

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE SINTONÍA SIMPLE EN REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN BASADOS EN EL PROGRAMA MATPOWER

Presentación ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Álvarez V., Clarialbis A
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE SINTONÍA SIMPLE EN REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN BASADOS EN EL PROGRAMA MATPOWER

Prof. Guía: Dr. Ing. Julio Molina

Presentación ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Álvarez V., Clarialbis A
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

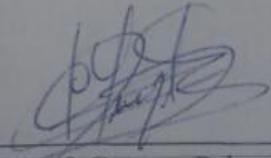
CONSTANCIA DE APROBACIÓN

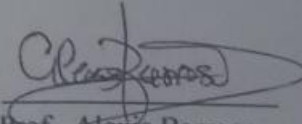
Caracas, 09 de noviembre de 2017

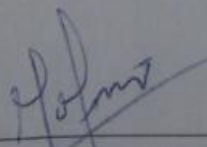
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **Clarialbis A. Álvarez V.**, titulado:

"IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE SINTONÍA SIMPLE EN REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN BASADOS EN EL PROGRAMA MATPOWER"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de **Ingeniero Electricista** en la **menção Potencia**, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor y lo declaran **APROBADO**.


Prof. Carmen Pahmer
Jurado


Prof. Alexis Barroso
Jurado


Prof. Julio Molina
Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios. Le agradezco al darme fuerza y esperanza en el camino de la vida el cual estoy recorriendo.

A mis padres. Por darme todo su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y ser pilares fundamentales de la persona que soy.

A mis hermanos. Por darme su apoyo y comprensión, y ser mis fieles amigos a pesar de la adversidad y la distancia a lo largo de los años.

A profesor tutor, Dr. Julio molina. Por la atención prestada, dedicación, paciencia y apoyo para el desarrollo y estructuración de este trabajo de grado.

A todas aquellas personas que a lo largo del desarrollo de la carrera me han dado su apoyo incondicional. Muchas gracias.

Álvarez V., Clarialbis A.

**IMPLEMENTANCIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA
ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE SINTONÍA SIMPLE EN
REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN BASADOS EN
EL PROGRAMA MATPOWER**

Tutor académico: Dr. Ing. Julio Molina. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: U.C.V. 2017. Pag 123.

Palabra clave: MATPOWER; Código fuente abierto; MATLAB; filtro de sintonía única; Sistema de Potencia; Cargas no lineales; Factor de potencia; distorsión armónica; resonancia; compensación de reactivos.

Resumen. El presente trabajo se enfoca en las modificaciones al programa de simulación de código fuente abierto MATPOWER, bajo la plataforma de MATLAB para el diseño inicial de filtros pasivos de sintonía simple, en particular se implementa el filtro LC serie. Se utiliza la función de flujo de carga del MATPOWER para verificar la compensación de banco capacitivo que forma el filtro. Usando la metodología de análisis armónico no iterativo (NIHA), se realiza el estudio de penetración armónica para evaluar el impacto en el THD de la red eléctrica bajo estudio, por la instalación solo de un banco capacitivo y el mismo banco con inductancia serie formando el filtro LC serie. Se implementa el estudio de barrido en frecuencia para analizar las frecuencias de resonancia y justificar los niveles de THD en algunos nodos de la red bajo estudio. Se analiza una red eléctrica industrial de prueba de 13 barras del IEEE modificada y se comprueban los resultados con una simulación en Pspice en el dominio del tiempo.

INDICE GENERAL

•	CONSTANCIA DE APROBACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
•	INDICE GENERAL	vii
•	LISTA DE TABLAS	x
•	LISTA DE FIGURAS	xii
•	LISTA DE GRÁFICAS	xiii
•	LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	xiv
•	INTRODUCCIÓN	1
•	CAPÍTULO I	5
•	ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.....	5
1.1.	Diversas fuentes generadoras de armónicos en los SEP	6
1.1.1.	Transformadores.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1.2.	Maquinas rotativas en los SEP.....	6
1.1.3.	Lámparas fluorescentes	6
1.1.4.	Otras fuentes armónicas	¡Error! Marcador no definido.
1.2.	Efectos de los armónicos en los sistemas de potencia	7
1.3.	Resonancia Armónica	8
1.3.1.	Resonancia paralela	8
1.3.2.	Resonancia serie	9
1.4.	Distorsión Armónica	10
1.5.	Penetración armónica	11
1.6.	Barrido en frecuencia	12
1.7.	Filtrado de Armónicos	12
1.7.1.	Filtros sintonizados	12
1.8.	Normativas para el control de armónicos.....	13
1.8.1.	Límites de armónicos permitidos en los Sistemas de Potencia ...	14

1.8.2. Limitaciones en el funcionamiento continuo en el banco capacitivo según el estándar 1036 del IEEE	16
• CAPÍTULO II	17
• ESTRUCTURA Y MANEJO DE DATOS EN MATPOWER.....	17
2.1 Modelado de los elementos del sistema de potencia en MATPOWER.	18
2.1.1 Formato de datos.....	18
2.1.2 Formato de las ramas.....	19
2.1.3 Formato de generadores	20
2.1.4 Formato de cargas pasiva.....	20
2.1.5 Formato de elementos en paralelo (Shunt)	21
2.2 Flujo de potencia convencional aplicado con MATPOWER	21
• CAPÍTULO III	23
• DISEÑO DEL FILTRO SINTONIZADO	23
3.1 Modelado en MATPOWER del filtro LC serie sintonizado	24
3.2 Metodología para la compensación de potencia reactiva	25
3.3 Cálculo de la componente inductiva del filtro LC serie	26
3.3.1 Frecuencia resonante paralela del sistema	27
3.4 Estudio de barrido de frecuencia del sistema	28
• CAPÍTULO IV	35
• MODIFICACIONES REALIZADAS AL MATPOWER	35
4.1 Implementación del NIHA usando el estándar IEEE CDF y PTI..	35
4.1.1 Modificación del campo Bus Data para la implementación del filtro LC serie.....	35
4.2 Modificación de la función “savecase” para la implementación del filtro LC serie.....	36
4.3 Modificación de la función MakeYbusH	38
4.4 Función runpfHfilter para estudio de penetración armónica no iterativa	39

• CAPÍTULO V.....	43
• IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO	43
5.1. Descripción del sistema industrial de 13 barras del IEEE	43
5.2. Ingreso de datos en el programa para el diseño del filtro	46
5.2.1. Corrección del factor de potencia del sistema	47
5.2.2. Cálculo de la componente reactiva del filtro	50
5.2.3. Distorsión armónica del sistema	53
5.3. Estudio de resonancia en el sistema.....	58
5.4. Verificación de los límites del condensador del filtro según la norma IEEE std 1036.....	62
• CAPÍTULO VI.....	65
• VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DESARROLLADO EN MATPOWER	65
6.1 Validación de resultados obtenidos con el programa PSpice.....	68
6.1.1 Comparación de resultados del factor de potencia y distorsión armónica	68
6.1.2 Comparación de tensiones armónicas del caso de estudio	69
• CONCLUSIONES.....	74
• RECOMENDACIONES.....	75
• REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
• APÉNDICES.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Límites de THD en tensión	15
Tabla 2 Límites de THD en corrientes	15
Tabla 3 Datos de las líneas (en bases de 13.8kV, 69kV y 10MVA).....	45
Tabla 4 Datos de transformadores (en bases a valores nominales).....	45
Tabla 5 Espectro armónico de corrientes del ASD	46
Tabla 6 Resultados del caso de estudio del flujo de carga inicial.....	47
Tabla 7 Potencia, reactancia y capacitancia de la red 13 barras modificada con compensación.....	48
Tabla 8 Resultados del flujo de carga con compensación de reactivos $X_c = 28.7122\Omega$	49
Tabla 9 Factores de potencia con compensación $X_c = 28.7122\Omega$	49
Tabla 10 Inductancia y reactancia inductiva para una sintonía de $4.7 \cdot f_0$	51
Tabla 11 Resultados del flujo de carga con el compensación de reactivos $X_c = 28.7122\Omega$ y $X_{Lf} = 1.2998\Omega$	51
Tabla 12 Factores de potencia con solo compensación y con el filtro LC serie en la primera iteración	52
Tabla 13 Valores del fp, kVAr y reactancia en las diversas iteraciones del programa runpfFilter	52
Tabla 14 Tensiones armónicas y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio.....	53
Tabla 15 Tensiones y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio con solo el banco capacitivo	55
Tabla 16 Tensiones armónicas y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio con el filtro LC serie conectado	56
Tabla 17 Valor de la resonancia de la impedancia propia de la barra 5.....	58
Tabla 18 Impedancias de transferencia entre el bus 5 y buses con cargas no líneas	59
Tabla 19 Resonancias de la impedancia propia de la barra 5 con el filtro.....	60

Tabla 20 Resonancias de las impedancias de transferencia entre las barras con cargas no líneas y la barra 5 con el filtro LC serie	61
Tabla 21 Verificación de la norma IEEE std. 1036 en MATPOWER.....	62
Tabla 22 Resumen de los valores obtenidos de la ejecución de runpfFilter	64
Tabla 23 Comparación del factor de potencia de runpfFilter y PSpice	69
Tabla 24 Comparación del THDv en MATPOWER y PSpice	69
Tabla 25 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso 1.....	73
Tabla 26 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso 2.....	73
Tabla 27 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso 3.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Circuito resonancia paralela [8].....	9
Figura 2 Circuito resonancia serie [8].....	10
Figura 3 Tipos de filtros sintonizados [7]	13
Figura 4 Modelo de rama [9]	19
Figura 5 Filtro de sintonía única conectado en paralelo (shunt)	24
Figura 6 Respuesta en frecuencia del filtro LC serie	27
Figura 7 Equivalente del sistema de potencia para el análisis de barrido en frecuencia	29
Figura 8 Barrido en frecuencia de un sistema de potencia [8]	30
Figura 9 Flujograma de estudio de barrido en frecuencia de una red eléctrica.....	31
Figura 10 Flujograma para el diseño del filtro de sintonía simple [12]	34
Figura 11 Matriz bus_data modificada en MATPOWER.....	36
Figura 12 Modificación del campo “bus data” en la función “savecase”	37
Figura 13 Modificación del campo “gen data” en la función “savecase”.....	37
Figura 14 Incorporación del campo “gen data” en la función “savecase”	38
Figura 15 Matriz diagonal de admitancias del filtro LC serie	38
Figura 16 Incorporación makeYbusH_filter en la función runpfHfilter	40
Figura 17 Adaptaciones del NIHA para estudios con filtro LC serie [6].....	41
Figura 18 Sistema eléctrico industrial de 13 barras del IEEE [13]	44
Figura 19 Sistema eléctrico industrial de 13 barras del IEEE [13] modificado....	44
Figura 20 Caso de prueba con filtro de sintonía simple.....	64
Figura 21 Circuito modelado en PSpice para el caso 1.....	66
Figura 22 Circuito modelado en PSpice para el caso 2.....	67
Figura 23 Circuito modelado en PSpice para el caso 3.....	67

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Barrido en frecuencia de la impedancia propia de la barra 5 con un banco capacitivo $X_c = 28.7122\Omega$	50
Gráfica 2 Distorsión armónica del sistema sin compensación.....	54
Gráfica 3 Distorsión armónica del sistema con solo el banco capacitivo a la red	55
Gráfica 4 Distorsión Armónica del sistema incluyendo el filtro LC serie a la red	57
Gráfica 5 Comparación de la distorsión armónica del sistema entre solo compensación con el banco capacitivo y el filtro LC serie.....	57
Gráfica 6 Barrido en frecuencia de las impedancias de transferencia entre el bus de interés y barra con cargas no líneas.....	59
Gráfica 7 Barrido en frecuencia de la impedancia propia de la barra 5 con el filtro LC serie conectado.....	60
Gráfica 8 Barrido en frecuencia de las impedancias de transferencia entre los buses con cargas no líneas y la barra 5 con el filtro LC serie	61
Gráfica 9 Forma de onda de la corriente que circula por el filtro LC serie	63
Gráfica 10 Forma de onda de la tensión en la barra 5 con el filtro LC serie	63
Gráfica 11 Tensiones armónicas en el caso 1 incluyendo la fundamental.....	70
Gráfica 12 Tensiones armónicas en el caso 1 sin la componente fundamental	70
Gráfica 13 Tensiones armónicas en el caso 2 incluyendo la fundamental.....	71
Gráfica 14 Tensiones armónicas en el caso 2 sin la componente fundamental. ...	71
Gráfica 15 Tensiones armónicas en el caso 3 incluyendo la fundamental.....	72
Gráfica 16 Tensiones armónicas en el caso 3 sin la componente fundamental. ...	72

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SEP: Sistema Eléctrico de potencia

OSS: Open Source Software

CPF: Flujo de Carga Convencional

HPF: Flujo de Carga Armónico

PCC: Punto de Acople Común

OPF: Flujo de Carga óptimo

FP: Factor de potencia

HP: Harmonic Penetration “Penetración Armónica”

INTRODUCCIÓN

El incremento acelerado del uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, debido principalmente al desarrollo de la electrónica de potencia, ha permitido un uso más eficiente de la energía eléctrica y aumentos considerables en la productividad en las industrias. Sin embargo, se ha creado una situación problemática ya que el incremento de las corrientes armónicas generadas por los propios equipos eléctricos, distorsionan considerablemente la onda de tensión llegando a superar límites intolerables para el buen funcionamiento de maquinarias y equipos eléctricos. Por lo tanto, es importante mejorar la calidad de la forma de onda de las tensiones y corrientes para evitar el mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia ocasionados por el sobrecalentamiento de los materiales, por eso es indispensable mantener los armónicos de tensión y corriente dentro de ciertos límites establecidos en los entes reguladores.

Los efectos de las componentes armónicas de corrientes y tensiones generadas por las cargas no lineales no tenían un impacto significativo en los sistemas eléctricos, hasta el advenimiento de los dispositivos electrónicos de potencia y sus diversas aplicaciones en los sistemas de control de motores, transmisión de energía en redes de corriente continua, etc.

Para la industria es muy importante bajar los costos de producción y hacer más eficiente el uso de la energía. El uso de bancos de condensadores es un método para mejorar el factor de potencia y evitar sanciones económicas del ente regulador. No obstante en algunas situaciones los bancos de condensadores pueden incrementar la distorsión armónica en el punto de común acoplamiento (PCC) lo cual puede generar de nuevo sanciones de la empresa de suministro eléctrico. El uso de filtros pasivos tipo LC serie cumple con los objetivos de mejorar el factor de potencia y atenuar la distorsión armónica de la red a la que

estén conectados. Por esto surge la necesidad de contar con herramientas computacionales que permitan el cálculo de filtros de armónicos, que cumplan con ambos requerimientos.

El desarrollo de aplicaciones computacionales para la planificación de los sistemas de potencia, actualmente están enfocadas al uso de herramientas de software libre. En el ámbito de los sistemas de potencia existen algunas herramientas computacionales en software libre, entre las cuales se encuentra el MATPOWER. En el caso que esta herramienta se ejecute bajo la plataforma de MatLab se clasifica como un software de código fuente abierto, mientras que la si plataforma de trabajo es Octave puede ser clasificada como software libre.

El presente trabajo de grado pretende desarrollar los módulos necesarios y llevar a cabo las modificaciones de la herramienta MATPOWER, para estudiar la respuesta en frecuencia de una red industrial de media tensión y diseñar un filtro de sintonía simple que permita atenuar la distorsión armónica y compensar reactivos en la red. [1]

Para llevar a cabo un desarrollo satisfactorio de la solución para el problema se plantea el siguiente objetivo general, “Desarrollar e implementar un programa de análisis de resonancias y diseño de un filtro de sintonía simple al código abierto de MATPOWER, que permita compensar reactivos y atenuar la distorsión armónica de tensión”. Con el fin de lograr el objetivo se desglosan los siguientes objetivos específicos:

- Describir el procedimiento para la compensación capacitiva especificado en la norma IEEE Std. 1036-2010 Guide for Application of Schunt Power Capacitors. [2]
- Describir el procedimiento para la disminución de distorsión armónica especificado en la norma IEEE Std. 1531 Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. [3]

- Reseñar los límites de distorsión armónica establecidos en la norma IEEE Std. 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [4]
- Analizar la utilización de un filtro de sintonía simple, como compensador de reactivos y atenuador de armónicos. [2] [5]
- Analizar las resonancias de un sistema de potencia industrial usando para ello la técnica de barrido en frecuencia.
- Implementar el análisis de barrido en frecuencia en MATPOWER basado en el trabajo de la Ing. Suarez (2015). [6]
- Implementar el algoritmo desarrollado en el artículo “Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems” para el cálculo de componentes de filtros de sintonía simple, respetando los criterios en la norma IEEE. [2] [4] [3] [6]
- Comprobar el resultado de subprograma creado en MATPOWER con resultados obtenidos en simulaciones con otro software.

El capítulo I del siguiente trabajo plantea las bases para resolver el problema de frecuencias armónicas en el sistema eléctrico, contiene la definición de los armónicos, su representación en Fourier, algunas fuentes de generación de armónicos, el impacto de dichas frecuencias en el sistema eléctrico, los efectos de la resonancia los cuales pueden ser analizados mediante el estudio en el dominio de la frecuencia. El principio de diseño del filtro sintonizado para eliminar las perturbaciones armónicas y las normativas en vigencia.

En el capítulo II se presenta la herramienta computacional MATPOWER, los métodos numéricos, estándares utilizados para su estructura de datos y se presentan los módulos más importantes que permiten realizar estudios de flujo de potencia convencional

El Capítulo III contiene el desarrollo de la metodología para el diseño de un filtro LC serie bajo los criterios planteados por las normas IEEE std.1531 y IEEE std. 1036. Se describe en detalle el barrido en frecuencia con el método de

inyección de corrientes empleando el cálculo de la matriz de impedancia armónica desarrollada para estudio de penetración armónica no iterativa (NIHA).

En el Capítulo IV se describe las modificaciones realizadas al programa de código abierto MATPOWER, los arreglos planteados para realizar el estudio de penetración armónica no iterativa (NIHA) incluyendo el filtro LC serie, los módulos desarrollados para la implementación del filtro LC serie.

En el Capítulo V se ejecuta un caso de estudio basado en la red de prueba de 13 barras del IEEE modificada y se muestra el proceso de implementación del filtro en MATPOWER.

El Capítulo VI contiene la simulación del caso de estudio realizada en el programa de simulación temporal PSpice y se valida el programa runpfFilter desarrollado a partir del MATPOWER y desarrollado en este trabajo

Para finalizar este trabajo se prestan las conclusiones y recomendaciones para futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO I

ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Los avances tecnológicos debido a la electrónica de potencia desarrollados en los pasados 30 años, permitieron la incorporación de nuevas cargas con un comportamiento no lineal, ocasionando el aumento en la generación de corrientes y tensiones armónicas en los sistemas de media y baja tensión.

Se puede decir que los armónicos son señales de frecuencias múltiplo entero de la componente de frecuencia fundamental. En los sistemas de potencia los armónicos de rango par (2, 4, 6, 8...) no suelen estudiarse debido a su inexistencia, gracias a la simetría de la señal alterna de las cargas eléctricas. Los armónicos de rango impar (3, 5, 7, 9...) son los usualmente estudiados en los sistemas eléctricos, bajo la hipótesis de considerar las redes trifásicas balanceadas. Finalmente sólo se considera la componente continua en casos excepcionales, cuando se quiere estudiar el funcionamiento anormal en ciertas cargas no lineales (p.ej. variadores de velocidad)

Los armónicos presentes en los SEP pueden ser representados a partir de una serie geométrica de Fourier, compuesta por componentes sinusoidales de una onda periódica de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Partiendo de este concepto la definición de Fourier es la siguiente:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n)] \quad 1.1$$

Donde:

- a_0 : Componente continua de la señal
- a_n : Magnitud de la componente armónica
- ω : Frecuencia angular fundamental
- φ_n : ángulo de fase de la componente armónica

1.1. Diversas fuentes generadoras de armónicos en los SEP

Las principales causas o generadores de armónicos en un sistema de potencia son los siguientes equipos:

1.1.1. Principales fuentes armónicas

En la actualidad el uso de convertidores, inversores y rectificadores es de uso frecuente. Estos equipos producen una alta distorsión armónica en la corriente debido a que estos dispositivos están compuestos por diodos, tiristores o IGBT, los cuales permiten cortar las señales eléctricas (i.e. tensiones o corrientes) generando formas de onda discontinuas.

1.1.2. Lámparas fluorescentes

El uso de estos equipos ha aumentado en los últimos tiempos, esto se debe en gran parte al interés que se tiene de reducir el consumo energético. Las lámparas fluorescentes son cargas no lineales y su mayor impacto se observa en redes de media y baja tensión.

1.1.3. Maquinas rotativas en los SEP

El SEP está constituido principalmente por el uso de máquinas sincrónicas y asincrónicas. Los armónicos de estos equipos se producen cuando el campo magnético alrededor del entrehierro no se encuentra distribuido de forma sinusoidal generando una fuerza electromotriz con perturbaciones. La presencia

de las ranuras donde se alojan los devanados aumenta el contenido armónico de la fuerza electromotriz.

1.1.4. Transformadores

La fuente principal de armónicas en las redes eléctricas hace 30 años era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia. Los transformadores modernos en condiciones de estado estable no causan por sí mismos una distorsión significativa en la red eléctrica. Los armónicos son producidos debido al porcentaje de la corriente de vacío, se generan pérdidas por histéresis, las cuales se producen en el núcleo ferromagnético generando perturbaciones. La forma de onda distorsionada de la corriente de excitación contiene armónicas impares triples de la frecuencia fundamental (3ª, 9ª, 15ª, etc.).

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se incrementan a sus niveles máximos en las horas de la madrugada, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es muy alto [7]

1.2. Efectos de los armónicos en los sistemas de potencia

Existen estudios respecto los efectos perjudiciales de los armónicos en los sistemas de potencia. Principalmente éstos se deben por tres motivos: la proliferación de convertidores de cargas no lineales, la presencia de circuitos resonantes a causa de capacitores para corregir factor de potencia y equipos sensibles a los armónicos.

Los principales efectos perjudiciales de los armónicos son,

- Sobre calentamiento, aparición de ruido y daño de conductores eléctricos, particularmente del neutro en sistemas trifásicos.
- Sobre calentamiento y falla prematura de transformadores, inclusive incendio.

- Reducción de la eficacia, sobrecalentamiento y falla prematura en motores de inducción
- Falla de conectores de potencia en equipos modulares de oficinas.
- Disparo indeseado de interruptores y relés.
- Quema de fusibles (p. ej. bancos de condensadores).
- Sobrecalentamiento de aisladores (i.e. bushings)
- Sobrecalentamiento y sobrecarga de generadores de emergencia.
- Sobrecalentamiento y falla de bancos de capacitores para corrección del factor de potencia.
- Interferencia con controladores de motores y equipos de medición.
- Aumento de pérdidas (óhmicas y dieléctricas) en conductores.

Considerado los efectos negativos de los armónicos en la red eléctrica se deben tomar medidas para mitigarlos, evitando daños de equipos y pérdidas de producción de las industrias.

1.3. Resonancia Armónica

En los SEP se pueden producir los fenómenos de resonancias, las cuales se presenta cuando las reactancias inductivas (p. ej. reactancia de cortocircuito de transformador) son iguales a las reactancias capacitivas (p. ej. banco capacitivo compensador del factor de potencia). Estos fenómenos se producen como consecuencia de las corrientes o voltajes armónicos sintonizados cerca o igual a la frecuencia natural del sistema. Se originan dos tipos de resonancias:

1.3.1. Resonancia paralela

Una resonancia paralela resulta en una impedancia muy alta presentada en el sistema, en una determinada frecuencia armónica originada por una carga no lineal. La frecuencia armónica donde la impedancia es elevada es definida como la frecuencia de resonancia paralela.

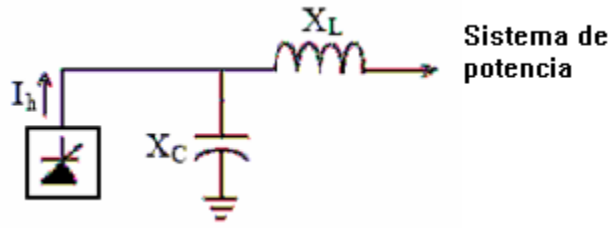


Figura 1 Circuito resonancia paralela [8]

El efecto producido por esta resonancia es una alta distorsión en la tensión considerando que las cargas no lineales se comportan como fuentes de corriente. De la Figura 1 se obtiene la impedancia equivalente,

$$X_{eq} = j \cdot \frac{X_C \cdot X_L}{X_L - X_C} \quad 1.2$$

La impedancia es infinita cuando ambas reactancias del denominador son iguales. En ese caso la frecuencia de resonancia se obtiene,

$$f_p = \frac{f_o}{\sqrt{X_{Lo}/X_{Co}}} \quad 1.3$$

Donde,

f_o : frecuencia fundamental

X_{Lo} : Reactancia inductiva a frecuencia fundamental

X_{Co} : Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental

1.3.2. Resonancia serie

En la resonancia serie se produce una impedancia muy baja en el sistema a una determinada frecuencia armónica originada por una carga no lineal. La frecuencia armónica donde la impedancia es baja es definida como la frecuencia de resonancia serie.

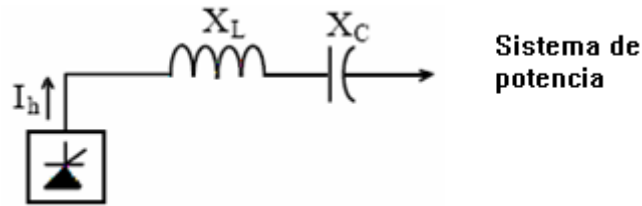


Figura 2 Circuito resonancia serie [8]

La resonancia serie puede causar altos niveles de distorsión de tensión en los terminales de la inductancia y el capacitor del circuito de la figura 2, debido a la corriente armónica que circula en el camino de baja impedancia. De la figura 2 se obtiene la impedancia equivalente,

$$X_{eq} = j \cdot (X_L - X_C) \quad 1.4$$

La impedancia es cero cuando ambas reactancias son iguales. En ese caso la frecuencia de resonancia se obtiene,

$$f_s = \frac{f_o}{\sqrt{X_{Lo}/X_{Co}}} \quad 1.5$$

1.4. Distorsión Armónica

En los sistemas de potencia idealmente las corrientes y tensiones tienen una forma de onda de tipo sinusoidal. Debido al funcionamiento de algunos equipos que tienen exigencias específicas se producen deformaciones de la forma de onda sinusoidales. La distorsión armónica total THD (**T**otal **H**armonic **D**istortion) es definida como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de las componentes armónicas individuales dividida por la magnitud de la componente fundamental,

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \quad 1.6$$

Dónde:

C_1 Componente fundamental de la tensión o corriente

C_n Componente armónica de la tensión o corriente

1.5. Penetración armónica

En los sistemas donde existen múltiples cargas no lineales son necesarios los estudios de análisis de penetración armónica (HP). Estos estudios comienzan con la aplicación del flujo de potencia convencional para luego considerar la frecuencia en los modelos de los componentes.

La aplicación de HP en los sistemas eléctricos permite determinar y cuantificar los niveles de contaminación por armónicos que se producen en una barra debido a cargas no lineales y constatar violaciones en los límites de distorsión armónica (IEEE 519- 2014). Por otro lado también permite determinar condiciones peligrosas de resonancia.

Los métodos planteados en el dominio de la frecuencia son una extensión del flujo de potencia convencional y pueden, metodológicamente, enfocar de dos maneras: iterativa y no iterativa [6].

La iterativa se basa en que las corrientes armónicas inyectadas por la carga no lineal son independientes de las tensiones armónicas de la red y la no iterativa consiste en la interacción armónica de los dispositivos no lineales con la red

1.6. Barrido en frecuencia

La metodología de barrido en frecuencia (en inglés, *frequency scan*) consiste básicamente en reproducir un diagrama de magnitud de Bode de la impedancia del sistema usando como referencia cualquier nodo de la red.

Esta metodología permite visualizar el comportamiento de la impedancia y permite justificar el grado de distorsión de la tensión y de la corriente. Además se pueden determinar los armónicos donde se encuentran las resonancias paralelas y las resonancias series en el diagrama de magnitud de Bode.

1.7. Filtrado de Armónicos

La solución más convencional para resolver el problema de armónicos es disminuir estas perturbaciones mediante filtros pasivos. En consecuencia, se reducen las distorsiones armónicas producidas por las cargas no lineales de la red eléctrica. Existen distintos tipos de filtros pasivos de armónicos, los cuales son recomendados dependiendo del punto de la red de conexión, el tipo de carga que posee el sistema y el costo del diseño e implementación del filtro.

1.7.1. Filtros sintonizados

El filtro sintonizado es un método efectivo para minimizar el problema de la distorsión armónica, principalmente porque se toma la frecuencia más perjudicial en el sistema para diseñar partes del filtro y quede sintonizado en esa o alrededor de esa frecuencia perjudicial.

Los filtros sintonizados más comunes son el filtro LC paralelo y el filtro LC serie. El filtro LC paralelo se caracteriza por producir una resonancia paralela generando una alta impedancia en la frecuencia de sintonía.

El filtro LC serie al conectarse en paralelo en una red es caracterizado por una baja impedancia en la frecuencia de resonancia, atrapando con ella la perturbación dado el bajo camino de impedancia que provoca.

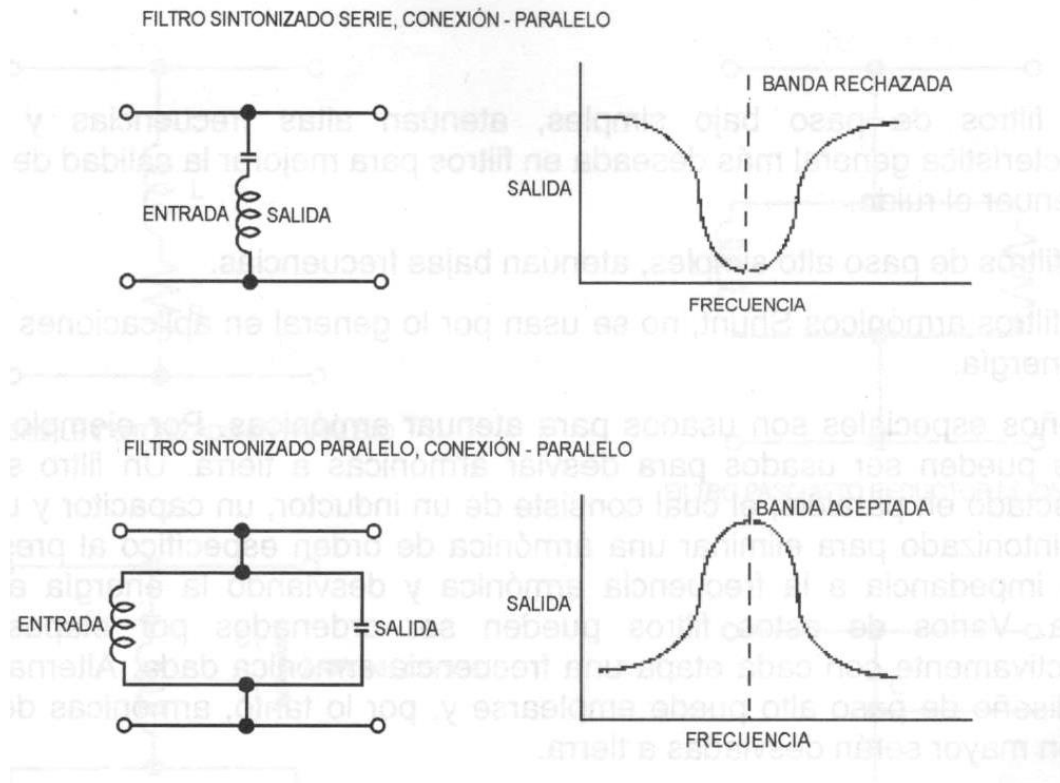


Figura 3 Tipos de filtros sintonizados [7]

1.8. Normativas para el control de armónicos

Las normativas recomendadas para la regulación del contenido armónico en las redes ocasionados por cargas no lineales, se estableció en el año de 1992 por el IEEE. En la actualidad se han modificado algunos renglones de esa normativa y se proponen límites para:

- Distorsión de tensión producida en el sistema.
- La corriente armónica que el usuario puede inyectar al sistema.
- Calidad de la tensión, que la empresa de distribución de electricidad debe suministrar al usuario.

Esta normativa en su primera edición lleva la numeración IEEE std. 519-1992 y la actual IEEE std. 519-2014.

1.8.1. Límites de armónicos permitidos en los Sistemas de Potencia

La gestión de la calidad del servicio de distribución de electricidad se considera una responsabilidad conjunta que involucra tanto a los usuarios finales y los propietarios u operadores del sistema y en consecuencia se recomiendan límites armónicos para tensiones y corrientes (IEEE std. 519-2014).

Los límites permitidos dependen del nivel de tensión al cual está conectado el usuario y del orden de los armónicos. La contaminación armónica se evalúa con los siguientes índices:

THD_v : Total de distorsión armónica de tensión

THD_i : Total de distorsión armónica de corriente

Los límites se utilizan para diseñar y evaluar las condiciones operativas de una red en condiciones estacionarias. Estos vienen expresados en percentiles, siendo estos una medida de posición, usada en estadística, que indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo de resultados.

En el punto de conexión común con entre la red industrial y la empresa suministradora del servicio PCC, los propietarios u operadores del sistema deben limitar los armónicos de tensión de línea a neutro de la siguiente manera:

- Los valores diarios del percentil 99 de corto tiempo (3s) deben ser inferiores a 1,5 veces los valores dados en la Tabla 1
- Los valores semanales del percentil 95 de intervalos de tiempo de 10min deben ser menores que los valores dados en la Tabla 1

Tabla 1 Limites de THD en tensión

Tensión de bus en PCC	Armónico Individual (%)	Tasa de distorsión armónica THD_V
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	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

Los sistemas de alta tensión pueden tener hasta un 2.0% de THD cuando la causa es una estación terminal HVDC.

Los usuarios conectados a sistemas donde la tensión nominal en el PCC es 120V a 69kV deben limitar sus corrientes armónicas de la siguiente manera:

- Las corrientes armónicas diarias, el percentil 99 de corta duración (3s) deben ser inferiores a 2,0 veces los valores indicados en la Tabla 2
- Las corrientes armónicas semanales, el percentil 99 de duración 10min deben ser inferiores a 1,5 veces los valores indicados en la Tabla 2.
- Las corrientes armónicas semanales, el percentil 95 de duración 10min deben ser menor que los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2 Límites de THD en corrientes

Máxima distorsión de la corriente armónica en porcentaje de la corriente de carga I_L						
Orden del armónica individual (armónicos impares) a, b						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	THD_I
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Donde,

I_{sc} = Corriente de cortocircuito máxima en PCC

$I_L =$ Corriente de carga de demanda máxima (a frecuencia fundamental)

Estos límites para periodos cortos, durante condiciones inusuales o arranque de motores pueden ser excedidos en un 50%.

1.8.2. Limitaciones en el funcionamiento continuo en el banco capacitivo según el estándar 1036 del IEEE

Los condensadores están diseñados para ser operados a su tensión y frecuencia nominal. Estos equipos son capaces de operar en funcionamiento continuo y bajo condiciones de contingencia, siempre que ninguna de las lecturas sobrepasen las siguientes limitaciones:

- 110% de la tensión rms nominal.
- 120% de la tensión de pico nominal, es decir que la tensión pico no sea superior a $1.2 \times \sqrt{2} \times V_{rms}$ (tensión nominal rms) incluyendo los armónicos y excluyendo los transitorios.
- 135% de la corriente eficaz nominal basada en los kVAr nominales y la tensión nominal, incluidas las corrientes armónicas.
- 135% de los kVAr nominales.

Las capacidades de sobretensión continua y de corto tiempo (sin pérdida de vida) de cualquier elemento en serie de un condensador se considerarán como parte de la capacidad total de tensión de la unidad del condensador [2].

CAPÍTULO II

ESTRUCTURA Y MANEJO DE DATOS EN MATPOWER

Matpower es un paquete de simulación de código abierto para el análisis de sistemas de potencia que se ejecuta sobre la plataforma y lenguaje de Matlab. Fue desarrollado por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo Sánchez y Deqiang Gan del PSERC (Power System Engineering Research Center). El programa es orientado a la solución de flujo de potencia convencional en AC y flujo de potencia óptimo (OPF) [9].

MATPOWER cuenta con una biblioteca que dispone de un alto rango de funciones modificables y de manejo sencillo. Este programa fue concebido inicialmente para el estudio de flujo de potencia convencional sin embargo los avances en este campo han permitido el desarrollo de nuevos modelos, por eso en su última versión [10] trae módulos para despacho óptimo de energía, base para el manejo de modelos de carga ZIP, manejo de eventos de CPF con límites de generación. Además proporciona en su librería numerosos casos de ejemplos, desde los casos sencillos de cuatro (4) barras hasta ejemplos con mayor número de barras.

Entre las funciones básicas del MATPOWER se destacan la función “*MakeYbus*” la cual contiene el algoritmo para construir la matriz de admitancias $[Y_{bus}]$ del sistema en estudio, y la función “*MakeBdc*” la cual permite la construcción de la matriz $[Bdc_{bus}]$ donde la parte real de todas las admitancias de la matriz $[Y_{bus}]$ son nulas. Esta última es usada para realizar flujos de potencia óptimos.

2.1 Modelado de los elementos del sistema de potencia en MATPOWER.

En MATPOWER, debido al alto nivel que ofrece Matlab en el entorno matricial, todas las ecuaciones y modelos se presentan en estructuras de matrices y vectores. Para la resolución del flujo de carga convencional, en esta herramienta se fija una barra de referencia (slack) y las demás se toman como PV o PQ. Las impedancias se expresan en forma cartesiana mientras que las tensiones en forma polar. En ambos casos las magnitudes están dadas en por unidad y los ángulos de las tensiones en radianes. Por otra parte, las potencias del modelo de carga de impedancia constante y los elementos en paralelo (shunt) tipo banco capacitivo, se representan en MVA y MVAr.

2.1.1 Formato de datos

Los datos de entrada para MATPOWER son especificados en un archivo Matlab de extensión .m conformado por un conjunto de matrices y variables escalares. Este archivo de datos se denomina “**MatPower case**”. Este se ejecuta en el flujo de carga convencional en MATPOWER usando la función *runpf*, en donde la información que contiene el archivo de entrada es tratado como una variable tipo estructura identificada como “*mpc*”. Esta estructura está conformada por cinco campos: el campo escalar “system MVA base” y los campos en forma matricial “bus”, “branch”, “generator” y “generatorcost”. Este último utilizado en flujos de cargas óptimos.

El campo “system MVA base” contiene la potencia base en MVA del sistema utilizada para la conversión a por unidad de las potencias. En los otros campos “bus”, “branch”, “generator” contienen información que caracterizan a las barras, ramas y generadores. Las columnas de estos campos matriciales tienen un formato estándar similar a los recomendados por el IEEE CDF y PTI [9]

2.1.2 Formato de las ramas

El patrón común para representar las líneas de transmisión, transformadores y cambiadores de fase, es el modelo π de línea de transmisión en serie con un transformador con cambiador de fase tal como se muestra en la Figura 4. El transformador cuya relación de tap tiene magnitud τ y ángulo de cambiador de fase θ_{shift} , está situado en el extremo de la rama. La r_s y x_s son la resistencia y reactancia series de las ramas del sistema, mientras que b_c es la capacidad total de la rama.

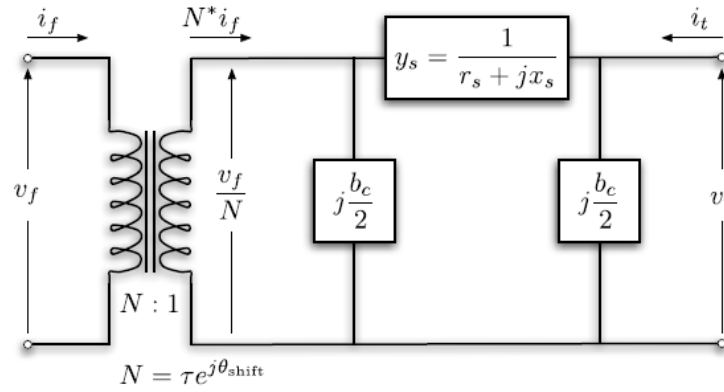


Figura 4 Modelo de rama [9]

Las inyecciones de corriente en el inicio (i_f) y final de la rama (i_t), son expresadas en términos de una matriz de admitancia de rama (Y_{br}), se expresa en términos de matriz 2×2 de admitancia.

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} * \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad 2.1$$

Con los elementos de la impedancia serie del modelo π denotada por $y_s = 1/z_s$, se estructura de la siguiente forma:

$$[Y_{br}] = \begin{bmatrix} \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right)\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad 2.2$$

Los parámetros r_s , x_s , b_c , τ y θ_{shift} , son especificados en las columnas del campo “*branch data*” como r , x , b , *ratio* y *angle*, respectivamente.

2.1.3 Formato de generadores

Un generador sincrónico es modelado como una inyección de potencia compleja (MW y MVar equivalentes) cuando la barra es especificada como PQ. En este caso, para un generador i es especificada su potencia en las columnas $P_g(2)$ y $Q_g(3)$ de la matriz “*generator data*”. La inyección de potencia es de la forma:

$$\underline{s}_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad 2.3$$

En los casos, tipo PV se especifica la magnitud de la tensión y la potencia (MW equivalente) en las columnas $P_g(2)$ y $V_g(6)$, y tipo slack la magnitud de la tensión unitaria en la columna $V_g(6)$ de la matriz “*generator data*”.

2.1.4 Formato de cargas pasiva

Las cargas pasivas son modeladas a potencia constante como una cantidad específica de potencia real y reactiva consumida en la barra. Para una barra i es especificada la potencia consumida en las columnas $P_d(3)$ y $Q_d(4)$ del campo “*bus data*” y es de la forma:

$$\underline{s}_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad 2.4$$

2.1.5 Formato de elementos en paralelo (Shunt)

Los elementos conectados en derivación como capacitores e inductores ideales son modelados como una fuente de potencia (MVar) en paralelo con la barra. La admitancia del elemento en derivación (shunt) puede ser especificada por su potencia real consumida p_{sh}^i (en MW) y potencia reactiva inyectada o consumida q_{sh}^i (en Mvar) en las columnas $G_s(5)$ y $B_s(6)$ del campo “bus data”, es decir:

$$\underline{y}_{sh}^i = \frac{p_{sh}^i \pm jq_{sh}^i}{S_{base}} \quad 2.5$$

En esta última expresión, la base de la magnitud de la tensión se asume la nominal de 1,0 p.u.

2.2 Flujo de potencia convencional aplicado con MATPOWER

MATPOWER fue diseñado desde sus inicios para ejecutar un análisis de flujo de potencia, para ello se usa la función “runpf”. Esta función tiene como argumento de entrada el archivo “casedata”, y opcionalmente otra entrada de información se logra usando la estructura “mpopt”, la cual establece las condiciones por defecto tales como el tipo y tolerancias del método numérico, el número máximo de iteraciones, etc.

La librería de MATPOWER incluye cuatro (4) diferentes métodos para resolver CPF. El método por defecto en MATPOWER es el Newton-Raphson, utilizando la forma polar de las ecuaciones y una completa matriz jacobiana, la cual es actualizada en cada iteración.

También se incluyen otros métodos de solución del CPF, tales como el método de Newton-Raphson desacoplado, los métodos XB y BX. Estos algoritmos reducen en gran medida la cantidad de computación por iteración, al

actualizar las magnitudes de tensiones y ángulos por separado basados en Jacobianos aproximados constantes que solo se tienen en cuenta una vez al comienzo del proceso de solución. El cuarto algoritmo es el método estándar de Gauss-Seidel de Glimm y Stagg.

La solución del flujo de potencia se muestra en pantalla por una estructura denominada “results”, esta información detallada es almacenada en forma de columnas.

Internamente, la función “runpf” realiza una serie de conversiones de los datos del problema antes de llamar a la rutina de “solver”. Esta conversión de formato externo a interno se realiza mediante la función “ext2int”. Al terminar la simulación los datos se convierten de nuevo a formato externo para mostrarlos en pantalla.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL FILTRO SINTONIZADO

El propósito de los filtros en un sistema eléctrico de potencia es suprimir o disminuir la distorsión de la onda de tensión y de corriente producida por las componentes no lineales del sistema de potencia.

Cuando se desea suprimir o disminuir una corriente o tensión de frecuencia determinada en la red eléctrica se puede utilizar un filtro LC serie, conectado en paralelo en punto de la red. Este filtro presenta una impedancia muy baja a la frecuencia seleccionada para suprimir o disminuir las corrientes y tensiones armónicas en el sistema.

Los filtros LC serie tienen ciertas desventajas, entre las más importantes es la vulnerabilidad que tienen a la pérdida de sintonía debido a la dependencia de los elementos del filtro con la temperatura y/o a variaciones de la frecuencia fundamental. Por otra parte, al interactuar con la red eléctrica puede que se produzca una resonancia paralela. Aun así son los equipos con mayor uso por ser de menor costo en comparación a otras configuraciones. Al conectarse en paralelo en un nodo del sistema inyectan potencia reactiva a frecuencia fundamental mejorando así el factor de potencia y el perfil de tensiones. Además proporciona una máxima atenuación para una armónica individual disminuyendo las pérdidas asociadas en la red.

Los filtros LC serie están sintonizados a una frecuencia en donde se igualan sus reactancias, conocida como la frecuencia de resonancia serie. Se pueden diseñar para un factor de calidad elevado sintonizando a un armónico bajo

(usualmente el 3° ó 5°) o un factor de calidad reducido sintonizando a un armónico elevado [11].

Para las especificaciones de las componentes que conforman el filtro LC serie se siguen las recomendaciones de la norma IEEE std.1036 -2011 *Guide for application of shunt power capacitors* y IEEE std. 1531 -2003 *Guide for Application and Specification of Harmonic*

3.1 Modelado en MATPOWER del filtro LC serie sintonizado

El filtro de sintonía simple LC serie se desarrolla partiendo del circuito ilustrado en la Figura 5 la impedancia del circuito es,

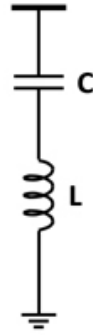


Figura 5 Filtro de sintonía única conectado en paralelo (shunt)

$$Z_{filtro} = j(Xl - Xc). \quad 3.1$$

Tomando en cuenta que se desea calcular el impacto de los armónicos en el sistema, la representación con los diferentes valores de “h” será:

$$Z_{filtro} = j \left(h \cdot \omega L - \frac{1}{\omega C \cdot h} \right) \quad 3.2$$

$$Y_{filtro} = \frac{1}{Z_{filtro}} = -j \left(\frac{1}{h \cdot \omega L - \frac{1}{\omega C \cdot h}} \right) \quad 3.3$$

A partir de la ecuación 3.3 se obtiene el valor Y_{filtro} en la barra donde se ubique el filtro sintonizado, la cual se incorpora a la matriz de admitancia del sistema $[Y_{bus}]$ usando la metodología propuesta en el NIHA desarrollado en la referencia [6].

3.2 Metodología para la compensación de potencia reactiva

En los sistemas de potencia se presentan situaciones donde la demanda de reactivos supera la generada por los elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios. La transmisión de esta potencia desde los generadores a las cargas tiene como consecuencia negativa, los bajos niveles de tensión en los nodos particularmente los más alejados en la red de transmisión. Además, el bajo factor de potencia implica pérdida de energía en la red eléctrica por lo que el productor y distribuidor se ve en la finalidad de cobrar una penalización al usuario.

Para realizar la compensación de reactivos en los sistemas de potencia por lo general se utilizan bancos de condensadores debido a su bajo costo, fácil mantenimiento y ubicación en la red.

La compensación del factor de potencia (f_p) en una red se realiza a partir de un valor inicial de potencia reactiva entregada en un nodo. Para efectos de este trabajo corresponde en el punto de común acoplamiento con la red externa PCC y se obtiene de la corrida de un flujo de carga convencional en MATPOWER. Conocido el f_p entregado en el nodo de referencia, si este resulta bajo se hace necesario corregir a un nuevo f_p más alto. Los valores aceptables según la norma [2] son f_p mayores o iguales a 0,9.

Básicamente se obtiene la diferencia de los kVAr nuevos (corregido) con los KVar inicial (sin corrección). Esta diferencia será el valor en kVAr del banco capacitivo que se añadirá a la red.

$$Q_c (kVar) = P_s (kW) \times [\tan(\cos^{-1} fp_{inicial}) - \tan(\cos^{-1} fp_{new})] \quad 3.4$$

Donde, P_s = Potencia del sistema en el PCC en kW

Para calcular el valor de la reactancia capacitiva y el condensador, considerando que la tensión de bus esta expresada en kV, las potencias en MW y MVar, se utilizan las ecuaciones,

$$X_c = \frac{V_{bus}^2}{Q_c} \quad [\Omega] \quad 3.5$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_o \cdot X_c} \quad [f] \quad 3.6$$

3.3 Cálculo de la componente inductiva del filtro LC serie

Para realizar el cálculo de la reactancia inductiva se adoptan la recomendaciones del artículo “Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems” [12]

En primer lugar se debe realizar un estudio en frecuencias de la red de prueba, para determinar la frecuencia armónica f_c con mayor impacto en el sistema. Luego se determina la inductiva serie del filtro L_s usando el condensador C_f que se obtuvo del estudio del factor de potencia y a partir del criterio que la frecuencia de resonancia f_s del filtro debe ser menor a f_c .

$$f_s = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{1}{L_s * C_f}} < f_c \quad [Hz] \quad 3.7$$

$$L_s = \frac{1}{(2\pi)^2 * f_s^2 * C_f} \quad [H] \quad 3.8$$

$$X_L = L_s * 2\pi * f_o \quad [\Omega] \quad 3.9$$

La respuesta en frecuencia del filtro sintonizado se observa en la Figura 6, donde se puede visualizar un valle el cual representa el camino de baja impedancia en la frecuencia del filtro f_s .

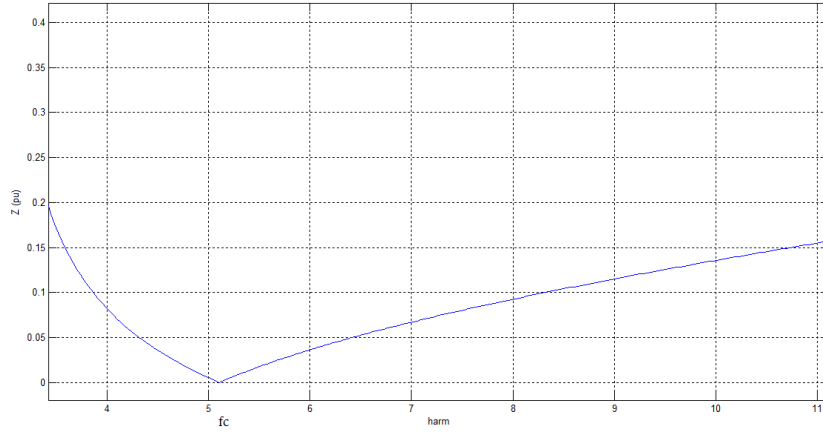


Figura 6 Respuesta en frecuencia del filtro LC serie

3.3.1 Frecuencia resonante paralela del sistema

En una red eléctrica la frecuencia de resonancia paralela está representada por la impedancia del sistema, la cual es dominada por los transformadores en servicio y los capacitores shunt localizados dentro de la instalación.

A partir del cálculo de la matriz de impedancias Z_{bus} se puede determinar el valor de la admitancia equivalente del sistema X_{sys} . La inductancia de Thevenin desde el punto de conexión:

$$L_{sys} = \frac{X_{sys}}{2\pi * f_o} \quad [H] \quad 3.10$$

La correspondiente inductancia es la interacción con la impedancia de la fuente, se produce a una frecuencia inferior f_c a la que está sintonizado el filtro. La frecuencia resonante en paralelo estará representada por la ecuación 3.11, usando la inductancia serie del filtro L_s y el condensador C_f que se obtuvo del estudio del factor de potencia del sistema.

$$f_{sys} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{1}{(L_s + L_{sys}) * C_f}} \quad [Hz] \quad 3.11$$

Un punto importante acerca de la ecuación es:

- El sistema puede tener uno o más bancos capacitivos que pueden estar conectados en paralelo y en serie a través de la trayectoria. Esto puede generar otras frecuencias de resonancia paralela.

3.4 Estudio de barrido de frecuencia del sistema

El barrido en frecuencia consiste en calcular la impedancia armónica en el nodo del sistema versus un rango de frecuencia de interés. El nodo de interés puede ser aquel donde la fuente de armónicos esta conectada.

En un sistema Figura 7 la impedancia armónica se calcula, colocando una fuente de corriente de valor unitario en el nodo analizado. Las otras fuentes de corriente son puestas a cero y por medio de una sucesiva ejecución del NIHA [6] se encuentran las tensiones de las barras.

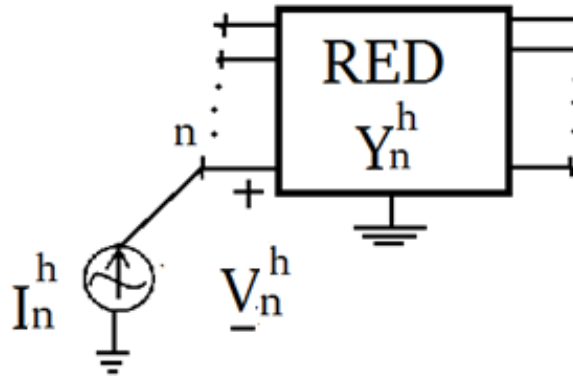


Figura 7 Equivalente del sistema de potencia para el análisis de barrido en frecuencia

$$I_n = Y_n * V_n \quad 3.5$$

$$V_n = [Y_n]^{-1} * I_n \quad 3.6$$

Donde

I_n : Es el vector de corrientes armónicas inyectado en un punto de la red

Y_h : Es la matriz de admitancia de la red en una frecuencia “h”

V_n : Es el vector de tensión en las barras de la red

Si ejemplificamos el método antes mencionado seria de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Colocando las fuentes de corriente a 0 y dejando la fuente I_2 en 1, se obtiene la siguiente matriz

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.8$$

$$\Rightarrow [V_h] = [Z_{bus,h}] \quad 3.9$$

Donde se puede observar que la tensión armónica es equivalente a las impedancias armónicas.

En general, la respuesta en frecuencia de la red consiste en resolver múltiples sistemas de ecuaciones del tipo $b = X \cdot A$, donde la matriz A es simétrica y muy dispersa (muchos ceros). Un ejemplo grafico del resultado del método se puede observar en la Figura 8, donde se identificaron las resonancias serie y paralelo de ese sistema

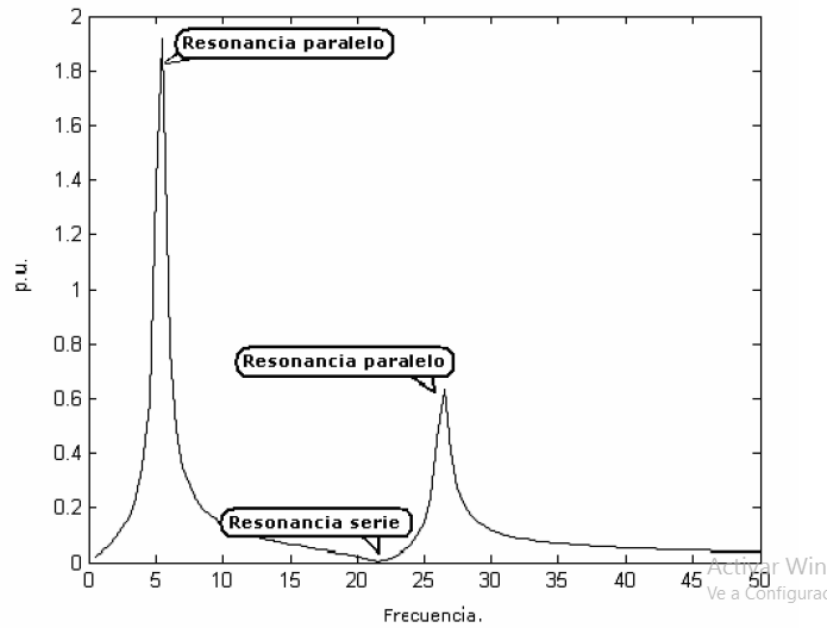


Figura 8 Barrido en frecuencia de un sistema de potencia [8]

La metodología implementada para el barrido en frecuencia es el mostrado en la Figura 9 donde se puede observar de forma detallada como se inyectan las corrientes armónicas a la red bajo estudio.

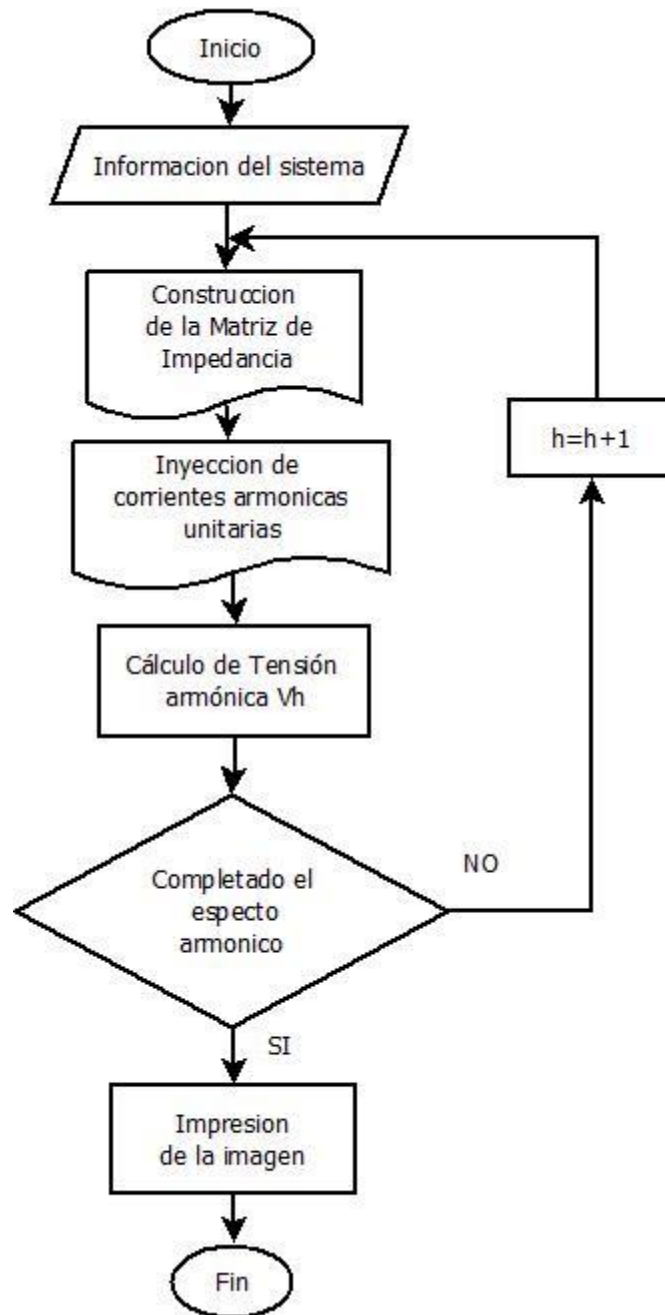


Figura 9 Flujograma de estudio de barrido en frecuencia de una red eléctrica

A partir del artículo del IEEE “Desing of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems”, se sintetiza una metodología adaptada a los objetivos del trabajo para especificar un filtro de sintonía simple,

- El modelo se inicia calculando el factor de potencia f_p del sistema bajo estudio en el punto común de acoplamiento (PCC), usando los resultados del flujo de carga ejecutado a partir la función `runpf` del MatPower.
- Se verifica si es necesaria la compensación reactiva para alcanzar un f_p de diseño $f_{p,diseño}$ en el PCC. En caso afirmativo, se efectúa el cálculo del banco capacitivo C_f ubicado en una barra especificada por el planificador. Es importante señalar que la barra de compensación puede ser distinta al PCC.
- Bajo la hipótesis de la existencia de cargas no lineales en la red, se computa el valor de la inductiva serie (L_s) tomando en cuenta la frecuencia de resonancia serie de diseño $f_{s,diseño}$.
- Se realiza un nuevo cálculo del f_p para determinar si el sistema cumple con el $f_{p,diseño}$. En caso que no se cumplan se debe realizar un nuevo ajuste de los kVAr del banco capacitivo y de la inductancia serie usando el $f_{s,diseño}$, consecutivamente hasta alcanzar el valor de $f_{p,diseño}$ en el PCC.
- Seguidamente se realiza el flujo de carga con la metodología NIHA usando la función `runpfH` [6] para determinar el THDv en cada barra.
- Se verifica que el THDv en el bus donde está ubicado el filtro no supere el límite establecidos en la norma [4]. En caso de superar el límite se debe realizar un barrido en frecuencia entre los nodos con cargas no lineales y el filtro, para determinar si la frecuencia de resonancia paralela se encuentra muy próxima a los armónicos influyentes. Si el problema se debe a esta frecuencia se debe realizar un replanteamiento del filtro. En caso contrario se debe realizar un ajuste en los kVAr del banco capacitivo y en consecuencia de la inductiva L_s .
- Luego se verifica si el banco capacitivo cumplen con los límites establecidos en la norma del IEEE [2] std. 1036.
 - En primer lugar se verifica que la corriente I_{rms} por el filtro no supere el límite $I_{rms,max}$ establecido para el banco capacitivo. En

caso de superar los límites se debe realizar un ajuste los kVAr del banco.

- En segundo lugar se examinan los límites de tensión V_{rms} y V_{pico} en el banco capacitivo del filtro. En caso de superar los límites $V_{rms,max}$ y $V_{pico,max}$ se debe realizar un ajuste en los kV del banco.
- Finalmente se verifica la potencia del banco capacitivo kVAr no supere el limite $kVAr_{max}$

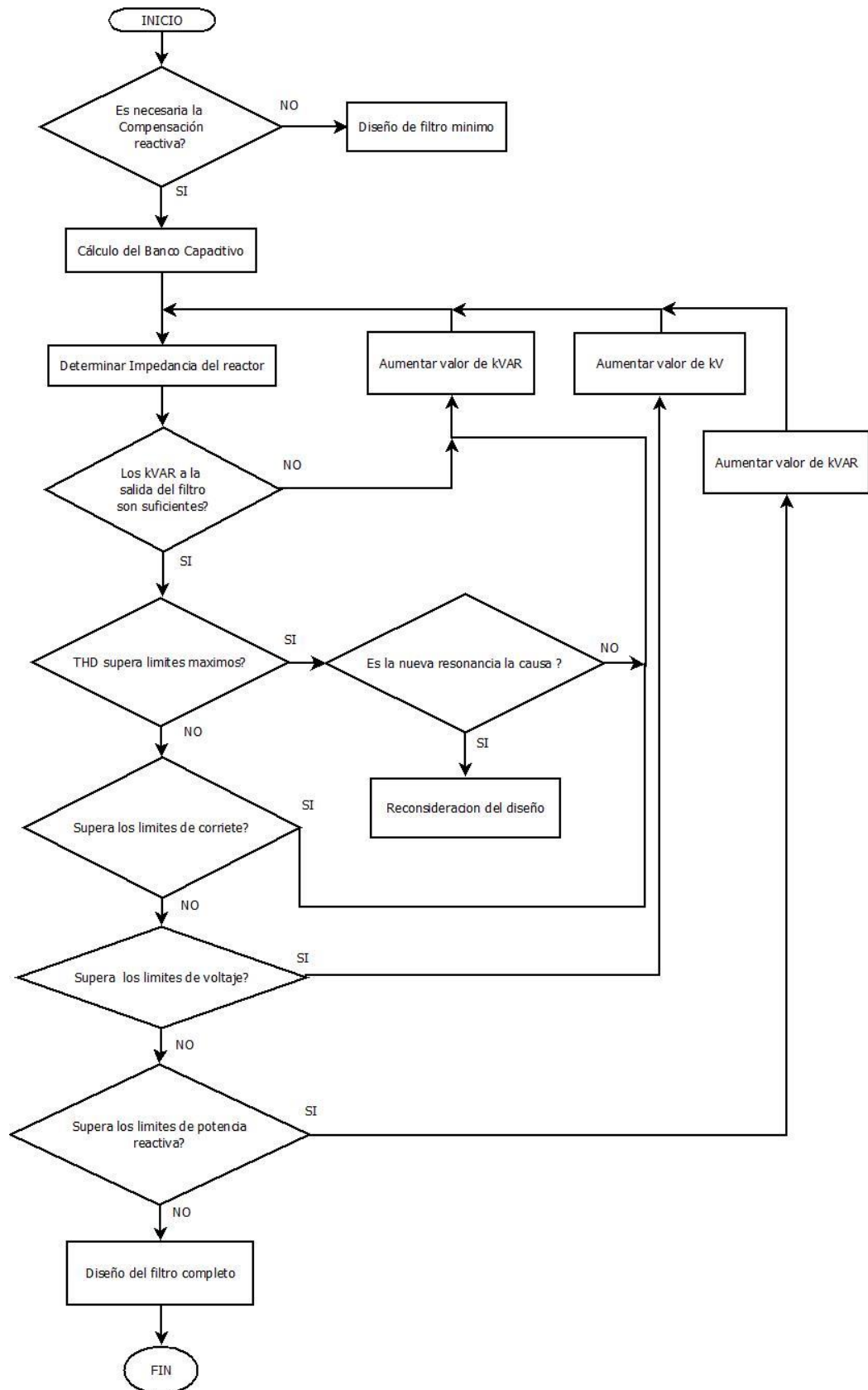


Figura 10 Flujograma para el diseño del filtro de sintonía simple [12]

CAPÍTULO IV

MODIFICACIONES REALIZADAS AL MATPOWER

La facilidad que permite MATPOWER para modificar el código fuente es de suma importancia para el desarrollo de las rutinas necesarias para el diseño del filtro de sintonía, tomando en cuenta las modificaciones realizadas en el estudio de penetración armónica no iterativa NIHA [6]

El desarrollo de nuevas funciones se realizó bajo la plataforma de MATLAB y utilizando la última versión de MATPOWER (6.0b2).

4.1 Implementación del NIHA usando el estándar IEEE CDF y PTI

El modelo implementado en el análisis armónico no iterativo NIHA (ver apéndice II) utiliza el formato de datos IEEE CDF y PTI, de manera similar esta estructura de datos se sigue en este trabajo incluyendo la información nueva necesaria en la estructura “mpc” de MATPOWER. En el trabajo [6] se realizaron modificaciones en las matrices de datos “bus data”, “gen data” y se incluyó el campo matricial “HSData” que contiene la información del espectro armónico típico de la carga no lineal.

4.1.1 Modificación del campo Bus Data para la implementación del filtro LC serie

En el campo “bus data” se incluyen tres nuevas columnas (ver Figura 11) para almacenar la ubicación del filtro de sintonía simple en la red bajo estudio, la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del filtro expresadas en ohmios. Estas nuevas columnas en la matriz “bus data” son denominadas “filter”, “Xl” y “Xc”.

La columna “filter” es binaria. Un valor igual a cero (0) indica que no hay filtro conectado en la barra mientras que un valor uno (1), indica que hay un filtro en esa barra. Las columnas “XL” y “Xc” contienen los valores de la reactancia inductiva y capacitiva, respectivamente del filtro, en caso contrario aparece un valor de cero (0).

Se modifica la función idx_busH incorporada al MATPOWER en el trabajo [6] para incluir los nuevos índices “filter”, “XL” y “Xc”, El código de esta modificación se presenta en el apéndice III.

%% bus_data														
%	bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	baseKV	zone	Vmax	Vmin	nonl_load	filter	XL	XC
mpc.bus = [														
	1	3	0	0	0	0	69	1	1.05	0.95	0	0	0	0;
	2	2	0	0	0	0	13.8	2	1.05	0.95	0	0	0	0;
	3	1	0.6	0.53	0	0	0.48	4	1.05	0.95	1	0	0	0;%C
	4	1	0	0	0	0	69	1	1.05	0.95	0	0	0	0;
	5	1	2.24	2	0	0	13.8	3	1.05	0.95	0	1	0	0;
	6	1	0	0	0	0	13.8	3	1.05	0.95	0	0	0	0;
	7	1	1.15	0.29	0	0	0.48	5	1.05	0.95	1	0	0	0;%C
	8	1	1.31	1.13	0	0	4.16	6	1.05	0.95	0	0	0	0;
	9	1	0	0	0	0	13.8	3	1.05	0.95	0	0	0	0;
	10	1	0.81	0.8	0	0	0.48	7	1.05	0.95	1	0	0	0;%C
	11	1	0	0	0	0	13.8	3	1.05	0.95	0	0	0	0;
	12	1	0.37	0.33	0	0	0.48	8	1.05	0.95	1	0	0	0;%C
	13	1	2.8	2.5	0	0	2.4	9	1.05	0.95	0	0	0	0;
];														

Figura 11 Matriz bus_data modificada en MATPOWER

4.2 Modificación de la función “savecase” para la implementación del filtro

LC serie

La función del MATPOWER “savecase” trabaja de la siguiente forma: al ingresar una entrada (caso de estudio) la función realiza una lectura de la estructura de entrada, y luego guardar la estructura “mpc” en un nuevo archivo de extensión .m., los datos del caso guardados serán los datos temporales que estaba en las matrices del caso, además realiza la sobreescritura de la entrada modificando los datos guardados en el archivo.

[illegible][illegible]

37

4.4 Función `runpfHfilter` para estudio de penetración armónica no iterativa

Para el estudio de la penetración armónica el método de análisis armónico no iterativo (NIHA, No Iterative Harmonic Analysis) es el más simple. En este método se asume que las corrientes armónicas inyectadas por las cargas no lineales son independientes de las tensiones armónicas de la red, es decir, el método no considera la interacción entre la red y los dispositivos no lineales

El comportamiento de estos dispositivos sólo depende de las tensiones fundamentales en las barras y de sus datos. Entonces se considera que las tensiones armónicas no influyen en la potencia consumida por el sistema. Por tanto, los balances de potencias en las barras dependen solamente de las tensiones fundamentales, lo que permite calcular de forma directa las admitancias de las cargas en las barras PQ a partir de la solución del flujo de potencia convencional [6].

La nueva función `runpfHfilter` se encarga de ejecutar el estudio de penetración armónica bajo la metodología de NIHA incluyendo las impedancias del filtro LC serie, imprimiendo posteriormente los resultados en pantalla. La diferencia básica respecto a la función `runpfH` desarrollada en [6] es el uso de la nueva función `makeYbusH_filter` en lugar de la función `makeYbusH`.

Esta nueva función muestra el tiempo de duración y la cantidad de las iteraciones, además realiza la lectura y adecuación de datos los cuales luego se imprimen en pantalla por medio de un arreglo basado igualmente en el comando `fprintf` como resultados. La metodología para resolver un caso de estudio de HP bajo NIHA con filtro LC serie empleando MATPOWER se muestra en el diagrama de la Figura 17.

El detalle del código de la nueva función se basa en el partes del código de la función desarrollada en la referencia [6].

```

%% Matriz de admitancia armonica

k=2*j k-1: % orden del armonico 3,5,7
YbusH = makeYbusH_filter( baseMVA, bus, branch,gen,k)
if det(YbusH)==0
    fprintf(fd, '\nWarning: Matrix is singular to working precision', et);
else
    fprintf(fd, '\nConverged in %.2f seconds', et);
end

Mod_Ihar= abs(If)*hsdat(jk,PERCENT)/100; %modulo de la corriente armonica e

Fase_Ihar= angle(If)+hsdat(jk,ANGLE)*pi/180*bus(:,NONL_LOAD); %fase de la c

Ihar=Mod_Ihar.*exp(1j*Fase_Ihar);

Vh(:,jk)=YbusH\Ihar;

```

Figura 16 Incorporación makeYbusH_filter en la función runpfHfilter

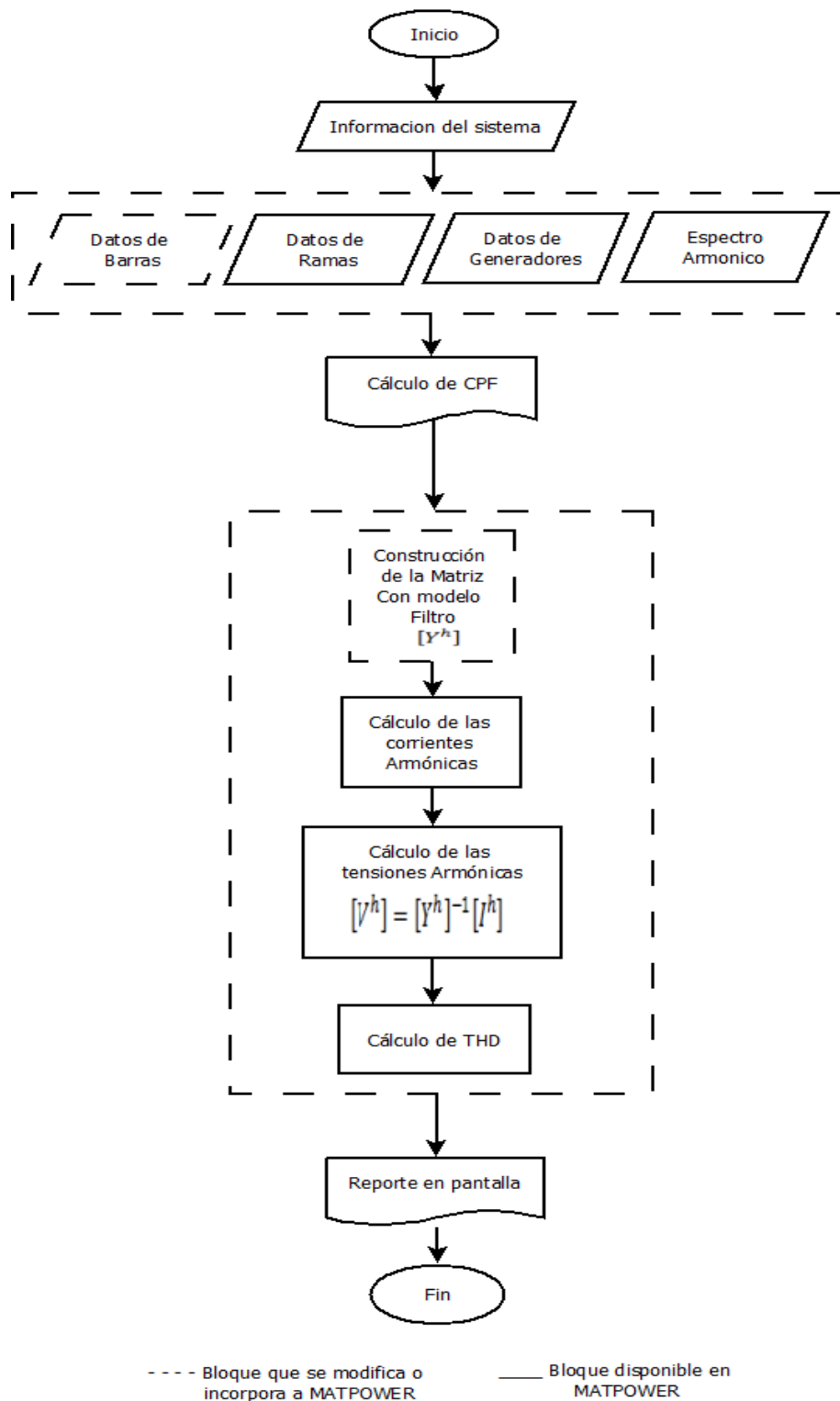


Figura 17 Adaptaciones del NIHA para estudios con filtro LC serie [6].

4.5 La nueva función *runpfFilter* incorporada a MATPOWER para diseñar un filtro LC serie

Esta nueva función es la encargada de realizar el diseño del filtro LC serie para el caso de estudio bajo el modelo empleado en la Figura 10. Las partes principales de la función se desarrollaron en nuevas subfunciones. Siendo creados en MATPOWER en archivos '.m', conocidos con los nombres de "*Factorpotencia*", "*CorreccionFP*", "*Reacinductiva*", "*valoresbase*", y "*runpfHfilter*".

La función "*Factorpotencia*" realiza el cálculo del fp del sistema en el punto de común conexión con la red (PCC). La función "*CorreccionFP*" realiza el ajuste del fp del sistema al valor deseado, determinando las variables de salida: potencia MVar trifásica del banco capacitivo, reactancia y capacidad. Esta función utiliza principalmente para calcular los valores iniciales, para cumplir con el valor mínimo exigido por la norma IEEE std.1036 [2].

La función "*Reacinductiva*" determina: reactancia equivalente inductiva del sistema, reactancia inductiva del filtro, inductancia del filtro, frecuencia de resonancia paralela y frecuencia de resonancia serie.

La función "*valoresbase*" verifica el cumplimiento de la corriente, tensiones y potencia reactiva máximas permitidas en el filtro conforme a la norma del IEEE std.1036 [2] para los equipos del filtro.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos de la implementación del nuevo programa runpfFilter a partir del MATPOWER, siguiendo del diagrama de flujo que se muestra en la Figura 10.

5.1. Descripción del sistema industrial de 13 barras del IEEE

El estudio se realiza sobre la red eléctrica de prueba de 13 barras del IEEE [1] que se muestra en la Figura 18 la red de prueba original consta de 13 barras, es alimentado desde un sistema externo en 69kV, una planta local que opera en 13,8kV y solo posee una barra con carga no lineal. Esta red de prueba fue la usada en el desarrollo de método NIHA [6]. La red modificada consiste en colocar cargas no lineales en barras adicionales, no usar la compensación reactiva y desconectar el generador auxiliar, tal como observa en la Figura 20.

Los datos del sistema se describen en las Tabla 3 y Tabla 4. Los valores base del sistema corresponden a 13,8kV y 10MVA. Las capacitancias de las líneas cortas se desprecian. Se considera un sistema trifásico balanceado, por tanto solo se proporcionan solo datos de secuencia positiva. Los dispositivos no lineales corresponden a controladores de velocidad de motores (i.e. ASD) los cuales en el sistema se conectan en las barras 3, 7, 10 y 12.

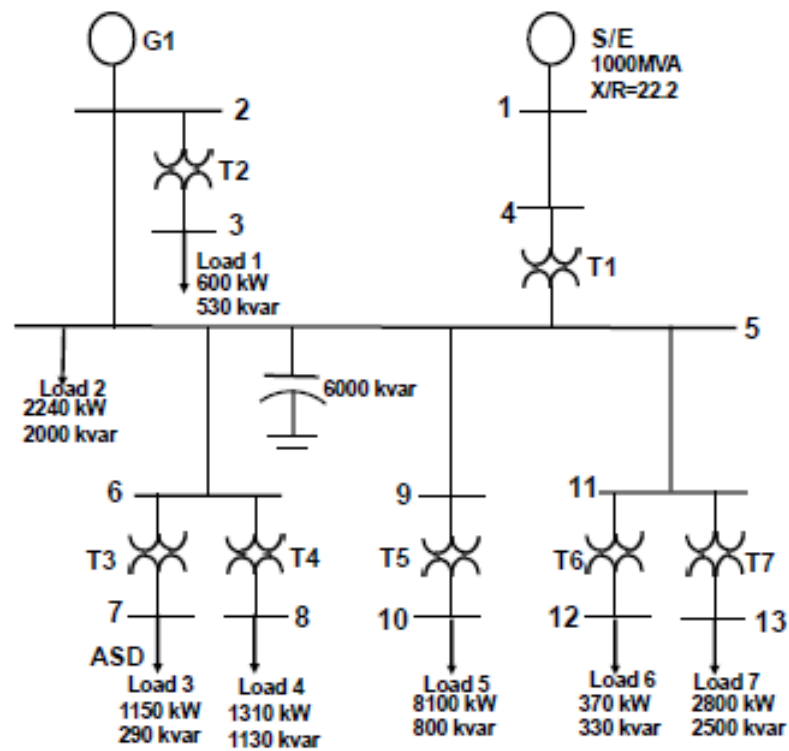


Figura 18 Sistema eléctrico industrial de 13 barras del IEEE [13]

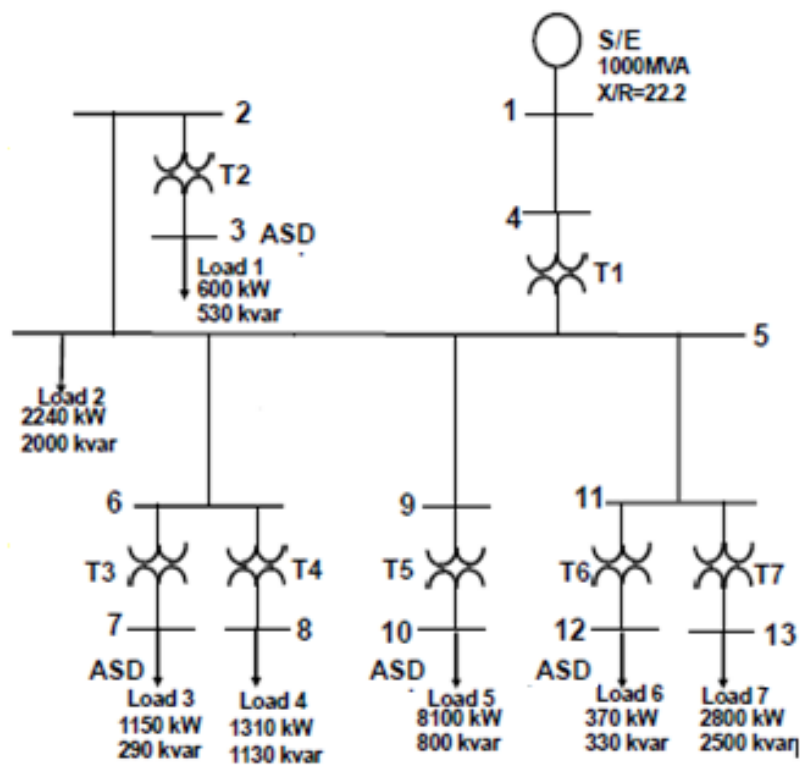


Figura 19 Sistema eléctrico industrial de 13 barras del IEEE [13] modificado

Tabla 3 Datos de las líneas (en bases de 13.8kV, 69kV y 10MVA)

Desde	Hasta	R (p.u.)	X (p.u.)
1	4	0,00139	0,00296
5	2	0,00122	0,00243
5	6	0,00075	0,00063
5	9	0,00157	0,00091
5	11	0,00109	0,00091

Tabla 4 Datos de transformadores (en bases a valores nominales)

Desde	Hasta	Voltaje [kV]	Tap	kVA	%R	%X
4	5	69:13,8	69	15.000	0,4698	7.9862
2	3	13,8:0,48	13,45	1.500	0,9593	5.6694
6	7	13,8:0,48	13,45	1.250	0,7398	4.4388
6	8	13,8:4,16	13,11	1.725	0,7442	5.9537
9	10	13,8:0,48	13,45	1.500	0,8743	5.6831
11	12	13,8:0,48	13,80	1.500	0,8363	5.4360
11	13	13,8:2,4	13,11	3.750	0,4568	5.4810

Para llevar a cabo los diversos estudios de penetración armónica se utiliza el espectro armónico típico de las cargas ASD los cuales están dados en Tabla 5.

Tabla 5 Espectro armónico de corrientes del ASD

Armónico	Porcentaje (%)	Fase relativa (°)
1	100.00	0.00
3	0.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	-84.11	-84.11
9	0.00	0.00
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
15	0.00	0.00
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
21	0.00	0.00
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
27	0.00	0.00
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
33	0.00	0.00
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

5.2. Ingreso de datos en el programa para el diseño del filtro

Se ejecuta la nueva función,

```
>>> runpfFilter(caso13barras)
```

Generando secuencialmente los siguientes análisis,

- Determinación del factor de potencia inicial
- Corrección del factor de potencia
- Determinar el THD de tensión
- Diseño del filtro para la compensación de reactivos y filtrado de armónicos

5.2.1. Corrección del factor de potencia del sistema

En primer lugar, el programa realiza el flujo de carga convencional para obtener los valores iniciales del sistema usando la función *runpf* de MATPOWER. Luego se determina el factor de potencia en el PCC (i.e. barra 1).

Tabla 6 Resultados del caso de estudio del flujo de carga inicial

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang(°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0,000*	9.42	9.03	-	-
2	0.949	-2.964	-	-	-	-
3	0.945	-4.170	-	-	0,60	0,53
4	0.996	-0.088	-	-	-	-
5	0.946	-2.959	-	-	2,24	2,00
6	0.946	-2.961	-	-	-	-
7	0.927	-5.520	-	-	1,15	0,29
8	0.948	-5.412	-	-	1,31	1,13
9	0.946	-2.957	-	-	-	-
10	0.932	-4.606	-	-	0,81	0,80
11	0.946	-2.956	-	-	-	-
12	0.930	-3,710	-	-	0,37	0,33
13	0.953	-5.246	-	-	2,80	2,50
-	Total:		9.42	9.03	9,28	7,58

*barra de slack

El cómputo del factor de potencia se llevó a cabo con la siguiente ecuación:

$$f_p = \frac{P_{PCC}}{S_{totalPCC}} \quad 5.1$$

Tomando los resultados del flujo de potencia de la tabla 6,

$$FP_{inicial} = \frac{9.42}{\sqrt{9.42^2 + 9.03^2}} = 0.7218 \quad 5.2$$

Con el objetivo de elevar el factor de potencia hasta un valor de diseño, el cual se toma 0.95 en este trabajo, con el fin de liberar carga de reactivos (MVar) en el PCC y mejorar los niveles de tensión de las barras del sistema industrial.

A partir de la ecuación 3.4 se obtiene la potencia reactiva necesaria para mejorar el fp del sistema y determinar el banco capacitivo trifásico,

$$Q_c \text{ kvar} = 9.42 \times [\tan(\cos^{-1}(0.7217)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))] \quad 5.3$$

$$Q_c \text{ kvar} = 5938.82 \quad 5.4$$

Seguidamente se determina la reactancia capacitiva del banco con la ecuación 3.5 y la conductancia con la ecuación 3.6. Aunque la tensión nominal en la barra es 13.8kV, se toma la tensión en la barra obtenida del flujo de carga.

$$XC = \frac{13.058^2}{5938.82} = 28.7113 \quad [\Omega] \quad 5.5$$

$$C = \frac{1}{2\pi * 60 * 28.7113} = 92.388 \quad [\mu f] \quad 5.6$$

Tabla 7 Potencia, reactancia y capacitancia de la red 13 barras modificada con compensación

Qc inicial [Mvar]	Xc inicial [Ω]	C inicial [μf]
5.9386	28.7122	92.385

El programa ejecuta un nuevo flujo de carga del sistema para determinar el nuevo factor de potencia y compararlo con el factor de potencia inicial.

Tabla 8 Resultados del flujo de carga con compensación de reactivos
 $X_c = 28.7122\Omega$

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang(°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0,000*	9.38	2.87	-	-
2	0.981	-3.009	-	-	-	-
3	0.981	-4.129	-	-	0,60	0,53
4	0.998	-0.137	-	-	-	-
5	0.981	-3.005	-	-	2,24	2,00
6	0.981	-3.007	-	-	-	-
7	0.962	-5.383	-	-	1,15	0,29
8	0.986	-5.278	-	-	1,31	1,13
9	0.981	-3.003	-	-	-	-
10	0.969	-4.532	-	-	0,81	0,80
11	0.980	-3.002	-	-	-	-
12	0.966	-3,702	-	-	0,37	0,33
13	0.991	-5.125	-	-	2,80	2,50
-	Total:		9.38	2.87	9,28	7,58

*barra de slack

El nuevo factor de potencia se obtiene,

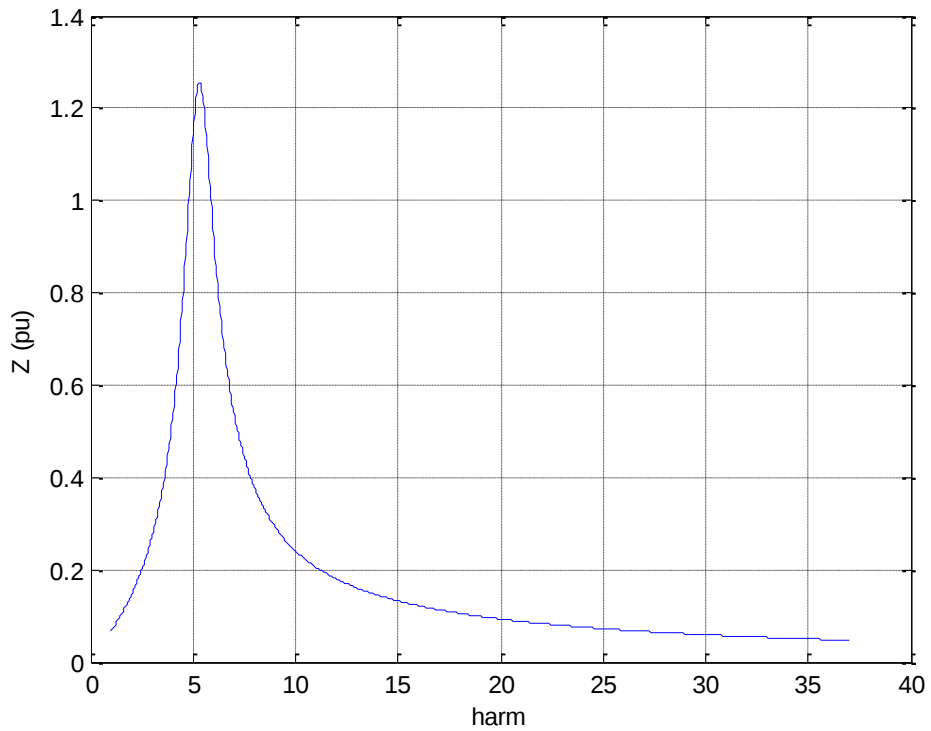
$$FP_{\text{corregido}} = \frac{9.38}{\sqrt{9.38^2 + 2.87^2}} = 0.9562 \quad 5.6$$

Tabla 9 Factores de potencia con compensación $X_c = 28.7122\Omega$

f_p inicial	f_p Corregido
0.7217	0.9564

5.2.2. Cálculo de la componente reactiva del filtro

Utilizando las ecuaciones 3.8 y 3.9, el programa determinar el valor de la reactancia inductiva del filtro. En el cómputo del elemento inductivo se tomó en cuenta la frecuencia de sintonización a partir de un estudio en frecuencia del sistema. Este estudio arroja como resultado un impacto significativo de la impedancia alrededor de la 5° armónica como se puede observar en la Gráfica 1.



Gráfica 1 Barrido en frecuencia de la impedancia propia de la barra 5 con un banco capacitivo $X_c = 28.7122\Omega$

Se fija la frecuencia de sintonización en $4.7 \cdot f_0$ siguiendo los criterios de la referencia [12] en donde se establece que la sintoniza debe estar por debajo de la frecuencia perjudicial. Esto se debe a que en condiciones de resonancia, la baja impedancia puede ocasionar que todas las corrientes armónicas cercanas a esa frecuencia sean absorbidas por el filtro.

$$L_s = \frac{1}{(2\pi)^2 * (4.7 * 60)^2 * 92.388 * 10^{-6}} = 3.447 \text{ [mH]} \quad 5.7$$

$$X_L = 3.44 * 10^{-3} * 2\pi * 60 = 1.299 \quad [\Omega]$$

5.8

Tabla 10 Inductancia y reactancia inductiva para una sintonía de $4.7*f_0$

Ls [H]	XLf [Ω]
0.0034	1.2998

Luego de realizado el cálculo de la componente inductiva, el programa realiza un nuevo flujo de carga convencional para determinar el nuevo factor de potencia con el filtro LC serie conectado, y así comprobar si el nuevo fp es aceptable según el fp de diseño.

Tabla 11 Resultados del flujo de carga con el compensación de reactivos

$$X_c = 28.7122\Omega \text{ y } XLf = 1.2998\Omega$$

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang($^\circ$)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0,000*	9.38	3.04	-	-
2	0.980	-3.008	-	-	-	-
3	0.980	-4.130	-	-	0,60	0,53
4	0.998	-0.135	-	-	-	-
5	0.980	-3.003	-	-	2,24	2,00
6	0.980	-3.005	-	-	-	-
7	0.961	-5.387	-	-	1,15	0,29
8	0.985	-5.281	-	-	1,31	1,13
9	0.980	-3.002	-	-	-	-
10	0.968	-4.534	-	-	0,81	0,80
11	0.979	-3.001	-	-	-	-
12	0.965	-3,702	-	-	0,37	0,33
13	0.990	-5.128	-	-	2,80	2,50
-	Total:		9.38	3.04	9,28	7,58

*barra de slack

$$FP_{filtro} = \frac{9.38}{\sqrt{9.38^2 + 3.2^2}} = 0.9464 \quad 5.9$$

Tabla 12 Factores de potencia con solo compensación y con el filtro LC serie en la primera iteración

f_p inicial	f_p Corregido	f_p Corregido con filtro
0.7217	0.9564	0.9463

Como se puede visualizar en la ecuación 5.9 y en la Tabla 12, el nuevo factor de potencia del caso de estudio con el filtro LC serie, no cumple inicialmente con el requisito de $f_p \geq 0.95$. Siguiendo el flujograma del diseño del filtro se realiza una nueva corrida a partir de un ajuste de la potencia reactiva inyectada por el filtro. El criterio empleado para ajustar el valor en kVAr del banco capacitivo es aumentar un 1% del valor inicial obtenido en la iteración previa.

El programa realiza las iteraciones necesarias, en las cuales se ajustan los kVAr del filtro hasta alcanzar un $f_p \geq f_p \text{ diseño} = 0.95$. Las variaciones del f_p con el filtro, la potencia reactiva, las reactancias capacitiva e inductiva, se tabulan en la Tabla 13 estas se ajustan con cada cambio de los KVAR del filtro.

Tabla 13 Valores del f_p , kVAr y reactancia en las diversas iteraciones del programa runpfFilter

Iteración	f_p con filtro	Q_c [MVar]	X_{Lf} [Ω]	X_c [Ω]
0	0.9463	5.6216	1.2998	28.7121
1	0.9471	5.6810	1.4373	31.7504
2	0.9492	6.0580	1.4231	31.436
3	0.9512	6.1186	1.4090	31.124

5.2.3. Distorsión armónica del sistema

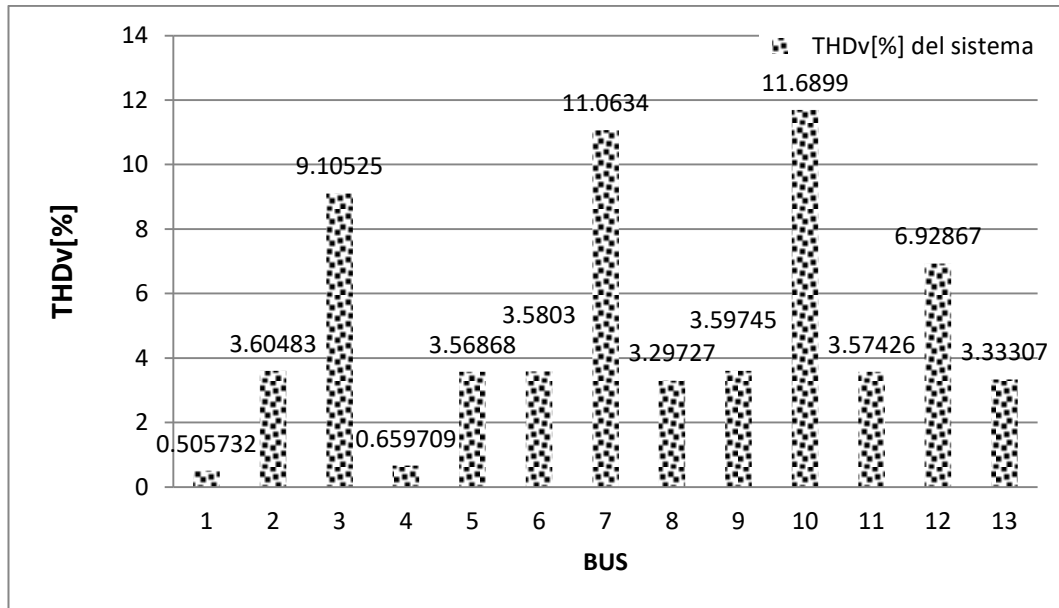
En la siguiente sección se describe como el programa ejecuta la penetración armónica (HP) aplicando la metodología NIHA [6]. El objetivo de la HP es determinar el THD_v en las barras del sistema para las distintas etapas ya descritas del proceso del diseño del filtro:

- Etapa 1: análisis de la red sin compensación de reactivos,
- Etapa 2: análisis de la red con compensación de reactivos a partir del banco
- Etapa 3: análisis de la red con compensación de reactivos a partir del banco capacitivo del filtro LC serie.

En la Tabla 14 se muestran los resultados del estudio de HP en la etapa 1, en donde se observan $THD > 9\%$ en algunas de las barras con cargas no lineales, mientras que en la barra 5 el $THD (<8\%)$ es aceptable según la norma IEEE std. 519-2014.

Tabla 14 Tensiones armónicas y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio

Bus	V1(L-N)	V3(L-N)	V5(L-N)	V7(L-N)	THD _v [%] del sistema
1	39837.2	0	125.047	109.519	0.505732
2	7537.28	0	168.537	147.653	3.60483
3	261.828	0	14.1048	12.636	9.10525
4	39678.5	0	162.495	142.291	0.659709
5	7539.04	0	166.994	146.253	3.56868
6	7536.63	0	167.518	146.688	3.5803
7	256.766	0	16.8116	15.0158	11.0634
8	2276.13	0	49.2539	42.0455	3.29727
9	7537.01	0	168.196	147.354	3.59745
10	258.354	0	17.6998	15.9311	11.6899
11	7533.76	0	167.205	146.413	3.57426
12	257.845	0	10.6922	9.52818	6.92867
13	1319.97	0	28.6618	24.5772	3.33307



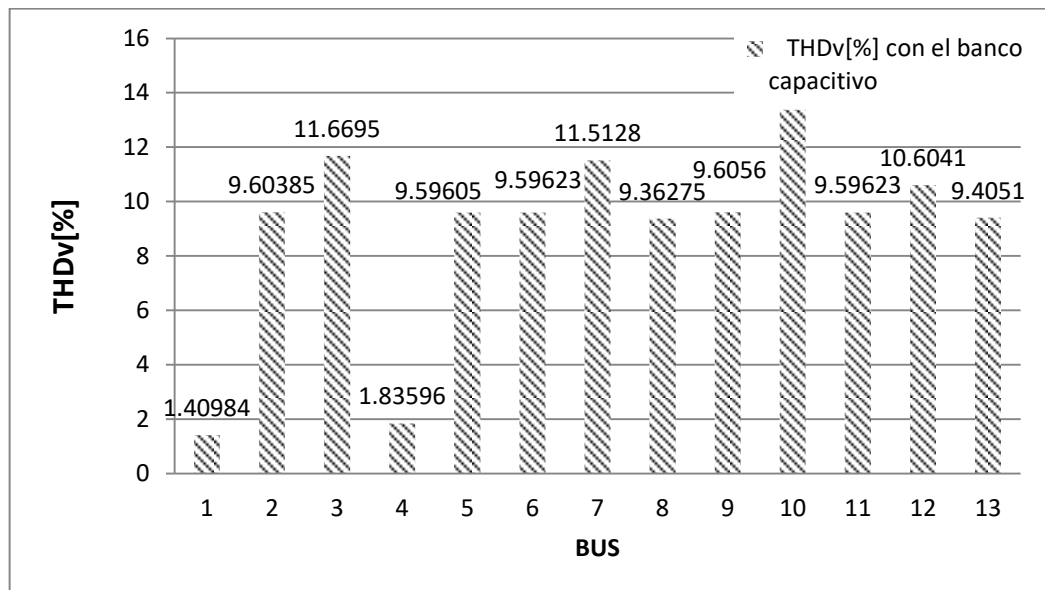
Gráfica 2 Distorsión armónica del sistema sin compensación

Los resultados obtenidos del estudio de hp en la etapa 2 se muestran en la Tabla 15 se observa que los thd_v en las barras superan el límite de 8%, con excepción de las barras 1 y 4 esto se debe a la baja impedancia (i.e. Z_{cc}) del sistema externo. En la norma IEEE 519-2014 [4] se fija el límite de $THD_v \leq 8\%$ para sistema de tensión $\leq 69kV$, en consecuencia el sistema no cumple con los valores recomendados.

Tabla 15 Tensiones y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio con solo el banco capacitivo

Bus	V1(L-N)	V3(L-N)	V5(L-N)	V7(L-N)	THDv[%]
1	39837.2	0	543.838	137.135	1.40984
2	7814.42	0	727.094	181.976	9.60385
3	271.983	0	30.5961	3.44181	11.6695
4	39751.6	0	706.7	178.17	1.83596
5	7816.11	0	726.268	183.13	9.59605
6	7813.79	0	726.228	182.554	9.59623
7	266.624	0	28.2595	3.77502	11.5128
8	2368.75	0	215.126	52.8948	9.36275
9	7814.16	0	727.103	182.324	9.6056
10	268.652	0	33.4812	5.90556	13.3722
11	7811.03	0	725.911	182.691	9.59623
12	267.644	0	27.8728	3.28027	10.6041
13	1373.09	0	125.224	30.9476	9.4051

La distorsión armónica de tensión por barra depende de la cercanía a la carga no lineal. se puede observar en la Gráfica 3 el impacto de las cargas no lineales donde se encuentran localizadas (buses 3, 7, 10 y 12) con THDv > 10%, mientras que en otras barras cercanas el THD > 8%.



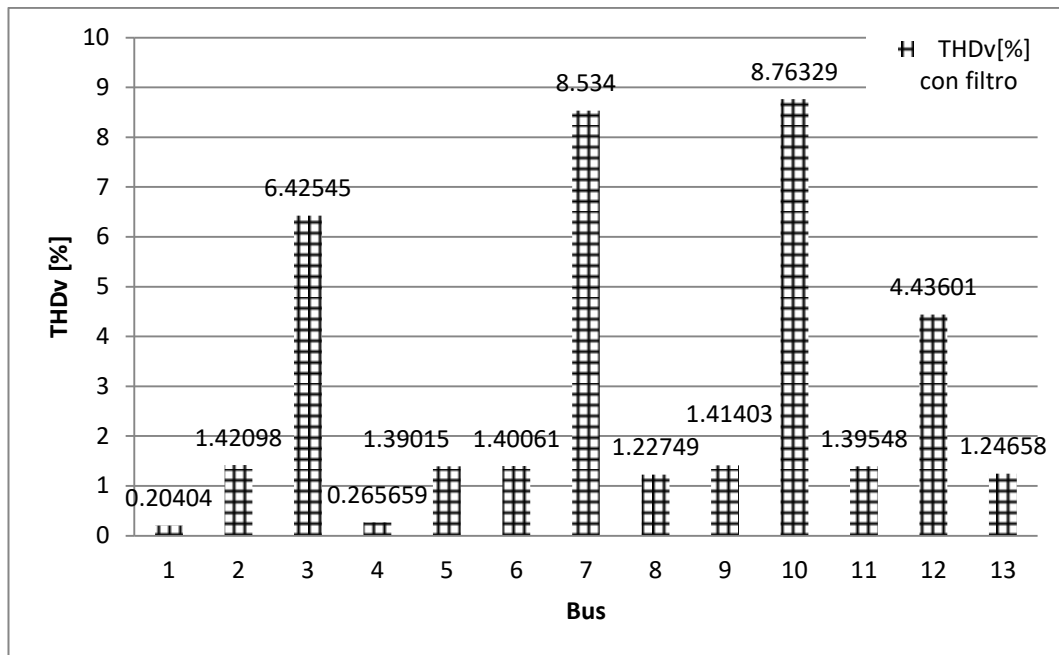
Gráfica 3 Distorsión armónica del sistema con solo el banco capacitivo a la red

Seguidamente se realiza el estudio de hp para la etapa 3. En la Tabla 16 se encuentran los valores arrojados por runpfFilter y el thd de las barras de la red. En la barra de interés (barra 5) disminuyó considerablemente el THD respecto a la etapa anterior.

Tabla 16 Tensiones armónicas y distorsión armónica calculados con runpfFilter, para el caso de estudio con el filtro LC serie conectado

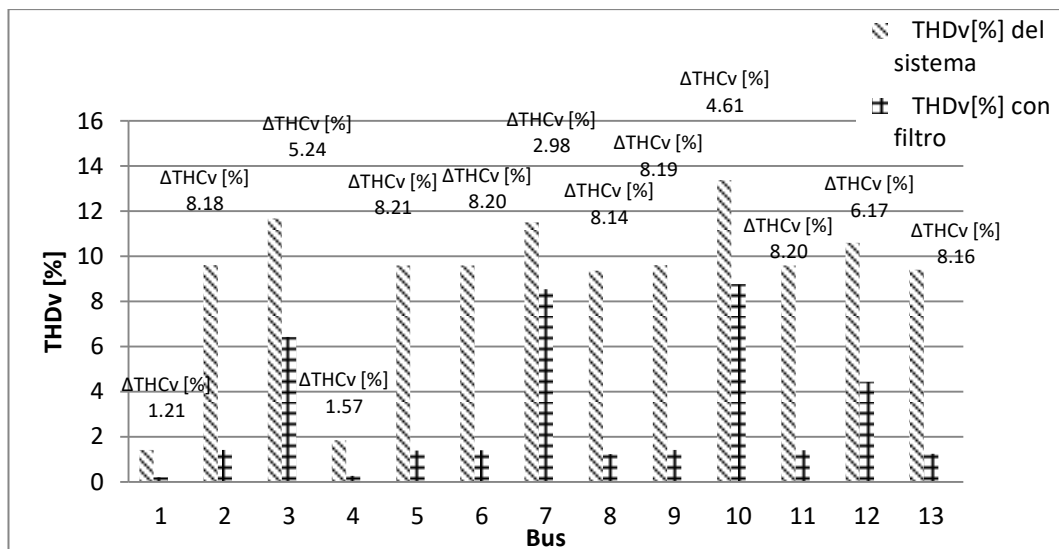
Bus	V1(L-N)	V3(L-N)	V5(L-N)	V7(L-N)	THDv[%] con filtro
1	39837.2	0	15.731	45.3844	0.20404
2	7806.43	0	22.4666	61.9558	1.42098
3	271.69	0	8.60141	9.33625	6.42545
4	39749.5	0	20.4419	58.9649	0.265659
5	7808.12	0	21.0079	60.6064	1.39015
6	7805.8	0	21.5787	61.0896	1.40061
7	266.34	0	11.7966	12.0931	8.534
8	2366.08	0	6.39084	17.6955	1.22749
9	7806.17	0	22.1009	61.6387	1.41403
10	268.356	0	12.041	12.4764	8.76329
11	7803.04	0	21.3212	60.8535	1.39548
12	267.362	0	5.44604	6.41623	4.43601
13	1371.56	0	3.67741	10.306	1.24658

En la Gráfica 4 se puede apreciar mejor la influencia del filtro ubicado en la barra 5., es decir, La distorsión armónica de tensión disminuyo por debajo 8%, excepto en algunas de las barras (7 y 10) donde se tiene las cargas no lineales.



Gráfica 4 Distorsión Armónica del sistema incluyendo el filtro LC serie a la red

Realizando una comparación los valores de thd obtenidos en las etapas 2 y 3, se observa en la Gráfica 5 que el filtro lc serie tiene una influencia positiva sobre la red, al disminuir los thd en las distintas barras del sistema.



Gráfica 5 Comparación de la distorsión armónica del sistema entre solo compensación con el banco capacitivo y el filtro LC serie

5.3. Estudio de resonancia en el sistema

Para el desarrollo del barrido en frecuencia se implementó un nuevo programa basado en el trabajo de NIHA [6] pero con inyección de corrientes unitarias. Esto permite determinar cuáles son las frecuencias resonantes del sistema

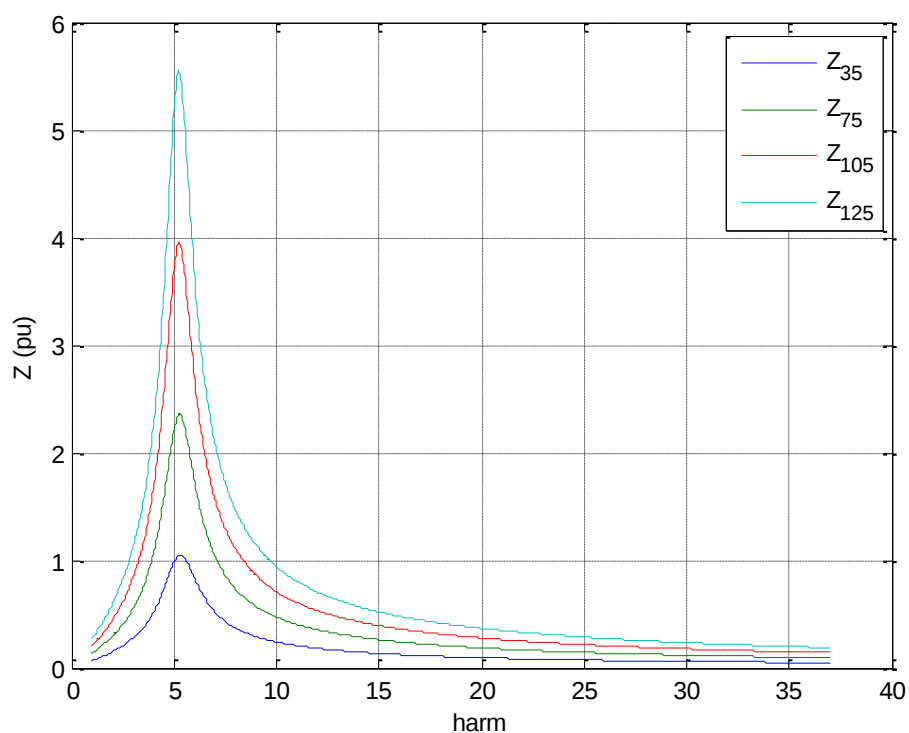
En la Gráfica 1 se observa el comportamiento del bus 5 de la red al tener conectado solo el banco capacitivo. Hay una resonancia paralela de frecuencia de 321.6 Hz el cual se encuentra alrededor del 5° armónico de tensión (ver Tabla 17)

Se toma como referencia el artículo «Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems» [12], el cual recomienda si la frecuencia de resonancia está cerca del 5° armónico se sintoniza en el orden 4.7 de la fundamental.

Tabla 17 Valor de la resonancia de la impedancia propia de la barra 5

Tipo de Resonancia	Orden armónico	Frecuencia [Hz]	Magnitud [p.u.]
Paralelo	5.36	321.6	1.336

Del barrido en frecuencia mostrado en la Gráfica 6 se puede concluir que la carga no lineal con mayor influencia armónica sobre la barra 5, es la carga conectada en la barra 12. la impedancia de transferencia es de una magnitud elevada en comparación con las otras cargas. En la Tabla 18 se tabulan los resultados obtenidos del barrido en frecuencia de las barras con cargas no lineales respecto a la barra 5.

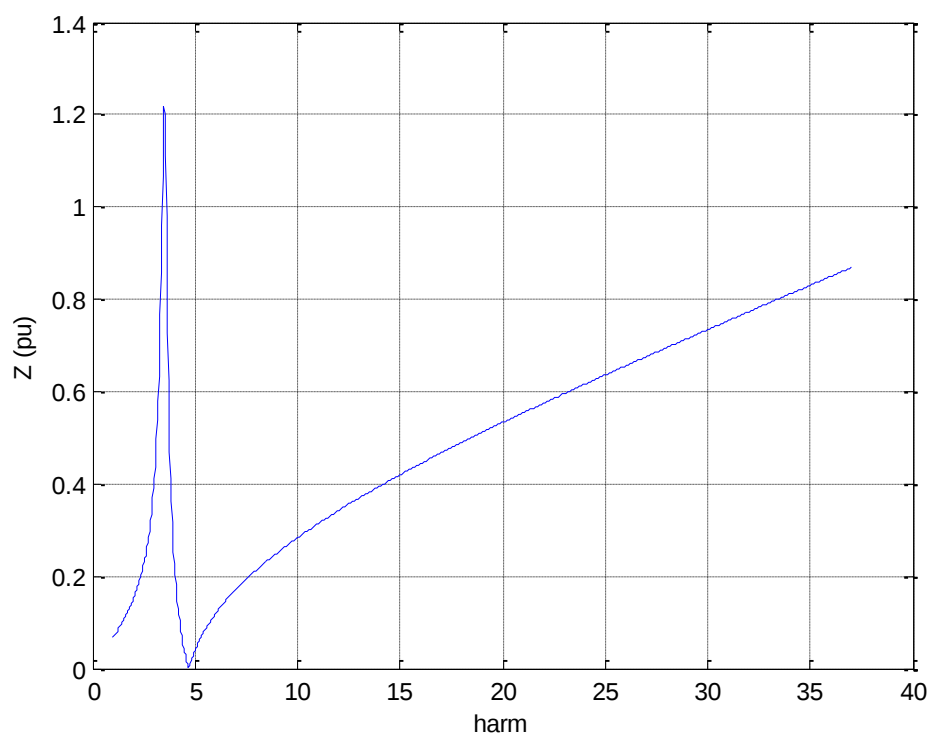


Gráfica 6 Barrido en frecuencia de las impedancias de transferencia entre el bus de interés y barra con cargas no líneas

Tabla 18 Impedancias de transferencia entre el bus 5 y buses con cargas no líneas

Tipo de Resonancia	Orden armónico	Frecuencia [Hz]	Magnitud [p.u.]
Paralelo Barras 12-5	5.324	319.44	5.918
Paralelo Barras 10-5	5.36	321.60	4.215
Paralelo Barras 7-5	5.326	319.56	2.513
Paralelo Barras 3-5	5.396	323.76	1.117

El barrido en frecuencia de la barra 5 con el filtro lc serie conectado, se muestra en la Gráfica 7. Se observa las dos resonancias: una paralela y otra debido a la frecuencia de corte del filtro.



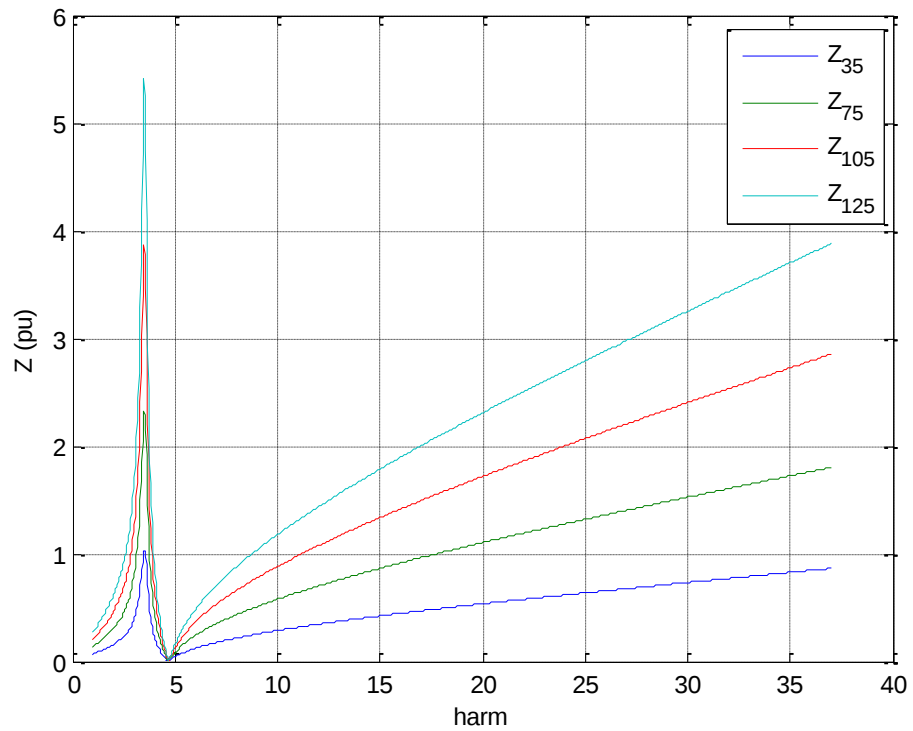
Gráfica 7 Barrido en frecuencia de la impedancia propia de la barra 5 con el filtro LC serie conectado

En la Tabla 19 se muestran los valores de las frecuencia de resonancias serie y paralela, las cuales en función del armónico se encuentran en el valor de sintonía 4.7° y 3.5°, respectivamente.

Tabla 19 Resonancias de la impedancia propia de la barra 5 con el filtro

Tipo de Resonancia	Orden armónico	Frecuencia [Hz]	Magnitud [p.u.]
serie	4.712	282.72	0.001791
paralela	3.486	209.16	1,22

En la Gráfica 8 se muestran las impedancias de transferencias desde la barra del filtro respecto a las barras donde se encuentran conectadas las cargas no lineales. En la Tabla 20 se muestran los valores de las resonancias en donde todos los casos son muy similares.



Gráfica 8 Barrido en frecuencia de las impedancias de transferencia entre los buses con cargas no líneas y la barra 5 con el filtro LC serie

Tabla 20 Resonancias de las impedancias de transferencia entre las barras con cargas no líneas y la barra 5 con el filtro LC serie

Tipo de Resonancia	Orden armónico	Frecuencias [Hz]	Magnitud [p.u.]
Paralelo Barras 12-5	3.489	209.3400	5.409
Serie Barras12-5	4.712	282.7200	0.00725
Paralelo Barras 10-5	3.486	209.1600	3.874
Serie Barras10-5	4.712	282.7200	0.00546
Paralelo Barras 7-5	3.486	209.1600	2.319
Serie Barras7-5	4.712	282.7200	0.00362
Paralelo Barras 3-5	3.523	211.3800	1.031
Serie Barras3-5	4.712	282.7200	0.00183

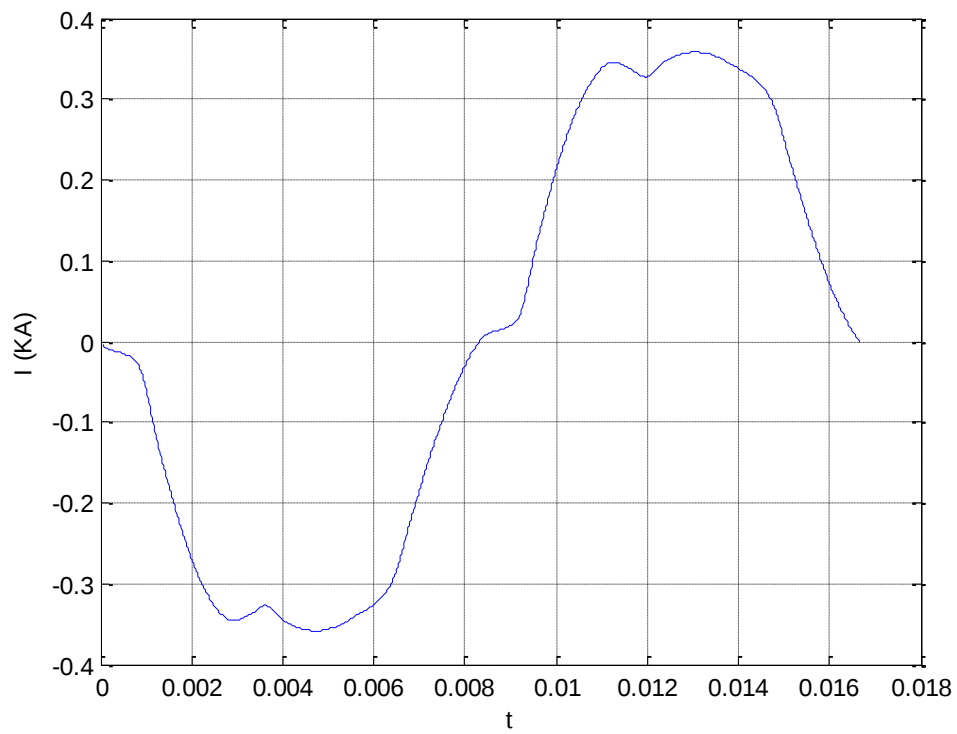
5.4. Verificación de los límites del condensador del filtro según la norma IEEE std 1036

Establecido el valor del condensador del filtro LC serie se realiza la verificación de los límites conforme al estándar IEEE std. 1036 [2]. En la Tabla 21 se tabulan las cantidades (i.e. corriente y tensión) que está sometido el condensador y sus máximos permitidos por el estándar se comprueba que están dentro de los límites máximos estipulados.

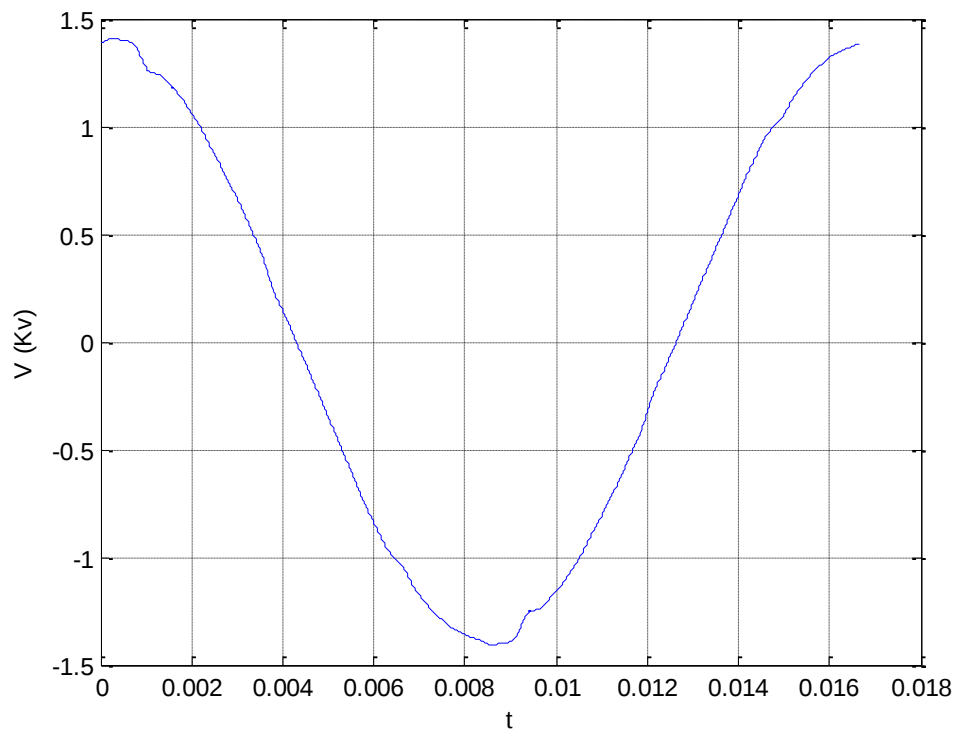
Tabla 21 Verificación de la norma IEEE std. 1036 en MATPOWER

Valores	Máximo	Filtro	Limite[%]	Calculado[%]
Corriente [kA]	0.3389	0.2463	135	105.29
Tensión _{RMS} [kV]	8.764	7.8089	110	98.01
Tensión pico [kV]	13.5211	11.2187	120	99.57
kVAR [MVar]	8.1000	6.1916	135	103.19

En las Gráfica 9 y 11 se visualizan las formas de onda de la corriente que circula por el filtro y de la tensión. La onda de tensión solo tiene unas ligeras muescas en algunos puntos, mientras que la onda de corriente se encuentra distorsionada ya que circulan las frecuencias armónicas filtradas.



Gráfica 9 Forma de onda de la corriente que circula por el filtro LC serie



Gráfica 10 Forma de onda de la tensión en la barra 5 con el filtro LC serie

Finalmente, el caso de estudio que se muestra en la Figura 20 y los valores de la Tabla 22 son los resultados de la ejecución del programa runpfFilter. Estos valores pasaron por un proceso de verificación de los estándares utilizados para el diseño de filtros

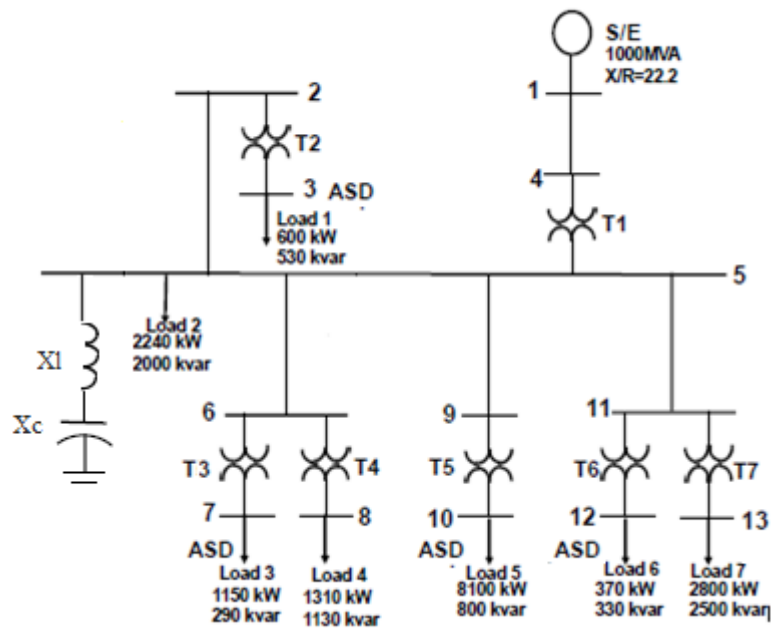


Figura 20 Caso de prueba con filtro de sintonía simple

Tabla 22 Resumen de los valores obtenidos de la ejecución de runpfFilter

Localización Del filtro	FP filtro	THDv [%]	QC [Mvar]	XLf [Ω]	XCf [Ω]
Barra 5	0.9512	1.3909	5.7729	1.4090	31.1248

CAPÍTULO VI

VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DESARROLLADO EN MATPOWER

El programa empleado para validar el modelo del algoritmo de diseño de filtro LC serie implementado en MATPOWER fue el software de simulación temporal PSpice.

El Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) conocido como PSpice es un software de diseño y simulación de circuitos en el dominio del tiempo, frecuencia o en forma de parámetros. Fue desarrollado por Donald O. Pederson y Laurence W. Nagel en la Universidad de California, Berkeley en 1972 [14].

El procedimiento para ejecutar la simulación en PSpice consiste en tres pasos básicos: primero la creación del fichero fuente que contiene las características de los elementos que forman parte del circuito, segundo es introducir los datos del fichero en el software y ejecutar el programa. Este último paso crea un fichero de salida y por último ejecuta un programa para la presentación de los resultados a través de gráficos o tablas. [15]

Se utilizan tres casos para validar las diferentes etapas del proceso de diseño del filtro LC serie que ejecuta el programa desarrollado runpfFilter. Para ello se construye un circuito en PSpice equivalente a la red modificada de 13 barras del IEEE [13]. Estos casos se describen de la siguiente manera:

- Caso 1: corresponde al equivalente del caso de estudio de 13 barras sin compensación del factor de potencia (ver Figura 21).
- Caso 2: corresponde al equivalente del caso de estudio de 13 barras con compensación capacitiva (ver Figura 22).
- Caso 3: corresponde al equivalente del caso de estudio de 13 barras con el filtro LC serie (ver Figura 23).

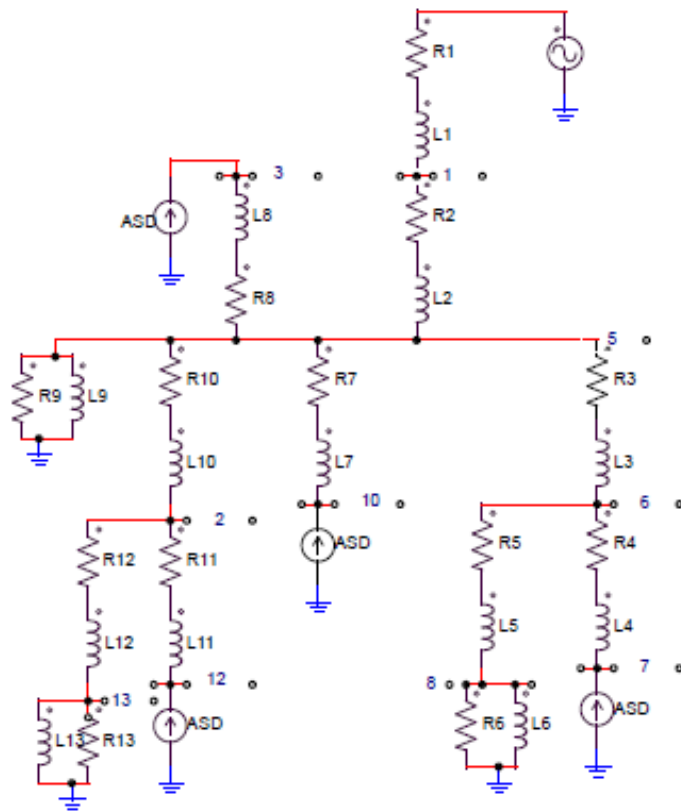


Figura 21 Circuito modelado en PSpice para el caso 1

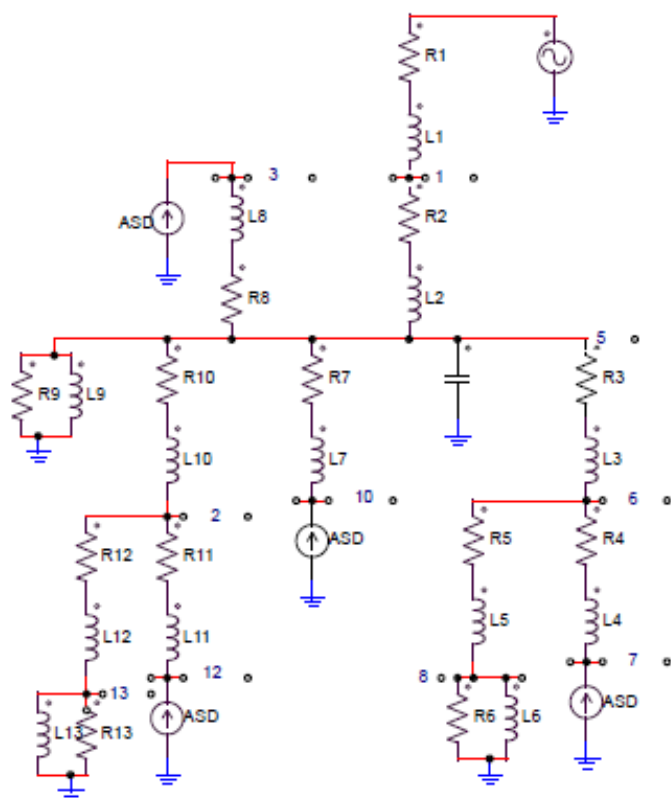


Figura 22 Circuito modelado en PSpice para el caso 2

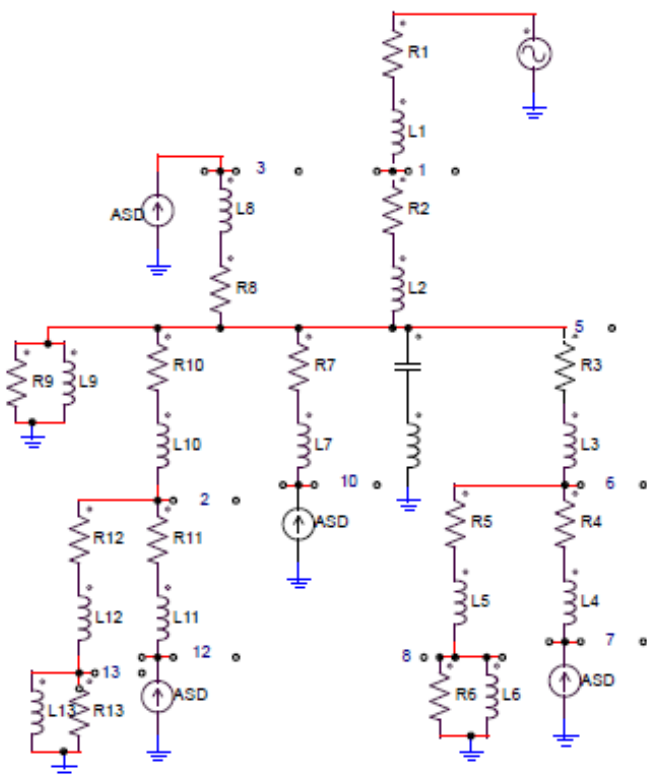


Figura 23 Circuito modelado en PSpice para el caso 3

El modelo en PSpice desarrollado para los casos planteados, se realizó con el orden de los nodos, las cargas (en paralelo) y las cargas no lineales de forma similar al orden fijado en el estudio de penetración armónica no iterativa (NIHA) [6].

En el apéndice XII se presenta el fichero fuente de los tres casos implementados, los cuales describen todos los elementos del circuito y se especifican de acuerdo a la numeración de los nodos. Es importante resaltar que los indicadores con la extensión TRAN, especifican los tiempos de: muestreo, tiempo final de simulación, tiempo inicial de simulación y el paso de integración, así como el indicador PARAM, describe la frecuencia, periodo y frecuencia angular en ese orden respectivamente. Utilizando la sentencia PROBE se generó un fichero temporal de resultados que permiten determinar el valor de f_p y el THD_v .

En los apéndices XIII, XIV y XV se encuentran los ficheros de salida de los casos planteados para el sistema de 13 barras del IEEE [13] modificado, obtenidos de la simulación en PSpice con los cuales se realizaron los gráficos de comparación. Los archivos de texto son exportados a la función `runpfFilter` en una rutina presentada en el apéndice XVI en donde se utiliza la función “`importdata`” de Matlab

6.1 Validación de resultados obtenidos con el programa PSpice

Los resultados obtenidos de la validación en el programa PSpice del modelo implementado en la función `runpfFilter` se realizaron en dos secciones:

6.1.1 Comparación de resultados del factor de potencia y distorsión armónica

En la Tabla 23 se visualizan los resultados del factor de potencia de los tres casos de comparación descritos anteriormente. En todos los casos los errores son menores a 2.3%

Tabla 23 Comparación del factor de potencia de runpfFilter y PSpice

Caso	fp runpfFilter	fp PSpice	Error[%]
1	0.7217	0.728	0.8654
2	0.9564	0.935	2.2888
3	0.9512	0.974	2.3408

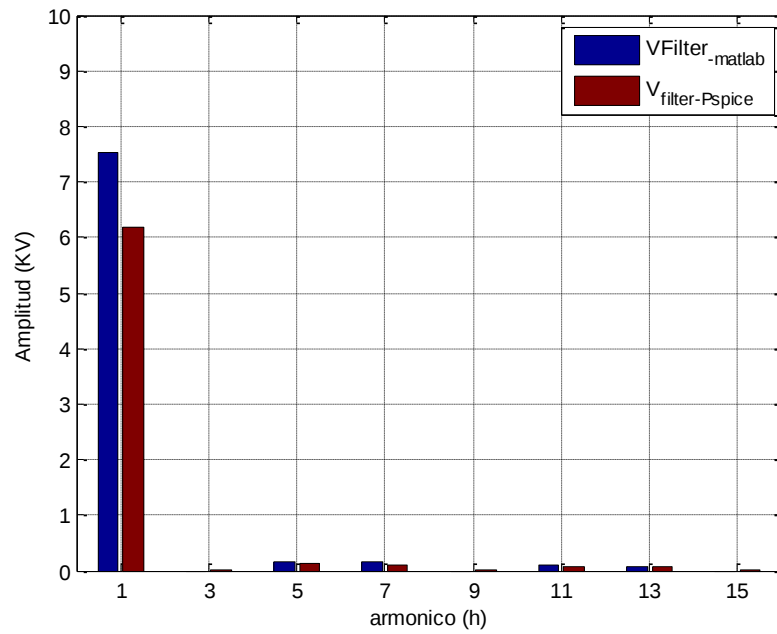
En la Tabla 24 se tabulan los valores de THD_v de ambas simulaciones y además se colocaron los resultados de capacitancia e inductancia obtenidos a partir del programa runpfFilter, los cuales se utilizaron en la simulaciones en PSpice. El error obtenido aumenta en la medida que disminuye el THD. Esto quizás se deba a la sensibilidad de la ecuación del error relativo cuando se utilizan cantidades bajas.

Tabla 24 Comparación del THD_v en MATPOWER y PSpice

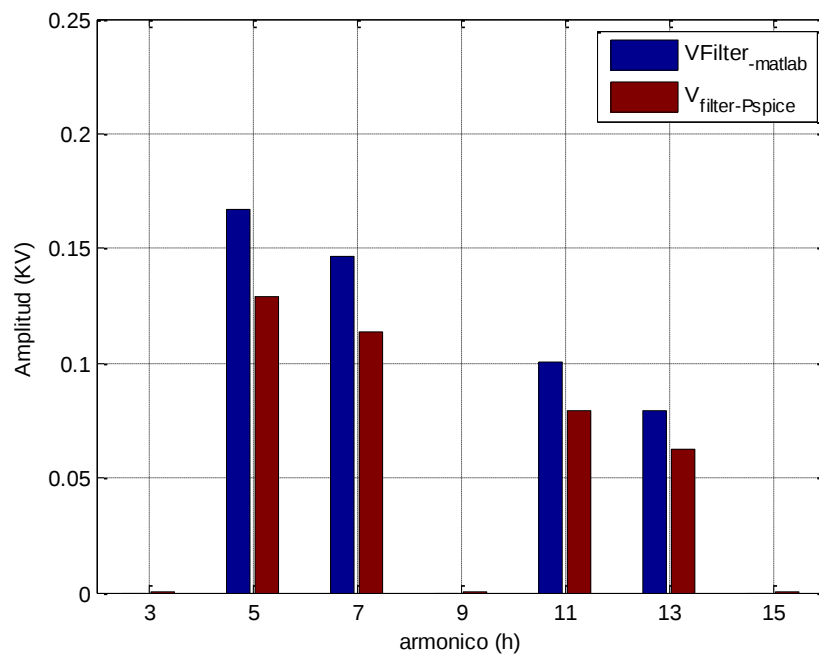
Caso	THD_v runpfFilter [%]	THD_v PSpice [%]	C_f [μ F]	L_f [mH]	Error THD [%]
1	3.568	3.21	0	0	11.2
2	9.59	9.91	92.38	0	3.23
3	1.3901	1.15	85,22	3.737	20.9

6.1.2 Comparación de tensiones armónicas del caso de estudio

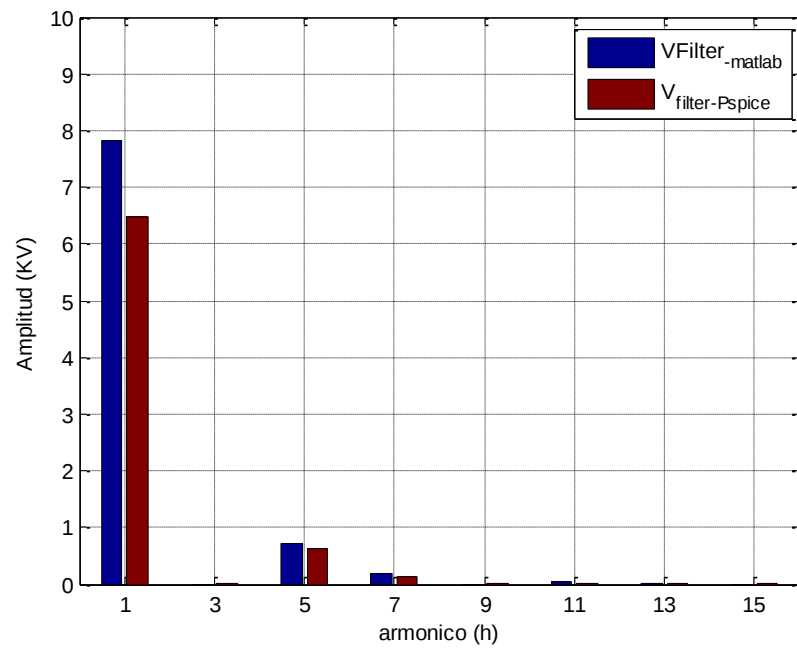
En la Gráfica 11 al 16 se realiza la comparación de las magnitudes armónicas de la tensión armónicas en la barra 5 donde se encuentra ubicado el filtro LC serie. La tensión fundamental es muy grande respecto a las tensiones armónicas por eso se presentan dos graficas por cada caso. Las barras rojas corresponden a los resultados arrojados por la función runpfFilter, mientras las barras azules son las que se obtienen con la simulación en PSpice.



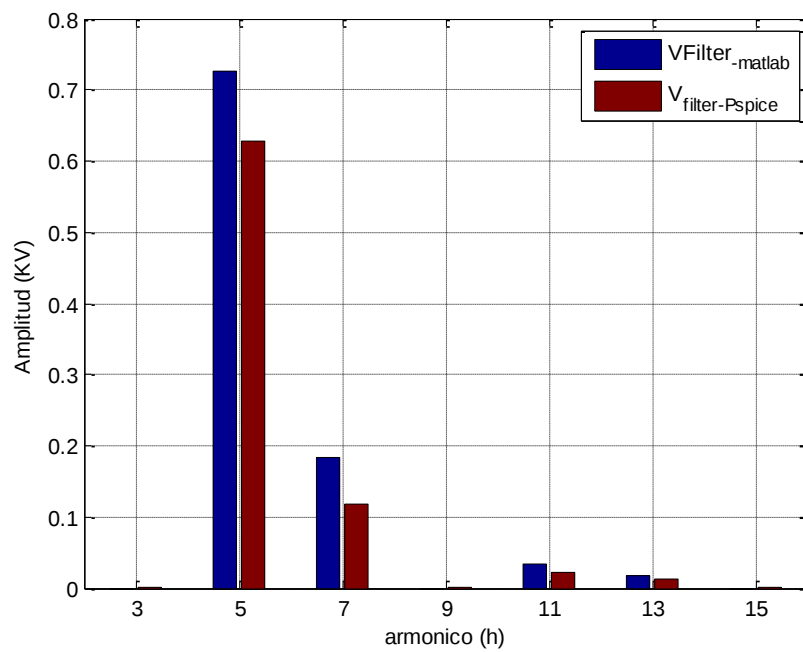
Gráfica 11 Tensiones armónicas en el caso 1 incluyendo la fundamental



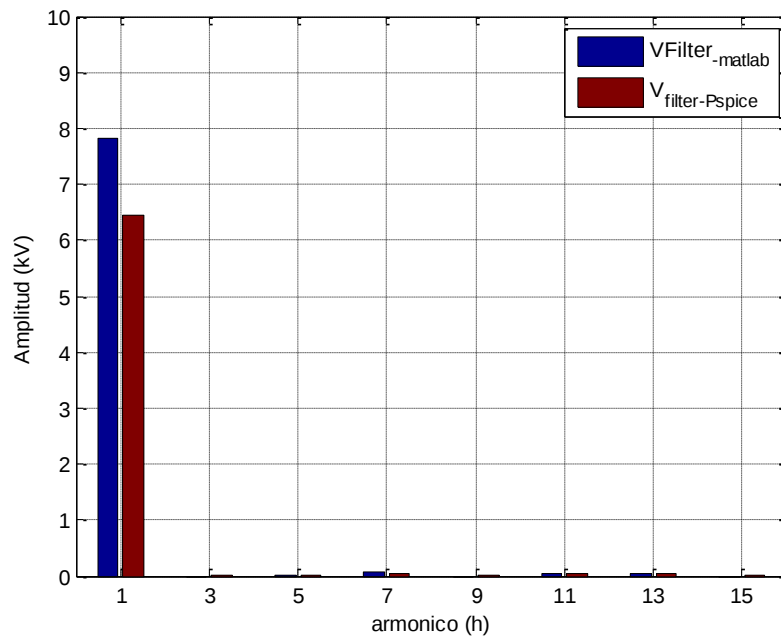
Gráfica 12 Tensiones armónicas en el caso 1 sin la componente fundamental



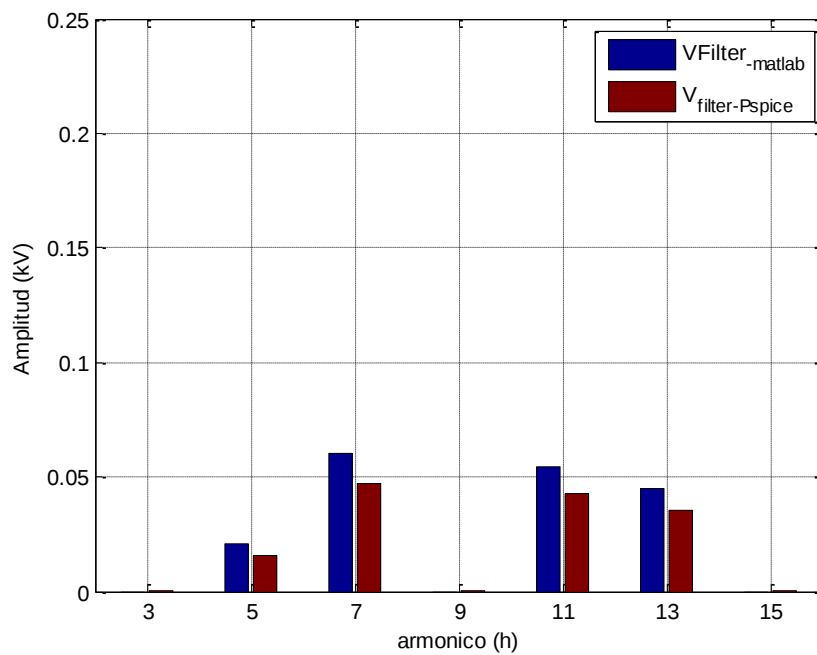
Gráfica 13 Tensiones armónicas en el caso 2 incluyendo la fundamental.



Gráfica 14 Tensiones armónicas en el caso 2 sin la componente fundamental.



Gráfica 15 Tensiones armónicas en el caso 3 incluyendo la fundamental.



Gráfica 16 Tensiones armónicas en el caso 3 sin la componente fundamental.

En la Tabla 25, 26 y 27 se encuentran las magnitudes armónicas de las tensiones mostradas de las gráficas de barras anteriores, en la Tabla 25 se aprecian

los resultados del caso 1 donde los armónicos regulares (5°, 7°, 11°, etc) tienen errores en el orden de 20% a 30%.

Tabla 25 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso

1

Tensión armónica	1	3	5	7	9	11	13	15
MATPOWER [kV]	7.54	0.00045	0.167	0.146	0.0007	0.101	0.0796	1.70E-04
PSpice [kV]	6.19	0.000466	0.129	0.113	0.000068	0.079	0.0628	0.000175
Error [%]	21.81	3.45	29.46	29.20	2.94	27.85	26.75	2.86

La Tabla 26 correspondiente al caso 2, en donde los errores relativos de los armónicos regulares están en el rango de 20% a 50%

Tabla 26 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso

2

Tensión armónica	1	3	5	7	9	11	13	15
MATPOWER [kV]	7.82	0.00013	0.726	0.183	0.00005	0.0338	0.0185	0.000025
PSpice [kV]	6.46	1.27E-04	0.629	0.117	5.44E-05	0.0233	0.0128	2.65E-05
Error [%]	21.05	2.36	15.42	56.41	4.41	45.06	44.53	1.89

La Tabla 27 correspondiente al caso 3, en donde los errores relativos de los armónicos regulares están en el rango de 20% a 30%

Tabla 27 Valores magnitud de tensiones obtenidos del diagrama de barras del caso

3

Tensión armónica	1	3	5	7	9	11	13	15
MATPOWER [kV]	7.81	0.0005	0.0606	0.146	0.00014	0.0545	0.0453	0.00015
PSpice [kV]	6.45	0.000467	0.0468	0.113	0.000131	0.0425	0.0355	0.00014 2
Error [%]	21.0 9	7.07	29.49	29.20	6.87	28.24	27.61	5.63

CONCLUSIONES

Los altos niveles de distorsión armónica en los sistemas de potencia generados por las cargas no lineales, han influenciado en el desarrollo de estudios de penetración armónica y las soluciones para suprimir dichas perturbaciones, con el fin de obtener una buena calidad en el suministro de energía.

El presente trabajo de grado se enfocó en desarrollar una implementación en el programa código abierto MATPOWER para realizar el estudio de las resonancias y diseño de un filtro pasivo tipo LC serie, siendo las contribuciones:

- Se desarrolló una implementación en el programa MATPOWER para el diseño de filtros LC serie bajo los criterios de los estándares IEEE std.1036 [2], IEEE std. 1531 [3]
- Se implementó en el programa MATPOWER el análisis de barrido en frecuencia para estudios de resonancias armónicas.
- Se adaptó el programa de estudios de penetración armónica bajo la metodología no iterativa (NIHA) para incluir como un nuevo elemento en la matriz $[Y_{bus}]$ los filtros pasivos del tipo LC serie.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigación siguiendo esta línea de investigación se presentan las siguientes recomendaciones:

- Incorporar un módulo para la selección óptima de la configuración del banco de condensadores del filtro LC con unidades discretas y de valor comercial, bajo el criterio de mínimos costos.
- Ampliar el módulo de diseño del filtro para incluir el filtro LC serie (i.e. filtro mínimo [12]) que cumpla solo el objetivo de atenuar distorsión armónica y no incluya como criterio de diseño la compensación reactiva.
- Incluir en el modelo la parte resistiva de la inductancia del filtro LC serie y el análisis del factor de calidad del filtro
- Incluir otros modelos de filtros pasivos tales como los filtros de primer, segundo y tercer orden pasa alto.
- Realizar un estudio técnico económico del uso de filtros pasivos en sistemas industriales para compensar reactivos y minimizar distorsión armónica.
- Utilizar redes de prueba del IEEE de mayor dimensión en la cantidad de barras, con el fin de verificar si las adaptaciones de análisis armónico no iterativo presentan alguna desventaja para el diseño del filtro de sintonía simple.
- Incorporar el estudio del factor de potencia tomando en cuenta el contenido armónico de la red de prueba para realizar un modelado del filtro con mayor exactitud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. alvarez, «Anteproyecto "Implementación de un algoritmo para la especificación de filtros de sintonía simple en redes eléctricas de media tensión basados en el programa matpower",» 2016.
- [2] « Std. 1036-2010 Guide for Application of Schunt Power Capacitors,» *IEEE* .
- [3] «Std. 1531 Guide for Application and Specification of Harmonic Filters,» *IEEE*.
- [4] « Std. 519 2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» *IEEE*.
- [5] N. Montañez, « « Desarrollo de un software para el cálculo de compensación de reactivos y atenuación de la distorsión armónica en un sistema eléctrico industrial»,» N. Montañez, « Desarrollo de un software para el cálculo de Universidad Central de Venezuela, caracas, 2009.
- [6] F. Suarez, ««Evaluación de programa de código abierto para estudios de flujo de potencia con armónicos»,» Universidad Central de Venezuela, caracas, 2015.
- [7] E. Harper, El ABC de la calidad de la Energía Eléctrica, Limusa.
- [8] C. Carvajal, «ANÁLISIS DE RESONANCIA ARMÓNICA EN SISTEMAS,» Pereira, 2007.
- [9] R. Z. y. C. Murillo-Sánchez, «MATPOWER 5.1 User's Manual,» 2015.
- [10] C. E. M.-S. Ray. Zimmerman, «MATPOWER 6.0 User's Manual,» 2016.
- [11] L. I. E. J. Arrillaga, Armónicos en Sistemas de Potencia, Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1994.
- [12] D. G. y. J. Mccall, ««Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems»,» Ind. Appl. IEEE Trans. On, vol. IA-32, n.o 3, 1987.
- [13] ««Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation »,» Power Dely.

IEEE Trans.On. Vol. 14, n. o. 2, April 1999.

- [14] F. d. I. UNMdP, « Facultad de Ingeniería UNMdP,» [En línea]. Available:
<http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/Pspice%20Medidas.pdf>.
[Último acceso: 31 10 2017].
- [15] A. D. y. J. G. J. Agular, Simulacion electronica con PSpice, RAMA.
- [16] E. Parra, Analisis armónico en sistemas de distribución, 2004.
- [17] F. O. J. Ruiz, «Metodologia para identificar fuentes armonicas en sistemas electricos,» Universidad tecnologia de pereira, pereira, 2007.
- [18] W. S. J. Grainger, « “Análisis de Sistemas de Potencia”,» McGraw Hill,.

