



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis

Contaminación Armónica en Redes Eléctricas, Caso de Estudio

Que presenta:

Ricardo García Ortega

Para obtener el Título de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Asesor:

Ingeniero Electricista

Ignacio Franco Torres

Morelia, Michoacán

Noviembre 2018

Agradecimientos

Dios por permitirme llegar hasta este momento de la vida y poder concluir este trabajo.

Mis padres, por su gran esfuerzo y apoyo incondicional que me regalaron la oportunidad de estudiar y concluir la carrera.

Al Doctor Saúl Calderón Fernández, por su tutoría y conocimientos transmitidos en la elaboración del trabajo y en el área de estudio. A mi asesor Ing. Ignacio Franco Torres por su constante apoyo y confianza en este trabajo.

A mi familia en general que de alguna forma contribuyeron en mi preparación académica.

A mis amigos y compañeros de la Facultad, por su apoyo.

Dedicatoria

Ofrezco este trabajo en honor a Dios mi maestro y padre, quien, por su amor infinito, me dio el bello regalo de la vida y permitirme llegar hasta estos instantes memorables. Existen diversas formas de alabar a Dios, quiero manifestarle de esta manera hacia él, diciendo estas palabras; Este trabajo el inicio de mi sueño stereo lo dedico a Dios con todo mi corazón, haré de este trabajo, una alabanza digna de él, no regalaré a Dios algo que no me cueste.

Mis padres que han estado en todo momento en mi vida, dándome siempre su apoyo incondicional, forjándome para poder llegar ser como ellos, solo decirles que sin ellos no podría llegar hasta esta instancia de la vida. Mis hermanas decirles que las quiero mucho.

A mis familiares quienes me han apoyado desde que era niño siendo mis segundos padres, en quienes puedo confiar y recibir apoyo en tiempos difíciles.

Darle las gracias a mi asesor Doctor Saúl Calderón Fernández, quien creyó en mi y en este proyecto, por su tiempo y su atención. Afirmándole que este trabajo es fruto de esfuerzo y sobre todo una pasión que compartimos ambos por el tema del mismo trabajo, repitiendo sus palabras; *Diseñar filtros es todo un arte.*

Agradecer a mi novia quien me acompañó durante mi carrera, su cariño y afecto en esta etapa de mi vida.

.

Índice General

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE GENERAL	IV
RESUMEN	VI
PALABRAS CLAVE.....	VI
ABSTRACT	VII
KEYWORDS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS.....	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XI
CAPÍTULO 1.- CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	12
1.1.- INTRODUCCIÓN.....	12
1.2.- CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	13
1.3.- IMPORTANCIA DE LA CALIDAD EN LA ENERGÍA.....	13
1.4.- BENEFICIOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	14
1.5.- PROBLEMAS QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	14
1.6.- SOLUCIONES AL PROBLEMA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	14
1.6.1.- Soluciones al lado de la Empresa Suministradora	15
1.6.2.- Soluciones al lado del usuario o consumidor	15
1.7.- OBJETIVO.....	15
1.8.- JUSTIFICACIÓN.....	16
CAPÍTULO 2.- DISTURBIOS RELACIONADOS A LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	17
2.1.-TRANSITORIOS	18
2.1.1.-Transitorio Impulsivo	18
2.1.2.-Transitorio Oscilatorio	18
2.2.- VARIACIONES DE VOLTAJE DE LARGA DURACIÓN	19
2.2.1.-Sobrevoltaje	19
2.2.2.-Bajo voltaje	19
2.2.3.- Interrupciones Sostenidas	20
2.3.- VARIACIÓN DE VOLTAJE DE CORTA DURACIÓN.....	20
2.3.1- Interrupción.....	20
2.3.2.-Hundimientos (dips)	20
2.3.3.-Hinchamiento (swell).....	21
2.4.- DESBALANCE VOLTAJE.....	22
2.5.- DISTORSIÓN DE ONDA.....	22
2.5.1.- CD offset	22
2.5.2.- Armónicos	23
2.5.3.- Interarmónicos	23
2.5.4.- Muecas (notching)	23
2.5.5.- Ruido	24
2.6.- FLUCTUACIONES DE VOLTAJE	24
2.7.- VARIACIONES DE FRECUENCIA DE LA RED.....	24

CAPÍTULO 3.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ARMÓNICOS	25
3.1.- DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS	25
3.2.- VOLTAJE CONTRA CORRIENTE DE DISTORSIÓN.....	26
3.3.- DIFERENCIAS ENTRE ARMÓNICOS Y TRANSITORIOS.....	27
3.4.- ANÁLISIS DE POTENCIAS BAJO CONDICIONES NO SINUSOIDALES.	28
3.4.1.- <i>Potencias reactiva, activa y aparente en presencia de armónicos</i>	28
3.4.2.- <i>Factor de Potencia</i>	32
3.4.3.- <i>Secuencia de fases de Armónicos</i>	33
3.4.4.- <i>Armónicos Triplen</i>	33
3.5.- ÍNDICES DE ARMÓNICOS.....	35
3.5.1.- <i>Distorsion Armónica Total (THD)</i>	35
3.5.2.- <i>Demanda de distorsión total (TDD)</i>	36
3.6.- UBICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS	37
3.7.- CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA DEL SISTEMA	38
3.7.1.- <i>Impedancia del sistema</i>	38
3.7.2.- <i>Impedancia del condensador</i>	40
3.7.3.- <i>Resonancia Paralela</i>	40
3.7.4.- <i>Resonancia en serie</i>	42
3.7.5.- <i>Efectos de Carga resistiva</i>	43
3.8.- EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	44
3.8.1.- <i>Impacto en los condensadores</i>	44
3.8.2.- <i>Impacto en los transformadores</i>	45
3.9 MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS	46
3.9.1 <i>Filtros Sintonizados</i>	46
CAPÍTULO 4.- CASO DE ESTUDIO	50
4.1.- EXPERIMENTO DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMA FÍSICO Y SIMULINK.....	51
4.1.1.- <i>Experimento Resistivo físico y en Simulink</i>	51
4.1.2 <i>Pruebas en circuito puramente Inductivo</i>	55
4.1.3 <i>Pruebas en circuito puramente Capacitivo</i>	59
4.2.- DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS SINTONIZADOS	63
4.2.1.- <i>Prueba de Filtros en un circuito resonante en Simulink</i>	63
CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1.- CONCLUSIONES.....	67
5.2.- RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69
APÉNDICES	70
APÉNDICE A.....	70
<i>Análisis de Magnitud y Fase Armónico</i>	70
APÉNDICE B.....	76
<i>Niveles de Armónicas permitidos por las Normas</i>	76
APÉNDICE C.....	78
<i>Mediciones en transformadores del sistema eléctrico FIRA (Fideicomisos Instituidos En Relación Con La Agricultura)</i>	78

Resumen

Actualmente existe un creciente nivel de distorsión armónica en el sistema eléctrico, debido a que a finales de siglo pasado al sistema eléctrico de potencia se le han agregado cargas de naturaleza no lineal. Esto da como resultado perturbaciones en el transporte, distribución y consumo de energía eléctrica.

Las empresas son cada vez más competitivas, dicha razón las obliga a utilizar equipos que funcionan con componentes de electrónica de potencia, con el propósito de que los equipos simplifiquen el trabajo, aumente la producción y la calidad.

Existen diferentes tipos de perturbaciones que afectan la red eléctrica, cada una causa diversos daños al sistema, al igual que son originados de formas distintas. Si bien las perturbaciones están presentes, de igual manera cada sistema eléctrico responde de manera distinta a cada perturbación, un análisis detallado tanto del sistema eléctrico como de los diversos tipos de perturbaciones es importante para los ingenieros electricistas y electrónicos. Es de mencionarse que el consumo eléctrico se mide en potencia, y es un problema que todos los ingenieros electricistas deben tomar muy en cuenta, ya que todos los usuarios pretenden consumir energía eléctrica al más bajo costo monetario y con la mejor calidad.

Uno de los métodos más comunes para mejorar el factor de potencia es la conexión de capacitores en paralelo, es aquí donde se comete el error de colocar bancos capacitivos a la red eléctrica con el propósito de mantener un factor de potencia aceptable al medidor de energía, y de esta manera evitar, el ser penalizados o en un caso más deseable, ser bonificados por el suministrador eléctrico (CFE).

Entonces sí se sabe que en el sistema eléctrico existen perturbaciones, de las cuales entre ellas están los armónicos y si agregamos que los consumidores de energía eléctrica utilizan capacitores, habrá más daños que beneficios.

Es por ello que en este documento se demuestra que el sistema eléctrico está contaminado por armónicos, los cuales pueden magnificarse utilizando capacitores.

También se incluye una alternativa para mitigar dichas señales armónicas por medio de filtros sintonizados, dando soluciones a estas perturbaciones, así como una herramienta matemática para la ayuda de valores para el mismo diseño de los filtros.

Palabras Clave

Calidad de la energía, Armónicos, señal sinusoidal, frecuencia, filtros sintonizados, voltaje, corriente, impedancia, reactancia, resonancia paralela, resonancia serie, capacitor, inductor, resistencia

Abstract

Actually, there is an increasing level of harmonic distortion in the electric system, due to the fact that at the end of the last century power loads have been added to the electric power system. This results in disturbances in the transport, distribution and consumption of electrical energy.

Companies are increasingly competitive, this reason forces them to use equipment that works with power electronics components, with the goal that equipment simplify work, increase production and quality.

There are different types of disturbances that affect the electrical network, each one causes different damage to the system, just as they are originated in different ways.

Although the disturbances are equally preconditioned each electrical system responds differently to each disturbance, a detailed analysis of both electrical system and various types of disturbances is important for electrical and electronic engineers.

It is worth mentioning that the electrical consumption is measured in power, and it is a problem that all electrical engineers must consider, since all consumers intend to consume electricity, at the lowest monetary cost. It's here where the error is made of placing capacitive banks to the electric grid with the purpose of maintaining an acceptable power factor to the energy meter, and in this way avoiding by the electric supplier in this case CFE.

So, if we know that in the electrical system we have disturbances of which harmonics are among them and if we add that the consumers of electrical energy use capacitors, we can have more damages than benefits.

That is why this document shows that the electrical system is contaminated by harmonics which can be amplified using capacitors. An alternative is also included to mitigate these harmonics signal by means of tuned filters, giving solutions to these disturbances, as well as a mathematical tool for the help of values for the same design of the filters.

Keywords

Quality of Energy, harmonics, sinusoidal signal, frequency, filter, voltage, current, impedance, reactance, parallel resonance, series resonance, capacitor, inductor, resistance.

.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 SEÑAL SINUSOIDAL PURA	17
FIGURA 2.2 TRANSITORIO IMPULSIVO	18
FIGURA 2.3 TRANSITORIO OSCILATORIO.....	19
FIGURA 2.4 HUNDIMIENTOS (DIPS).....	21
FIGURA 2.5 HINCHAMIENTOS (SWELL).....	21
FIGURA 2.6 ARMÓNICOS FUNDAMENTAL TERCER Y QUINTO ORDEN	23
FIGURA 2.7 MUESCAS (NOTCHING).....	24
FIGURA 3.1 SEÑAL SINUSOIDAL DE CORRIENTE DISTORSIONADA POR CARGA NO-LINEAL	25
FIGURA 3.2 SEÑAL SINUSOIDAL REPRESENTADA POR SERIES DE FOURIER.....	26
FIGURA 3.5 RELACIÓN POTENCIAS APARENTE	32
FIGURA 3.6 SISTEMA TRIFÁSICO BALANCEADO CON TERCER ARMÓNICO EN CADA FASE	34
FIGURA 3.7 FLUJO DE LA CORRIENTE DE TERCERA ARMÓNICA EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	34
FIGURA 3.8 FLUJO GENERAL DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA RADIAL	37
FIGURA 3.9 FLUJO GENERAL DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA RADIAL	38
FIGURA 3.10 IMPEDANCIA CONTRA FRECUENCIA PARA UN SISTEMA INDUCTIVO	40
FIGURA 3.11 SISTEMA CON POSIBLES PROBLEMAS DE RESONANCIA PARALELA.....	41
FIGURA 3.12 EN FRECUENCIA ARMÓNICAS, EL BANCO DE CONDENSADORES EN DERIVACIÓN APARECE EN PARALELO CON LA INDUCTANCIA DEL SISTEMA. (A) CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN SIMPLIFICADO. (B) CIRCUITO RESONANTE PARALELO VISTO DESDE LA FUENTE ARMÓNICA.....	42
FIGURA 3.13 SISTEMA CON POSIBLES PROBLEMAS DE RESONANCIA SERIE.....	43
FIGURA 3.14 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE UN CIRCUITO CON RESONANCIA SERIE Y RESONANCIA PARALELA.....	43
FIGURA 3.15 EFECTOS DE CARGA RESISTIVA EN RESONANCIA PARALELA	44
FIGURA 3.16 CORRIENTE TÍPICA DE UN CONDENSADOR DE UN SISTEMA EN LA 11TH-ARMÓNICA RESONANTE	45
FIGURA 3.17 FILTRO SINTONIZADO.....	46
FIGURA 3.18 EFECTO DE LA CONEXIÓN DE BANCO DE CAPACITORES Y FILTROS EN LA AMPLIFICACIÓN DE LOS ARMÓNICOS.....	47
FIGURA 3.19 EFECTO DE CONECTAR FILTRO DE RECHAZO EN LA DISTORSIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE.....	48
FIGURA 3.20 EFECTO DE CONECTAR FILTRO DE ARMÓNICOS EN LA DISTORSIÓN DE VOLTAJE EN CAPACITOR.....	48
FIGURA 3.21 EFECTOS DE BOBINA O REACTOR EN LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES	49
FIGURA 3.22 EFECTO DE BOBINA O REACTOR EN LOS SOBRE VOLTAJES OCASIONADOS POR LA CONEXIÓN DEL BANCO DE CAPACITORES.....	49
FIGURA 4.1 (A) PUNTO DE ACOPLAMIENTO COMÚN (PCC). (B) VOLTAJES ARMÓNICOS CREADOS EN EL PCC A CAUSA DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS GENERADAS POR LA CARGA A1	50
FIGURA 4.2 CIRCUITO MODELO PARA EL ARMADO DE LOS EXPERIMENTOS EN SIMULINK Y EN EL LABORATORIO	51
FIGURA 4.3 CIRCUITO PURAMENTE RESISTIVO EN SIMULINK.....	52
FIGURA 4.4 CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PURAMENTE RESISTIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA	52
FIGURA 4.5 FORMAS SINUSOIDALES DEL CIRCUITO RESISTIVO EN SIMULINK. (A) CORRIENTE SEÑAL ROJA. (B) VOLTAJE SEÑAL AZUL	53
FIGURA 4.6 FORMAS SINUSOIDALES CORRIENTE Y VOLTAJE DEL CIRCUITO RESISTIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA.....	53
FIGURA 4.7 CONTENIDO THD EN EL VOLTAJE CIRCUITO RESISTIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDO POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	54
FIGURA 4.8 CONTENIDO THD EN LA CORRIENTE CIRCUITO RESISTIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDO POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	54
FIGURA 4.9 CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PURAMENTE INDUCTIVO EN SIMULINK.....	56
FIGURA 4.10 CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PURAMENTE INDUCTIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA.....	56
FIGURA 4.11 FORMAS SINUSOIDALES DEL CIRCUITO INDUCTIVO EN SIMULINK. (A) CORRIENTE SEÑAL ROJA. (B) VOLTAJE SEÑAL AZUL	57
FIGURA 4.12 FORMA SINUSOIDAL CORRIENTE Y VOLTAJE DEL CIRCUITO INDUCTIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA.....	57

FIGURA 4.13 CONTENIDO THD EN EL VOLTAJE CIRCUITO INDUCTIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDO POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	58
FIGURA 4.14 CONTENIDO THD EN LA CORRIENTE DE CIRCUITO INDUCTIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDA POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	58
FIGURA 4.15 CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PURAMENTE CAPACITIVO EN SIMULINK	59
FIGURA 4.16 CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PURAMENTE CAPACITIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA	60
FIGURA 4.17 FORMAS SINUSOIDALES DEL CIRCUITO CAPACITIVO EN SIMULINK. (A) CORRIENTE SEÑAL ROJA. (B) VOLTAJE SEÑAL AZUL	60
FIGURA 4.18 FORMA SINUSOIDALES DE CORRIENTE Y VOLTAJE DEL CIRCUITO CAPACITIVO EN EL LABORATORIO DE ELÉCTRICA.....	61
FIGURA 4.19 CONTENIDO THD EN EL VOLTAJE CIRCUITO CAPACITIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDO POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	61
FIGURA 4.20 CONTENIDO THD EN LA CORRIENTE DE CIRCUITO CAPACITIVO TOMADO DEL LABORATORIO DE ELÉCTRICA, MEDIDA POR UN ANALIZADOR DE ARMÓNICAS.....	62
FIGURA 4.21 CIRCUITO CAPACITIVO CON PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN SIMULINK	64
FIGURA 4.22 SEÑALES SINUSOIDALES DE VOLTAJE EN EL CIRCUITO CAPACITIVO.....	64
FIGURA 4.24 CONEXIÓN DE FILTROS AL CIRCUITO CAPACITIVO.....	65
FIGURA 4.25 SEÑAL SINUSOIDAL DE VOLTAJE EN EL CIRCUITO CAPACITIVO CON FILTROS CONECTADOS.....	65
FIGURA A.1 EJEMPLO DE CIRCUITO RESISTIVO PARA CALCULAR ARMÓNICO DE ORDEN 3 CON EL PROGRAMA DE MATLAB	73
FIGURA A.2 EJEMPLO DE ONDA SINUSOIDAL DISTORSIONADA DEL VOLTAJE EN EL CIRCUITO RESISTIVO	73
FIGURA A.3 RESULTADO DE FASE Y ÁNGULO DEL ARMÓNICO DE ORDEN 3 POR EL PROGRAMA DE MATLAB	75
FIGURA C.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE LA SUBESTACIÓN DE F.I.R.A DE CAPACIDAD DE 300KVA.....	79
FIGURA C.2 CONEXIÓN DE UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS AL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 300 KVA DEL LADO SECUNDARIO DE LA SUBESTACIÓN DE F.I.R.A	79
FIGURA C.3 GRÁFICAS DE CORRIENTE DE FASE C DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 300 KVA DE LA SUBESTACIÓN DE F.I.R.A. (A) DISTORSIÓN DE CORRIENTE THD. (B) ESPECTRO ARMÓNICO INDIVIDUAL DE CADA ARMÓNICO PRESENTE EN LA SEÑAL.....	80
FIGURA C.4 CONEXIÓN DE UN ANALIZADOR DE ARMÓNICOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 75 KVA DEL LADO SECUNDARIO LOCALIZADO EN EL EDIFICIO A PISO 3 DE F.I.R.A	81
FIGURA C.5 GRÁFICAS DE CORRIENTE DE FASE C DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 75 KVA TIPO SECO DEL EDIFICIO A PISO 3 DE F.I.R.A. (A) DISTORSIÓN DE CORRIENTE THD. (B) ESPECTRO ARMÓNICO INDIVIDUAL DE CADA ARMÓNICO PRESENTE EN LA SEÑAL.....	82

Lista de Tablas

TABLA 1.1 OPERACIONES PREVENTIVAS AL SUMINISTRADO ELÉCTRICO.....	15
TABLA 4.1 PORCENTAJE ARMÓNICO DE VOLTAJE DE CIRCUITO RESISTIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	55
TABLA 4.2 PORCENTAJE ARMÓNICO DE CORRIENTE DE CIRCUITO RESISTIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR EL ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	55
TABLA 4.3 PORCENTAJE ARMÓNICO DE VOLTAJE DEL CIRCUITO INDUCTIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	59
TABLA 4.4 PORCENTAJE ARMÓNICO DE CORRIENTE DE CIRCUITO INDUCTIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	59
TABLA 4.5 PORCENTAJE ARMÓNICO DE VOLTAJE DEL CIRCUITO CAPACITIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	62
TABLA 4.6 PORCENTAJE ARMÓNICO DE CORRIENTE DEL CIRCUITO CAPACITIVO DE LABORATORIO DE ELÉCTRICA TOMADO POR ANALIZADOR DE ARMÓNICOS.....	62
TABLA 4.7 ARMÓNICOS CON SU AMPLITUD DEL VOLTAJE Y PORCENTAJE THD EN CIRCUITO INDUCTIVO.....	64
TABLA 5.1 VALORES REQUERIDOS POR EL PROGRAMA PARA CALCULAR LA AMPLITUD Y FASE DE ÁNGULO DEL ARMÓNICO DE ORDEN 3 DEL EJEMPLO RESISTIVO.....	74
TABLA B.1 NORMA POR LA IEEE-519 LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE EN PORCENTAJE	76
TABLA B.2 NORMA POR CFE L0000-45 LIMITE DE DISTORSIÓN ARMÓNICO DE VOLTAJE EN PORCENTAJE	77
TABLA B.3 NORMA POR LA IEEE-519 LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE EN PORCENTAJE	77
TABLA B.4 NORMA POR CFE L0000-45 LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE EN PORCENTAJE	78

Glosario de Términos

Ampere	Corriente (Unidad de intensidad de corriente eléctrica)
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Hz	Hertz
RMS	Raíz cuadrada media (root mean square)
THD	total distorsión armónica (Total Harmonic Distortion).
Volts.	Voltaje (Potencial eléctrico)
Osciloscopio	Instrumento de visualización electrónico para representar señales eléctricas
Henrio	Unidad inductiva eléctrica
Faradio	Unidad capacitiva eléctrica
PCC	Punto de acoplamiento común
PU	Unidad por Unidad

Capítulo 1.- Calidad de la Energía Eléctrica

1.1.- Introducción

Una empresa suministradora de energía eléctrica, tiene como objetivo principal el mantener y suministrar una señal de voltaje estable en los terminales (si es de suministro) de utilización, teóricamente dicha señal debe ser una onda perfectamente sinusoidal.

Es común aceptar que las empresas suministradoras de energía eléctrica generen una onda de voltaje aparentemente sinusoidal, pero cabe mencionar que sus sistemas de distribución contienen distorsión. [1]

Sin embargo, haciendo uso de un equipo adecuado en las cargas se puede observar la presencia de distorsión de voltaje, que, aunque pudiera ser pequeña si se utiliza una carga capacitiva la respuesta a esta señal una corriente altamente distorsionada que de manera visible se puede apreciar.

Este trabajo trata de un caso de estudio detectado en casi cualquier toma corriente como punto de suministro eléctrico con una señal de voltaje aparentemente con casi nula distorsión, que responde al comportamiento muy especial de respuesta de un capacitor al contenido armónico.

Normalmente en los sistemas eléctricos se utilizan capacitores como una medida remedial para evitar o corregir el bajo factor de potencia, además de aumentar el voltaje en los puntos de acoplamiento común de cargas de cualquier tipo (PCC). Sin embargo, se tiene que cuidar la distorsión armónica en la fuente ya que los capacitores pueden provocar problemas en sistemas eléctricos mayores debido a la distorsión armónica

Los armónicos se han vuelto un elemento común en casi todas las instalaciones eléctricas, su presencia se ha convertido hoy en día en algo cotidiano en los hogares, comercios e industria, para determinar si hay una buena calidad en el servicio de energía, se debe conocer la fuente que los produce, con el propósito de determinar la medida remedial más apropiada, a cada caso particular. [2]

En el capítulo 1 Se definirá el término de calidad de la energía y todo lo que abarca, hablando de su importancia, beneficios y los problemas que aborda.

En el capítulo 2 Se mencionan las principales perturbaciones que modifican la calidad de la energía.

En el capítulo 3 Se explica la naturaleza, generación y comportamiento de los armónicos en el sistema eléctrico y clasificación.

En el capítulo 4 Se demuestra el caso de estudio con mediciones incluyendo un correctivo para mitigar la distorsión en el sistema eléctrico.

En el capítulo 5 Se demuestran las conclusiones del caso de estudio.

1.2.- Calidad de la Energía

Existen múltiples definiciones de calidad de la energía, en este trabajo se define como: ***El correcto manejo suministrado de energía eléctrica, hacia el usuario, sin presencia de interrupciones, sobretensiones, variaciones al voltaje rms, así como mal formaciones en su señal sinusoidal; dando como resultado una estabilidad constante en el voltaje, frecuencia y un continuo servicio eficiente del suministrador eléctrico.***

Un nivel óptimo de energía eléctrica es uno de los principales servicios en las sociedades modernas para el soporte de la vida cotidiana.

La finalidad del estudio de la calidad de la energía es buscar alternativas más prácticas y eficaces para corregir las variaciones y disturbios de voltaje que se suministra al consumidor, así como plantear la disolución de fallas que se presentan del lado del sistema de las compañías suministradoras de energía eléctrica, con el propósito de obtener una alta calidad en el sistema eléctrico.

1.3.- Importancia de la Calidad en la Energía

La energía eléctrica representa el principal insumo que mueve al mundo industrial; sin ella las empresas se detendrían y las economías enteras entrarían en crisis. Por eso es vital saber administrarla con responsabilidad.

Aproximadamente el 55% de la energía eléctrica producida es consumida por los sectores comerciales e industriales, como consecuencia el uso consciente y buen manejo de la energía eléctrica, le permite a la empresa ser cada vez más competitiva en una economía que tiende a la globalización, así el ahorro de energía es una alternativa viable para reducir costos de operación y mejorar los niveles de competitividad dentro del mundo industrial.

Actualmente, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido importancia y la razón es la preocupación en la búsqueda de mayor producción con el menor costo posible en las empresas.

La sociedad tiene un gran impacto en cuanto a sus dispositivos motorizados e informatizados, cuando existen anomalías en el sistema eléctrico, el comportamiento de estos sistemas se ven afectados, los beneficios económicos y el bienestar proporcionado por la tecnología se eliminan y traen consigo numerosos problemas, tanto para la empresa suministradora como para sus usuarios.

Esta es la etapa delicada en la cual la calidad de la energía provoca desconcierto tanto para el usuario y el suministrador eléctrico. El estudio de la calidad eléctrica es un paso importante para identificar y dar soluciones a problemas del sistema eléctrico, en años recientes esta atención a la calidad de la energía ha tenido un gran impacto debido al incremento del número de cargas sensibles.

Se debe mencionar que en la actualidad muchas empresas apuestan a energías verdes para minimizar sus gastos y tener otro ingreso más económico de energía eléctrica usando energía no convencional como la energía eólica y la solar, estos dispositivos generalmente utilizan generadores con inversores y proceso de conversión de CD a CA que lleva a la generación de armónicos.

1.4.- Beneficios de la calidad de la Energía

Cuando se tiene una infraestructura eléctrica que garantice una adecuada calidad de energía se obtienen beneficios complementarios, ya que se cuenta con instalaciones seguras que reducen riesgos eléctricos para las personas y equipos incrementando la optimización y confiabilidad de las empresas.

Se sabe que el gasto energético, es un factor importante a la empresa o industria, pero en muchas ocasiones desconoce que paga sus recursos de manera no razonable, ya que solo gasta el monto total de la factura de energía eléctrica sin analizar si su pago es proporcional en comparación a sus cargas que estén conectadas en su sistema eléctrico y también comparar sus operaciones de meses anteriores.

1.5.- Problemas que afectan la Calidad de la Energía

Cualquier alteración en el voltaje que procede de una fuente de energía ya sea corriente alterna o corriente continua, se considera materia concerniente a la calidad de la energía eléctrica, los disturbios e interrupciones siempre han existido en los sistemas eléctricos, sin embargo, en la actualidad dichas condiciones han agravado los problemas, tales como; equipos de control, automatización y electrónica de potencia. Estos equipos son de naturaleza no lineal, los cuales deterioran las señales de tensión en la red.

Los problemas en la calidad de la energía eléctrica pueden ser eventos de velocidad tales como impulsos de voltaje (transitorios), fallas en la onda eléctrica, caídas e incrementos de voltaje y pérdida total de energía eléctrica.

La mayoría de los problemas en la calidad de la energía se encuentran en el interior de las edificaciones y no en el suministrador eléctrico, los problemas más comunes son; mal sistema de tierra en la instalación eléctrica, violación de normas y generación de disturbios en la energía eléctrica interna. También se debe mencionar que el factor de potencia es un problema constante en ambos lados ya que las empresas eléctricas y los clientes industriales siguen utilizando capacitores para la corrección de factor de potencia, controlar el voltaje y minimizar el flujo de reactivos. Los capacitores influyen en muchos tipos de problemas de calidad de la energía ya que son un conducto directo para las corrientes de alta frecuencia y pueden ya sea, mejorar o agravar la situación, al incrementar los niveles de armónicos.

1.6.- Soluciones al Problema de la Calidad de la Energía

Para mejorar la calidad de la energía es necesario visualizar los beneficios mediante un análisis, especificando el equipo a utilizar y definir el lugar donde se va monitorear, dando prioridad en cargas donde se originan los disturbios eléctricos.

También permite hacer un análisis de los datos recopilados, identificación de eventos que ocurran en intervalos de una operación no adecuada del equipo o cargas del sistema, así como aquellas cargas que sobrepasen los parámetros de soporte.

1.6.1.- Soluciones al lado de la Empresa Suministradora

La empresa suministradora debe proponerse; cumplir las siguientes evaluaciones y operaciones preventivas en el suministro eléctrico, las cuales se muestran en la tabla 1.1

Evaluaciones Preventivas	Operaciones Preventivas
Número de interrupciones al año	Monitoreo de líneas
Causas de interrupciones	Análisis de Datos en interrupciones
Duración de interrupciones	Inspección y monitoreo en equipos
Número de usuarios afectados	
Tiempo en reestablecer la interrupción	

Tabla 1.1 Operaciones preventivas al suministrado eléctrico

1.6.2.- Soluciones al lado del usuario o consumidor

La calidad de la energía puede ser vista bajo diferentes perspectivas. Por el lado del consumidor viendo la afectación de las variaciones de la tensión eléctrica en sus cargas y por otro lado el suministrador viendo las características de las corrientes consumidas por sus clientes y las posibles afectaciones a la red derivado de la calidad del consumo. [3]

La empresa suministradora debe de revisar que las instalaciones eléctricas propias del usuario, se encuentren en condiciones apropiadas, que no tengan presencia de sobretensiones en su sistema eléctrico y tengan una adecuada conexión a tierra. El usuario tiene a su alcance una amplia variedad de dispositivos para proteger equipos susceptibles a variaciones de voltaje, por eso se recomienda seguir las siguientes recomendaciones:

- Puestas a tierra adecuadas.
- Supresores de picos.
- Filtros a la entrada de líneas.
- Transformadores de aislamiento.
- Reguladores de tensión.
- Implementación de UPS (fuentes de poder no interrumpibles)
- Corrección de factor de Potencia

1.7.- Objetivo

La finalidad de esta investigación es tratar las causas y los diversos problemas que generan las armónicas en cualquier sistema eléctrico así mismo plantear una mitigación en simulación por medio de filtros pasivos. Para ello se aborda un caso de estudio con una señal de suministro común de 120V, 60Hz. con distorsión casi nula que al conectar un capacitor como respuesta a esta excitación produce una corriente con alto contenido armónico.

1.8.- Justificación

Prácticamente en cualquier sistema eléctrico se encuentran problemas de calidad de la energía.

Particularmente en el caso de los armónicos aun cuando el contenido y el número sean pequeños, es suficiente para ser magnificado por la conexión de una carga como un capacitor que proporciona baja impedancia para valores de frecuencia arriba de la fundamental como lo muestra el caso de estudio mostrado en este trabajo.

Capítulo 2.- Disturbios relacionados a la Calidad de la Energía

La electricidad en el toma corriente de pared es un fenómeno electromagnético. El suministrador eléctrico comercial abastece como corriente alterna (CA), una fuente silenciosa y aparentemente ilimitada de energía que puede generarse en centrales eléctricas cuya tensión se eleva mediante transformadores. Observar lo que hace esta energía en breves periodos de tiempo puede ayudar a entender lo importante que el suministro de CA sea simple y continuo para un funcionamiento confiable. El suministro eléctrico de CA comercial aparece como una onda sinusoidal continua y simétrica, que varía de 50 o 60 ciclos por segundo (Hertz), en la figura 2.1 se muestra una onda sinusoidal de CA. Cuando esta forma de onda cambia de tamaño, forma, simetría o frecuencia, o tiene cortes intermitentes, impulsos, resonancia o desciende a valor cero, existe una perturbación energética.

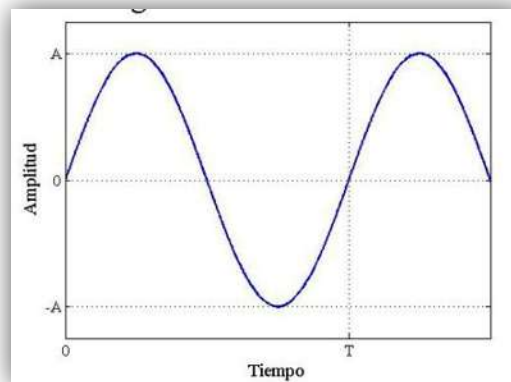


Figura 2.1 Señal Sinusoidal pura

En este trabajo se incluyen diagramas simples representativos de cambios en la forma ideal de la onda sinusoidal. [4]

El estándar 1159-2009 del IEEE [5] aborda este problema con el objetivo de proporcionar una terminología en siete categorías organizadas según la distorsión forma de onda:

- Transitorios
- Interrupciones
- Bajada de Tensión
- Aumento de Tensión
- Distorsión de la forma de Onda
- Fluctuaciones de Tensión
- Variaciones de Frecuencia

2.1.-Transitorios

Los transitorios son la manifestación de un cambio repentino, en las condiciones estables del circuito o red eléctrica. Los transitorios se pueden clasificar en dos categorías, impulsivos y oscilatorios.

2.1.1.-Transitorio Impulsivo

Los transitorios impulsivos son eventos repentinos de cresta alta, la cual eleva los niveles de tensión y/o corriente, de forma unidireccional en polaridad y sin presentar cambios en la frecuencia. En la Figura 2.2 se muestra un transitorio impulsivo.

Son eventos rápidos de 5 nanosegundos (ns) de tiempo en ascenso desde estado estable, hasta la cresta del impulso, con una duración de 50 nanosegundos (ns). [6]

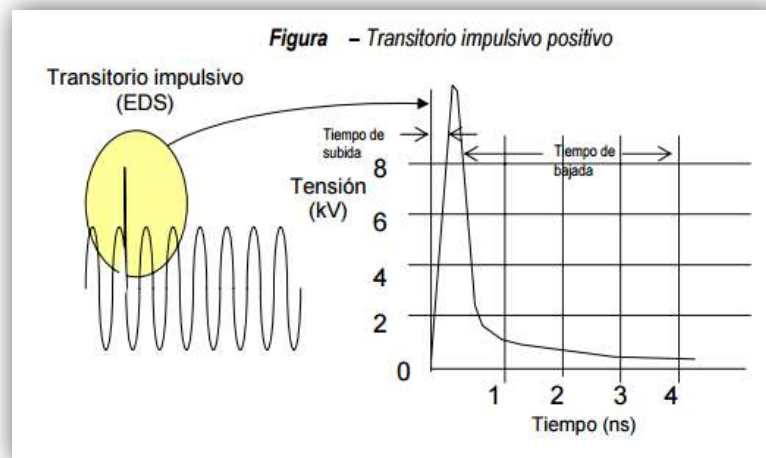


Figura 2.2 Transitorio Impulsivo

2.1.2.-Transitorio Oscilatorio

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino en las condiciones de estado estable, en el voltaje, la corriente, o ambos, tanto en ciclos negativos como positivos y de frecuencia distinta a la frecuencia de operación del sistema. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de un transitorio oscilatorio.

Este tipo de transitorio se clasifica por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia en; transitorios de alta, media y baja frecuencia. [6]

- I. Transitorio oscilatorio de alta frecuencia van desde 500Khz y una duración medida en microsegundos.
- II. Transitorios oscilatorios de media frecuencia se encuentran entre 5 y 500khz.

- III. Transitorios oscilatorios de baja frecuencia van desde 5khz con una duración de 0.3ms a 50ms.

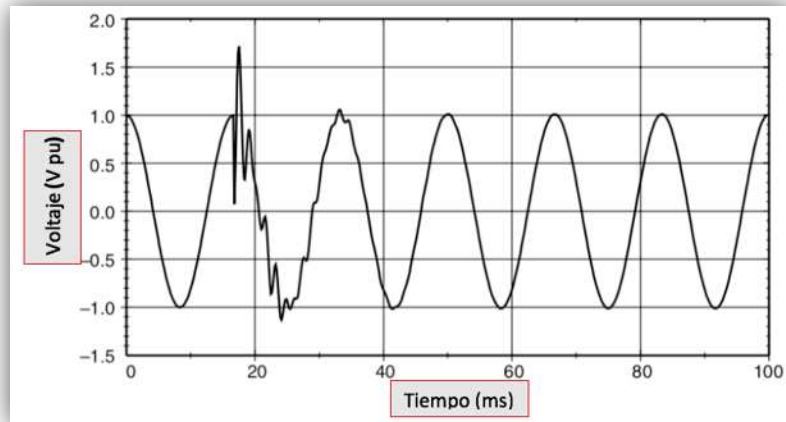


Figura 2.3 Transitorio Oscilatorio

2.2.- Variaciones de voltaje de larga duración

Las variaciones de larga duración pueden ser sobre voltajes o bajos voltajes, abarcan desviaciones rms en frecuencia de alimentación por más de 60 segundos. Son causados por variaciones de carga y por operaciones de conmutación en el sistema eléctrico.

2.2.1.-Sobrevoltaje

Es un incremento del voltaje rms mayor del 110% en la frecuencia de alimentación, con una duración superior a los 60 segundos. Los sobre voltajes son el resultado de un sistema eléctrico débil o los controles de regulación son inadecuados. [6]

2.2.2.-Bajo voltaje

Es un decremento en el voltaje rms menor al 90% en la frecuencia de alimentación, con una duración superior a los 60 segundos. El bajo voltaje es resultado de conectar grandes cargas al sistema eléctrico de manera simultánea o la desconexión de banco de capacitores. [6]

2.2.3- Interrupciones Sostenidas

Son eventos en los cuales el voltaje cae a cero y no retorna a sus condiciones de estado estable de manera automática, con una duración mayor a 60 segundos.

2.3.- Variación de Voltaje de corta duración

Cada tipo de variación se puede designar como instantáneo, momentáneo, o temporal dependiendo su tiempo de duración. Las variaciones son causadas por fallas de grandes cargas, las cuales demandan altas corrientes o por conexiones intermitentes en el sistema eléctrico.

Dependiendo de la localización de falla y las condiciones del sistema, la falla puede causar bajo voltaje temporales, sobre voltaje, o pérdida completa de voltaje o interrupciones.

2.3.1- Interrupción

Evento en el cual la fuente de voltaje o corriente de carga decrece a menos de 0.1pu en un lapso de tiempo inferior a 60 segundos, las interrupciones ocurren debido a fallas en el equipo y mal operación en el sistema de control. [6]

2.3.2.- Hundimientos (dips)

Un hundimiento (sags) es el decremento de entre 0.1 y 0.9 pu en el voltaje o corriente rms en la frecuencia de alimentación con una duración de tiempo de 0.5 ciclos a 60 segundos. [6]

La comunidad de calidad de la energía ha usado el termino sag por muchos años para describir un decremento de voltaje de corta duración.

Son producidas por energización de grandes cargas o arranque de motores. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de un hundimiento (dips). La duración de hundimientos típicos se define como rangos de entre 2ms (alrededor de un décimo de ciclos) a un par de minutos. Los “bajo voltajes” que duran menos de medio ciclo no pueden caracterizarse efectivamente por el cambio en el valor rms del valor de la frecuencia fundamental. [6] Por lo tanto, estos eventos son considerados como transitorios. Los bajo voltajes que duran más de un minuto se pueden controlar con reguladores de voltaje, estos se clasifican como variaciones de larga duración.

Las duraciones de los hundimientos se subdividen en tres categorías; instantáneas, momentáneas y temporales.

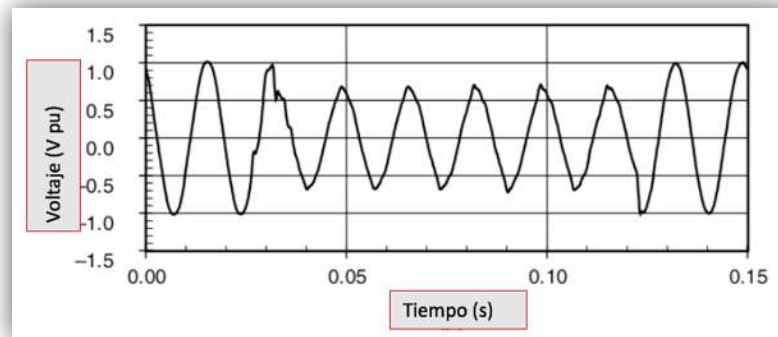


Figura 2.4 Hundimientos (dips)

2.3.3.-Hinchamiento (swell)

Un hinchamiento se define como el incremento entre 1.1 y 1.8 pu en el voltaje o corriente rms en la frecuencia de alimentación con duración de 0.5 ciclos a 60 segundos, los cuales pueden ser causados por la desconexión de grandes cargas o la energización de bancos capacitivos. [6] En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de un hinchamiento (swell).

Como en el caso de los hundimientos (sags). Los hinchamientos (swell) se asocian con condiciones de falla en el sistema, pero no son tan comunes como los hundimientos de voltaje. Los hinchamientos se caracterizan por su magnitud (valor rms) y duración.

La severidad de un hinchamiento de voltaje durante una condición de falla está en función de la localización de la falla, de la impedancia del sistema y del aterrizado.

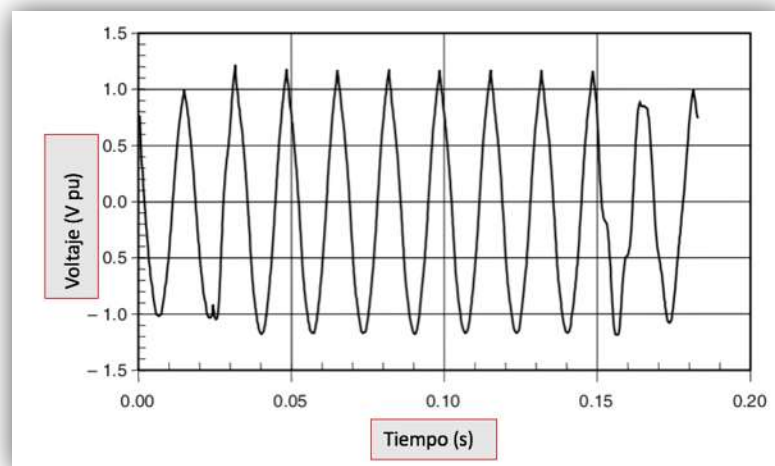


Figura 2.5 Hinchamientos (Swell)

2.4.- Desbalance Voltaje

El desequilibrio en un sistema monofásico viene dado por una diferente magnitud de la parte positiva y la negativa de una señal eléctrica. El desequilibrio se mide como el cociente entre la parte negativa y positiva de la onda y se expresa en tanto por ciento. [6] También se puede hablar de desequilibrio trifásico que suponen un desigual reparto de las cargas entre las tres ramas de una distribución trifásica y originan alteraciones en el sistema, afectando a los usuarios. El sistema sinusoidal trifásico se representa por tres vectores de igual módulo y desfasados 120 grados. Cuando los tres vectores tienen diferente magnitud, o cuando los tres ángulos son distintos, se dice que existe desequilibrio.

Los desequilibrios de corriente se producen cuando la intensidad que circula por las tres fases no es igual, lo cual provoca que la corriente que circula por el neutro no sea nula.

Los desequilibrios de tensión se originan por un incorrecto reparto de cargas en la instalación. En instalaciones con armónicos, a pesar de que el sistema trifásico esté equilibrado, puede circular corriente por el hilo de neutro. [7]

El desbalance de voltaje se define como la máxima desviación del promedio de los voltajes o corrientes trifásicos, divididos por el promedio de los voltajes o corrientes trifásicos, expresados en porcentos. La relación entre el componente de secuencia negativa o cero y la componente secuencia positiva se puede usar para especificar el desequilibrio porcentual.

Una manera rápida de evaluar el estado del desbalance de la tensión es tomar la diferencia entre la tensión más alta y más baja de las tres fases de alimentación, este número no debe exceder el 4% de la tensión más baja. Como se muestra en la ecuación 2.1

$$DT_T = \frac{3(T_{max} - T_{min})}{T_a + T_b + T_c} \quad (2.1)$$

2.5.- Distorsión de Onda

Se define como la desviación de una onda seno ideal de la frecuencia de alimentación, se caracteriza por el contenido espectral de la desviación.

Existen 5 tipos principales de distorsión de onda:

- CD offset
- Armónicos
- Interarmónicos
- Muecas
- Ruido

2.5.1.- CD offset

La presencia de voltaje o corriente de CD en un sistema CA se le denomina CD offset, a consecuencia de una falla de rectificadores en tecnologías de convertidores CA a CD.

La circulación de corriente directa en un transformador puede causar efectos dañinos al polarizar los núcleos y estar saturados en su operación normal.

2.5.2.- Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia. En la Figura 2.6 se muestra un tercer y quinto armónico en la onda fundamental.

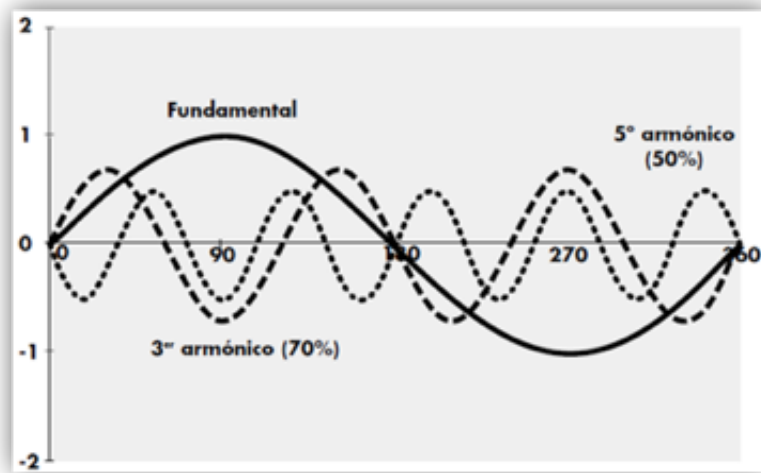


Figura 2.6 Armónicos fundamental tercer y quinto orden

2.5.3.- Interarmónicos

Se define como los voltajes o corrientes que contienen componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual la fuente del sistema fue diseñada para operar.

2.5.4.- Muestras (notching)

Son un disturbio periódico en el voltaje causado por la operación normal de dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente conmuta de una fase a otra, durante este periodo, hay un corto circuito momentáneo entre dos fases, abatiendo el voltaje a cero tanto como lo permita la impedancia del sistema. En la figura 2.7 se muestra un ejemplo de una muesca (notching).

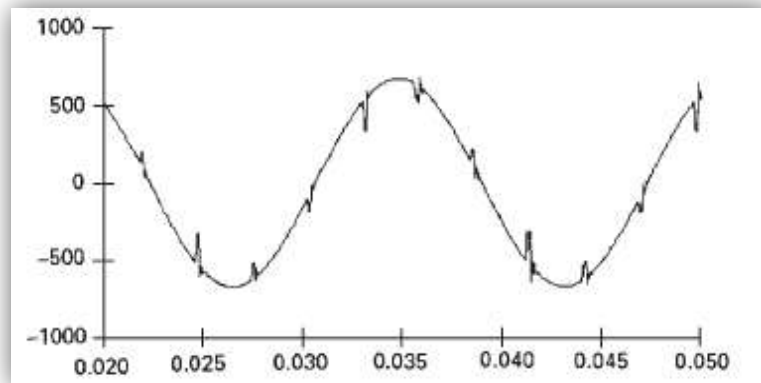


Figura 2.7 Muecas (Notching)

2.5.5.- Ruido

El ruido se define como señales eléctricas no deseables con espectro de banda ancha de contenido menor a 200khz sobrepuestas en los voltajes o corrientes en los conductores de fase, o encontrados en los conductores neutros, básicamente, el ruido consiste de cualquier distorsión indeseable de la señal de potencia, que no puede clasificarse como distorsión armónica o transitoria. [6] El ruido en los sistemas de potencia puede ser causado por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco eléctrico, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes de potencia conmutadas.

2.6.- Fluctuaciones de Voltaje

Una fluctuación de tensión es una variación sistemática de la forma de onda de tensión o una serie de cambios aleatorios de tensión de pequeñas dimensiones, básicamente entre 95% y 105% del valor nominal a una baja frecuencia inferior a los 25Hz, toda carga que presente variaciones de corriente puede causar fluctuaciones de tensión.

2.7.- Variaciones de Frecuencia de la Red

Se define como la desviación de la frecuencia fundamental de la red de alimentación de su valor nominal de 50 o 60Hz.

Pueden ser causadas por fallas del propio sistema, desconexión de grandes cargas o una gran fuente de generación saliendo de servicio.

Capítulo 3.- Conceptos Fundamentales de Armónicos

La tensión de onda sinusoidal generada en las centrales es aceptable en la mayoría de las áreas, el voltaje que se encuentra en los sistemas de transmisión generalmente tiene una distorsión menor al 1%. Sin embargo, la distorsión aumenta cerca de la carga, los convertidores electrónicos de potencia cortan la corriente en formas de onda arbitrarias.

Si bien hay algunos casos donde la distorsión es aleatoria, la mayoría de la distorsión es periódica, o un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico.

Esto ha dado a lugar al uso generalizado del término armónicos, para describir la distorsión de la forma de onda. Este término debe ser cuidadosamente calificado para que tenga sentido.

Aunque el problema de armónicos puede ser difícil de tratar, en realidad solo un pequeño porcentaje de los alimentadores de distribución de la empresa suministradora, tiene problemas severos de armónicos, por el contrario, el sector del usuario sufre más problemas armónicos que el sector suministrador.

3.1.- Distorsión de Armónicos

La distorsión de armónicos es causada por dispositivos no lineales en el sistema de potencia, un dispositivo no lineal es aquel que la corriente no es proporcional al voltaje aplicado.

En la Figura 3.1 se muestra este concepto en el caso de una tensión sinusoidal aplicado a una resistencia no lineal simple donde el voltaje y la corriente resultante se distorsiona. [6]

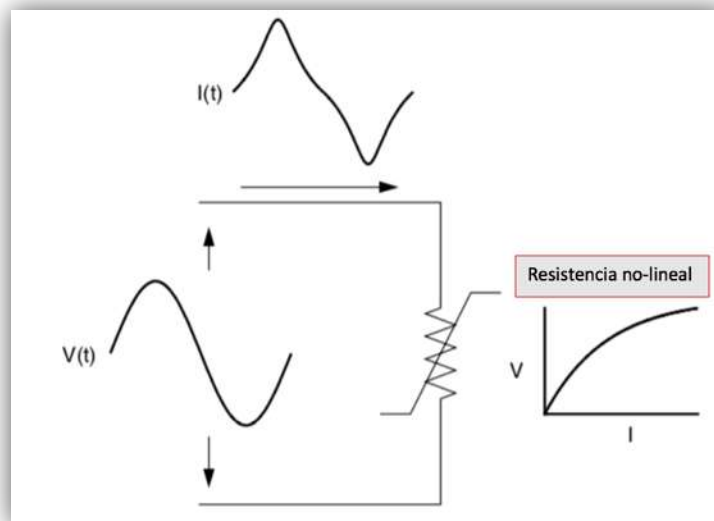


Figura 3.1 Señal sinusoidal de corriente distorsionada por carga no-lineal

Al aumentar el voltaje en un pequeño porcentaje, puede causar que la corriente se duplique y adopte una forma de onda distinta.

En la Figura 3.2 se aprecia que cualquier forma de onda periódica se puede expresar como una suma de sinusoidales. Cuando una forma de onda es idéntica de un ciclo al siguiente se puede representar como una suma de ondas sinusoidales puras, donde la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada.

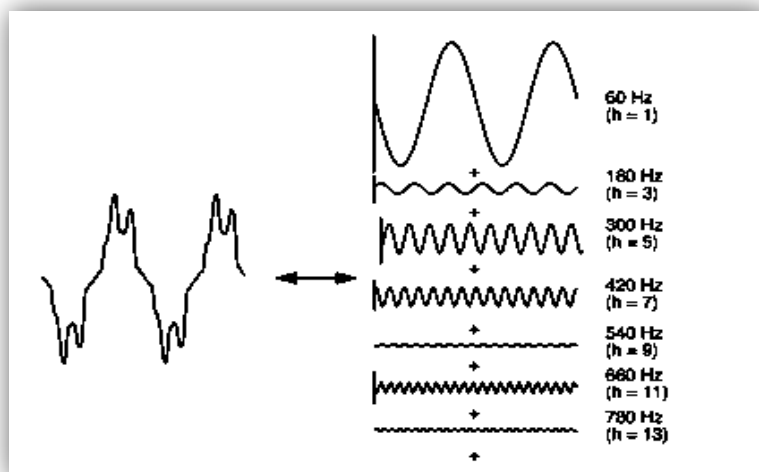


Figura 3.2 Señal sinusoidal representada por Series de Fourier

Este múltiplo se llama armónico de la fundamental, la suma de las sinusoidales se conoce como series de Fourier, este concepto se aplica universalmente en el análisis de problemas armónicos, a menudo solo las magnitudes de los armónicos son de interés. Sin embargo, cuando los semi ciclos positivos y negativos de una forma de onda tiene formas idénticas, las series de Fourier solo contienen armónicos impares. [6]

Por lo general los armónicos de orden superior por encima del rango del $h=25^{\text{th}}$ al $h=50^{\text{th}}$ son despreciables para el análisis del sistema eléctrico. Si bien pueden causar interferencia con dispositivos electrónicos de baja potencia, por lo general no son dañinos para el sistema eléctrico en general. Una excepción común a esto ocurre cuando hay resonancias del sistema en el rango de estas frecuencias. [6] Estas resonancias pueden excitarse mediante muescas o conmutaciones de transitorios en convertidores de potencia electrónicos.

3.2.- Voltaje contra corriente de distorsión

Existen causas y efectos separados para los voltajes y las corrientes, así como también alguna relación entre ambas. Por lo tanto, el término armónico es inadecuado para describir específicamente un problema, las cargas no lineales aparentan ser fuentes de corriente armónica en derivación e inyectan corrientes armónicas en el sistema eléctrico. Para todos los análisis es suficiente tratar estas cargas que producen armónicos simplemente como fuentes de corriente. [6] [8]

Existen excepciones a esto, como se describe en la figura 3.3 donde muestra que el voltaje de distorsión es resultado de la corriente de distorsión que pasa por la impedancia serie lineal de la energía que entrega al sistema, aunque, la fuente es puramente sinusoidal hay una carga no lineal que provoca una distorsión en la corriente.

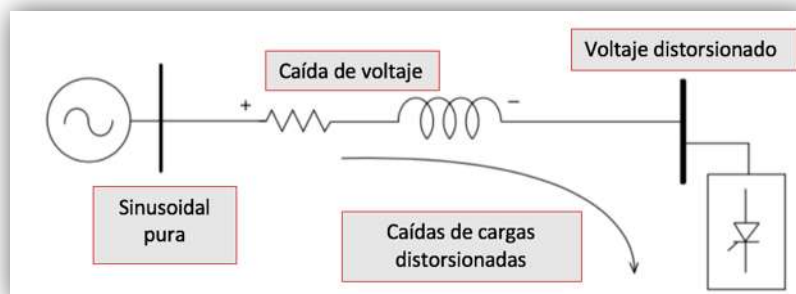


Figura 3.3 Las corrientes armónicas que fluyen a través de la impedancia de un sistema produciendo tensiones armónicas en la carga

Las corrientes que pasan por la impedancia del sistema causan una caída de voltaje para cada armónico.

Esto da como resultado la presencia de armónicos de tensión en el bus de carga. La cantidad de distorsión de voltaje depende de la impedancia y la corriente. Suponiendo que la distorsión del bus de carga, se mantiene dentro de límites razonables, la cantidad de corriente armónica producida por la carga generalmente es constante. [6]

Mientras que los armónicos de corriente de carga causan en última instancia la distorsión de voltaje, se debe tener en cuenta que la carga no tiene control sobre la distorsión de voltaje.

La misma carga colocada en dos ubicaciones diferentes en el sistema de energía resultara en dos valores de distorsión de voltaje diferentes. [6]

El reconocimiento de este hecho es la base de la división de responsabilidades para el control de armónicos que se encuentran en estándares como el IEEE 519-1992. [8]

Algunas prácticas recomendadas y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica son:

- El control sobre la cantidad de corriente armónico inyectado en el sistema tiene lugar en la aplicación de uso final.
- Suponiendo que la inyección de corriente armónica está dentro de los límites razonables, la entidad que tiene el control sobre la impedancia del sistema ejerce el control sobre la distorsión de la tensión.

3.3.- Diferencias entre Armónicos y Transitorios

La distorsión armónica es una causa de perturbaciones en calidad de la energía, que en realidad son transitorias, aunque las perturbaciones transitorias y los armónicos son fenómenos diferentes. [6]

Las formas de onda transitorias exhiben las altas frecuencias brevemente solo después de un cambio abrupto en el sistema eléctrico, estas frecuencias no tienen relación con la frecuencia fundamental del sistema.

Los armónicos por definición ocurren en el estado estacionario y son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

La distorsión de forma de onda que producen los armónicos está presente durante o al menos varios segundos, los transitorios generalmente se disipan en unos cuantos ciclos.

Los transitorios se asocian con cambios en el sistema, como la conmutación de elementos de carga o de control de banco de capacitores, mientras que los armónicos están asociados con la operación continua de una carga.

3.4.- Análisis de Potencias bajo condiciones no sinusoidales.

Las condiciones tales como como rms, potencia (reactiva, activa, aparente), factor de potencia y secuencia de fase, son definidas por la frecuencia fundamental en condiciones puramente sinusoidales. En presencia de distorsión armónica el sistema de potencia eléctrico ya no opera en condiciones puramente sinusoidales y desafortunadamente esto es ignorado por muchos ingenieros. [6]

3.4.1.- Potencias reactiva, activa y aparente en presencia de armónicos

Existen tres cantidades estándar asociadas con la potencia eléctrica:

- I. Potencia Aparente **S** (volts-amperes VA). Es el producto de la tensión y corriente rms.
- II. Potencia Activa **P** (watts W). Es la tasa promedio de entrega de energía.
- III. Potencia Reactiva **Q** (volts-amperes VAR's). Parte de la potencia aparente que está fuera de fase con la potencia activa.

La potencia aparente **S** aplica a condiciones tanto sinusoidales como no sinusoidales y se define para un sistema monofásico como:

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (3.1)$$

Donde V_{rms} y I_{rms} son los valores de voltaje y de corriente rms. En una condición sinusoidal tanto el voltaje como la corriente su forma de onda sinusoidal contiene solamente el componente de la frecuencia fundamental donde los valores se expresan de la siguiente manera:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times v_1 \quad (2.2)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_1 \quad (3.3)$$

Los valores v_1 e I_1 son la amplitud de las formas de onda de la voltaje y corriente respectivamente. El subíndice 1 denota la cantidad sobre la frecuencia fundamental, en una condición no sinusoidal una forma de onda con distorsión armónica está formada por sinusoides de frecuencias armónicas con distintas amplitudes.

Los valores rms de las formas de onda se calculan como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados rms de todas las componentes individuales como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times V_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{max}}^2} \quad (3.4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \times I_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{max}}^2} \quad (3.5)$$

Donde V_h e I_h son las amplitudes de una forma de onda en el componente armónico h.

En condiciones puramente sinusoidales, las componentes armónicas V_h e I_h son todas iguales a cero y solo V_1 e I_1 permanecen, entonces las ecuaciones (3.2) y (3.3) se simplifican. La potencia activa P representa la potencia útil que consumen las cargas para realizar un trabajo real, convirtiendo la energía eléctrica a otras formas de energía. En la energía eléctrica el trabajo real es utilizado por la corriente que está en fase con el voltaje. El trabajo no real será resultado por la corriente que no está en fase con el voltaje.

La potencia activa es la tarifa en la cual la energía es gastada, disipada o consumida por la carga y es medida en unidades de watts. P puede calcularse promediando el producto de la tensión y corriente instantánea, es decir:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (3.6)$$

En la ecuación (3.6) es válida para condiciones sinusoidales y no sinusoidales. Para sinusoidales P se resuelve como:

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos \phi_1 = V_{1rms} I_{1rms} \cos \phi_1 = S \cos \phi_1 \quad (3.7)$$

Donde ϕ_1 es la fase angular entre el voltaje y la corriente de la frecuencia fundamental. En la ecuación 3.6 indica la potencia activa promedio en función de la frecuencia fundamental. En el caso no sinusoidal el cálculo de la potencia activa debe incluir las contribuciones a todas las componentes armónicas, por lo tanto, es la suma de la potencia activa por cada armónica.

La potencia aparente S es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Es proporcional al rms de la corriente de distorsión y este cálculo es sencillo, aunque ligeramente más complicado que el caso sinusoidal. La potencia reactiva Q es un tipo de potencia que no realiza trabajo real y está generalmente asociada con elementos reactivos como inductores y capacitores. Por ejemplo, la carga inductiva de un motor causa que la corriente de la carga se retrase respecto al voltaje.

La potencia reactiva es un tipo de energía que no tiene utilidad y generalmente se asocia con elementos reactivos (inductores y condensadores).

La energía que aparece a través de la inductancia se desplaza hacia adelante y hacia atrás entre la inductancia misma y la fuente del sistema de energía, sin producir trabajo neto. Esta expresado en unidades de VARS, en un caso sinusoidal la potencia reactiva es definida como:

$$Q_1 = S \sin \phi_1 = \frac{V_1 I_1}{2} \sin \phi_1 = V_{1rms} I_{1rms} \sin \phi_1 \quad (3.8)$$

En la Figura 3.4 se muestra la relación entre P , Q y S en condiciones sinusoidales. Existe desacuerdo entre analistas de armónicas sobre cómo se define Q en presencia de distorsión armónica. Si no fuera por el hecho que muchas empresas miden Q y calculan la facturación de la demanda a partir del factor de potencia por Q , eso podría ser un punto discutible. Es más importante el determinar P y S ; P define cuanta potencia activa comienza a ser consumida, mientras que S define la capacidad del sistema de potencia requerido para entregar a P .

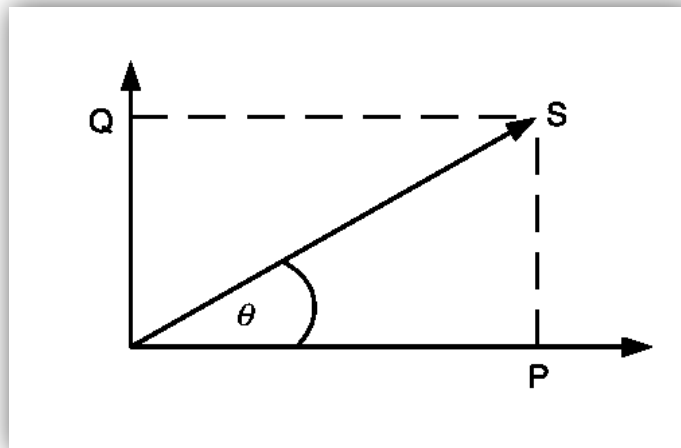


Figura 3.4 Relación entre P , Q y S en condiciones sinusoidales

Q_1 es la potencia reactiva tradicional de la frecuencia fundamental que puede ser usada para dimensionar los capacitores en paralelo. Cuando la potencia reactiva tiene distorsión, presenta otras peculiaridades interesantes. El concepto de flujo de VAR en el sistema eléctrico está profundamente arraigado dentro de las mentes de los ingenieros, pero lo que muchos de ellos no se dan cuenta es que este concepto es válido solo dentro de un estado sinusoidal estable. [6]

Cuando hay distorsión, el componente de S que queda después de ser extraído P no se conserva, es decir, no suma cero en un nodo. Se presume que las cantidades de energía fluyen alrededor del sistema de manera conservadora.

Esto no implica que P no se conserve o que la corriente no se conserve porque la conservación de la energía y las leyes de Kirchhoff todavía se aplican a cualquier forma de onda.

Esto ha llevado a algunos analistas a proponer que se use Q para denotar las componentes reactivas que se conserven e introducir una nueva cantidad para los componentes que no lo son. Muchos llaman a esta cantidad potencia de distorsión D o simplemente como la distorsión de volts-amperes. Tiene unidades de volts-amperes, pero puede no ser estrictamente apropiado referirse a esta cantidad como potencia ya que no fluye a través del sistema, pues se supone que lo hace.

En este concepto, Q consiste en la suma de los valores de potencia reactiva tradicional en cada frecuencia, D representa todos los productos cruzados de voltaje y corriente a diferentes frecuencias que no producen potencias promedio. P, Q, y S se relacionan de la siguiente manera, usando las funciones para S y P que se mostraron en las ecuaciones anteriores (3.7) y (3.8) como punto de partida:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.9)$$

$$Q = \sum_k V_k I_k \sin \phi_k \quad (3.10)$$

Por lo tanto, D puede determinarse con los valores de S, P y Q por

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (3.11)$$

Algunos analistas prefieren usar plano de tres dimensiones para mostrar la relación de los componentes mostrado en la figura 3.5. P y Q contribuyen a la tradicional componente sinusoidal para S mientras D representa una contribución adicional para la potencia aparente por los armónicos.

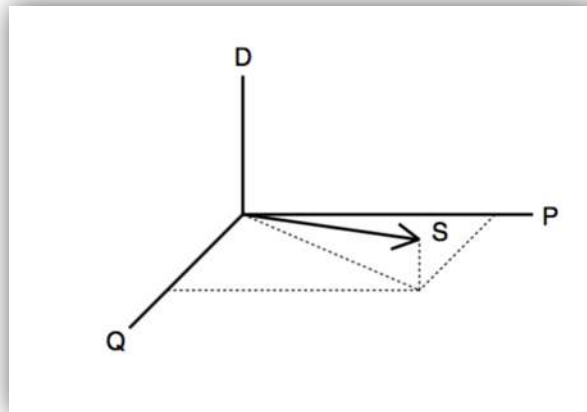


Figura 3.5 Relación potencias aparente

3.4.2.- Factor de Potencia

El factor de potencia de un dispositivo o circuito de corriente alterna es la relación de la potencia activa (P) a la potencia aparente (S), es decir;

$$F.P = \frac{P}{S} \quad (3.12)$$

Donde:

P= potencia activa suministrada o absorbida por el circuito o dispositivo (W)

S= potencia aparente del circuito o dispositivo (VA)

El factor de potencia se expresa como un número simple o como un porcentaje. Como la potencia nunca puede exceder la potencia aparente S, se deduce que el factor de potencia nunca puede ser mayor que la unidad. El factor de potencia de un circuito o dispositivo es simplemente una forma de establecer que fracción de su potencia aparente es potencia real o activa.

Sin embargo, el factor de potencia tradicional está dado por el coseno del ángulo entre el voltaje fundamental y corriente fundamental. Cuando hay armónicas este factor de potencia se llama factor de potencia de desplazamiento

$$F.P_{Desplazamiento} = \cos \theta \quad (3.13)$$

Cuando no hay armónicos, el factor de potencia tradicional y el factor de potencia de desplazamiento tienen el mismo valor.

3.4.3.- Secuencia de fases de Armónicos

En la ingeniería eléctrica se han usado componentes simétricos para describir el comportamiento del sistema eléctrico trifásico, el cual se transforma en tres sistemas monofásicos. El método de componentes simétricos se puede emplear para el análisis de la respuesta del sistema a las corrientes armónicas, siempre que se tenga cuidado de no violar los fundamentos del método.

El conjunto de secuencia positiva contiene tres sinusoidales desplazados 120° una de otra, con rotación de fase A-B-C (por ejemplo $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$), en secuencia negativa se desplazan 120° , con rotación opuesta A-C-B (por ejemplo $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$), los sinusoidales de secuencia cero, están en fase una con otra (por ejemplo $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$). En un sistema trifásico equilibrado, la secuencia de fase armónica se determina multiplicando el número de armónico "h" por la rotación de fase de secuencia positiva normal.

Dado que una forma de onda distorsionada solo contiene componentes armónicos impares, a continuación, se muestra la secuencia de fase de armónicos impares:

- I. Armónicos de orden $h=1, 7, 13, \dots$ son secuencia positiva.
- II. Armónicos de orden $h=5, 11, 17, \dots$ son secuencia negativa.
- III. Los denominados Triplen $h=3, 9, 15, \dots$ son secuencia cero.

Las armónicas pares son originadas por los hornos de arco, los ciclos convertidores y los rectificadores semicontrolados, mientras que las armónicas impares son generadas por equipos basados en rectificadores estáticos y rectificadores controlados, las armónicas impares son las que se encuentran en mayor magnitud en los sistemas eléctricos. [13] [9]

3.4.4.- Armónicos Triplen

Los armónicos triplen son múltiplos impares de las terceras armónicas ($h=3, 9, 15, 21, \dots$). Los triplen merecen una consideración especial ya que el sistema eléctrico responde a menudo de manera diferente para los triplen que para el resto de los armónicos. Los triplen son una importante emisión para el sistema de tierra con circulación de corriente a través del neutro. [9]

Para un sistema con cargas monofásicas perfectamente equilibradas como se muestra en la figura 3.6 donde están presentes componentes fundamentales y de tercer armónico. Al sumar las corrientes en el nodo N, se encuentra que las componentes fundamentales de la corriente en el neutro son cero, pero las componentes del tercer armónico son 3 veces las de la corriente de fase porque naturalmente, coinciden en la fase y el tiempo. [6]

En un transformador con una conexión en los devanados estrella-delta, se tiene un impacto significativo en el flujo de los armónicos triplen causados por cargas no-lineales, como se muestra en la figura 3.7 En la configuración de un transformador estrella-delta, las corrientes de armónicos triplen se muestran entrando al lado de la estrella. Como están en fase, se incluyen por el neutro. El devanado delta proporciona un balance de amperes-vueltas para que puedan fluir, pero permanecen atrapados en el delta y no aparecen en las líneas de corriente en el lado delta. [6]

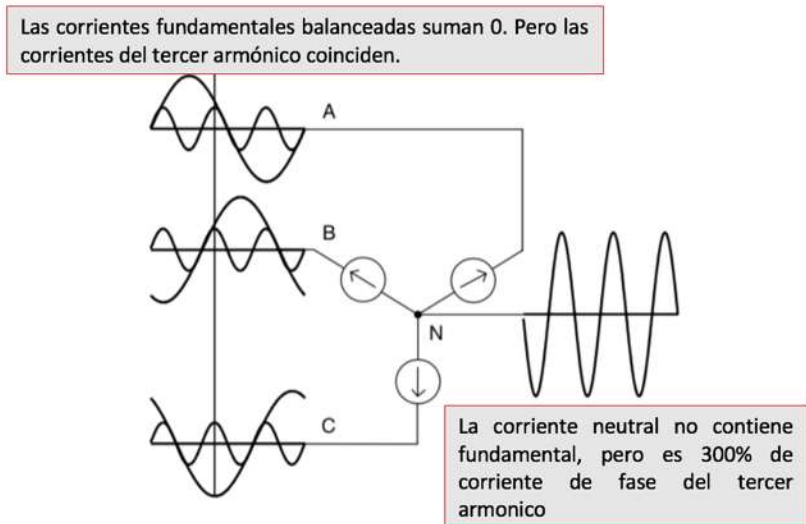


Figura 3.6 Sistema trifásico balanceado con tercer armónico en cada fase

Cuando las corrientes están equilibradas, las corrientes armónicas triplen se comportan exactamente como corrientes de secuencia cero, que es precisamente lo que son. Este tipo de configuración en un transformador es la más comúnmente utilizado en subestaciones de distribución con el devanado delta conectado al alimentador de la transmisión.

El uso de devanados en configuración estrella con puesta a tierra en ambos lados del transformador permite que los triplen fluyan sin interrupciones desde el sistema de baja tensión hacia el sistema de alta tensión. Estarán presentes en igual proporción en ambos lados.

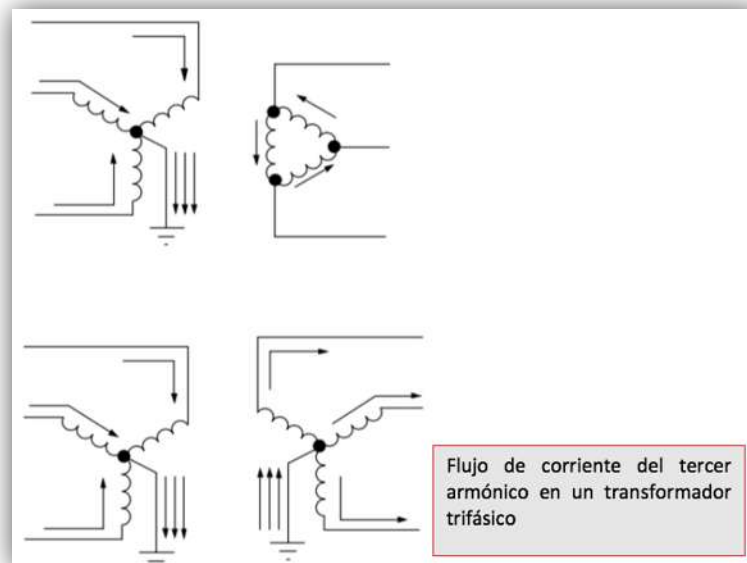


Figura 3.7 Flujo de la corriente de tercera armónica en un transformador trifásico

Algunas implicaciones importantes que están relacionadas con el análisis de calidad de energía eléctrica son:

- Los transformadores en particular con conexión neutral, son susceptibles de sobrecalentamiento cuando se alimentan cargas monofásicas en el lado del devanado estrella que contiene un alto contenido de tercer armónico. [6]
- La medición de la corriente en el lado delta en un transformador, no mostrará la existencia de triplen y por lo tanto, no dará una idea real sobre el calentamiento a la que está sometido el transformador. [6]
- El flujo de la corriente de tercer armónico puede ser interrumpido por una apropiada conexión de aislamiento en el transformador. [6]

Removiendo la conexión a neutro en un lado del transformador o en ambos en configuración estrella-estrella, bloqueará el flujo de corriente de tercer armónico. Del mismo modo, un devanado con configuración delta bloquea el flujo de la línea. Se debe tener en cuenta que los transformadores de núcleo de tres patas se comportan como si tuvieran un devanado terciario delta fantasma. Por lo tanto, una conexión en estrella-estrella con un solo punto neutro conectado a tierra seguirá siendo capaz de conducir los armónicos triplen desde ese lado.

Las reglas mencionadas para el flujo de corriente de tener armónicos en un transformador, solo aplica para condiciones de cargas balanceadas. Cuando las fases no están equilibradas, las corrientes de frecuencia armónicas triplen normales, pueden aparecer muy bien donde no se les espera. El modo normal para armónicos triplen es ser secuencia cero. Durante los desbalances, los armónicos triplen pueden tener componentes de secuencia positiva o negativa.

3.5.- Índices de Armónicos

Los dos índices más comúnmente usados para la medición del contenido armónico en una forma de onda son; la distorsión total armónica (THD) y la demanda de distorsión total (TDD). Ambas son medidas de valor efectivo de una forma de onda y pueden aplicarse a la tensión o la corriente. A pesar de que ambas mediciones señalan el porcentaje de distorsión armónica, la diferencia entre ellas es la escala, la THD puede señalar niveles altos de distorsión, pero en corriente muy pequeñas, mientras que la TDD está a términos de función a la demanda que exige el sistema eléctrico.

3.5.1.-Distorsion Armónica Total (THD)

La THD es una medida de valor efectivo de los componentes armónicos de una forma de onda. Es decir, es el valor calorífico potencial de los armónicos en relación en la fundamental. Este índice puede ser calculado ya sea para voltaje o corriente:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (3.14)$$

Donde M_h es el valor rms del componente armónico h de la cantidad M . El valor eficaz (rms) de una forma de onda distorsionada es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados. El THD es relacionado al valor rms de la forma de onda de la siguiente manera

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (3.15)$$

La THD es una cantidad útil para muchas aplicaciones, puede proporcionar una buena idea de la cantidad de calor extra que se obtendrá cuando se aplica una tensión distorsionada a través de una carga resistiva. Así mismo puede dar una indicación de las pérdidas adicionales causadas por la corriente que fluye a través de un conductor.

Sin embargo, no es un buen indicador de la tensión dentro de un capacitor porque está relacionado con el valor máximo de la forma de onda de voltaje, mas no de su valor de calentamiento. [7, p. 181]

El índice THD se usa con mayor frecuencia para describir la distorsión armónica de voltaje. Los voltajes armónicos casi siempre se refieren al valor fundamental de la forma de onda en el momento de la muestra. Debido a que el voltaje fundamental varía solo en un pequeño porcentaje, el voltaje THD es casi siempre un número significativo.

3.5.2.-Demanda de distorsión total (TDD)

Los niveles de distorsión actuales se pueden caracterizar por un valor THD, como se ha descrito, pero, a menudo puede ser engañoso. Una corriente pequeña puede tener un alto THD pero no ser una amenaza significativa para el sistema. Por ejemplo, muchas unidades de velocidad ajustable mostraron altos valores de THD para la corriente de entrada cuando operan con cargas muy pequeñas. [6]

Esta no es necesariamente una preocupación importante porque la magnitud de la corriente armónica es baja, aunque su distorsión de corriente es alta.

Algunos analistas han intentado evitar esta dificultad refiriendo THD a la fundamental de la corriente de carga máxima de demanda en lugar de la fundamental de la muestra actual. Esto se llama demanda de distorsión total y se define de la siguiente manera:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad (3.16)$$

Donde I_L es el pico, o la máxima corriente de la carga de la componente fundamental de la frecuencia medida en el punto común de acoplamiento.

Hay dos maneras de medir I_L . Con la carga que ya está en el sistema como el promedio de la corriente de demanda máxima durante 12 meses anteriores. El cálculo puede ser simplemente promediando las lecturas de demanda máxima de 12 meses. Para una nueva instalación I_L debe estimarse en función de los perfiles de cargas predichas. [6]

3.6.- Ubicación de Fuentes Armónicas

En los alimentadores de distribución radial y sistemas de potencia de plantas industriales, la tendencia principal es que las corrientes armónicas fluyen desde la carga que producen las armónicas hacia la fuente del sistema de potencia. [6]

Esto se ve en la figura 3.8 En donde la impedancia del sistema de potencia normalmente es la impedancia más baja vista por las corrientes armónicas. Por lo tanto, la mayor parte de la corriente fluye hacia la fuente. Esta tendencia general de los flujos de corriente armónicos puede usarse para localizar fuentes de armónicos. Usando un monitor de calidad de potencia capaz de reportar el contenido armónico de la corriente, simplemente con medir las corrientes armónicas en cada ramificación, empezando por el inicio del circuito y rastreando los armónicos de la fuente.

Los capacitores de corrección del factor de potencia pueden alterar este patrón de flujo para al menos uno de los armónicos. Por ejemplo, agregar un capacitor al circuito anterior como se muestra en la figura 3.9 puede atraer una gran cantidad de corriente armónica a esa parte del circuito.

En tal situación, seguir la ruta de la corriente armónica conducirá a un banco de condensadores en lugar de la fuente armónica real. Por lo tanto, generalmente **es necesario desconectar temporalmente todos los capacitores para ubicar de manera confiable las fuentes armónicas**.

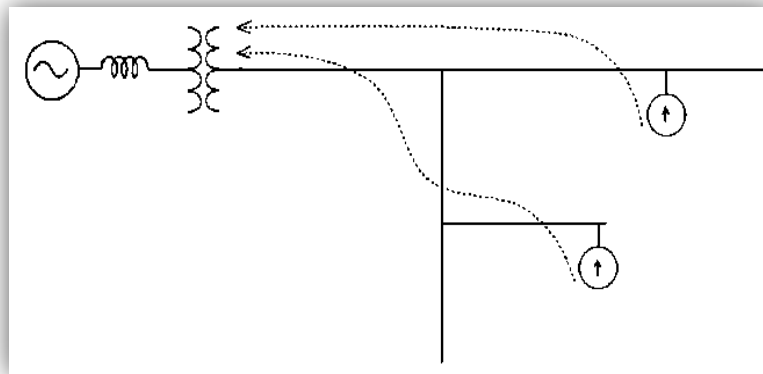


Figura 3.8 Flujo general de corrientes armónicas en un sistema de potencia radial

Por lo general es fácil diferenciar las corrientes armónicas debido a las fuentes reales de las corrientes armónicas que se deben estrictamente a la resonancia que implica un banco de condensadores. Una corriente de resonancia típicamente tiene un solo armónico dominante que va sobre la parte superior de la onda sinusoidal fundamental.

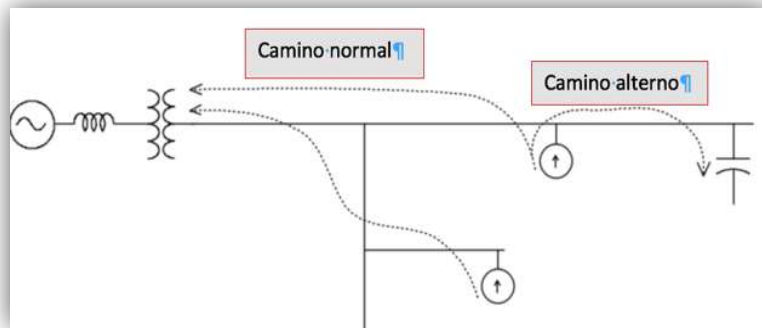


Figura 3.9 Flujo general de corrientes armónicas en un sistema de potencia radial

Las formas de onda de estas fuentes armónicas tienen formas de onda un poco arbitrarias dependiendo de los fenómenos de distorsión, pero contienen varios armónicos en cantidades significativas. Una armónica grande y significativa casi siempre resulta ser resonancia. Este hecho se puede aprovechar para determinar si es probable que existan problemas de resonancia armónica en un sistema con capacitores. Simplemente midiendo la corriente que no sea la fundamental, es probable que el capacitor esté participando en un circuito resonante dentro del sistema eléctrico.

Otro método para localizar fuentes de armónicos **“es correlacionando las variaciones de tiempo de la distorsión de voltaje con el tipo y características de la carga”**.

3.7.- Características de respuesta del sistema

En los sistemas de potencia, la respuesta del sistema es tan importante como las fuentes de armónicos. De hecho, los sistemas de potencia son bastante tolerantes a las corrientes inyectadas por las cargas generadas de armónicos a menos que exista alguna interacción adversa con la impedancia del sistema. La identificación de las fuentes es solo la mitad del trabajo de análisis armónico. La respuesta del sistema de potencia en cada frecuencia armónica determina el verdadero impacto de la carga no lineal en la distorsión de tensión armónica. [6]

Existen tres variables principales que afectan las características de respuesta del sistema, por ejemplo; la impedancia del sistema, la presencia de un banco de condensadores y la cantidad de cargas resistivas en el sistema.

3.7.1.-Impedancia del sistema

En la frecuencia fundamental, los sistemas de potencia son principalmente inductivos, y la impedancia equivalente a veces se denomina simplemente reactancia de cortocircuito. Una de las cantidades más frecuentemente utilizadas en el análisis de armónicos en los sistemas de potencia es la impedancia de cortocircuito al punto en una red en la que se encuentra el condensador. Si no está disponible directamente, se puede calcular a partir de los resultados del estudio de cortocircuito de la siguiente manera:

$$Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} = \frac{KV^2}{MVA_{sc}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3}I_{sc}} \quad (3.17)$$

Donde:

Z_{sc} = impedancia de cortocircuito

R_{sc} = resistencia de cortocircuito

jX_{sc} =reactancia de cortocircuito

KV = voltaje de fase a fase, kV

MVA_{sc} = cortocircuito trifásico

I_{sc} = corriente de cortocircuito

Z_{sc} es una cantidad fasorial que consiste en resistencia y reactancia. Sin embargo, si los datos de cortocircuito no contienen información de fase, generalmente está obligado a suponer que la impedancia es puramente reactiva.

Esta es una suposición razonable para los sistemas de potencia a nivel industrial y para la mayoría de los sistemas de servicio público. Cuando esto no es el caso se debe hacer esfuerzo para determinar un valor de resistencia más realista, ya que afectará a los resultados una vez que se consideren los capacitores.

La parte de la reactancia inductiva de la impedancia cambia linealmente con la frecuencia. Un error común que se comete en los análisis de armónicos es olvidar ajustar la reactancia para la frecuencia. [6]

La reactancia para la h-armónica se determina a partir de la fundamental de la impedancia reactiva X_1 por:

$$X_h = hX_1 \quad (3.18)$$

En la mayoría de los sistemas de potencia, generalmente se puede suponer que la resistencia no cambia significativamente cuando se estudian los efectos armónicos menores al noveno orden. Para líneas y cables, la resistencia varía aproximadamente por la raíz cuadrada de la frecuencia, pero para algunos transformadores esta regla es la excepción. Debido a las pérdidas de corriente parásitas, la resistencia aparente de los transformadores de gran capacidad puede variar, casi proporcionalmente con la frecuencia, esto puede tener un efecto muy beneficioso sobre la amortiguación de la resonancia. En un sistema eléctrico a nivel industrial, la reactancia del sistema equivalente a menudo está dominado por la impedancia del transformador de servicio, por lo tanto, una buena aproximación de X_{sc} puede basarse en la impedancia del transformador de entrada del sistema del servicio solamente.

$$X_{sc} = X_{tx} \quad (3.19)$$

Si bien no es preciso esto generalmente es al menos el 90% de la impedancia total y generalmente, es más. Esto suele ser suficiente para evaluar si habrá o no problemas significativos de resonancia armónica.

Una gráfica de impedancia en función de la frecuencia para un sistema inductivo (sin capacitores instalados) se vería como en la figura 3.10

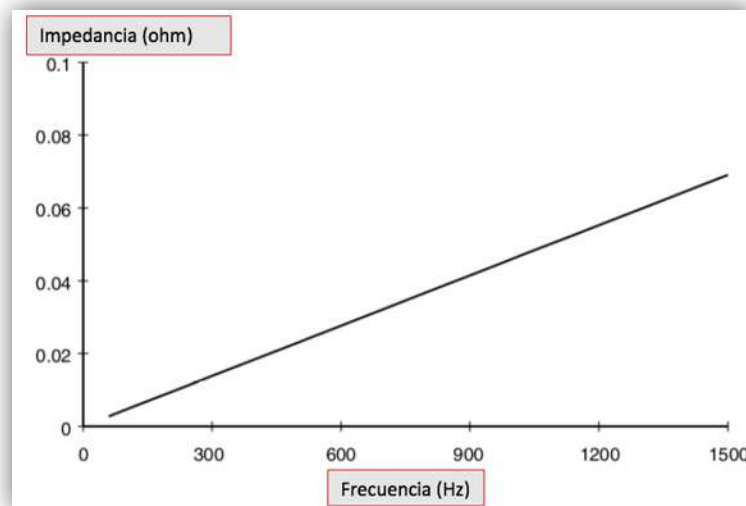


Figura 3.10 Impedancia contra frecuencia para un sistema inductivo

3.7.2.-Impedancia del condensador

Los condensadores en derivación, ya sea en la ubicación del cliente para la corrección del factor de potencia o en el sistema de distribución para el control de voltaje, alteran dramáticamente la variación de la impedancia del sistema con la frecuencia. Los condensadores no crean armónicos, pero pueden magnificar la distorsión armónica a grandes niveles. [6]

Mientras que la reactancia de componentes inductivos se incrementa proporcionalmente a la frecuencia, la reactancia capacitiva X_c disminuye proporcionalmente:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.20)$$

Donde C es la capacitancia en faradios, la reactancia capacitiva equivalente a frecuencia fundamental para un banco de condensadores puede determinarse por:

$$X_c = \frac{kV^2}{Mvar} \quad (3.21)$$

3.7.3.-Resonancia Paralela

Todos los circuitos que contienen tanto capacitancias como inductancias tienen una o más frecuencias naturales. Cuando una de esas frecuencias se alinea con una frecuencia que se

está produciendo en el sistema de potencia, puede desarrollarse una resonancia en la que el voltaje y la corriente, a esa frecuencia continúan persistiendo a valores muy altos. Esto es la raíz de la mayoría de los problemas con la distorsión armónica en los sistemas de potencia. En la figura 3.11 se muestra un sistema eléctrico de potencia que presenta problemas de resonancia paralela.

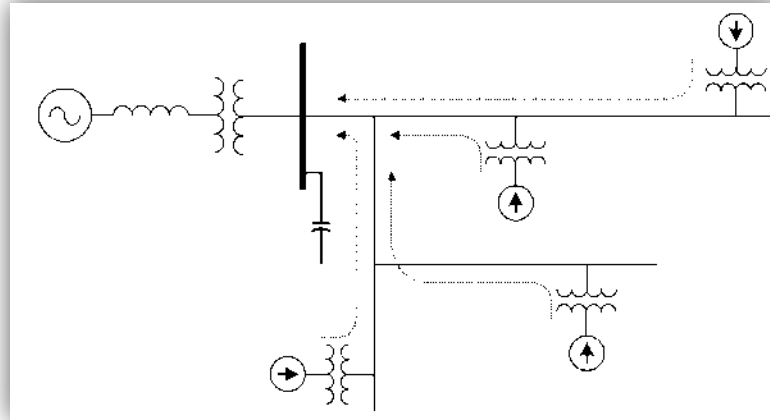


Figura 3.11 Sistema con posibles problemas de resonancia paralela

Desde la perspectiva de las fuentes armónicas el capacitor en derivación, se encuentra en paralelo con la inductancia equivalente del sistema (Inductancias de fuentes y transformadores) a frecuencias armónicas, tal como se muestra en la figura 3.12. El fenómeno de resonancia paralela ocurre cuando la reactancia X_C y la reactancia del sistema de distribución se anulan mutuamente.

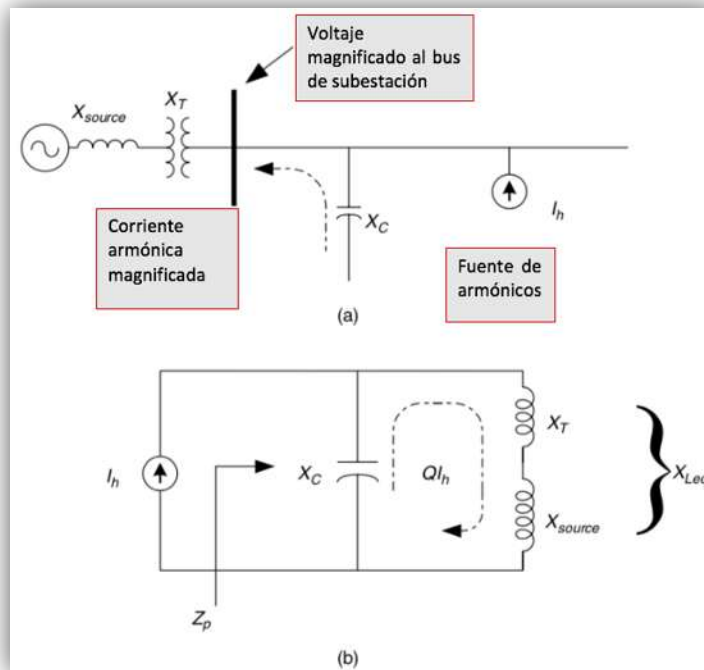


Figura 3.12 En frecuencia armónicas, el banco de condensadores en derivación aparece en paralelo con la inductancia del sistema. (a) Circuito de distribución simplificado. (b) Circuito resonante paralelo visto desde la fuente armónica

3.7.4.- Resonancia en serie

Existen casos en donde los capacitores en derivación y las inductancias de un transformador o líneas de distribución pueden aparecer como un circuito LC en serie para una fuente de corrientes armónicas. Si la frecuencia resonante corresponde a una frecuencia armónica característica de la carga no lineal, el circuito LC atraerá una gran parte de la corriente armónica generada, en el sistema de distribución.

Un usuario que no tiene carga no-lineal, pero que utiliza capacitores de corrección de factor de potencia, puede de esta manera experimentar una distorsión de alto voltaje armónico debido a las fuentes de armónicos vecinos. En la figura 3.13 se muestra una situación de este tipo. [6]

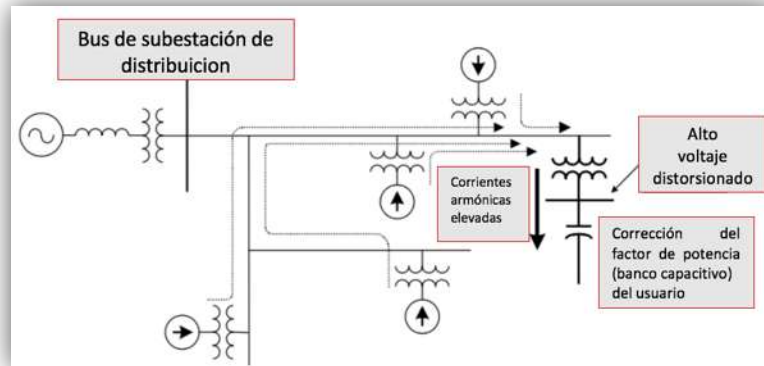


Figura 3.13 Sistema con posibles problemas de resonancia serie

Durante la resonancia, el capacitor que corrige el factor de potencia forma un circuito serie con el transformador y las fuentes armónicas. El circuito simplificado se muestra en la figura.3.14 La fuente de armónicos que se muestra en esta figura representa los armónicos totales producidos por otras cargas. La inductancia en serie con el condensador es la del transformador de entrada de servicio. Se muestra además la respuesta a la frecuencia para los dos tipos de resonancia.

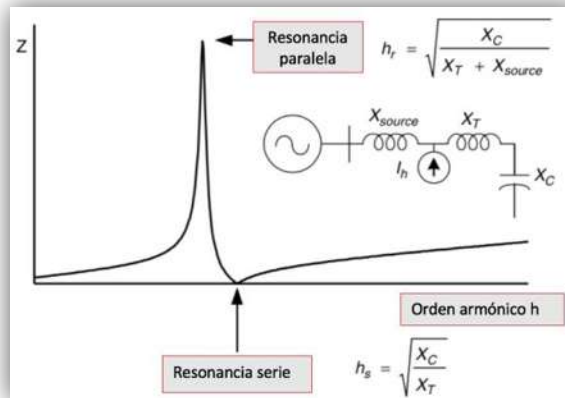


Figura 3.14 Respuesta de frecuencia de un circuito con resonancia serie y resonancia paralela

La combinación en serie de la inductancia del transformador y el banco de capacitores es muy pequeña (teóricamente cero) y solo está limitada por su resistencia. Por lo tanto, la corriente armónica correspondiente a la frecuencia resonante, fluirá libremente en este circuito. La tensión en el condensador del corrector de factor de potencia se magnificará y distorsionará, pudiendo además destruir al capacitor.

3.7.5.- Efectos de Carga resistiva

Determinar que el armónico resonante se alinea con una fuente armónica común no siempre es motivo de alarma. La amortiguación proporcionada por la resistencia en el sistema es a

menudo suficiente para evitar voltajes y corrientes catastróficas. En la figura.3.15 se muestra la característica resonante de un circuito paralelo, para varias cantidades de carga resistiva en paralelo con la capacitancia, donde tan solo un 10% de carga resistiva puede tener un impacto beneficioso significativo en la impedancia máxima.

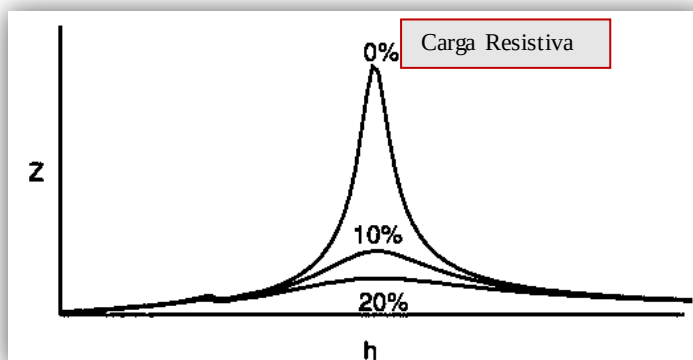


Figura 3.15 Efectos de carga resistiva en resonancia paralela

Del mismo modo, si hay una longitud significativa de líneas o cables entre el bus del condensador y el transformador más cercano, la resonancia se suprimirá. Las líneas y cables pueden agregar una cantidad significativa de resistencias al circuito equivalente.

Las condiciones de resonancia más problemáticas ocurren cuando los capacitores están instalados ya sea en buses de subestaciones de servicio público o instalaciones industriales.

3.8.- Efectos de la distorsión armónica

Las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales se reinyectan en los sistemas de suministro. Estas corrientes pueden interactuar de forma adversa con una gran variedad de equipos de sistemas de potencia, especialmente condensadores, transformadores y motores, causando pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y sobrecarga.

3.8.1.- Impacto en los condensadores

Los problemas que involucran armónicos a menudo aparecen primero en los bancos de capacitores. Como ya se mencionó anteriormente, un banco de capacitores experimenta una distorsión de alta tensión durante la resonancia. La corriente que fluye en el banco de capacitores también es significativamente grande y rica en armónicos. En la figura 3.16 se muestra una forma de onda de corriente de un banco de capacitores en resonancia con el sistema $h=11$ th undécimo armónico. La corriente armónica se muestra distintivamente, lo que resulta en una forma de onda que es esencialmente del $h=11$ th undécimo armónico situado en la parte superior de la frecuencia fundamental. Esta forma de onda de corriente típicamente indica que el sistema está en resonancia y está involucrado un banco de capacitores.

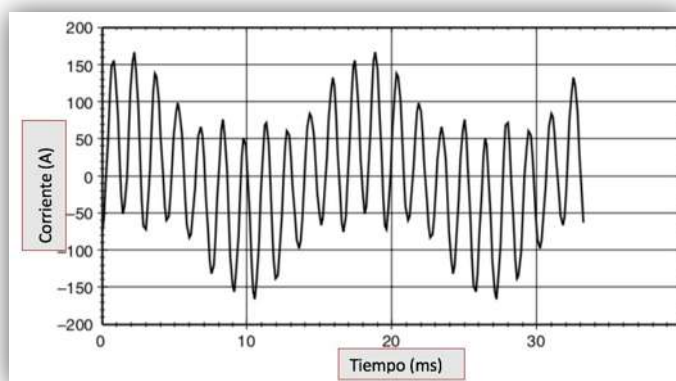


Figura 3.16 Corriente típica de un condensador de un sistema en la 11th-armónica resonante

3.8.2.- Impacto en los transformadores

Los transformadores están diseñados para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas con pérdidas mínimas a la frecuencia fundamental. La distorsión armónica de la corriente, en particular, así como de la tensión, contribuirá significativamente al calentamiento adicional del transformador.

Como resultado de esto, la vida esperada de los transformadores puede reducirse. La carga de los transformadores está restringida a corrientes sinusoidales con un contenido de armónicos menor al 5%; sin embargo, en las normas actuales para transformadores, cuando se espera que estos operen con cargas no lineales, se especifica un concepto conocido como **Factor K** para transformadores y debe indicar en su placa de características. [10]

Para diseñar un transformador que opere a frecuencias más altas, los diseñadores toman diferentes decisiones de diseño, como usar cable continuamente transpuesto en lugar de conductor sólido y colocar más conductores de enfriamiento.

Como regla general un transformador en el que la distorsión actual excede el 5% es un candidato para reducir la potencia armónica. Existen 3 efectos que aumentan el calentamiento del transformador cuando la corriente de carga incluye componentes armónicos:

1. Valor eficaz de la corriente. Si el transformador está dimensionado solo para el requerimiento de KVA de la carga, las corrientes armónicas pueden incrementar la corriente RMS del transformador a valores mayores de su capacidad. El incremento de la corriente eficaz total da como resultado, mayores pérdidas en los conductores.
2. Pérdidas por corrientes parasitas. Estas corrientes inductivas en un transformador causadas por los flujos magnéticos. Estas corrientes fluyen en los devanados, en el núcleo y conductores sometidos al campo magnético del transformador causando calentamiento adicional al transformador.
3. Pérdidas en el núcleo. El aumento de las pérdidas del núcleo en presencia de armónicos dependerá del efecto de los armónicos sobre la tensión aplicada y el

diseño del núcleo del transformador. El aumento de la distorsión de voltaje puede aumentar las corrientes parásitas en las laminaciones del núcleo.

3.9 Mitigación de Armónicos

Existen diversas prácticas para limitar el flujo de armónicos del equipo que los genera hacia donde la presencia de estas es indeseable o disminuirlas a niveles aceptable. La norma internacional como la IEEE 519-92 [8] recomiendan los límites permisibles de distorsión en las redes eléctricas para reducir los efectos nocivos de la circulación de armónicos por dichas redes.

Los filtros de armónicos cumplen la función de evitar la circulación de las corrientes de armónicos por el sistema eléctrico y reducir la distorsión de la tensión. Estos pueden ser pasivos (compuestos por arreglos de impedancias) o activos (basados en electrónica de potencia) [11]

3.9.1 Filtros Sintonizados

La manera de prevenir la ocurrencia de una resonancia, es asegurarse que la frecuencia de resonancia quede localizada en el área de frecuencia donde no existe inyección de fuentes armónicos. Un filtro sintonizado es un circuito RLC el cual presenta una impedancia mínima a la frecuencia de un armónico definido. Un filtro de armónicos utilizado para corregir el factor de potencia tiene doble propósito. [12]

A la frecuencia fundamental (60Hz) proporciona las VAR para corregir el factor de potencia de desplazamiento y a las frecuencias superiores, a la de sintonía proporciona una trayectoria de baja impedancia para ciertas armónicas producidas por las cargas, lo cual se traduce en un mayor factor de potencia de distribución y por lo tanto en un mejor factor de potencia total.

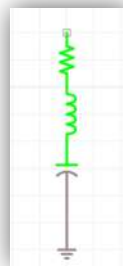


Figura 3.17 Filtro Sintonizado

Este tipo de filtro permite la corrección del factor de potencia de desplazamiento sin exhibir resonancia en presencia de cargas no lineales. La instalación de filtros presenta las ventajas con respecto a la instalación de banco de capacitores.

3.9.1.1.- Ventajas de filtros sintonizados respecto a banco de capacitores

A. Evitan que se presente el fenómeno de resonancia paralela

La conexión de capacitores para corregir el factor de potencia produce una frecuencia de resonancia. Aquellos armónicos producidos por la carga cuya frecuencia sea cercana a esta frecuencia de resonancia se verán amplificadas, lo cual se traduce en un bajo factor de potencia de distorsión y en una mayor distorsión de voltaje interfiriendo con la correcta operación de equipo sensible.

En la figura 3.18 se muestra un circuito equivalente simplificado que puede utilizarse para analizar el comportamiento del sistema cuando se conectan bancos de capacitores y filtros para corregir el factor de potencia en instalaciones con carga no-lineal.

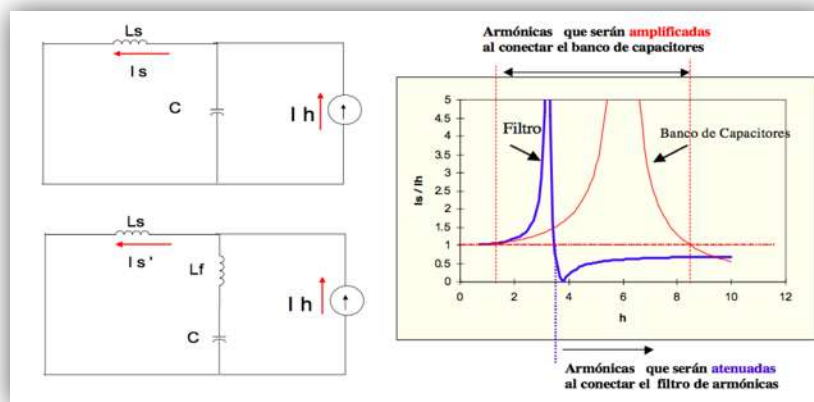


Figura 3.18 Efecto de la conexión de banco de capacitores y filtros en la amplificación de los armónicos

En la figura 3.19 se muestra el voltaje al neutro y corriente medida que alimentan a una carga no-lineal. En la figura 3.19 (a) presenta las mediciones efectuadas cuando se conectó un banco de capacitores mientras en la figura 43.19 (b) muestra las mediciones al conectar un filtro.

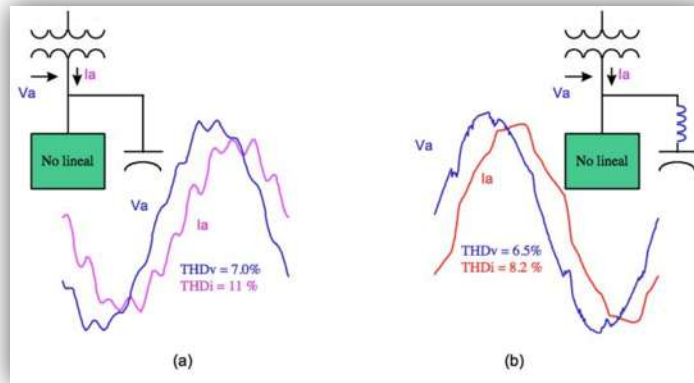


Figura 3.19 Efecto de conectar filtro de rechazo en la distorsión de voltaje y corriente

B. Evitan que se presente el fenómeno de resonancia serie

Si el voltaje de alimentación de la compañía suministradora presenta distorsión (V_H) y la combinación serie de la inductancia del sistema y transformador (V_L) con el capacitor (C) presenta una impedancia baja a una de las armónicas existentes en el voltaje primario, se presentarán corrientes elevadas que se traducirán en una elevada distorsión en el voltaje. La figura 3.20 (a) muestra el voltaje registrado previo la conexión del capacitor. La figura 3.20 (b) muestra el voltaje y la corriente cuando se conecta solo el capacitor. En la figura 3.20 (c) se muestra el efecto de agregar un reactor o bobina serie para disminuir la distorsión de corriente y voltaje.

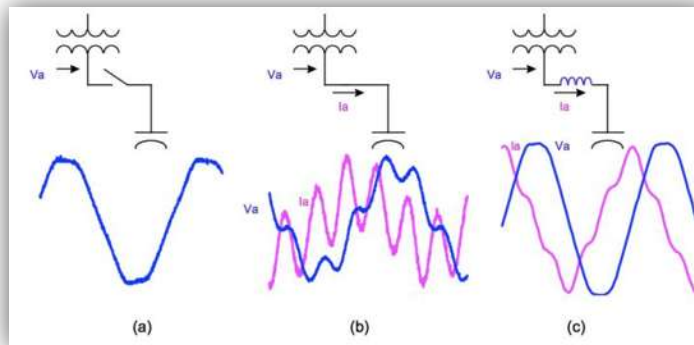


Figura 3.20 Efecto de conectar filtro de armónicos en la distorsión de voltaje en capacitor

C. Limitan la corriente de energización de capacitores

La conexión de un banco de capacitores trae como consecuencia una corriente de energización elevada, situación que se ve agravada cuando se conecta un banco que se encuentra eléctricamente cerca de uno o más bancos ya energizados. Esta corriente elevada, la cual puede alcanzar niveles de corto circuito, resulta peligrosa. El agregar reactores o bobinas en serie con los bancos de capacitores reduce considerablemente estas sobretensiones.

La figura 3.21 muestra las corrientes de energización de dos bancos de capacitores en paralelo los cuales se energizan uno después del otro. La figura 3.21 (A) muestra la disminución en la corriente de energización al agregar el reactor. En la figura 3.21 (B) se muestra la corriente del segundo banco y se observa que la corriente de esta se limita cuando se tiene reactores.

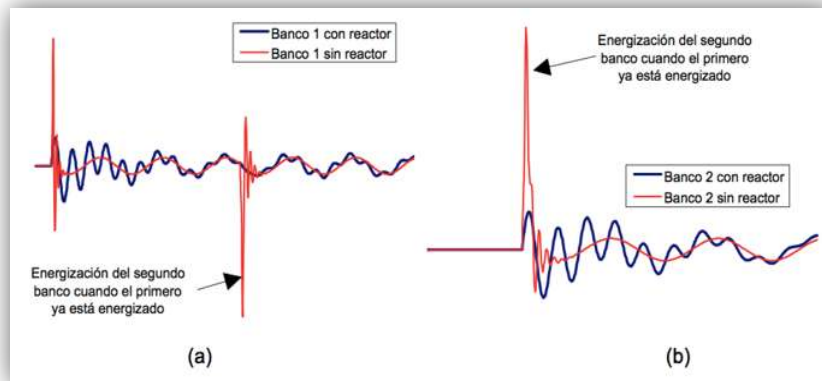


Figura 3.21 Efectos de bobina o reactor en la corriente de energización de los bancos de capacitores

D. Atenúan los disturbios en el voltaje ocasionados por la conexión de capacitores

En la figura 3.22 se ilustra la comparación de dos bancos de capacitores los cuales son energizados uno después del otro. La figura 3.22 (a) corresponde a la situación en donde no se tiene reactores o bobinas conectadas en serie con el capacitor y en la figura 3.22 (b) corresponde a la situación en la cual se agregó un reactor o bobina al banco de capacitores.

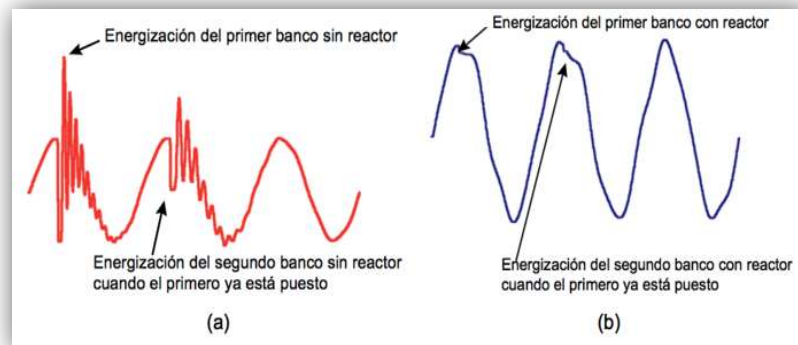


Figura 3.22 Efecto de bobina o reactor en los sobre voltajes ocasionados por la conexión del banco de capacitores

Capítulo 4.- Caso de Estudio

El objetivo de una empresa suministradora de energía eléctrica es generar una onda de voltaje casi perfectamente sinusoidal. En la mayoría de las regiones el voltaje de los sistemas de distribución tiene una pequeña distorsión. Sin embargo, al acercarse cada vez más hacia las cargas, la distorsión de voltaje aumenta de forma notoria. Los armónicos generados por una industria pueden propagarse a la red de suministro eléctrico. Esto produce una distorsión que afecta la calidad del servicio de todos los clientes conectados al mismo conductor de alimentación. En la figura 4.1 se muestra un pequeño sistema eléctrico trifásico, en donde están conectados cuatro cargas A1, A2, A3 y A4

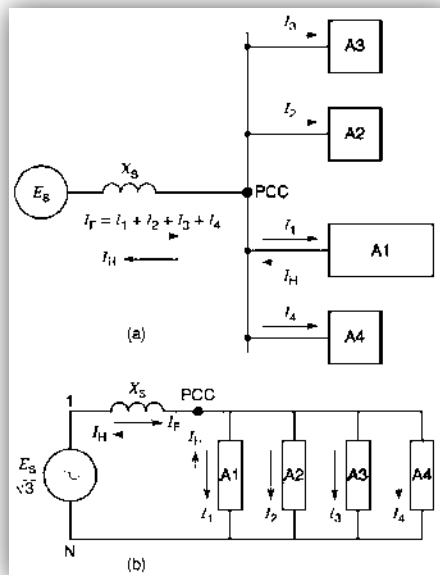


Figura 4.1 (a) Punto de acoplamiento común (PCC). (b) Voltajes armónicos creados en el PCCa causa de las corrientes armónicas generadas por la carga A1

A1 representa una carga industrial (carga no-lineal), A2, A3 y A4 son cargas de casa habitación. La carga A1 inyecta armónicos a la fuente de tensión, en consecuencia, la corriente armónica I_H generada por A1 afecta la calidad del voltaje suministrado a todos los clientes conectados al mismo punto de acoplamiento común. [13]

Mencionado lo anterior, es muy probable que en la mayoría de los usuarios que consumen energía eléctrica presenten problemas de naturaleza armónica, ya que armónicos=pérdidas de energía, lo deseable es que no exista perturbaciones armónicas. Ahora bien, los usuarios no conocen que tipo de cargas están conectadas a su mismo punto de acoplamiento común, pero si pueden conocer si tienen este tipo de problema, y en caso de presentarlo, saber a qué grado y lo más importante poder mitigar los armónicos a los niveles más bajos posibles.

Para demostrar que este problema es cada vez más frecuente en cualquier red eléctrica convencional, y como se puede ver magnificado en presencia de una carga capacitiva como las utilizadas para mejorar el f.p con una carga predominantemente inductiva (motores) aun cuando la distorsión en la señal de voltaje sea muy pequeña. Se presenta un caso de estudio en un toma corriente (contacto) convencional (consola de experimentos del laboratorio de ingeniería eléctrica de 120v 60hz 5A) que presenta sin carga un THD de 1.4%.

No obstante, al conectar una carga capacitiva se puede ver como la corriente sufre una distorsión. Se realizan pruebas con cargas resistivas y también inductiva para comparar y mostrar que en estos dos últimos la distorsión en la corriente es muy pequeña, prácticamente no existe. Se simula todo el sistema completo en Simulink de Matlab® para probar que dicha distorsión en la corriente parte de la pequeña distorsión de la fuente de voltaje, es decir se magnifica la distorsión armónica. Se simula además el sistema con filtros sintonizados como una medida de corrección.

4.1.- Experimento de investigación en sistema físico y Simulink

El experimento consiste en usar una fuente de 120v a 60hz, y conectar 3 cargas de naturalezas resistivas, inductivas y capacitivas individualmente y mediante un analizador de armónicos para redes medir el contenido armónico indicar el porcentaje y el orden de armónicos presentes. En la figura 4.2 se muestra la configuración del circuito que se realiza en ambos entornos (físico y digital)

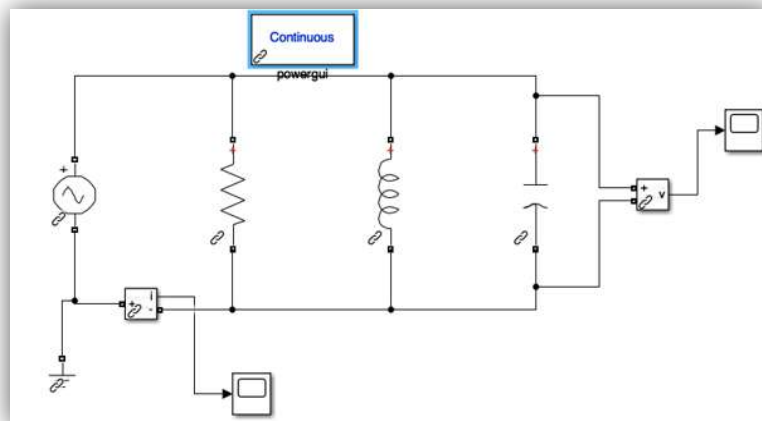


Figura 4.2 Circuito modelo para el armado de los experimentos en Simulink y en el laboratorio

4.1.1.- Experimento Resistivo físico y en Simulink

Se arma un circuito puramente resistivo usando una toma corriente convencional como fuente sinusoidal aparentemente pura y se conecta a una resistencia de 600 ohm. Del circuito resistivo se tomaron diversas mediciones de voltaje y corriente de distorsión de onda sinusoidal, THD (distorsión armónica total).

En la figura 4.3 se muestra el circuito resistivo en simulink, se usan diversos bloques de medición; corriente, voltaje, osciloscopio y THD. La corriente rms es de 0.2011A, el voltaje rms es de 120.1V, y el THD de corriente es de $1.48 \times 10^{-8}\%$, prácticamente nulo

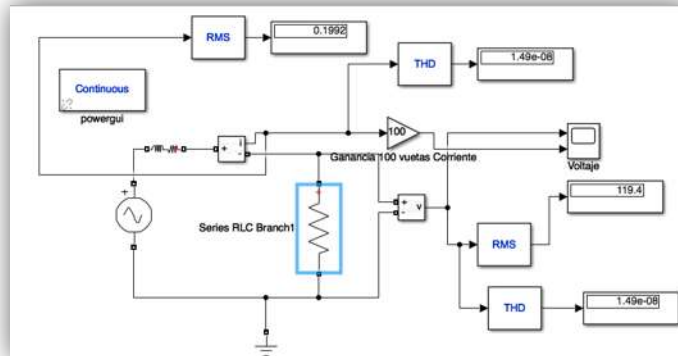


Figura 4.3 Circuito puramente resistivo en Simulink

En la figura 4.4 se muestra el circuito resistivo armado en el laboratorio de eléctrica (físico) usando un módulo de resistencias. Por medio de un analizador de redes y un multímetro, se tomaron mediciones de corriente, voltaje, forma de onda y THD.



Figura 4.4 Configuración de circuito puramente resistivo en el laboratorio de eléctrica

En la figura 4.5 se muestra las ondas sinusoidales de corriente y voltaje obtenidas del circuito resistivo en Simulink, en el que se aprecia no haber distorsión alguna en ninguna de las dos ondas, son prácticamente puras y se encuentran en fase. Por tanto, no presentan contenido armónico.

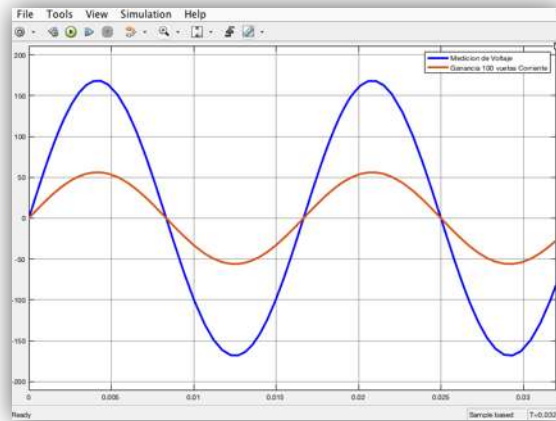


Figura 4.5 Formas sinusoidales del circuito resistivo en Simulink. (a) Corriente señal roja. (b) Voltaje señal azul

En la Figura 4.6 se muestran las ondas sinusoidales de corriente y voltaje medidas del circuito resistivo en el laboratorio de eléctrica, en las que, se observa que existe distorsión armónica mínima en las ondas sinusoidales, las cuales se encuentran en fase.



Figura 4.6 Formas sinusoidales corriente y voltaje del circuito resistivo en el laboratorio de eléctrica

En la figura 4.7 se muestra mediante un analizador de redes el porcentaje de contenido THD de voltaje presente en el circuito resistivo, medido en el laboratorio de eléctrica. Se puede apreciar que arroja un nivel relativamente bajo, de 1.6% THD, la cual la conforman la orden de armónica 0 que proviene de la corriente directa y también del orden 3.

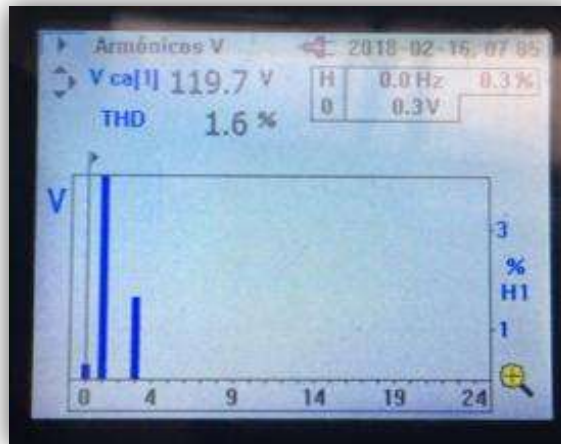


Figura 4.7 Contenido THD en el voltaje circuito resistivo tomado del laboratorio de eléctrica, medido por un analizador de armónicos

En la figura 4.8 se muestra mediante un analizador de redes el porcentaje de contenido de THD de corriente presente en el circuito resistivo, medido en el laboratorio de eléctrica. Se puede apreciar que arroja un nivel relativamente bajo, de 2.1% THD en el circuito, la cual la conforman del orden armónico 1(fundamental), 3, 5, 7, 9 y 11 (h).

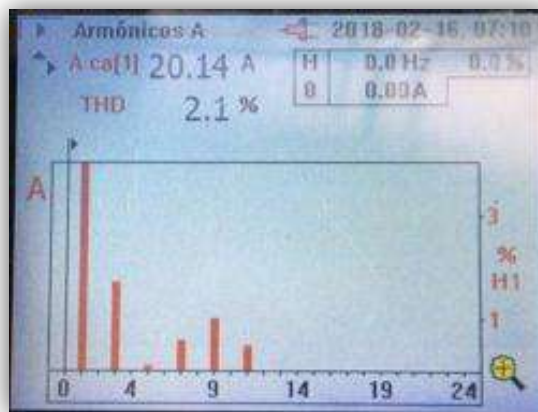


Figura 4.8 Contenido THD en la corriente circuito resistivo tomado del laboratorio de eléctrica, medido por un analizador de armónicos

En el circuito resistivo se tiene que tanto en Simulink como en el laboratorio de eléctrica la onda es sinusoidal, sin embargo, en la medición de laboratorio posee una distorsión mínima de 2.1% de distorsión en la corriente y un 1.6% de distorsión en el voltaje el cual quiere decir que hay presencia de armónicos en el sistema físico. A continuación, se muestran unas tablas donde se muestran las lecturas medidas en el laboratorio de eléctrica demostrando los valores individuales de cada armónico, medidos por el analizador de redes. El THD de cada armónico tanto en corriente como voltaje del circuito puramente resistivo se mencionan en las Tablas 4.1 y 4.2

En donde el $V_{Total}=119.5v$ y el $THD_{Voltaje}=1.4\%$

Armónica	h= 0	h= 1	h= 2	h= 3	h= 4	h= 5	h= 6	h= 7	h= 8
Porcentaje	0.3%	100%	0%	1.4%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0.3v	119.5v	0v	1.7v	0v	0v	0v	0v	0v

Armónica	h= 9	h= 10	h= 11	h= 12	h= 13	h= 14	h= 15	h= 16	h= 17
Porcentaje	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v

Tabla 4.1 Porcentaje armónico de voltaje de circuito resistivo de laboratorio de eléctrica tomado por analizador de armónicos

En donde el $I_{Total}=19.85A$ y $THD_{Corriente}=2.1\%$

Armónica	h= 0	h= 1	h= 2	h= 3	h= 4	h= 5	h= 6	h= 7	h= 8
Porcentaje	0.2%	100%	0%	1.7%	0%	0%	0%	0%	0%
Corriente	0.01A	19.7A	0A	0.33A	0A	0A	0A	0A	0A

Armónica	h= 9	h= 10	h= 11	h= 12	h= 13	h= 14	h= 15	h= 16	h= 17
Porcentaje	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Corriente	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A

Tabla 4.2 Porcentaje armónico de Corriente de circuito resistivo de laboratorio de eléctrica tomado por el analizador de armónicos

4.1.2 Pruebas en circuito puramente Inductivo

Se implemento un circuito puramente inductivo usando una toma corriente convencional como fuente sinusoidal aparentemente pura y se conecta a una bobina de 1.6H. Del circuito inductivo se tomaron diversas mediciones de voltaje y corriente; distorsión de onda sinusoidal, THD (distorsión armónica total).

A continuación, se muestran las mediciones capturadas en Simulink y en el laboratorio. En la figura 4.9 se muestra el circuito inductivo implementado en Simulink, se usan diversos bloques de medición; corriente, voltaje, forma de onda y THD.

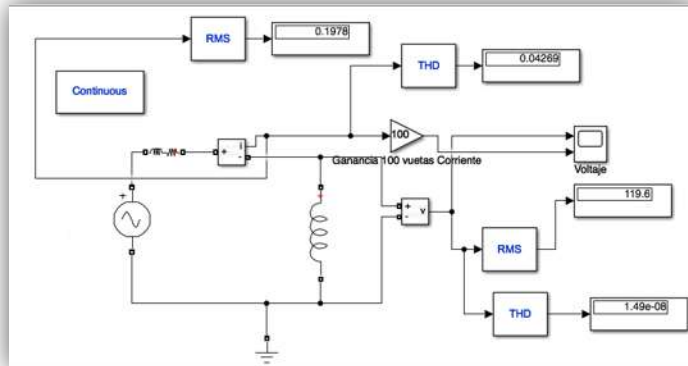


Figura 4.9 Configuración de circuito puramente inductivo en Simulink

La corriente rms es de 0.2008A, el voltaje rms es de 118.7V, y el THD de corriente es de 1.49e-08%, prácticamente nulo y el THD de voltaje es de 0.109% donde también es prácticamente nula la distorsión. En la figura 4.10 se muestra el circuito inductivo implementado en el laboratorio de eléctrica, usando un módulo de inductancias.



Figura 4.10 Configuración de circuito puramente inductivo en el laboratorio de eléctrica

Por medio de un analizador de redes y un multímetro, se tomaron lecturas de corriente, voltaje forma de onda y THD. En la figura 4.11 se muestra las ondas sinusoidales de corriente y voltaje medidas del circuito inductivo en Simulink, donde se aprecia no haber distorsión alguna, en ninguna de las dos ondas, son prácticamente puras y se encuentran en fase. Por tanto, no presentan contenido armónico.

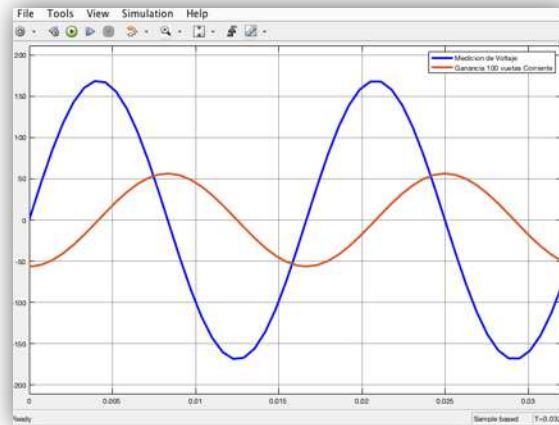


Figura 4.11 Formas sinusoidales del circuito inductivo en Simulink. (a) Corriente señal roja. (b) Voltaje señal azul

En la Figura 4.12 se muestran las ondas sinusoidales de corriente y voltaje medida del circuito inductivo de laboratorio de eléctrica, donde no presentan distorsion alguna en ambas señales sinusoidales y se encuentran perfectamente desfasadas por 90 grados. Por tanto, no presentan contenido armónico.



Figura 4.12 Forma sinusoidal corriente y voltaje del circuito inductivo en el laboratorio de eléctrica

En la figura 4.13 se muestra mediante un analizador de redes, el porcentaje de contenido THD de voltaje presente en el circuito inductivo, en el laboratorio de eléctrica. Se observa un nivel relativamente bajo de 1.4% THD de voltaje en el circuito, está conformado por el orden de armónicas 0th, 1th (fundamental), y 3th.

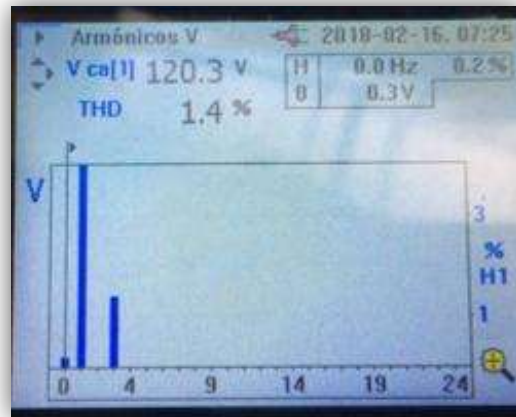


Figura 4.13 Contenido THD en el voltaje circuito inductivo tomado del laboratorio de eléctrica, medido por un analizador de armónicos

En la figura 4.14 se muestra mediante un analizador de redes el porcentaje de contenido de THD de corriente presente en el circuito inductivo, medido en el laboratorio de eléctrica. Se observa un nivel de corriente THD bajo de 0.8% en el circuito, la cual la conforman del orden armónico 0, 1 (fundamental) y 3.



Figura 4.14 Contenido THD en la corriente de circuito inductivo tomado del laboratorio de eléctrica, medida por un analizador de armónicos

En el circuito inductivo se tiene que las pruebas tanto en Simulink como en el laboratorio de eléctrica, la onda es sinusoidal, sin embargo, en la medición del laboratorio posee una distorsión mínima de 0.8% en la corriente y una distorsión de 1.4% en el voltaje, lo cual significa que hay presencia de armónicos en el sistema físico. A continuación, se muestran una tabla con lecturas en el laboratorio de eléctrica del circuito inductivo, demostrando los valores individuales de cada armónico medido por el analizador de redes. El THD de cada armónico tanto en corriente como voltaje del circuito puramente inductivo, se muestran en las tablas 4.3 y 4.4

En donde el $V_{Total}=119.9v$ y el $THD_{Voltaje}=1\%$

Armónica	h= 0	h= 1	h= 2	h= 3	h= 4	h= 5	h= 6	h= 7	h= 8
Porcentaje	0.3%	100%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0.3v	119.8v	0v	0.7v	0v	0v	0v	0v	0v

Armónica	h= 9	h= 10	h= 11	h= 12	h= 13	h= 14	h= 15	h= 16	h= 17
Porcentaje	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v

Tabla 4.3 Porcentaje armónico de voltaje del circuito inductivo de laboratorio de eléctrica tomado por analizador de armónicos

En donde el $I_{Total}=21.19A$ y $THD_{Corriente}=0.8\%$

Armónica	h=0	h=1	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8
Porcentaje	0.6%	100%	0%	0.6%	0%	0%	0%	0%	0%
Corriente	0.16A	21.14A	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A

Armónica	h= 9	h= 10	h= 11	h= 12	h= 13	h= 14	h= 15	h= 16	h= 17
Porcentaje	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Corriente	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A	0A

Tabla 4.4 Porcentaje armónico de corriente de circuito inductivo de laboratorio de eléctrica tomado por analizador de armónicos

4.1.3 Pruebas en circuito puramente Capacitivo

Se implemento un circuito puramente capacitivo como se muestra en la figura 4.15 usando un toma corriente convencional como fuente sinusoidal aparentemente pura y se conecta un capacitor de $8.8\mu F$. Del circuito inductivo se tomaron diversas mediciones tanto de voltaje como corriente; distorsión de onda sinusoidal, THD (distorsión armónica total) A continuación, se muestran las mediciones capturadas en Simulink y en el laboratorio.

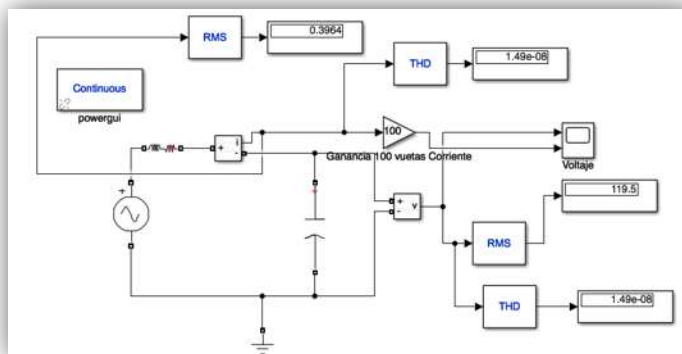


Figura 4.15 Configuración de circuito puramente capacitivo en Simulink

En la figura 4.15 se muestra el circuito capacitivo armado en Simulink, se usan diversos bloques de medición; corriente, voltaje, formas de onda y THD. La corriente rms es de 0.3964A, el voltaje rms es de 119.5V, y el THD de corriente es de 1.49e-08% prácticamente nulo y el THD de voltaje es de 1.49e-08% también prácticamente nula la distorsión. En la figura 4.16 se muestra el circuito capacitivo implementado en el laboratorio de eléctrica, usando un módulo de capacitores.

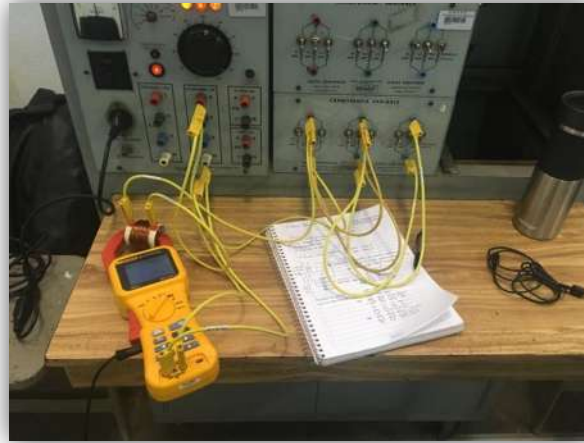


Figura 4.16 Configuración de circuito puramente capacitivo en el laboratorio de eléctrica

Por medio de un analizador de redes y un multímetro se tomaron mediciones de corrientes, voltaje, formas de onda y THD. En la figura 4.17 se muestra las ondas sinusoidales de corriente y voltaje medidas del circuito capacitivo en Simulink, donde se aprecia no haber distorsión de onda alguna, en ninguna de las dos ondas, son prácticamente puras y se encuentran perfectamente desfasadas 90 grados. Por tanto, no presentan contenido armónico.

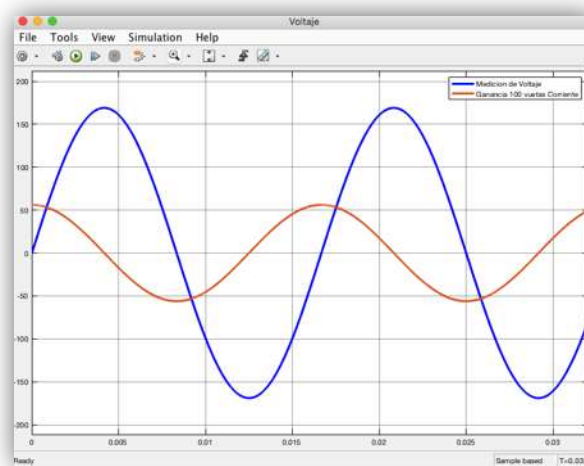


Figura 4.17 Formas sinusoidales del circuito capacitivo en Simulink. (a) Corriente señal roja. (b) Voltaje señal azul

En la imagen 4.18 se muestran las ondas sinusoidales de corriente y voltaje tomado del circuito capacitivo del laboratorio de eléctrica, donde se puede observar que la onda de voltaje está perfectamente sinusoidal mientras que de manera notoria existe un alto grado de distorsión en la onda sinusoidal de corriente, ambas ondas se encuentran en desfase de 90 grados.



Figura 4.18 Forma sinusoidales de corriente y voltaje del circuito capacitivo en el laboratorio de eléctrica

En la figura 4.19 se muestra mediante un analizador de redes, el porcentaje de contenido THD de voltaje presente en el circuito capacitivo, medido en el laboratorio de eléctrica. Se observa un nivel relativamente bajo de 0.6% THD de voltaje en el circuito, el cual está conformado por el orden armónico de; 0 (corriente directa), 1(fundamental) y 3.

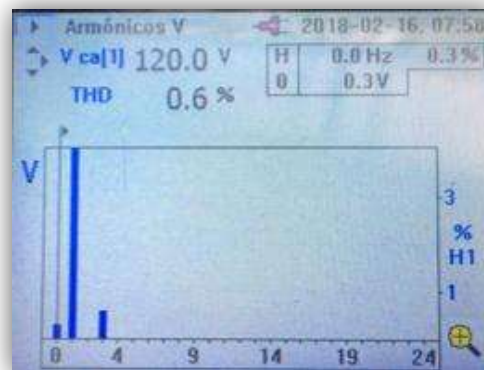


Figura 4.19 Contenido THD en el voltaje circuito capacitivo tomado del laboratorio de eléctrica, medido por un analizador de armónicos

En la figura 4.20 se muestra mediante un analizador de redes el porcentaje de contenido de THD de corriente presente en el circuito capacitivo, medido en el laboratorio de eléctrica.



Figura 4.20 Contenido THD en la corriente de circuito capacitivo tomado del laboratorio de eléctrica, medida por un analizador de armónicas

El contenido armónico del circuito capacitivo en la corriente es muy elevado posee una distorsión armónica de 36.6% donde el orden de las armónicas que tienen alta distorsión son los armónicos triplens. A continuación, se muestran las tablas con lecturas medidas en el laboratorio de eléctrica del circuito capacitivo, mostrando los valores individuales de cada armónico medido por el analizador de redes. El THD de cada armónico tanto en corriente como voltaje del circuito puramente capacitivo, se muestran en las tablas 4.5 y 4.6

En donde el $V_{Total}=119.8v$ y el $THD_{Voltaje}=1.0\%$

Armónica	h=0	h=1	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8
Porcentaje	0.5%	100%	0%	0.6%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0.4v	119.7v	0v	0.7v	0v	0v	0v	0v	0v

Armónica	h=9	h=10	h=11	h=12	h=13	h=14	h=15	h=16	h=17
Porcentaje	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Voltaje	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v	0v

Tabla 4.5 Porcentaje armónico de voltaje del circuito capacitivo de laboratorio de eléctrica tomado por analizador de armónicos

En donde el $I_{Total}=43.4A$ y $THD_{Corriente}=39.4\%$

Armónica	h=0	h=1	h=2	h=3	h=4	h=5	h=6	h=7	h=8
Porcentaje	0.0%	100%	0%	4%	0%	2.2%	0%	0.8%	0%
Corriente	0.0A	75A	0A	2A	0A	0.9A	0A	0.6A	0A

Armónica	h=9	h=10	h=11	h=12	h=13	h=14	h=15	h=16	h=17
Porcentaje	13%	0%	6.2%	0%	10%	0%	12.3%	0%	12%
Corriente	4.2A	0A	2.7A	0A	4.2A	0A	5.4A	0A	5.3A

Tabla 4.6 Porcentaje armónico de corriente del circuito capacitivo de laboratorio de eléctrica tomado por analizador de armónicos

4.2.- Diseño e Implementación de filtros Sintonizados

El utilizar filtros R-L-C para absorber las corrientes armónicas producidas por un equipo, resulta ser la solución técnica más completa, pero a la vez la más costosa.

El dimensionamiento de filtro puede ser tal que los condensadores del filtro sirvan también como parte de la composición del factor de potencia. No existe realmente reglas deterministas únicas para el diseño de filtros y es en gran parte la experiencia y el ensayo lo que ofrece un mejor resultado.

4.2.1.- Prueba de Filtros en un circuito resonante en Simulink

En los capítulos anteriores se menciona los fundamentos y datos relevantes para llegar a diseñar filtros para reducir el nivel armónico según las características del sistema eléctrico y sus padecimientos. En el capítulo 4.1 se mostraron pruebas realizadas de manera física en un laboratorio y en Simulink, inductivas resistivas y capacitivas. En el caso de las pruebas resistivas e inductivas los resultados fueron prácticamente idénticos, en ambas modalidades se obtienen las mismas características del sistema y niveles nulos de distorsión. En cambio, en las pruebas capacitivas los resultados comparados fueron muy distintos, en Simulink el circuito no presentaba distorsión THD, mientras que en el sistema físico tiene presencia de distorsión THD del 36%. Si bien se demuestra que el sistema eléctrico está contaminado por armónicos y solo hace falta que se agregue un solo capacitor para que entre en resonancia con alguna frecuencia armónica y magnifique la señal.

En este trabajo de investigación, se plantea una solución alternativa para mitigar lo más posible, los niveles armónicos por medio de filtros.

Retomando nuevamente el caso del circuito físico capacitivo, llevándolo al entorno de Simulink, haciendo el mismo experimento; misma configuración, dispositivos y naturalmente valores del capacitor, se implementan fuentes de voltaje múltiplos a la frecuencia fundamental (60hz) con voltajes diversos, las cuales representan los armónicos en el sistema, con la finalidad de llevar el caso real con sus perturbaciones y sus armónicos, a un entorno digital en Simulink.

Para inyectar armónicos en simulación en nuestro caso de estudio, se introduce una serie de fuentes de voltaje, múltiplos a la señal fundamental (60Hz) con el propósito de distorsionar la forma de onda del circuito capacitivo tal y como lo presenta el circuito físico. En la figura 4.21 se muestra la configuración del circuito capacitivo implementado en Simulink.

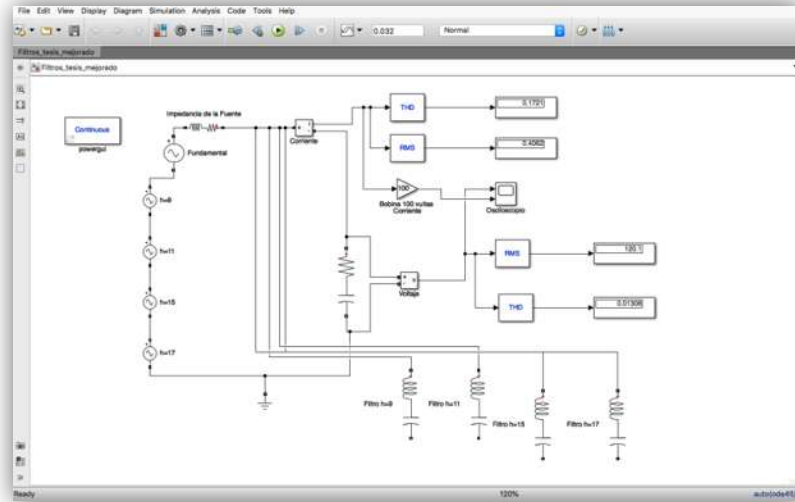


Figura 4.21 Circuito capacitivo con presencia de armónicos en Simulink

En la tabla 4.7 se muestra el orden de los armónicos introducidos en el circuito inductivo, con sus respectivos valores en voltaje y porcentajes THD.

Armónico	h= 1	h= 9	h= 11	h= 15	h= 17
Porcentaje THD	100%	2.35%	0.95%	1.05%	0.46%
Voltaje	120v	1.41v	0.57v	0.63v	0.28v

Tabla 4.7 Armónicos con su Amplitud del voltaje y porcentaje THD en circuito inductivo

En las figuras 4.22 de se muestra las señales de voltaje y corriente del circuito inductivo, donde ambas señales sinusoidales poseen un alto contenido armónico y una distorsión THD considerable.

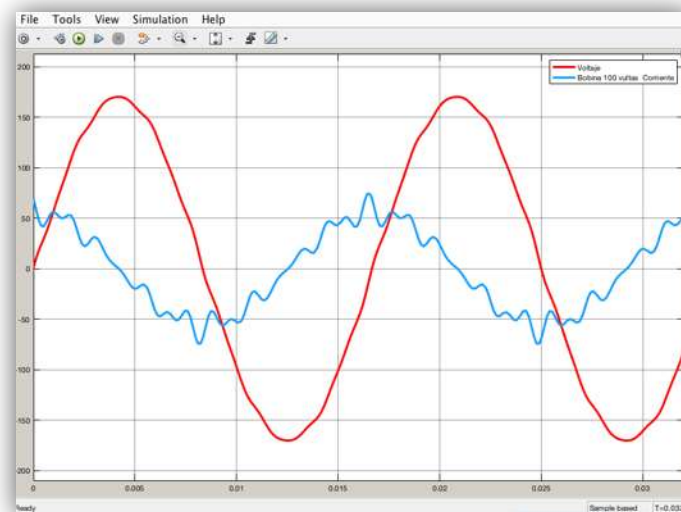


Figura 4.22 Señales sinusoidales de voltaje en el circuito capacitivo

El orden de cada armónico, incluyendo su amplitud y porcentaje THD son 4 armónicos presentes, así que se diseñaron 4 filtros, cada uno para filtrar a su respectivo armónico sintonizados a la frecuencia de cada uno.

En la figura 4.24 se muestra el circuito capacitivo con los filtros conectados al circuito.

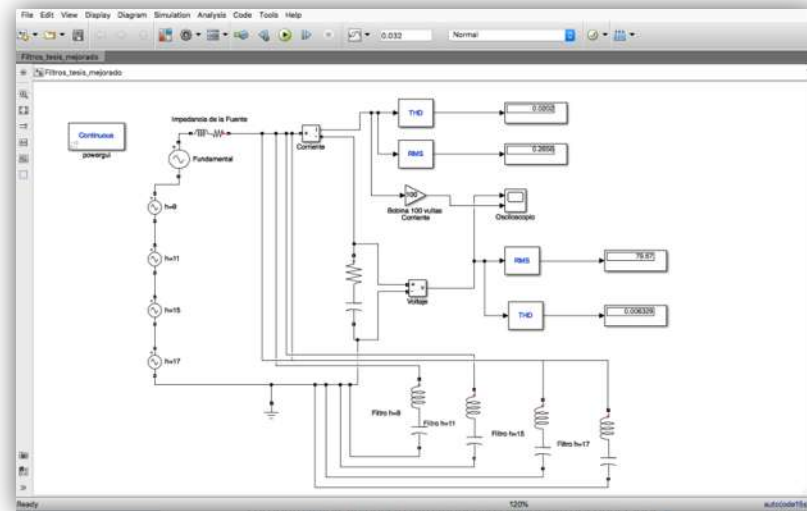


Figura 4.24 Conexión de filtros al circuito capacitivo

Ya que están conectados los filtros al circuito, se inicia la simulación y se toman mediciones en corriente y voltaje en las figuras 4.25 & 4.26 se muestran los resultados, las señales de corriente y voltaje del circuito inductivo con los filtros conectados.

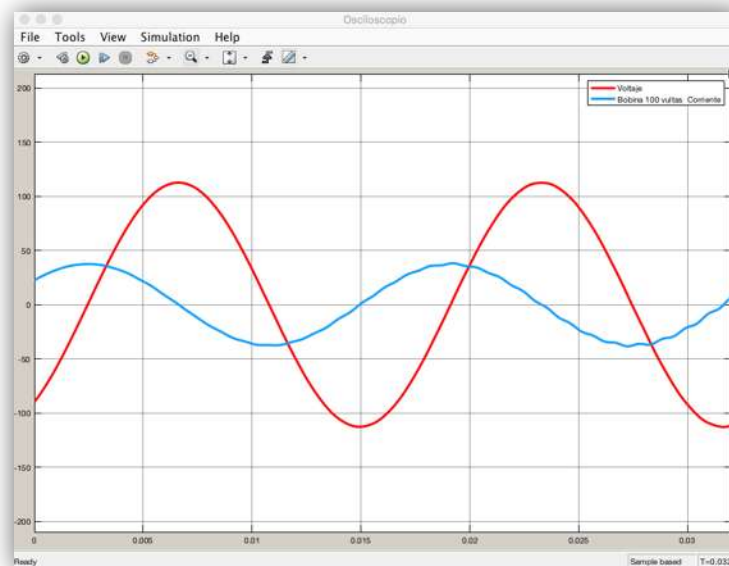


Figura 4.25 Señal sinusoidal de voltaje en el circuito capacitivo con filtros conectados

Los resultados son exitosos, las señales han adoptado una forma de onda muy parecida a una señal puramente sinusoidal prácticamente perfecta. Cada filtro diseñado para determinado armónico realiza su propósito para el que fue diseñado, filtrando los armónicos siendo un conductor de baja impedancia para la corriente resonante, llevándolos a tierra física. Removiendo de manera eficaz las perturbaciones que deformaban las señales de corriente y voltaje fundamentales de 60Hz.

Capítulo 5.- Conclusiones y Recomendaciones

5.1.- Conclusiones

El tema referente a la calidad de la energía es una rama del campo de la ingeniería eléctrica extenso, y su importancia en la actualidad en México no es la adecuada, las industrias y grandes inmuebles que son grandes consumidores de energía eléctrica, siguen siendo un tema sin ser seriamente considerado como tal.

Se realizan lecturas en una toma de corriente convencional de 120v a 60Hz y se comprueba que existen armónicos en el sistema eléctrico provocando por el mismo consumidor o cargas vecinas, ya es alarmante y merecedor de dedicarle tiempo de estudio.

En este caso de estudio, se demuestra una de las tantas perturbaciones que afectan a la calidad del sistema eléctrico, los armónicos son el resultado de una mala planeación eléctrica, incremento de dispositivos conmutadores y sobre todo una infraestructura inestable a sus agravantes, diseñada sin considerar estas perturbaciones, es decir una sola señal fundamental dominante en el sistema eléctrico.

En este trabajo, en el experimento capacitivo se inyectaron 4 armónicos y se diseñaron 4 filtros, cada filtro para su respectivo armónico, pero en la práctica cada filtro tiene costo monetario, por lo tanto, se concluye este trabajo argumentando que a medida que el usuario demande una mejor calidad de energía eléctrica en suministro y su red eléctrica, su inversión monetaria se verá reflejada. Con las mediciones anteriores se demuestra que existe contenido armónico en el sistema eléctrico (en este caso un toma corriente convencional) demostrando que un solo capacitor de solo 8.8μ , magnificó las señales armónicas en el sistema.

Esto lleva a la conclusión que; donde quiera que se utilicen capacitores en especial para corrección de factor de potencia, habrá una frecuencia donde el circuito entrará en resonancia. La presencia de capacitores para compensación del factor de potencia puede originar resonancias, las cuales a su vez producen corrientes o voltajes excesivos que afectan los equipos del sistema.

En base a este caso de estudio, en la actualidad no debiera de compensarse la potencia reactiva inductiva solo con capacitores en espera de mejorar el f.p. o aumentar el voltaje. Lo más adecuado es hacerlo con filtros sintonizados para evitar magnificar la corriente con armónicos.

La Calidad de la energía no es un tema que deba tomarse a la ligera, ya que conlleva grandes beneficios no solo para el consumidor, sino para la misma empresa suministradora.

5.2.- Recomendaciones

La electrónica de potencia evoluciona a gran escala, incluyendo la automatización y fuentes de generación renovables. Estos avances benefician la producción de grandes empresas consumidoras de energía eléctrica haciéndolos más eficaces y rápidos, pero al mismo tiempo, perjudica la calidad con la que es aprovechada la energía eléctrica sobre todo si se utilizan en el sistema eléctrico capacitores para compensación.

Es conveniente elaborar un modelo lo más detallado posible de cada sistema eléctrico y analizar su comportamiento para lograr su mejor operación de este y hacerlo más eficiente desde el punto de vista técnico y económico.

La respuesta de un sistema eléctrico a las perturbaciones eléctricas es tan importante como sus causantes, la respuesta del sistema es de suma importancia el estudiarse y tener un buen sistema a tierra física. En caso que un sistema eléctrico tenga conectado un banco de capacitores, con la finalidad de corregir un factor de potencia, es muy probable que lejos de estar siendo corregido, está siendo atacado por armónicos que entran en resonancia con los capacitores se magnifican con señales de corriente dañando el sistema eléctrico.

El diseño de filtros sintonizados es una alternativa confiable y eficaz, se debe considerar que no todos los sistemas eléctricos tienen una misma respuesta y comportamiento a las perturbaciones eléctricas. Se requiere un estudio minucioso y detallado del sistema eléctrico, así como el tipo de sus perturbaciones. Una vez teniendo los datos de sistema y sus perturbaciones, diseñar filtros en caso necesario.

Desafortunadamente el diseño de los filtros, así como su construcción en material y estructura tiene su costo monetario.

Bibliografía

- [1] ELSPEC, «Generalidades sobre Corrientes Armonicas en Sistemas de Potencia con CFP con Capacitores,» [En línea]. Available: <https://bit.ly/2qPxogB>.
- [2] L. G. E. Mendoza, «Efectos de la instalacion de bancos de capacitores en sistemas industriales con presencia de armonicas,» [En línea]. Available: <https://bit.ly/2QGezl9>.
- [3] CFE Gerardo Manuel Robledo Leal, «Calidad de la Energia Electrica: Camino a la Normalizacion,» *Simposio de Metrologia*, p. 7, 22 al 24 Octubre Santiago de Queretaro, Mexico 2008.
- [4] J. Seymour y T. H. , «Los siete tipos de problemas en el suministro electrico,» 2005. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2wUPO2i>.
- [5] IEEE, « 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,» Junio 2009.
- [6] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. S. y H. B. Wayne, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2004.
- [7] KOBAN K, «Calidad de la Energía Manual de uso KMI 2092 POWER-HARMONIC ANALYSER,» [En línea]. Available: <https://bit.ly/2zSNdaK>.
- [8] IEEE, 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993.
- [9] O. Peña, «Estudio y Simulación de las Configuraciones de transformadores para el Mejoramiento de la Calidad de Energía TECSUP,» 2 de enero de 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2RVncyO>.
- [10] G. E. Harper, *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, México: Limusa Noriega Editores.
- [11] I. P. Abril, «Cálculo de Parámetros de Filtros Pasivos de Armónicos,» Abril 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OIhLBf>.
- [12] J. A. Baez, A. L. J. d. I. R. y S. A. , «Ventajas del uso de Filtros para corrección de Factor de Potencia,» [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DmQHFB>.
- [13] T. Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, Pearson Prentice Hall, 2007.
- [14] J. G. Manuel, «Teoria y Diseño de Filtros de Armónicos en Sistemas Eléctricos,» 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2zZ2R4a>.
- [15] E. T. Ramírez, «Distorsion Armonica Automatizacion, Productividad y Calidad S.A de C.V,» Puebla. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2PvjTBu>.

Apéndices

Apéndice A

Análisis de Magnitud y Fase Armónico

La distorsión de una señal referente a una sinusoidal pura se expresa en términos de componentes armónicos o armónicos simplemente. En una señal eléctrica, un armónico es definido como el contenido de la señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia original del sistema.

Para determinar si hay una buena calidad en el servicio en el sistema de energía debe conocerse con certeza la magnitud y tipo de los armónicos presentes en la red y la fuente que los produce, con la finalidad determinar la medida remedial más apropiada. La serie de Fourier representa una alternativa para el análisis de la distorsión armónica de corriente y tensión. [9]

Fundamento Matemático

La teoría de Fourier establece que cualquier función continua y periódica puede ser representada por la suma de una componente sinusoidal fundamental más una serie de armónicos sinusoidales de orden superior con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental. Una señal cualquiera periódica puede expandirse en series de Fourier siempre que cumpla con estas condiciones: [14]

- I. Poseer un número finito de discontinuidades.
- II. Poseer un número finito de máximos y mínimos en un periodo.
- III. Que el resultado de integrar la función a lo largo de su periodo sea un valor finito.

En estas condiciones, una función $f(t)$ con periodo 2π se representa en series de Fourier de la siguiente manera:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t \quad (5.1)$$

Donde;

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (5.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (5.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (5.4)$$

Donde a_0 es la componente directa de la señal sinusoidal, mientras que a_n y b_n son los componentes de alterna de la señal.

En el caso de una función de tiempo $f(t)$, con periodo T , se obtiene;

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (5.5)$$

Donde ω_0 es la frecuencia angular.

Ahora para obtener el espectro de amplitud de $f(t)$ y el espectro de fase utilizamos las siguientes ecuaciones:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5.6)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (5.7)$$

Donde;

A_n = Espectro de amplitud

ϕ_n = Espectro de fase

El espectro de frecuencia de una señal consiste en las gráficas de amplitudes y de fases de sus armónicos, en comparación con las frecuencias. Tanto los espectros de amplitud como de fase forman el espectro de frecuencia $f(t)$.

Programa de Series de Fourier

Se entiende que es de suma importancia conocer el espectro tanto de la amplitud como la fase de cada orden armónico presente en la señal fundamental, ya que esos valores son la base y punto de partida para calcular los valores de los filtros sintonizados para mitigar el orden del armónico que causa problemas. En este trabajo se programó un código en Matlab, el fin de este programa es: dada una señal periódica sinusoidal, conocer y definir la

amplitud y la fase de cualquier orden armónico que se desee calcular. De esta forma el diseño de los filtros será más preciso y más eficaz. A continuación, se muestra el código del programa para calcular la fase y amplitud de cualquier orden de armónica:

```
clear;
clc;
H1=input('valor del armonico a estudiar'); %%Valor del armónico analizar
H=H1*10; %%Multiplicamos el armónico por 10
Inter=(360)/H; %%Intervalos de los ángulos a analizar
d1=[0:Inter:360]; %Vector de los ángulos
d=d1.*(pi/180);

nv=input('numero de angulos: ') %%creando el mismo numero de ángulos en
amplitudes
disp(' ')
vect=[ ];

for n=1:nv
    nv=input(['Amplitud del angulo(',num2str(n),'): ']);
    vect(n)=nv; %%mismo numero de ángulos y sus respectivas amplitudes
end

for i=0:length(vect) %%Calculo del amplitud por el seno del ángulo por H
    seno=(vect).*(sin(H1.*d));
end

for u=0:length(vect) %%Calculo del amplitud por el Coseno del ángulo por
H
    coseno=(vect).*(cos(H1.*d));
end

disp([d1',vect',seno',coseno'])

S1=sum(seno); %%Suma total de la columna de Grados
S2=sum(coseno); %%Suma total de la columna de Amplitudes

X1=(S1*Inter)/180; %%Calculando coeficiente de X
Y1=(S2*Inter)/180; %%Calculando coeficiente de Y
X=(X1)*(pi/180); %%Convirtiendo grados en radianes
Y=(Y1)*(pi/180); %%Convertir grados en radianes

Ah=sqrt((X1^2)+(Y1^2)); %%Magnitud del N armónico
Ang=atand(Y/X);%%Angulo del armónico
if X1<0
    Ang=Ang+180 %%Si el ángulo es negativo se sumarán 180 grados
end
disp([X1,Y1,Ah,Ang])
```

Con fines ilustrativos se usará como ejemplo un circuito eléctrico resistivo, el cual tendrá una señal fundamental con magnitud de $170V_{pico}$ un ángulo de 0 grados y una frecuencia de 60Hz (120v rms a 60hz), pero se le agregaran dos armónicos de orden 3 con una amplitud de $30V_{pico}$ con ángulo de fase de 30 grados y una frecuencia de 180Hz, y por último se

agrega un armónico de orden 5 con amplitud de onda de $15v_{pico}$ con un ángulo de 0 grados y una frecuencia de 300Hz. En la figura A.1 se muestra el circuito resistivo que se usa de ejemplo:

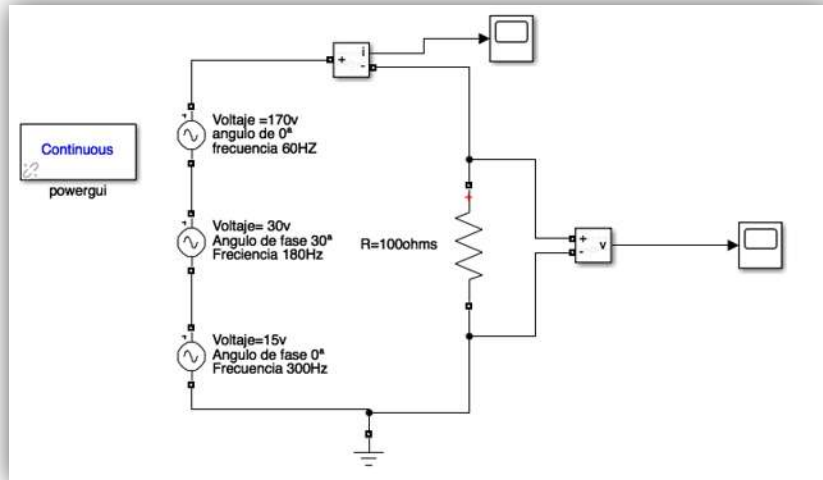


Figura A.1 Ejemplo de circuito resistivo para calcular armónico de orden 3 con el programa de Matlab

En este ejemplo, se sabe que el circuito contiene armónicos de orden 3 y 5, se saben sus magnitudes y fases de ángulo, así que el programa debe calcular los valores mismos que se les asigno al circuito en los armónicos.

En la figura A.2 se muestra la señal de voltaje en la resistencia y como se observa, contiene armónicos que distorsionan la señal fundamental, el osciloscopio se ajusta para que muestre un solo ciclo de la señal.

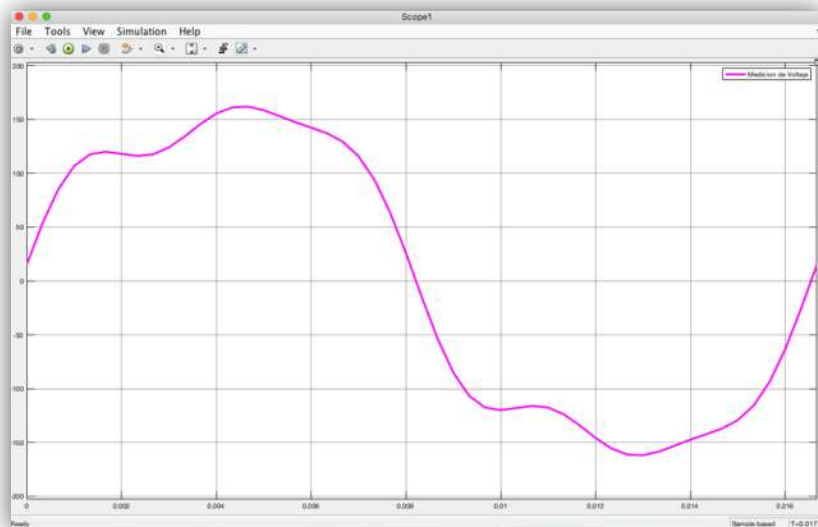


Figura A.2 Ejemplo de onda sinusoidal distorsionada del voltaje en el circuito resistivo

Para este ejemplo solo se calculará el armónico de orden 3, por tanto, el programa requiere determinada serie de valores que están en la imagen A.2 para calcular la magnitud y fase del armónico de orden 3. Los valores que se insertaran en el programa se muestran a en la tabla A.1

Angulo en grados	Magnitud en voltaje
0	0
12	75
24	109.9
36	119.94
48	116.82
60	119.945
72	135.53
84	153
96	161.732
108	158.613
120	149.52
132	140.52
144	128.676
156	101.234
168	50.71
180	-21.63
192	-74
204	-110.19
216	-119.55
228	-117.6
240	-120.174
252	-133.89
264	-151.98
276	-160.71
288	-158.2
300	-149.49
312	-140
324	-128
336	-101.46
348	-50.94
360	15.78

Tabla 5.1 Valores requeridos por el programa para calcular la amplitud y fase de ángulo del armónico de orden 3 del ejemplo resistivo

Tal como muestra la figura A.3 el programa efectivamente nos da como resultado una magnitud del armónico del orden 3 que tiene una magnitud de 29.5534v con un ángulo de fase de 30.8871 grados. A comparación de los valores que asignamos en el circuito; magnitud de 30v y ángulo de fase de 30 grados tenemos un error de relativamente bajo y prácticamente idénticos.

Por tanto, el programa es confiable para utilizarse en diseño de filtros para cualquier onda sinusoidal que se desee tomar como caso de estudio.

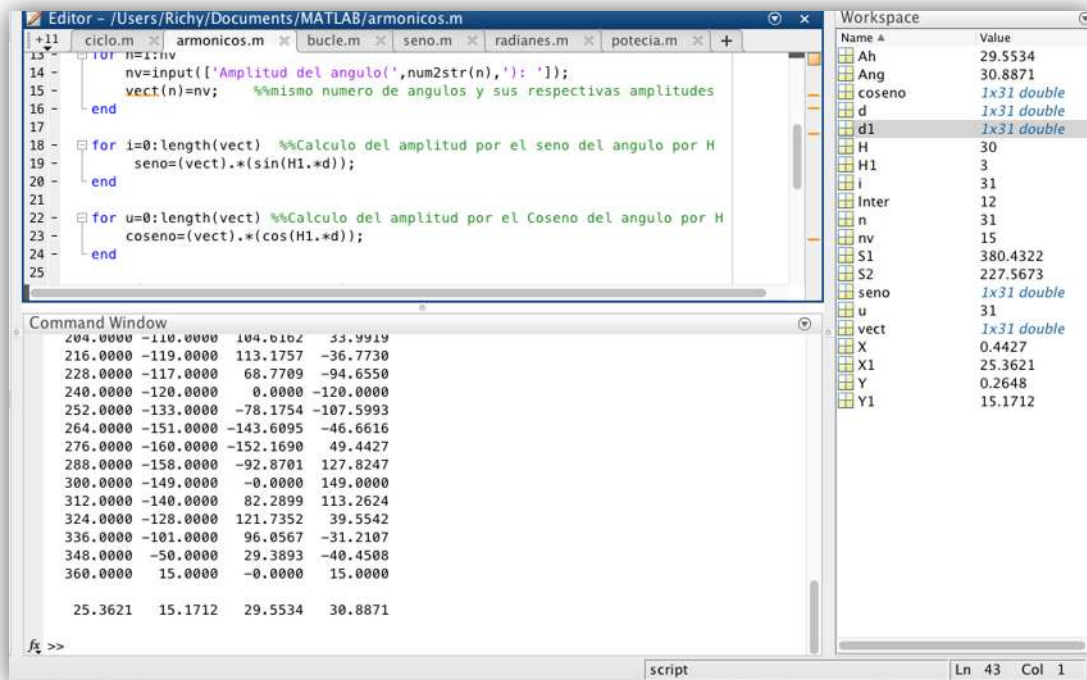


Figura A.3 Resultado de fase y ángulo del armónico de orden 3 por el programa de Matlab

Apéndice B

Niveles de Armónicas permitidos por las Normas

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía. Resulta especialmente delicada la relación usuario-compañía suministradora ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible. [15]

En México existe la especificación CFE L000-45 denominada *Perturbaciones en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica* concerniente a la distorsión armónica permisible.

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519 [8] *Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia* define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible.

En la tabla B.1 se muestra los límites de distorsión armónica en voltaje establecidos por IEEE 519

IEEE 519		
Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$V_n > 161 \text{ kV}$	1.0%	1.5%

Tabla B.1 Norma por la IEEE-519 límites de distorsión armónica de voltaje en porcentaje

En la figura B.2 se muestran los límites de distorsión armónica en el voltaje establecidos por CFE L000-45

CFE L0000-45		
Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	5.0%	8.0%
$1 < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 138 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$V_n > 138 \text{ kV}$	1.0%	1.5%

Tabla B.2 Norma por CFE L0000-45 limite de distorsión armónico de voltaje en porcentaje

En la figura B.3 se muestra los límites de distorsión armónica en corriente establecidos por IEEE 519

IEEE 519						
Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida						
I_{ca}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

Tabla B.3 Norma por la IEEE-519 límites de distorsión armónica de corriente en porcentaje

En la figura B.4 se muestra los límites de distorsión armónica en corriente establecidos por CFE L0000-45

CFE L0000-45						
Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida						
I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ Kv}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	6.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 50$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$I_{cc}/I_L \geq 50$	3.75%	3.0%	1.5%	1.15%	0.45%	0.22%

Tabla B.4 Norma por CFE L0000-45 límites de distorsión armónica de corriente en porcentaje

Apéndice C

Mediciones en transformadores del sistema eléctrico FIRA (Fideicomisos Instituidos En Relación Con La Agricultura)

La institución de FIRA es un banco nacionalmente reconocido, el cual tiene como carácter de entidades de la administración Pública Federal en los que funge como fideicomiso la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y como fiduciario el Banco de México, teniendo como función facilitar el acceso al crédito por medio de operaciones de crédito y descuento, así como el otorgamiento de garantías de crédito a proyectos relacionados con la agricultura, ganadería, avicultura, agroindustrial, pesca u otras actividades conexas a fines de realizarse en el medio rural.

Siendo Michoacán la sede de sus oficinas principales poseen una infraestructura muy extensa dando como resultado un campo amplio en el sistema eléctrico para satisfacer sus necesidades de energía eléctrica. Teniendo en las oficinas de Morelia transferencias de datos bancarios vitales poseen un sistema de respaldo eléctrico eficaz y eficiente en caso de una posible falla eléctrica.

Se realizaron diversas mediciones a transformadores de diversas capacidades en FIRA, de los cuales se presentarán dos casos en particular. El primer transformador se muestra localizado en la subestación eléctrica de FIRA de 300 KVA, en la figura C.1 se muestra este transformador.



Figura C.1 Transformador trifásico de la subestación de F.I.R.A de capacidad de 300KVA

En la figura C.2 se muestra la conexión del analizador de armónicos conectado en el lado secundario del transformador



Figura C.2 Conexión de un analizador de armónicos al transformador trifásico de 300 KVA del lado secundario de la subestación de F.I.R.A

Las pruebas que se realizaron al transformador trifásico de 300 KVA fueron de 96 horas aproximadamente, se muestra solo la fase C de su corriente. En la figura C.3 se muestran dos gráficas, de corriente en la fase C, una muestra la señal de distorsión de corriente del transformador y la segunda muestra el contenido armónico de la misma señal.

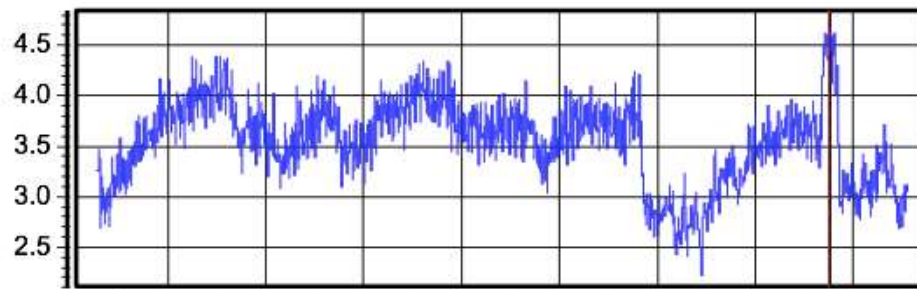
DIAGRAMA DE FASE DEL C ARMÓNICO

Sitio: Subestacion Electrica de FIRA

Medido desde 18/08/2017 15:20:00.0 Hasta 22/08/2017 18:40:00.0

INTENSIDAD

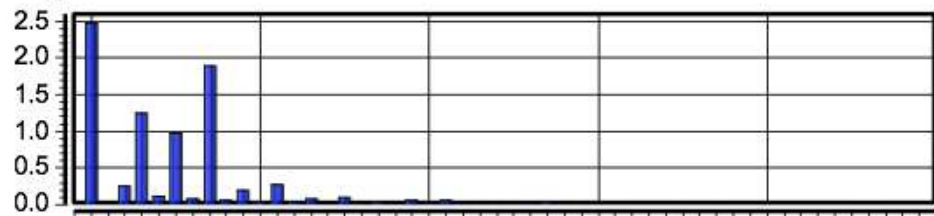
%



00:00 12:00 00:00 12:00 00:00 12:00 00:00 12:00
19/08/2017 20/08/2017 21/08/2017 22/08/2017
Sábado Domingo Lunes Martes

— C ITHD (pro)

%



THD H10 H20 H30 H40 H50

■ C IArmo

§ Total: 288.90 A

§ DC: 0.00 A

§ Fundamental (H1): 0.00 A

Distorsión Armónica Total THD: 2.47 %FND (Par: 0.31 %FND, Impar: 2.50 %FNI)

Figura C.3 Gráficas de corriente de fase C del transformador trifásico de 300 KVA de la subestación de F.I.R.A. (a) Distorsión de corriente THD. (b) Espectro armónico individual de cada armónico presente en la señal

El segundo transformador trifásico con capacidad de 75 KVA tipo seco se encuentra localizado en el edificio A piso 3 (GTDD5), en la figura C.4 se muestra el transformador incluyendo las pruebas que se realizaron.



Figura C.4 Conexión de un analizador de armónicos en el transformador trifásico de 75 KVA del lado secundario localizado en el edificio A piso 3 de F.I.R.A

Las pruebas que se realizaron al transformador trifásico de 75 KVA fueron de 22 horas aproximadamente, se muestra solo la fase C de su corriente. En la figura C.5 se muestran dos gráficas, de corriente en la fase C, una muestra la señal de distorsión de corriente del transformador y la segunda muestra el contenido armónico de la misma señal.

Cabe mencionar que el transformador de 75 KVA está siendo alimentado por el transformador de 300 KVA, donde el de 300 KVA está en la subestación eléctrica de FIRA mientras que el transformador de 75 KVA está en el edificio A planta tres.

Si comparamos la distorsión armónica de los dos transformadores la cual es la misma fase C que lo alimenta tenemos una distorsión armónica de corriente en el transformador de 300 KVA de 2.47% mientras que en el transformador de 75 KVA tiene una distorsión armónica de corriente de 73.89%.

Existe una distancia aproximada de 200 metros del transformador de 300KVA al transformador de 75 KVA, se debe mencionar que el transformador de 75 KVA tiene en su lado secundario la carga del edificio A planta tres.

Por lo tanto, se está demostrando con pruebas reales que la distorsión armónica es mas elevada a medida que nos vamos acercando a las fuentes de distorsión, que en este caso son las cargas del mismo edificio, y a medida que nos alejamos de las cargas, la distorsión armónica disminuye.

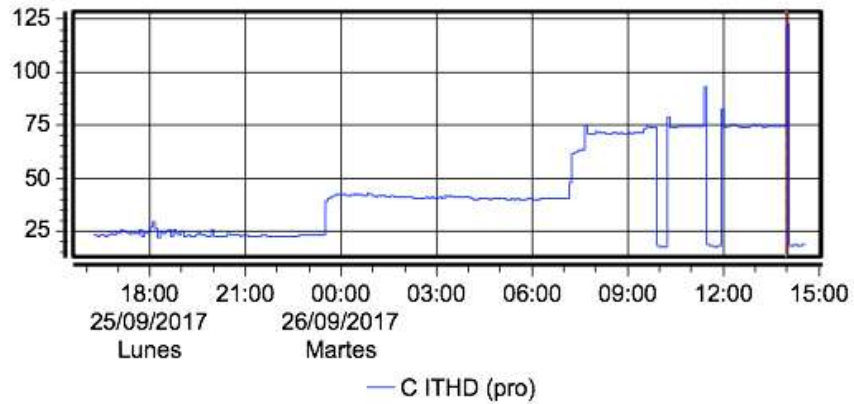
DIAGRAMA DE FASE DEL C ARMÓNICO

Sitio: A3 gtt5 Lado secundario

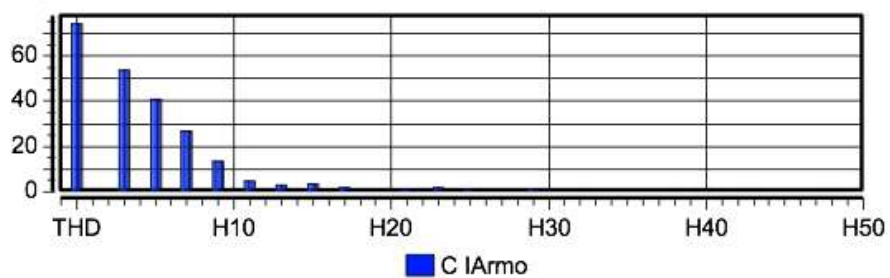
Medido desde 25/09/2017 16:10:00.0 Hasta 26/09/2017 14:35:00.0

INTENSIDAD

%



%



Total: 7.79 A
 DC: 0.00 A
 Fundamental (H1): 0.00 A
 Distorsión Armónica Total THD: 73.89 %FND (Par: 1.22 %FND, Impar: 73.90 %FND)

Figura C.5 Gráficas de corriente de fase C del transformador trifásico de 75 KVA tipo seco del edificio A piso 3 de F.I.R.A.
 (a) Distorsión de corriente THD. (b) Espectro armónico individual de cada armónico presente en la señal