a detalle y se analizará cada resultado con la norma IEEE 519-2014, para efectuar que el sistema de estudio, cumple las regulaciones e indicadores que la IEEE sugiere. A continuación, se presentará la tabla 18, con los resultados del flujo de potencia armónico realizado al sistema IEEE de 16 barras, con el objetivo de validar la compensación en este. Los datos mostrados se centrarán, en la magnitud de tensión, los perfiles de tensión RMS en por unidad, el THD en cada barra y entre otros que se mostrarán a continuación.

Tabla 18 Resultados del flujo de carga armónico para el sistema con el filtro implementado [Autor]

FLUJO DE CARGA ARMONICO CON FILTRO IMPLEMENTADO						
BUS	VLL (KV)	VRMS (p.u.)	THD (%)	P (MW)	Q (MVAR)	FP
1	23	1,000013	0,515501	161,8697	37,08949	0,9754379
2	22,87551	0,9946005	0,5102318	0,85	0,5267827	0,85
3	233,1705	1,013814	0,76303	161,019	56,10817	0,9612317
4	12,96512	0,9823499	1,709273	0,36125	0,2238826	0,85
5	33,72799	0,977697	1,230588	15,79246	8,334408	0,8843964
6	31,39955	0,9101813	1,040753	9	4,358899	0,9
7	32,84833	0,952548	2,979628	6,65	2,185749	0,95
8	237,7226	1,033604	0,7302415	214,4809	142,7591	0,9021492
9	13,36785	1,012789	1,19928	0,6807631	0,5192794	0,7950922
10	13,27095	1,005484	1,468606	0,68	0,51	0,8
11	34,67503	1,005142	1,168601	17,16849	9,621129	0,8723592
12	33,37689	0,967528	1,300315	6,823639	4,214262	0,9747716
13	33,01595	0,9575401	3,409359	10,2	6,321391	0,8500001
14	209,1611	0,9094163	0,6691131	190	62,44998	0,95
15	24,84	1,080012	0,4657631	90	152,2087	0,5089746
16	24,71357	1,074515	0,462568	0,8	0,6	0,8

Los resultados mostrados en la tabla 15, demuestran la efectividad del filtro al ubicarse en la barra 12, punto de inyección crítica de armónicos, la compensación reactiva, elevo de 0.91 p.u. a 0.97 p.u., el voltaje en esta barra, además, de tener un factor de potencia de 0.85, el banco de condensadores, elevo el FP a valores del 0.974, teniendo una muy buena efectividad, el filtro en el sistema de potencia de estudio.

3. CAPÍTULO III-RESULTADOS

3.1 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COMPENSACIÓN DEL FILTRO PASIVO DE ARMÓNICOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 16 BARRAS

Esta sección se centrará en el análisis de los resultados obtenidos a través de la implementación del filtro pasivo de potencia en la simulación del sistema IEEE de 16 buses, con el objetivo de verificar y validar los resultados a través de las limitaciones que impone el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos para el control de la inyección armónica en sistemas de potencia. La norma define ciertos indicadores con detallados percentiles o límites, en los que se deben de encontrar los resultados del flujo de carga armónico. [20]

Para efectos de este apartado, analizaremos los límites recomendados para los armónicos de tensión, detallando que el sistema IEEE de 16 buses, que se planteó en esta investigación, tiene 3 barras en alta tensión con un nivel de 230kV, y 13 barras en media tensión, de las cuales, 3 tienen magnitud de 13.2kV, 4 son de 23kV y 6 poseen 34.5kV como tensión nominal. Para este enfoque, se presentarán los límites establecidos por la IEEE para la distorsión armónica de voltaje, modificando ligeramente la información mostrada en la tabla 1, con el objetivo de centrarnos en los límites que aplican para el caso de estudio planteado. La información se muestra en la tabla 19. [20]

Tabla 19 Límites de Distorsión Armónica de la IEEE 519-2014 centrada en los niveles de tensión de interés [20]

Bus Voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total Harmonic Distortion THD (%)
1 kV < V ≤ 69kV	3.0	5.0
161kV < V	1.0	1.5 ^a

La tabla 19, muestra los límites recomendados por el estándar de la IEEE, resumiendo la información, a los niveles de tensión que aplican para el caso de estudio planteado, esto con el fin de centralizar los resultados en los límites que apliquen.

Digsilent Power Factory permite automatizar el análisis y verificación de los resultados de la compensación, a través de una interfaz interactiva, en la cual el THD, se puede delimitar bajo los percentiles que establecen las diferentes normativas para los indicadores de distorsión de voltaje; esto se puede entender y visualizar, en la figura 22.

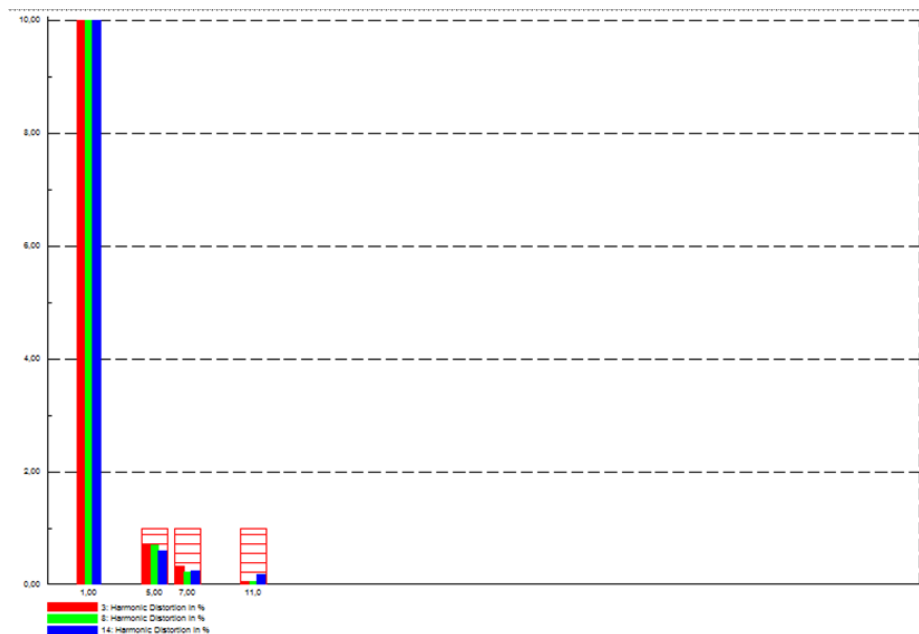


Figura 22. THD en barras de AT estandarizado a la norma IEEE 519-2014. [Autor]

La figura 22, muestra los resultados del análisis de distorsión armónica individual, presente en las barras de alta tensión del sistema, para esto en la tabla 16, la IEEE 519-2014, limita que, en barras con niveles de tensión superior a los 161kV, la distorsión armónica individual, no debe de superar el 1%. Dejando como evidencia en la figura 22, que la distorsión armónica individual en las barras de alto voltaje del sistema planteado, cumple con los límites que se le exigen. A continuación, se mostrará el análisis del THD en las barras de alta tensión, con el objetivo de validar el cumplimiento de este indicador. Ver tabla 20. [20]

Tabla 20 Resumen del THD en barras de AT comparando el límite establecido por la IEEE [Autor]

BUS	VLL (KV)	THD IEEE 519-2014 V>161kV (%)	THD MEDIDO (%)
3	233,1705	1,5	0,76303
8	237,7226	1,5	0,7302415
14	209,1611	1,5	0,6691131

Como se aprecia en la tabla 20, el límite establecido por la IEEE para barras con nivel de tensión superior al indicado por la tabla, se está cumpliendo óptimamente, demostrando que el filtro logra con éxito, mitigar la distorsión y cumplir con la normativa en las barras de alta.

A continuación, se mostrará el THD presente en las barras de media tensión, para efectos de estudio, las barras en el sistema planteado, se encuentran dentro de los límites de tensión de $1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$, para esto el estándar, determina que el límite máximo para distorsión armónica individual no debe de superar el 3%, como lo muestra la tabla 19. Para efectos de análisis, a través de las herramientas de Digsilent Power Factory que permiten la verificación del espectro de magnitud armónica, bajo el estándar IEEE 519-2014, analizaremos el THD en barras de MT. [20]

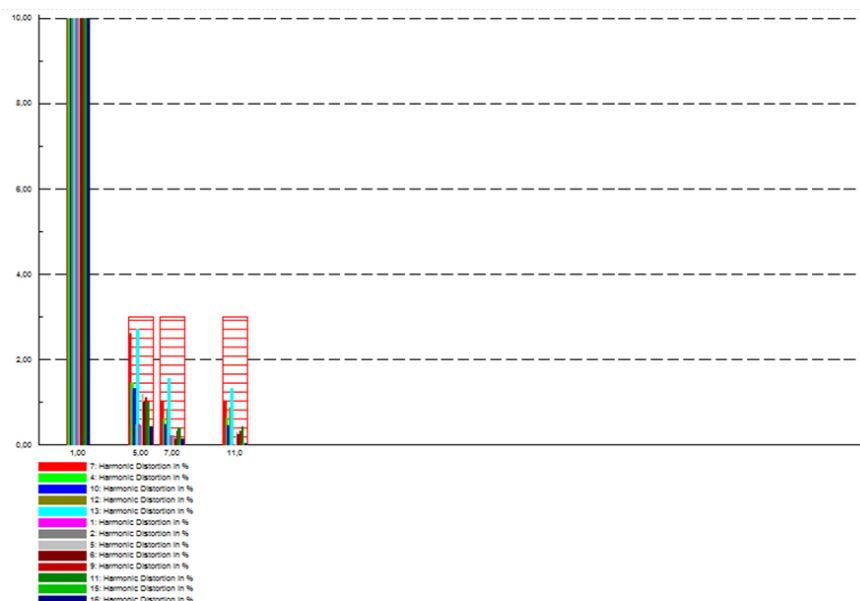


Figura 23. THD en barras de MT estandarizado a la norma IEEE 519-2014. [Autor]

La figura 23, deja en evidencia que las barras en media tensión, cumplen con efectividad, el percentil que establece la normatividad para los límites de distorsión armónica individual en este nivel de tensión. A continuación, se mostrará en la tabla 21, el resumen del THD en las barras de MT, para verificar, el cumplimiento de este indicador en estos buses.

Tabla 21 Resumen del THD en barras de MT comparando el límite establecido por la IEEE [Autor]

BUS	VLL (KV)	THD IEEE 519-2014 1 kV < V ≤ 69kV (%)	THD MEDIDO(%)
1	23	5	0,515501
2	22,87551	5	0,5102318
4	12,96512	5	1,709273
5	33,72799	5	1,230588
6	31,39955	5	1,040753
7	32,84833	5	2,979628
9	13,36785	5	1,19928
10	13,27095	5	1,468606
11	34,67503	5	1,168601
12	33,37689	5	1,300315
13	33,01595	5	3,409359
15	24,84	5	0,4657631
16	24,71357	5	0,462568

El límite establecido por la IEEE para barras con nivel de media tensión, el THD, no debe de superar el 5%, como se aprecia en la tabla 19. A partir de los datos presentados en la tabla 21, se deja en evidencia que la compensación armónica cumple óptimamente, mitigando el efecto de los armónicos en la totalidad del sistema; añadiendo que el diseño y la implementación del filtro, logran con éxito, que el sistema cumpla con la normativa en su totalidad.

3.2 ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL TRABAJO DE GRADO

3.2.1 IMPACTO INVESTIGATIVO

La presencia de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, tiene efectos perjudiciales, si no existe un control sobre estos. Las causas de los armónicos son las cargas no lineales, cada vez más presentes a niveles industriales, comerciales e incluso residenciales, pero el uso de estos dispositivos puede llegar a causar efectos como pérdidas de potencia, calentamientos excesivos, disparo de interruptores automáticos, distorsión de la forma de onda y entre otros efectos negativos, que afectan la calidad del suministro. Una solución a estos problemas de calidad de la energía, es instalar un filtro pasivo, que mitigue la inyección de corrientes armónicas al SEP, esto para evitar la circulación de estas por toda la red. Esta investigación evidencia, que la instalación de filtros pasivos en sistemas con distorsión armónica, son una solución óptima y eficaz, detallándose que el correcto diseño del filtro, tiene resultados excelentes contra la inyección de armónicos a la red. Teniendo como impacto investigativo, la aplicabilidad de este proyecto, para guiar u orientar a otras investigaciones que propongan solucionar problemas de calidad de la energía, o implementar filtros en sistemas de potencia, dejando una huella académica, que promueve y apoya la investigación en proyectos similares.

3.2.2 IMPACTO ECONÓMICO

Encontrar soluciones a problemas de calidad de la energía puede ser una tarea complicada, pero bajo los parámetros correctos, y análisis eficaz, se puede encontrar aplicaciones óptimas y de veracidad. Pero, no obstante, nace una pregunta después de proponer la solución correcta, y en el campo de las ingenierías, las soluciones óptimas también obedecen a parámetros económicos que se deben considerar; la ingeniería de detalle, tiene en cuenta todos estos factores económicos, antes de implementar la mejor solución que obedezca a brindar corrección a los problemas presentes y que sea una estrategia altamente efectiva economicante. Implementar un filtro de las dimensiones propuestas, representa un problema de diseño y su costo, va asociado a las dimensiones propias de este, y los parámetros nominales que se desean, justificar la implementación de un filtro pasivo, también puede basarse, debido a que si no existe regulación de armónicos para la inyección de armónicos al sistema o si por parte de las empresas operadoras, no se brinda un servicio óptimo, esto puede llevar a serias penalizaciones e incluso multas altamente costosas. La investigación propone que para que exista regulación en las señales eléctricas y se pueda brindar un servicio óptimo, la ingeniería de detalle, debe de analizar la aplicación óptimo-económica, que mejor se ajuste para solucionar rápidamente los problemas de calidad de la energía, para evitar sanciones.

4. CAPÍTULO IV – CONCLUSIONES

- Se puede evidenciar que los niveles de distorsión armónica en un sistema eléctrico de potencia, se ven afectados por la cantidad de ordenes armónicas que se inyecten al sistema, dejando en evidencia que, a mayor carga, mayores serán los niveles de distorsión, debido a que los armónicos incrementaran de magnitud. Los sistemas con grandes cantidades de cargas no lineales, requieren de soluciones oportunas y óptimas para suprimir la inyección de corrientes armónicas.
- La técnica analítica es un método acertado para el diseño de los filtros pasivos, de esta manera, logra optimizar los parámetros, para que el desempeño del filtro sea exitoso al mitigar corrientes armónicas y frecuencias específicas de resonancia.
- Se deja en evidencia bajo los referentes expuestos en la investigación, que el punto de ubicación de los filtros pasivos, se debe considerar en los casos donde los nodos tengan la máxima inyección de corriente armónica al sistema.
- Los filtros pasivos son una solución óptima para solucionar problemas de calidad de la energía, tomando como evidencia, que, en esta investigación, logra suprimir niveles armónicos críticos de exitosa manera, en un sistema IEEE de 16 barras.
- El filtro pasivo de potencia, logra que todo el sistema IEEE de 16 barras, logre cumplir óptimamente con los límites que la IEEE 519-2014 ha delimitado para el control y limitación de los armónicos en sistemas eléctricos de potencia.
- Implementar un solo filtro pasivo en un sistema IEEE de 16 barras, es una solución altamente efectiva y óptimo-económica para solucionar problemas de distorsión, y cumplir con los límites exigidos por la normativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Campos Avella *et al.*, “Calidad De La Energía Eléctrica,” *Unidad De Planeación Minero Energética De Colombia (UPME) y Instituto Colombiano Para El Desarrollo De La Ciencia Y La Tecnología “Francisco José De Caldas” (Colciencias)* Colciencias . <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf> (accessed May 19, 2022).
- [2] W. E. Lozano Beltran and C. A. Garzón Arévalo, “Propuesta de filtro activo de potencia para mitigación de armónicos de corriente con controlador no lineal basado en CBR ,” Bogotá D.C., 2020. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25642>
- [3] D. Marrugo, V. M. Garrido Arevalo, and O. D. Montoya Giraldo, “Analysis of Harmonic Mitigation Techniques in 14 Bus IEEE Power System Using Passive Filters,” p. 7, 2022.
- [4] R. Maya Arbeláez and S. Galindo Noreña, “Verificar la funcionalidad del método sistemático para el diseño de filtros pasivos en sistemas eléctricos de potencia de mayor dimensión,” Pereira, Jul. 2018. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/9766>
- [5] S. N. Vargas Mendoza, “Filtros pasivos y/o transformadores Zig - Zag como solución a los armónicos presentes en un sistema eléctrico.” Universidad de los Andes, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/56721>
- [6] P. S. R. Murthy, *Power System Analysis*, First. Hyderabad: BS Publications, 2007.
- [7] Electrical4U, “Electrical Power System: What is it? (Power System Basics),” *Electrical 4U*, Dec. 06, 2020. <https://www.electrical4u.com/power-system/> (accessed May 20, 2022).
- [8] L. Reyes, “LA TEORÍA PARA LAS EXPERIENCIAS DE LA MÁQUINA SINCRONICA – CENTRAL MICROHIDRÁULICA,” *Cursos Universidad de Chile u-Cursos.cl*, Mar. 2011. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/EL5204/1/material_docente/detalle?id=342926 (accessed May 20, 2022).
- [9] Vaillant, “¿Qué es la energía primaria? ,” *Vaillant*, 2022. <https://www.vaillant.es/usuarios/servicios/glosario/energia-primaria/> (accessed May 19, 2022).
- [10] J. P. Romero Herrera, “Guía Práctica para el Diseño y Proyecto de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Chile,” Santiago De Chile, Apr. 2010. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103832>
- [11] J. J. Grainger and W. D. Stevenson Jr, *Analisis De Sistemas De Potencia, Primera ed*, 1era ed. Ciudad de México, México: Mc Graw Hill, 1996.
- [12] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Fifth. Stamford: Cengage Learning, 2012.
- [13] S. Cadavid Carvajal and J. G. Ortega Pulgarín, “Herramienta computacional básica para el análisis y contribución en la prevención de apagones,” Universidad Pontificia

- Bolivariana, Medellín , 2013. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/407>
- [14] E. Rojas Flores, "Comparación de modelos de carga lineal en estudios de propagación armónica," Instituto Politécnico Nacional, Ciudad De México, 2013. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/11538>
 - [15] Isotest, "Calidad Eléctrica," *Seminario Calidad Eléctrica Isotest*. http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/Presentaciones/fluke/Seminario_Calidad_EI@ctrica_Fluke.pdf (accessed May 19, 2022).
 - [16] J. Boudreaux, "Design, Simulation, and Construction of an IEEE 14-Bus Power System," *LSU Master's Theses*, Sep. 28, 2018. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/4801
 - [17] A. Expósito, Gómez, J. L. Ramos, Martínez, J. A. Rosendo Macías, E. Romero Ramos, and J. M. Riquelme Santos, *Sistemas Eléctricos De Potencia*, Primera. Madrid: Prentice Hall, 2003.
 - [18] M. A. Sánchez Cortés, "Calidad de la Energía Eléctrica," Puebla de Zaragoza, Feb. 2009. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/34345407/Miguel_Angel_Sánchez_Cortés_Calidad_de_la_Energía_Eléctrica
 - [19] N. I. Mantilla Calderón, "Simulación de flujos de potencia con presencia de contenido armónico usando el método frecuencial," Quito, Oct. 2020. Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19332>
 - [20] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*. pp. 1–29, 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
 - [21] P. F. Aguirre Topa, "Mitigación de la distorsión armónica de un SEP mediante filtros pasivos sintonizados modelado en Matlab," Quito, Aug. 2016. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12905>
 - [22] L. Astudillo Mora, A. Vásquez Vega, and J. Rojas Serrano, "Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia," Cúcuta, 2015. Accessed: May 19, 2022. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/614/61447568001/61447568001.pdf>
 - [23] M. Bajaj and A. K. Singh, "Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 97, p. 107646, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMPELECENG.2021.107646.
 - [24] B. Park, J. Lee, H. Yoo, and G. Jang, "Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study in a Steel Mill Power System," *Energies*, vol. 14, p. 8, 2021, doi: 10.3390/en14082278.
 - [25] I. D. Melo, J. L. R. Pereira, A. M. Variz, and P. F. Ribeiro, "Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, p. 106128, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.106128.

- [26] M. A. Habibi, D. Prihanto, H. Wicaksono, A. Gunawan, J. R. Larasati, and L. Gumilar, "Harmonic Mitigation Using Shunt Hybrid Power Filter in Departement of Electrical Engineering Universitas Negeri Malang Electrical Power System," in *Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, 2019, pp. 761–766. doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938514.
- [27] M. Pomalis C.S., R. Chouhy Leborgne, A. R. Herrera-Orozco, and A. S. Bretas, "NSGAI optimization for single phase passive filter allocation in distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 176, p. 105923, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.105923.
- [28] S. B. Abood and T. M. Abdul-Wahhab, "Investigation of Harmonic Reduction Using Passive Filters in a Distribution Network in Basra City," *{IOP} Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1067, no. 1, p. 12124, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1067/1/012124.
- [29] M. D. Faraby, A. Fitriati, Christiono, Usman, A. Muchtar, and A. N. Putri, "Single Tuned Filter Planning to Mitigate Harmonic Polluted in Radial Distribution Network Using Particle Swarm Optimization," in *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 2020, pp. 418–422. doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315518.
- [30] D. Acharya, R. Badugu, D. K. Das, and M. Prakash, "Class Topper Optimization Algorithm based Optimum Passive Power Filter Design for Power System," in *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) R*, 2021, pp. 648–652. doi: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418249.,".
- [31] E. Kazemi-Robati and M. S. Sepasian, "Passive harmonic filter planning considering daily load variations and distribution system reconfiguration," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 166, pp. 125–135, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2018.09.019.
- [32] N. M. Khattab *et al.*, "A novel design of fourth-order harmonic passive filters for total demand distortion minimization using crow spiral-based search algorithm," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 3, p. 101632, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.001>.
- [33] Z. M. Ali, F. Q. Alenezi, S. S. Kandil, and S. H. E. Abdel Aleem, "Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 103, pp. 660–675, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.IJEPES.2018.06.044.
- [34] G. Hachemi, H. Abdelkader, and D. Rachid, "Optimal Sizing of Passive Filters for Typical Industrial Power Systems," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 905, pp. 65–77, 2022, doi: 10.4028/p-u37f6q.
- [35] W.-H. Ko and M. Tuomainen, "Design and application of a single-tuned passive harmonic filter to suppress harmonic distortion and resonance for railway traction power systems—A case study," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. n/a, no. n/a, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1049/els2.12041>.
- [36] V. Dovgun, D. Shandrygin, N. Boyarskaya, and V. Andyuseva, "Passive Filter Design for Power Supply Systems with Traction Loads," *E3S Web Conf.*, vol. 209, p. 6, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907003>
- [37] M. Azab, "Multi-objective design approach of passive filters for single-phase distributed

energy grid integration systems using particle swarm optimization,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 157–172, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.12.015.

- [38] P. S. Parthasarathy and E. Jeyasri, “Harmonic Distortion Evaluation And Reduction In Radial Distribution System,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, p. 5, Mar. 2014, Accessed: Jun. 03, 2022. [Online]. Available: www.ijirset.com
- [39] J. Sabelo Mahlalela, “Optimum Placement and Sizing of Harmonic Filters in Distribution Network,” National Sun Yat-Sen University, Taiwan, 2015. Accessed: Jun. 06, 2022. [Online]. Available: http://etd.lib.nsysu.edu.tw/ETD-db/ETD-search/view_etd?URN=etd-0630115-124017
- [40] M. Grady, “Understanding Power System Harmonics,” Austin, Apr. 2012. Accessed: Jun. 12, 2022. [Online]. Available: https://web.ecs.baylor.edu/faculty/grady/understanding_power_system_harmonics_grady_april_2012.pdf
- [41] S. Bester and G. Atkinson-Hope, “Harmonic filter design to mitigate two resonant points in a distribution network,” *2011 21st Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2011*, Jan. 2011, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/254012223_Harmonic_filter_design_to_mitigate_two_resonant_points_in_a_distribution_network
- [42] “IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters,” *IEEE Std 1531-2003*, pp. 1–66, 2003. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94407.
- [43] J. C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, First. New Jersey: IEEE Press, 2015. Accessed: Jun. 09, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=7061009>