



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRETENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

Luis Mauricio Saquilmer Mendoza

Asesorado por el Ing. Jorge Luis Pérez Rivera

Guatemala, noviembre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRETENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS MAURICIO SAQUILMER MENDOZA

ASESORADO POR EL ING. JORGE LUIS PÉREZ RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Fernando Waldemar de León Contreras
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRETENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 28 de octubre de 2005, No. EIME 256.2005



LUIS MAURICIO SAQUILMER MENDOZA

Guatemala 3 de octubre de 2007


Ingeniero Mario Renato Escobedo Martínez
Director de Escuela
Ingeniería Mecánica Eléctrica

Como Catedrático Asesor del Trabajo de Graduación titulado **ANALISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRE TENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, presentado por el estudiante Luís Mauricio Saquilmer Mendoza, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo atentamente,

Guatemala octubre de 2007

Vo.Bo. (f)



Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Aseor trabajo de graduación
Colegiado No. 3057



Guatemala, 8 de octubre 2007.

FACULTAD DE INGENIERÍA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRE TENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, desarrollado por el estudiante; Luis Mauricio Saquilmer Mendoza, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Electrotécnica



FJGL/sro

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Luis Mauricio Saquilmer Mendoza, titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRE TENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, procede a la autorización del mismo.


Ing. **Mario Renato Escobedo Martínez**

DIRECTOR



GUATEMALA, 15 DE OCTUBRE 2,007.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE SOBRETENSIONES POR RESONANCIA ARMÓNICA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, presentado por el estudiante universitario **Luis Mauricio Saquilmer Mendoza**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, appearing to be 'Murphy Olympo Patz Recinos', written over a horizontal line.

Ing. Murphy Olympo Patz Recinos
DECANO

Guatemala, noviembre de 2007



AGRADECIMIENTO A:

LA VIDA

Por haberme permitido culminar este trabajo, dándome la fuerza y el entendimiento necesario.

MIS PROGENITORES

Lisandro Saquilmer y Guadalupe Mendoza, por apoyarme y motivarme.

MI FAMILIA

A quienes agradezco su apoyo.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1 FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	1
1.1 Maquinas eléctricas.....	1
1.1.1 Generadores.....	1
1.1.2 Transformadores.....	5
1.1.3 Motores.....	12
1.2 Equipos de arco eléctrico.....	13
1.2.1 Hornos.....	13
1.2.2 Soldadores.....	19
1.2.2.1 Soldadura de punto.....	19
1.2.3 Lámparas.....	20
1.2.3.1 Fluorescentes o lámparas de arco.....	20
1.2.3.2 Vapor de sodio.....	21
1.3 Equipos electrónicos.....	22
1.3.1 Convertidores estáticos:.....	22
1.3.2 Los semiconductores de conmutación.....	22
1.3.2.1 Rectificadores de seis pulsos.....	22

1.3.3	Variador de frecuencia.....	24
1.3.4.	Los armónicos en los sistemas trifásicos.....	27
2	FILTROS DE ARMÓNICAS	29
2.1	Tipos de filtros de armónicos.....	29
2.1.1	Filtros pasivos.....	29
2.1.1.1	Filtro pasa banda o filtro serie.....	31
2.1.1.2	Filtro pasa altas.....	32
2.1.1.3	Filtro tipo C.....	33
2.1.1.4	Filtro PI o puente.....	33
2.2	Filtros sintonizados.....	34
2.2.1.	Respuesta a la frecuencia.....	34
2.2.2.	Ecuaciones características.....	35
2.2.3.	El factor de calidad del filtro, Q.....	36
2.2.4.	Puntos de interés del factor Q.....	36
2.2.5	Consideraciones del filtro sintonizado...	37
2.2.5.1	Incremento de la impedancia.....	39
2.2.5.2	Conexión de filtros múltiples.....	40
2.3	Filtros activos clases: tipo serie y tipo paralelo.....	40
2.3.1	Filtro activo serie.....	40
2.3.2	Filtro activo paralelo.....	41
3	MEDICIONES	45
3.1.	Instrumento.....	45
3.2	Características metrológicas.....	47
3.3.	Presentación de las mediciones.....	48
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE ARMÓNICAS	51
4.1.	Índice de calidad de la distorsión armónica de la corriente de carga.....	51

4.2.	Tolerancias de la distorsión armónica de la corriente de carga	52
4.3.	Índice de calidad de la distorsión armónica de la tensión..	57
4.4.	Tolerancias de la distorsión armónica de la tensión.....	58
5	PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE TENSIÓN POR RESONANCIA ARMÓNICA.....	63
5.1	Diseño de filtros pasivos compensadores de factor de potencia y rechazo de armónicos.....	63
5.1.1.	Selección del banco de capacitores.....	64
5.1.2.	Cálculo del orden de resonancia armónico.....	64
5.1.3.	Cálculo de la frecuencia de resonancia.....	65
5.1.4.	Cálculo de la reactancia capacitiva.....	65
5.1.5.	Cálculo de la reactancia inductiva.....	65
5.1.6.	Cálculo del voltaje pico a través de los capacitores	66
5.1.7.	Corriente a través del capacitor, se recomienda un 5% mayor que el nominal.....	66
5.1.8.	Corriente rms en los capacitores.....	66
5.1.9.	Capacidad del banco inductivo y del capacitivo	67
5.1.10.	Determinar los esfuerzos reales y verificar que se encuentren dentro de los límites tolerables.....	67
5.1.10.1.	Criterios para proteger el banco de capacitores.....	68
5.1.11.	Verificar las condiciones de resonancia.....	69
5.1.12.	Tipo del reactor.....	69
5.1.13.	Reactor de sintonizado.....	69
5.1.14.	Factor de calidad.....	71
5.1.15.	Ancho de banda del filtro.....	72

5.2	Ejemplo de aplicación.....	72
5.2.1.	Cálculo del filtro.....	72
5.2.2.	Criterios de diseño.....	74
5.2.2.1.	Capacitores.....	74
5.2.2.2.	Reactores.....	74
5.2.2.3.	Cálculos de diseño.....	75
6.	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	81
6.1.	Penalización económica por exceder los límites de las tolerancias.....	81
6.2.	Penalización económica por exceder los límites de las tolerancias de la distorsión armónica de la corriente de carga.....	83
6.3.	Cálculo de la indemnización por exceder las tolerancias para la tensión armónica, Artículo 34.....	86
6.4.	Cálculo de indemnización por exceder las tolerancias armónicas de corriente, del Artículo 42.....	89
6.5.	Aplicación de las indemnizaciones de NTSD.....	92
		93
	CONCLUSIONES.....	
	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	REFERENCIAS.....	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	a) Rotor ferromagnético que barre un conductor del estator. b) Distribución del flujo de campo magnético en función del tiempo en un punto sobre la superficie del estator. c) Voltaje inducido resultante en el conductor. Nótese que el voltaje es directamente proporcional a la densidad del flujo magnético en cualquier momento dado.	2
2	Voltaje de línea que sale de un generador trifásico con devanados de paso completo y paso fraccionado. A pesar de que el pico del voltaje del devanado de paso fraccionado es un poco menor que el del devanado de paso completo, su voltaje de salida es mucho más puro.	3
3	Corriente de excitación causada por un voltaje sinusoidal aplicado al devanado primario de un transformador.	5
4	Corriente de excitación contra voltaje aplicado en un transformador	6
5	Corriente de excitación no sinusoidal de un transformador y su contenido armónico.	7
6	Saturación del transformador y armónicas: (a) Energización de un transformador sin carga; (b) sobrevoltaje transitorio en el transformador (c) corriente de excitación del transformador con alto contenido armónico.	9
7	Corriente de Inrush de un transformador que alcanza de ocho a doce veces la corriente de plena carga.	11
8	Curva típica de saturación de un motor comparada con la curva de saturación de un transformador	12

9	Caso de un horno de arco alimentado con corriente alterna	15
10	Armónicas típicas originadas durante la operación del horno de arco: (a) Durante el período inicial de fundición dónde la 2a y 3a corrientes armónicas son dominantes; (b) durante el período de refinación la 2ª y 3ª armónicas son dominantes pero reducidas.	16
11	Orden armónico de la 2ª a la 40ª de una serie de datos reales de corriente, en una planta de fundición de metales.	17
12	Gráfica de distorsión armónica total en % de la fundamental de una serie de datos reales de corriente en una planta de fundición de metales.	18
13	Porcentaje de THD. Total de distorsión armónica de tensión en una planta fundidora de metales que utiliza hornos de arco.	18
14	Orden armónico en % de armónica de tensión en una planta fundidora de metales que utiliza hornos de arco. Están representadas las armónicas de la 2ª a la 40ª.	19
15	a) Forma de onda de la corriente en una lámpara con balasto magnético y b) Espectro armónico.	20
16	a) Forma de onda de la corriente en una lámpara fluorescente que utiliza balasto electrónico. b) Espectro de amplitud.	21
17	Configuración de un rectificador de seis pulsos.	23
18	Espectro de corrientes armónicas de un motor de cc operando con un rectificador de 6 pulsos.	24
19	Arreglo típico de un controlador de c.a., tensión y frecuencia ajustable.	25
20	Frecuencia variable suministrada por un inversor de conmutación forzada.	26
21	Corrientes y espectro armónico emitido por un dispositivo variador de frecuencia.	27
22	a) Armónicos de secuencia positiva. b) Armónicos de secuencia negativa c) armónicos de secuencia cero.	28

23	Tipos de filtros.	30
24	Diagrama unifilar de una red con carga lineal, carga no lineal y el filtro de armónicos.	30
25	Respuesta a la frecuencia de la impedancia de un filtro serie.	32
26	(1 de 2) Respuesta de un filtro para diferentes valores de MVA de corto circuito, carga no lineal de 6 polos, $P= 3 \text{ MW}$, 0.5 f de p. a) Sistema sin filtro, MVA_1 , b) Sistema con filtro de 5° y MVA_1 , c) Sistema con filtro y con $MVA_2 > MVA_1$ a) Sistema sin filtro.	37
26	(2 de 2) b) Sistema con filtro de 5° y MVA_1 , c) Sistema con filtro y con $MVA_2 > MVA_1$.	38
27	Principio de operación de un filtro activo tipo serie.	41
28	Diagrama de bloques de un filtro activo y ejemplo de forma de onda resultado de su aplicación.	42
29	Principio de operación de un filtro activo tipo paralelo.	43
30	Certificado de calibración del instrumento de medición.	46
31	Espectro armónico en la Industria 1.	73

TABLAS

I	Datos de placa de un generador de manufactura brasileña	4
II	Armónicos del horno de arco	14
III	Medición INDUSTRIA 1, datos técnicos	48
IV	Valores de distorsión armónica registrados en el período de medición.	48
V	Medición INDUSTRIA 2, datos técnicos.	49
VI	Valores registrados en el período de medición 2.	49
VII	Tolerancias para la distorsión armónica de corriente	53
VIII	INDUSTRIA 1, intervalo de corriente medido el 16 de noviembre, 15:39	55
IX	INDUSTRIA 2, intervalo de corriente medido el 17 de febrero, 16:15	56
X	Tolerancias para la distorsión armónica de tensión.	58
XI	INDUSTRIA 1. Intervalo de tensión del 16 de noviembre, 15:39	59
XII	INDUSTRIA 2, intervalo de tensión del 17 de febrero, 16:15	60
XIII	Datos generales de la industria 1.	73
XIV	Armónicos de tensión fuera de tolerancia Industria 1.	86
XV	Armónicos de tensión fuera de tolerancia Industria 2.	87
XVI	Armónicas del usuario fuera de tolerancia Industria 1	89
XVII	Armónicas de usuario fuera de tolerancia Industria 2	91

GLOSARIO

Ancho de banda del filtro Es la relación entre la frecuencia de filtrado y el factor de calidad el valor en Hz

$$B = F_h / Q \quad (\text{HZ})$$

Armónicas Componente sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia que es múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Para sistemas de potencia de 60 Hz, una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por:

$$F_{\text{armónica}} = n \times 60 \text{ Hz. Donde } n \text{ es un entero.}$$

Armónicos característicos Armónicos producidos por un elemento no lineal en condiciones normales de operación. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares no múltiplos de 3, por ejemplo, el 5°, 7°, 11°, 13°, etc.

$$H = kq \pm 1$$

K = número entero

q = número de pulsos del convertidor.

Armónicos no característicos	<p>Armónicos que son producidos por un elemento no lineal cuando éste opera en condiciones de red anormales. Pueden ser el resultado de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pulsaciones de frecuencia. • Combinación de las frecuencias características y la fundamental. • Funcionamiento desbalanceado en las redes eléctricas de corriente alterna. • Asimetría del ángulo de retraso. • Falla en un componente.
Carga lineal	<p>Es una carga que en operación de estado estable representa una impedancia esencialmente constante para la fuente de alimentación durante el ciclo completo del voltaje aplicado.</p>
Carga no lineal	<p>Carga que consume corriente eléctrica de manera discontinua o cuya impedancia varía durante el ciclo de la forma de onda del voltaje de alimentación. Provoca una corriente no sinusoidal cuando se le aplica un voltaje sinusoidal.</p>
Convertidor	<p>Los términos "convertidor", "convertidor estático" y "convertidor de potencia estático" son utilizados para referirse a dispositivos que convierten potencia de CA a CD, de CD a CA de CA a CA.</p>

Distorsión de demanda total, TDD	Es la relación de la corriente rms de distorsión total al valor de la máxima corriente de carga, IL. Se representa como la raíz cuadrada de la suma total de los cuadrados de los componentes armónicos, en por ciento de la demanda máxima de la corriente de carga (demanda en intervalos de 15 a 30 minutos).
Factor de calidad del filtro, Q	Es una medida de la agudeza de la sintonización, es decir, del ancho de banda del filtro, donde R determina el factor de calidad del filtro Q. Debe tener valores entre 50 y 150 para un ancho de banda aceptable. $Q = XLh / R = XCh / R$
Filtro	Término que describe un dispositivo cuyo propósito es la reducción de corrientes y/o voltajes armónicos que fluyen o que son inyectados en un sistema eléctrico.
Filtro paralelo	Filtro que reduce los armónicos presentando una baja impedancia para desviar los armónicos de la fuente de distorsión del sistema a proteger.
Filtro pasa altas	Filtro que presenta una sola banda de transmisión que se extiende de alguna frecuencia de corte diferente de cero, hasta frecuencia infinita.
Filtro serie	Filtro que reduce los armónicos por medio de una alta impedancia puesta en serie entre la fuente de armónicos y el sistema a proteger.

Filtro sintonizado	Filtro que consiste de elementos, capacitivos, inductivos y resistivos que son seleccionados de manera a presentar una mínima (máxima) impedancia a una o más frecuencias específicas.
Número de pulsos	Número total de conmutaciones sucesivas no simultáneas que ocurren en el circuito del convertidor durante cada ciclo, cuando este funciona sin control de fase. También es igual al orden armónico principal del voltaje directo, es decir, el número de pulsos presentes en la salida de voltaje dc en un ciclo del voltaje de la fuente.
Potencia armónica	Es la potencia disipada en forma de calor, efecto indeseable, excepto en ciertos procesos industriales que lo requieren. Las corrientes y voltajes armónicos deberán ser tan pequeños como sea posible. $P_{armónica} = V_n I_n \cos \phi_n$ V_n e I_n son tensiones y corrientes armónicas. ϕ_n es el ángulo de desfase entre ambos.
Potencia fundamental	En circuitos de ca, el voltaje y la corriente fundamental producen potencia fundamental. $P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1$ (Representa potencia útil) Dónde ϕ_1 es el ángulo de fase entre V_1 e I_1
Resonancia armónica	Fenómeno que produce la amplificación de los armónicos de la tensión o de corriente y que resulta de una oscilación sostenida entre la energía inductiva y la capacitiva de los elementos adyacentes a la fuente armónica.

THD Expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada. Se representa por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los componentes armónicos desde la 2ª a la n, dividido por la fundamental.

Valor efectivo o RMS El valor efectivo de una función formada por varios componentes armónicos está dado por la raíz cuadrada de los cuadrados de los valores rms de dichos componentes.

Valor promedio Es el área bajo la curva en un período T, dividida entre la duración del período.

$$F_{prom} = \frac{\text{Área bajo la curva}}{\text{Período en segundos}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Valor RMS (true rms) verdadero Es el valor medido por algunos instrumentos sin importar la forma de onda.

RESUMEN

Este trabajo pretende mostrar el problema de calidad de energía originado por las distorsiones armónicas de la onda de tensión y corriente en las instalaciones industriales. Este fenómeno aumenta en proporción directa con el avance tecnológico de la electrónica de potencia, su aplicación en diversas esferas del entorno industrial y en todos los niveles de tensión tanto en baja como en media y alta tensión.

La distorsión armónica es representada por las componentes armónicas, que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de una onda sinusoidal, las cuales son generadas por cargas no-lineales que se suman a la onda fundamental de 60 ciclos. Por esta razón se realizó un estudio sobre las fuentes generadoras de armónicas y su efecto en la resonancia armónica en las instalaciones industriales.

Se analizaron mediciones de armónicos en industrias cuyas acometidas presentan distorsión armónica tanto de tensión como de corriente para mostrar cómo se aplican las tolerancias de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución a los registros de la medición, así como el cálculo del monto en quetzales de la indemnización que se debe pagar cuando se violan dichas tolerancias.

También se realizó el estudio de una metodología para el diseño de un filtro de armónicos que solucionará el problema de distorsión armónica en la instalación medida, así como la obtención de la información de los parámetros básicos requeridos para su especificación.

HIPÓTESIS

1. Se cuenta con datos provenientes de mediciones de armónicas de corriente y tensión en instalaciones industriales, así como la normativa correspondiente en la Ley General de Electricidad y las Normas Técnicas de Servicio de Distribución, estas últimas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica; también se dispone de teoría sobre el diseño de filtros para poder especificar el filtro que solucione el problema de resonancia y contaminación por armónicas.
2. La solución al problema de resonancia armónica en instalaciones industriales pretende que se utilicen los capacitores utilizados para corrección del factor de potencia en la industria, cuando correspondan con las características requeridas para el filtro, en el esquema del filtro sintonizado que solucionará el problema de resonancia.

OBJETIVOS

GENERAL

Elaborar un estudio acerca de las tensiones de resonancia producidas por la distorsión armónica de la onda de corriente o voltaje e implementar una solución práctica filtrando las armónicas de corriente o voltaje cuya frecuencia esté cerca de la frecuencia de resonancia, mediante un dispositivo que aproveche los capacitores utilizados para corregir el bajo factor de potencia que comúnmente ya se encuentran instalados en las industrias.

ESPECÍFICOS

1. Aportar conceptos y definiciones sobre el tema.
2. Describir las principales fuentes de armónicos.
3. Describir los tipos de filtros de armónicos.
4. Analizar mediciones de armónicos de instalaciones industriales.
5. Proponer una solución al problema de las tensiones por resonancia.
6. Analizar económicamente la distorsión armónica de tensión y corriente aplicando las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la industria es poco conocido el problema de la distorsión armónica de la onda de tensión o corriente y se subestima o desconoce los efectos negativos de este fenómeno eléctrico sobre los demás dispositivos eléctricos, así como la aplicación de las normas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica para el monitoreo y control de estas.

El origen de la contaminación de las redes eléctricas por armónicos está en los equipos con dispositivos eléctricos no lineales. La utilización de tales dispositivos ha aumentado debido al progreso de la electrónica de potencia y la aplicación de equipo de cómputo en todas las líneas de producción industrial, lo cual ha incidido en el aumento de la distorsión armónica de la tensión y corriente.

Entre los efectos de la distorsión armónica se tiene el de afectar negativamente en el funcionamiento de los bancos de capacitores influyendo en el factor de potencia. Otra consecuencia de esta interacción consiste en el fenómeno de resonancia que se produce entre el banco de capacitores y la impedancia de la red que aumenta cuantitativamente la magnitud de los armónicos.

Para comprender la importancia de la problemática económica se realizará el análisis de datos de mediciones de armónicos aplicando las ecuaciones de los índices de calidad y las tolerancias establecidas en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución de Comisión Nacional de Energía Eléctrica, así como los filtros recomendados para dar solución al problema.

Por último, se plantea la metodología de cálculo y un ejemplo para dar solución a ambos problemas: el de bajo factor de potencia y el de resonancia, atenuando las armónicas que están cerca de la frecuencia de resonancia.

1. FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

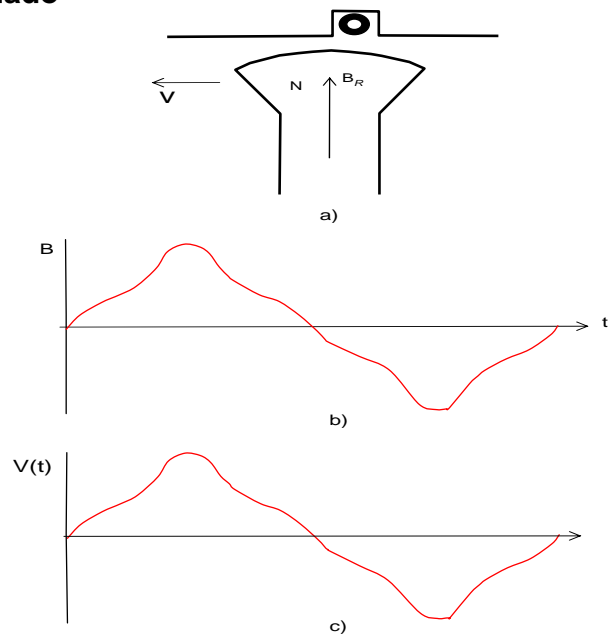
1.1 Máquinas eléctricas

Entre las máquinas eléctricas más importantes están los generadores, los transformadores y los motores.

1.1.1 Generadores

La distribución de densidad de flujo magnético en el entrehierro en una máquina de corriente alterna no es sinusoidal. La distribución de densidad de flujo real consistirá en un componente sinusoidal fundamental más los armónicos. Estos componentes armónicos del flujo generan componentes armónicos en los voltajes y en las corrientes del estator, ver figura 1.

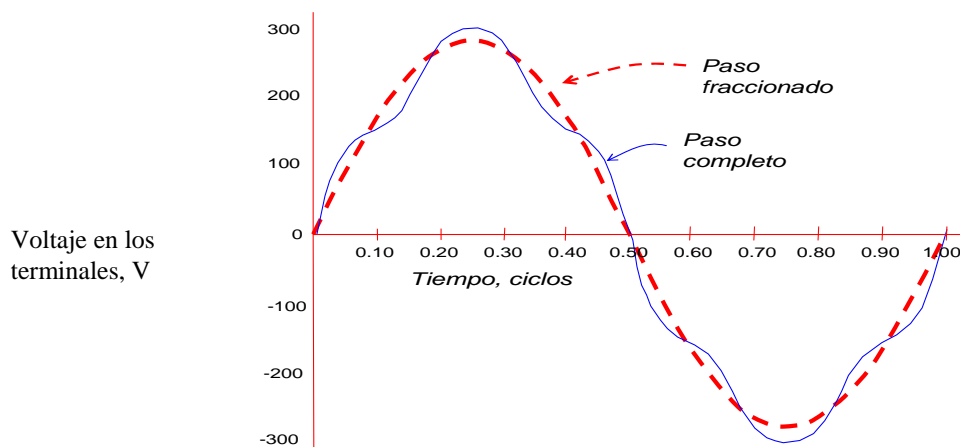
Figura 1. a) Rotor ferromagnético que barre un conductor del estator. b) Distribución del flujo de campo magnético en función del tiempo en un punto sobre la superficie del estator. c) Voltaje inducido resultante en el conductor. Nótese que el voltaje es directamente proporcional a la densidad del flujo magnético en cualquier momento dado



Fuente: Chapman, Máquinas Eléctricas, 4ª Edición, p. 713

En realidad estos componentes armónicos en las máquinas eléctricas son indeseables, por lo que se han desarrollado métodos para suprimirlos. La utilización de devanados de paso fraccionado es una técnica aplicada en la construcción de generadores para la supresión de armónicos, ver figura 2. Otra es la de diseñar el rotor para distribuir el flujo de una forma aproximadamente sinusoidal.

Figura 2. Voltaje de línea que sale de un generador trifásico con devanados de paso completo y paso fraccionado. A pesar de que el pico del voltaje del devanado de paso fraccionado es un poco menor que el del devanado de paso completo, su voltaje de salida es mucho más puro



Fuente: Chapman, Máquinas Eléctricas, 4ª Edición, p. 716

Bobina de paso completo

Si la bobina del estator pasa por el mismo ángulo que el paso polar.

Bobina de paso fraccionado Pf.

Si la bobina del estator pasa por un ángulo menor que el paso polar¹.

$$Pf = (\text{grados mecánicos que recorre una bobina/paso polar de la máquina}) * 180$$

Paso polar Pp

Es la distancia angular de dos polos adyacentes en una máquina, se mide en grados mecánicos.

$$Pp = 360^\circ / \text{número de polos}$$

Los armónicos de orden triple n, se suprimen automáticamente en las máquinas trifásicas. Los armónicos que quedan son los de la quinta, séptima, onceava, treceava, etc.

En resumen, se infiere que un generador puede ser una fuente importante de armónicos en el caso de que su diseño fuera deficiente o que por alguna razón se modificara el diseño de fábrica. Para complementar esta sección se muestra la vista de los datos de placa de un generador, donde se aprecia, entre otros, la distorsión armónica; que en este generador en particular es del orden de 5%. Ver tabla I.

Tabla I. Datos de placa de un generador de manufactura brasileña

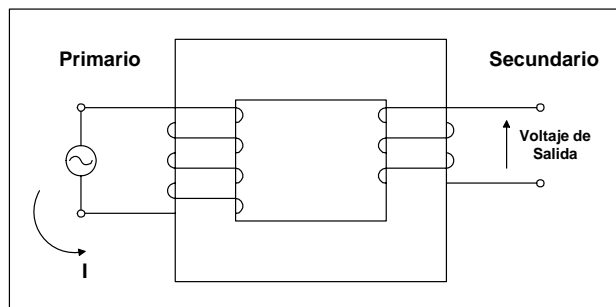
IDENTIFICACION		CARACTERISTICAS DE DESEMPEÑO								
Modelo: SPA.900		%Carga	0	50	75	100				
KVA:	8750	Carc.: 900	F. Pot.	----	1	0.9	1	0.9	1	0.9
KW	7875	Reg.: S1	Rend. (%)	----	96.3	95.6	97	96.4	97.3	96.7
F. Pot.:	90	Aisl.: F	Uexc.(V)	26.4	43.1	50.5	49.7	59.6	57.5	69.3
rpm:	900	ΔT : 100 °C	Iexc.(A)	6.4	10.5	12.3	12.1	14.5	14	16.8
Hz :	60	Amb.: 45 °C	Corr.corto.Cir.pp.:	6427. A			Sobrecarga:	1.1. x In por 1h cada 6 h		
Nº Fases:	3	Alt.: 1663 m	Corr.corto.Cir.ef.:	2525. A			Sobrecarga momentanea:	2 x In por 20 s		
V	13800		Distor. Armónica ff :	5.0%			Sobrevelocidad:	1.80 x n por 900s		
A	366.1		Factor Interf. Telef. Ff:	1.5%			Inercia Rotor (J=gd ² /4):	0 kgm ² m		
Con.:	4Y		Xd :	117.8%	Xq :	116.30%	X2 :	15.60%	T ^{''} do :	0.0249 s
Protección:	IP23		X'd :	26.4%	X" q:	16.80%	T" d :	0.13 s	T ^{''} do :	1.5311 s
F. Constr.:	B3		X''d :	14.5%	Xo :	5.80%	T ['] d :	0.3432 s	Ta :	0.55 s
Enfriam. :	IC 01		Vibración :	mm/s			Devan. Amortiguador :	x Com		
Excitación:	BRUSHLESS PMG		Ruido :	dB (A)			Masa Aprox. :	* kg		
Regulador:	GRMP03-1		Rotación :	HORARIO						

Fuente: Curso Directores de Proyectos Hidroeléctricos, Colegio de Ingenieros de Guatemala. Mayo-septiembre 2006. Ingeniero Murilo Logullo Machado. WEG, CENTRO DE NEGOCIOS DE ENERGIA, CNE. www.weg.com.mx/index.html.

1.1.2 Transformadores

Las armónicas en los sistemas eléctricos se originaron primariamente como consecuencia de la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia. Cuando un voltaje sinusoidal es aplicado al devanado primario del transformador (figura 3) una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador para inducir un voltaje en el lado secundario.

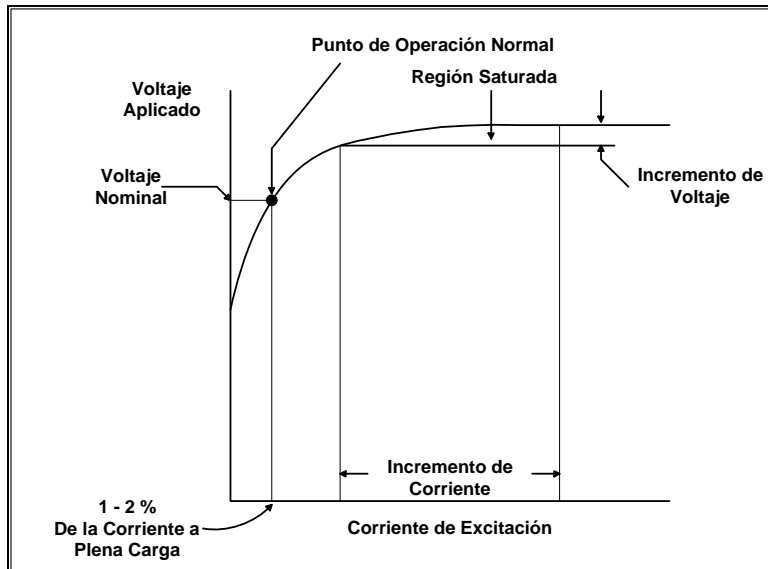
Figura 3. Corriente de excitación causada por un voltaje sinusoidal aplicado al devanado primario de un transformador



Fuente: A. E. Fitzgerald. Máquinas Eléctricas. 5ª Edición. p. 60

La relación entre el voltaje aplicado y la corriente de excitación es extremadamente no-lineal, como se ilustra en la figura 4.

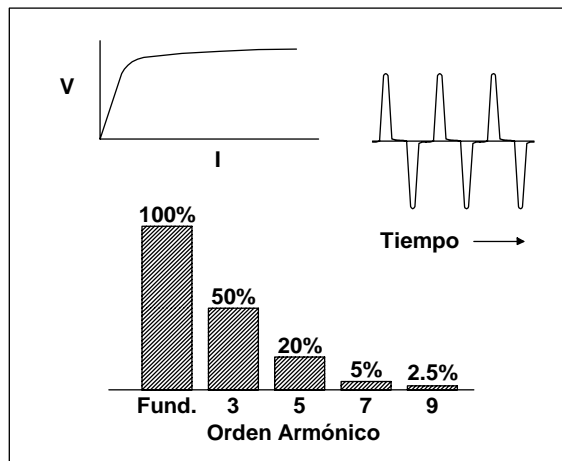
Figura 4. Corriente de excitación contra voltaje aplicado en un transformador



Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas.
Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad. México. p. 4.

La corriente de excitación demandada por el transformador (figura 5) no es sinusoidal y contiene muchas armónicas. La forma de onda de la corriente de excitación es rica en 3ª armónica, la cuál alcanza alrededor del 50% de la corriente de frecuencia fundamental, la 5ª, 7ª y 9ª están presentes a un menor grado.

Figura. 5. Corriente de excitación no sinusoidal de un transformador y su contenido armónico



Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas. Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad. México. p. 4.

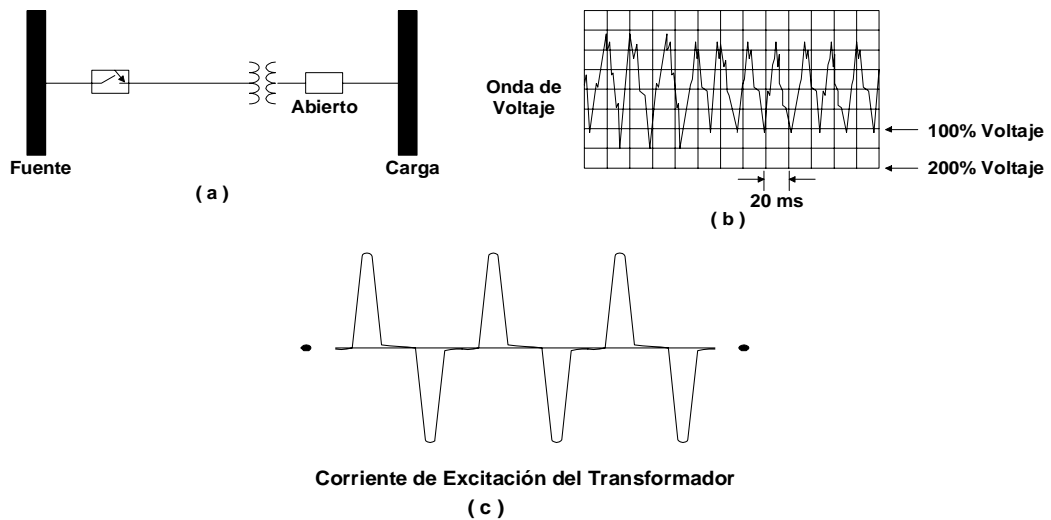
Afortunadamente, los transformadores son diseñados para operar cerca de la rodilla de la curva de saturación, donde la corriente de excitación es del 1 o 2% de la corriente a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos. Cuando el voltaje aplicado al transformador es incrementado arriba del nominal, el campo magnético incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación.

En un núcleo saturado, un pequeño incremento de voltaje produce un gran incremento en la corriente de excitación para generar el campo magnético requerido (figura 5). El contenido armónico también se incrementa abruptamente. Por ejemplo, la magnitud de 3ª armónica podría incrementar de 50 a 75% de la fundamental cuando se aplica el 115% del voltaje nominal.

La saturación y armónicas del transformador aparecen cuando una línea termina en un transformador y ésta es energizada con el interruptor de carga abierto. Cuando la línea es energizada (figura 6) hay un alto voltaje transitorio en el transformador.

El sobrevoltaje es causado por una combinación de dos efectos diferentes. El 1º es el transitorio que dura algunos ciclos y el 2º, un sobrevoltaje de tiempo largo a través de la inductancia de la línea, conocido como efecto Ferranti.

Figura 6. Saturación del transformador y armónicas: (a) Energización de un transformador sin carga; (b) sobrevoltaje transitorio en el transformador (c) corriente de excitación del transformador con alto contenido armónico



Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas. Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad. México. p.5

Éste alto voltaje fuerza al transformador a saturarse y demanda una gran corriente de excitación. Altas componentes armónicas aparecen en la forma de onda de voltaje. Durante el sobrevoltaje por efecto Ferranti, altas corrientes armónicas aparecen en la corriente de excitación hasta que el sobrevoltaje sostenido se reduce por el cierre del interruptor de carga.

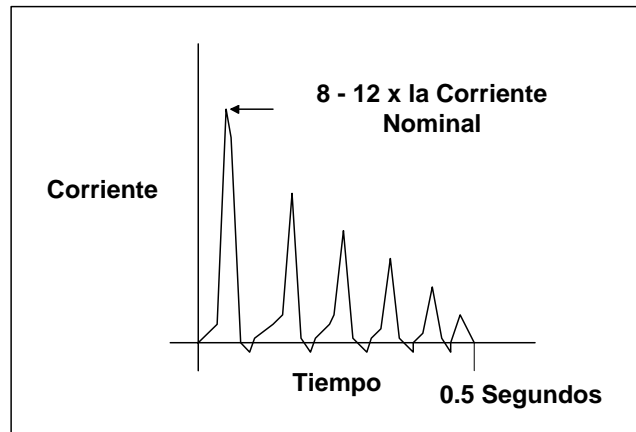
Una condición más común de sobrevoltaje sostenido ocurre cuando el sistema está en demanda mínima o seguido de un disturbio donde se remueve un bloque importante de potencia reactiva, tal como un reactor en derivación. Esto podría causar sobre voltajes en el sistema y podría forzar a muchos transformadores a operar en saturación, incrementándose la generación de armónicas en algunas partes del sistema.

Por el gran número de transformadores y si algunos están con baja carga, la corriente armónica total inyectada puede ser significativa.

La Corriente de Inrush es la corriente de excitación de un transformador, cuyo comportamiento es una corriente periódica continua.

La figura 7, muestra la corriente de Inrush o de energización del transformador, que podría ser de ocho o hasta doce veces la corriente a plena carga y hasta por un segundo. Después de ese corto tiempo, la corriente de excitación decae a su valor normal de 1 o 2% de la corriente a plena carga.

Figura 7. Corriente de Inrush de un transformador que alcanza de ocho a doce veces la corriente de plena carga



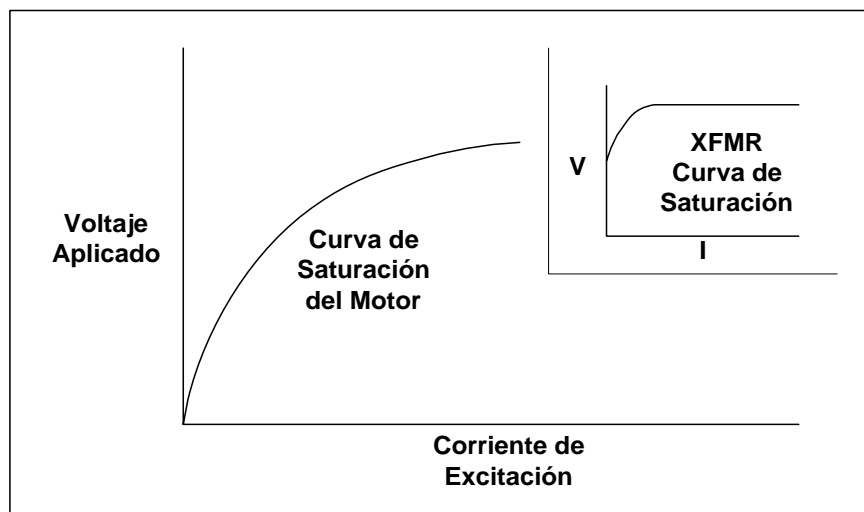
Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas.
Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad México, P.6

La corriente de Inrush contiene armónicas pares e impares con la 2ª armónica dominante, pero como no es una corriente de excitación continua, no representa un problema armónico.

1.1.3 Motores

Similar al transformador, un motor requiere de corriente de excitación (que contiene 3ª armónica) del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo. En el caso de un motor, el campo magnético es requerido para girar el rotor de la máquina. No obstante, la curva de saturación de un motor es mucho más lineal que la de un transformador, figura 8. El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de armónicas. Los devanados típicos del motor tienen 5 ó 7 ranuras por polo, produciendo 5ª y 7ª corrientes armónicas.

Figura 8. Curva típica de saturación de un motor comparada con la curva de saturación de un transformador



Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas. Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad. México, p. 1.

Un motor se convierte en fuente de armónicos cuando la tensión aplicada a sus devanados es mayor que la nominal. Esto sucede porque el motor trabaja en la región de saturación de la curva, generando campos magnéticos distorsionados, cuyo resultado es una corriente con distorsión armónica.

1.2 Equipos de arco eléctrico

La característica tensión-corriente de un arco eléctrico es típicamente no lineal. Luego de la ignición del arco, la tensión disminuye cuando la corriente se incrementa, quedando solo limitada a la impedancia de la fuente y a la tensión del arco. El arco se presenta como una resistencia negativa.

La tensión sobre el arco posee una forma trapezoidal, cuya magnitud es función del tipo y longitud del arco, por lo que es sumamente estable y relativamente de fácil caracterización.

1.2.1 Hornos

El contenido de armónicas es algo similar al de cualquier otra carga de arco, siendo mucho más impredecible. El principal problema es la imposibilidad de lograr un balance de fases, especialmente durante las etapas de fusión (el “clavado” del electrodo en la chatarra recién volcada en el horno produce grandes variaciones), siendo más probable lograr el balance en el período de afino.

La corriente usualmente no es periódica, con un espectro continuo de armónicas e inter-armónicas, siendo predominantes las armónicas (múltiplos enteros) comprendidas entre segunda y séptima².

Durante el afino las corrientes son más simétricas y cíclicas, por lo cual existe una considerable reducción de las armónicas pares y las inter-armónicas. La tabla siguiente muestra los valores típicos de armónicas para la fusión y afino.

Tabla II. Armónicos del horno de arco

Condición del horno	Componente armónica en % de la fundamental				
	Orden de la armónica				
	2	3	4	5	7
Fusión inicial (arco muy activo)	7,7	5,8	2,5	4,2	3,1
Afino (arco estable)	0,0	2,0	0,0	2,1	0,0

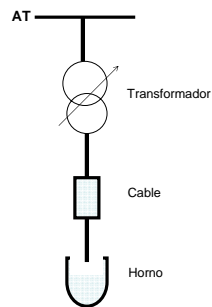
Fuente: www/Faraday.fie.umich.mx/titulacion/armonicas

Los hornos de arco causan los más severos problemas porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un lugar, como el mostrado en la figura 9, donde el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía.

Para arrancar el proceso, tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente, son acercados al horno, haciendo contacto con el acero.

Los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco. La trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa, así exhibe una acción de rectificación débil entre los dos elementos distintos. Ésta simple acción de rectificación de fase produce las armónicas en la corriente de fase.

Figura 9. Caso de un horno de arco alimentado con corriente alterna

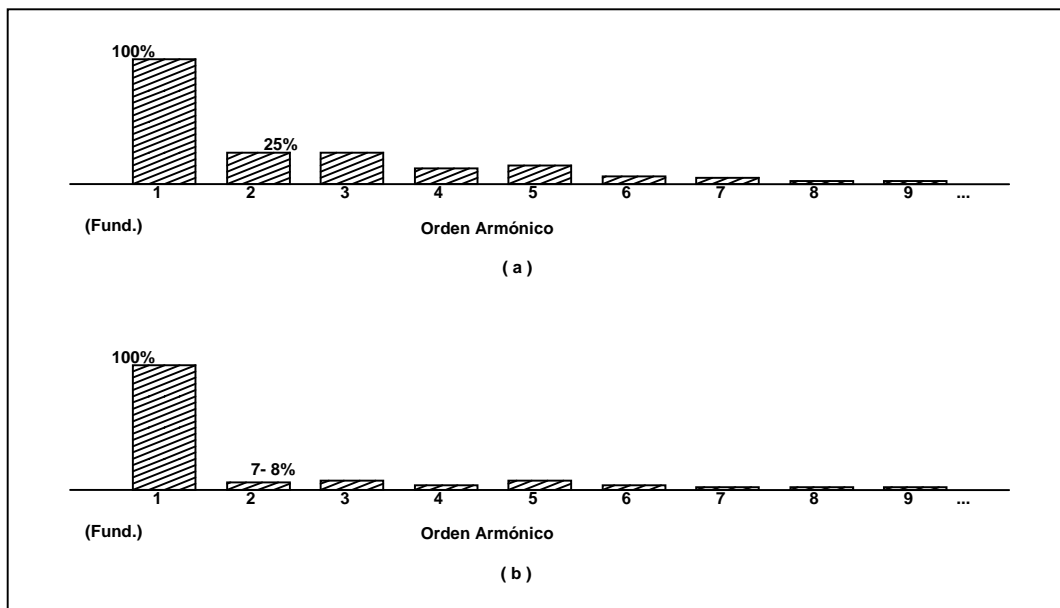


Fuente: Reproducción del cuaderno técnico No. 152. *Schneider Electric*. Septiembre 1999.

Una corriente muy grande típicamente en decenas de kilo Amperes fluye a través de los electrodos y la chatarra de acero. La corriente es limitada por las reactancias de los cables de alimentación al horno y el transformador de horno. En la etapa inicial de fundición, la trayectoria de arco es errática. El resultado de las variaciones del voltaje de arco produce todas las armónicas, cualquiera dominante por la acción rectificadora.

El horno es alimentado desde un transformador construido especialmente con un devanado conectado en delta. Por las características monofásicas del arco, todas las armónicas son producidas, incluyendo pares y triples. La figura 10, muestra un espectro de frecuencia típico de corriente del horno de arco durante el período inicial cuando la chatarra está siendo fundida. La 2ª y 3ª son dominantes, cada una con el 25% de la magnitud de corriente fundamental.

Figura 10. Armónicas típicas originadas durante la operación del horno de arco: (a) Durante el período inicial de fundición dónde la 2ª y 3ª corrientes armónicas son dominantes; (b) durante el período de refinación la 2ª y 3ª armónicas son dominantes pero reducidas

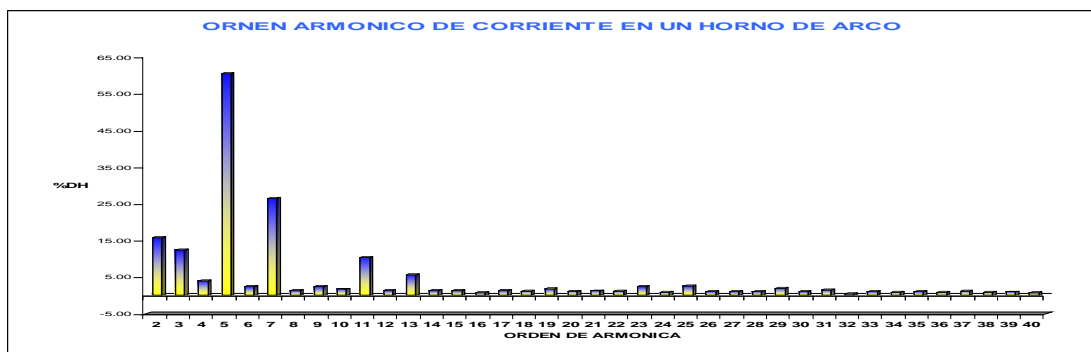


Fuente: Capítulo VII, Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes armónicas. Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad, México, p. 3

Durante el período más largo, que es cuando la chatarra está siendo refinada, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable. El inciso b, de la figura 10, muestra el contenido armónico de la corriente del horno durante el período de refinación. Aunque la 2ª y 3ª armónicas predominan, sus magnitudes son reducidas al 7 u 8% de la magnitud de corriente fundamental.

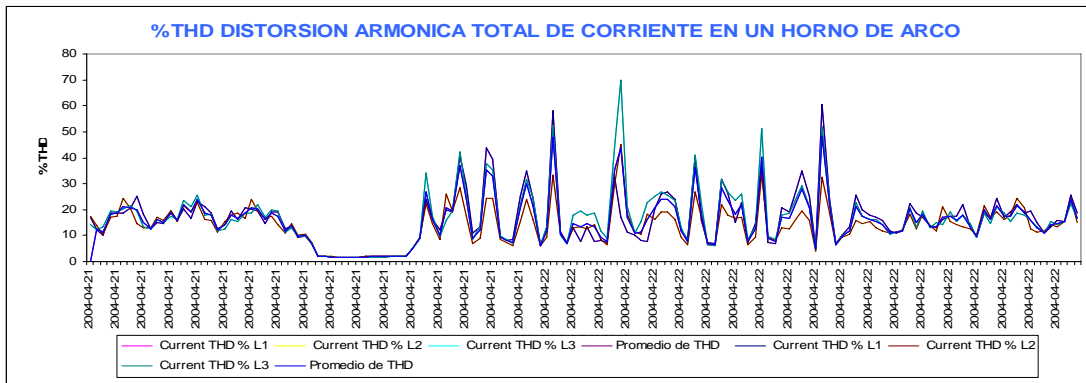
En la figura 11 se muestra de una grafica de orden armónico real de la distorsión armónica de corriente en un horno de arco y en la figura 12 se aprecia el comportamiento de la distorsión total de corriente en el periodo de 24 horas para el mismo horno.

Figura 11. Orden armónico de la 2ª a la 40ª de una serie de datos reales de corriente, en una planta de fundición de metales



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

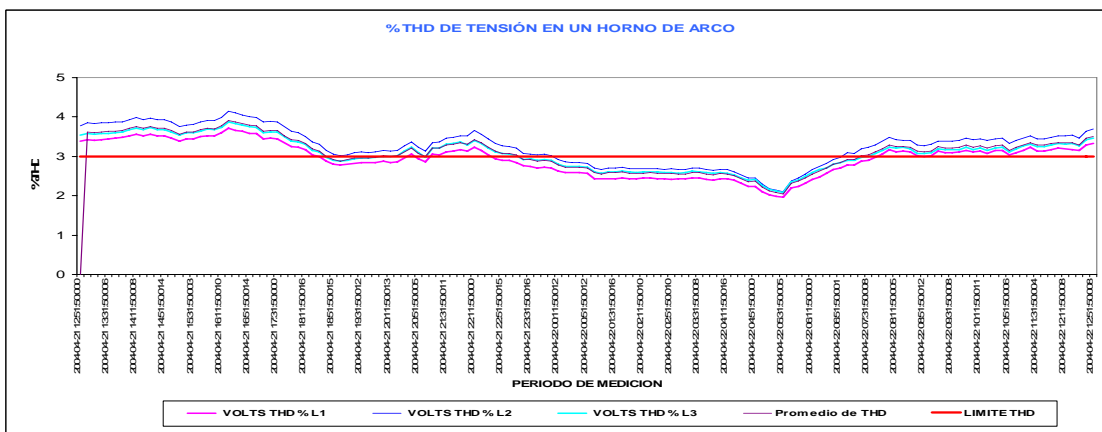
Figura 12. Gráfica de distorsión armónica total en % de la fundamental de una serie de datos reales de corriente en una planta de fundición de metales



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

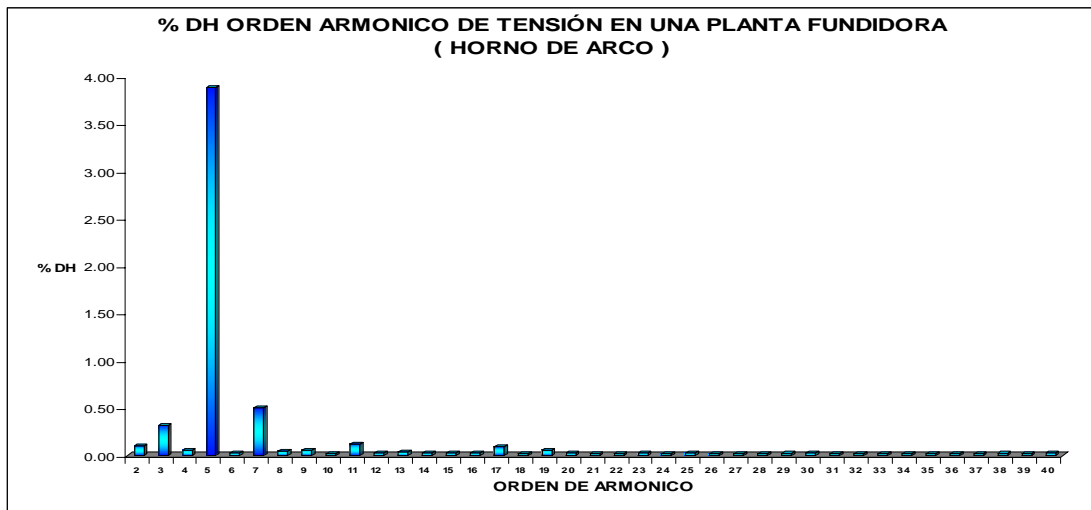
Los armónicos de tensión de datos reales, generados por hornos de arco, se pueden ver en las figuras 13 y 14.

Figura 13. Porcentaje de THD. Total de distorsión armónica de tensión en una planta fundidora de metales que utiliza hornos de arco.



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Figura 14. Orden armónico en % de armónica de tensión en un fundidor de metales que utiliza hornos de arco. Están representadas las armónicas de la 2ª a la 40ª



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

1.2.2 Soldadores

1.2.2.1 Soldadura de punto

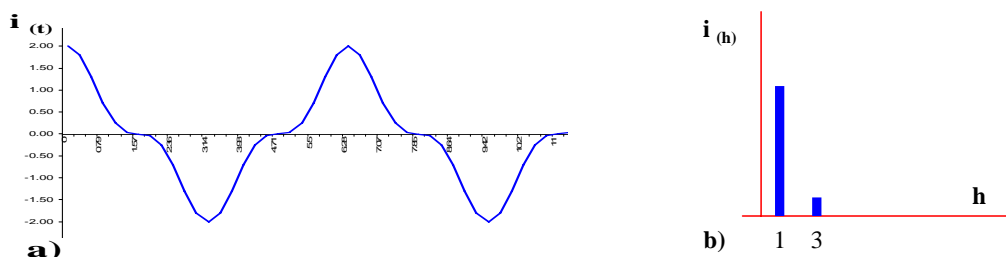
La soldadura se efectúa haciendo pasar una alta corriente (30,000 A) entre las piezas que se quiere soldar. El calentamiento producido por esta corriente en el punto de unión de las piezas es tan alto que la soldadura se produce por la fusión del metal. Las perturbaciones generadas son tensiones armónicas de 200 a 20 KHz³.

1.2.3 Lámparas

1.2.3.1 Fluorescentes o lámparas de arco

Para aplicaciones con lámparas, hace falta el agregado de un elemento que limite esta circulación de corriente dentro de la capacidad de las mismas y que establezca el arco, elemento denominado balasto. La figura 15 muestra la corriente y espectro de armónicas de una lámpara fluorescente con balasto magnético. Originalmente fueron magnéticos, siendo en la actualidad reemplazados por electrónicos. Los balastos magnéticos no son normalmente productores de armónicas, pero por otra parte los electrónicos del tipo de fuente conmutada pueden introducir dos o tres veces más armónicas que los magnéticos. Existen diseños especiales para controlar la contaminación, introduciendo distorsiones menores que los magnéticos.

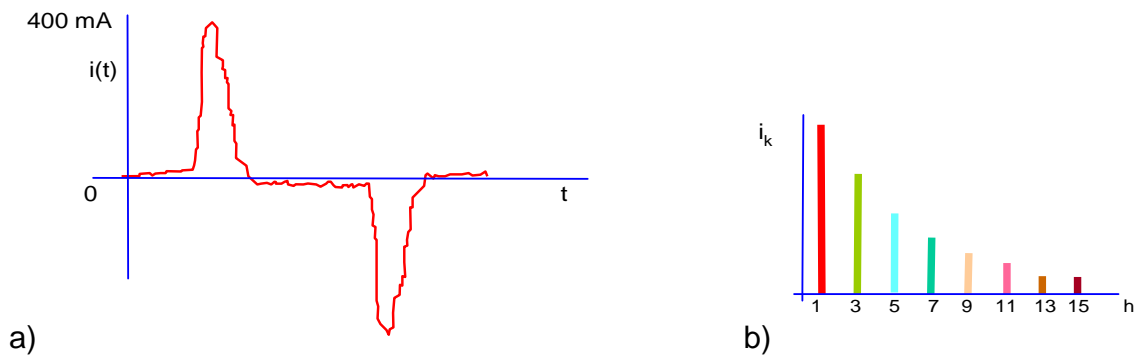
Figura 15. a) Forma de onda de la corriente en una lámpara con balasto magnético y b) Espectro armónico



Fuente: Francisco Javier González. Calidad de la Potencia Eléctrica. Fundamentos sobre armónicas. pp. 93-94.

En general, el nivel del contenido de armónicos de los balastos electrónicos, van desde el 8 al 35 %, como se puede apreciar en la figura 16. Este tipo de lámpara tiene un THD de corriente del orden del 153 %.

Figura 16. a) Forma de onda de la corriente en una lámpara fluorescente que utiliza balasto electrónico. b) Espectro de amplitud



Fuente: Francisco Javier González. Calidad de la Potencia Eléctrica. Fundamentos sobre armónicas. pp. 94-95.

1.2.3.2 Vapor de sodio

El principio de funcionamiento de este tipo de lámpara es similar al de las fluorescentes. Muestran valores de THD, total de distorsión armónica, de 14 % para lámparas de alta presión y 400 W.

1.3 Equipos electrónicos

1.3.1 Convertidores estáticos

Son dispositivos de conversión de energía eléctrica cuyo funcionamiento se basa en semiconductores de potencia.

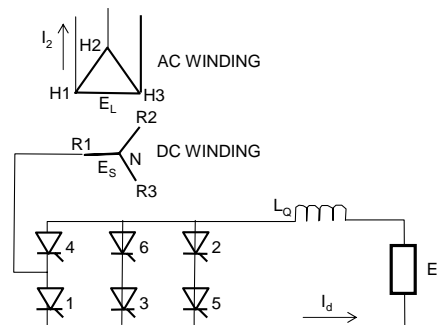
1.3.2 Los semiconductores de conmutación

Otra categoría de fuentes armónicas está constituida por los controladores de voltaje. Estos dispositivos generan armónicas por su mecanismo de control e incluyen algunos tipos con tiristores. Son utilizados en dispositivos para el control de los diferentes tipos de motores tanto de corriente alterna como de corriente directa.

1.3.2.1 Rectificadores de seis pulsos

En ciertas aplicaciones industriales se utilizan rectificadores de seis pulsos para proveer de tensión a motores de corriente directa, un arreglo de este tipo se puede apreciar en la figura 17.

Figura 17. Configuración de un rectificador de seis pulsos

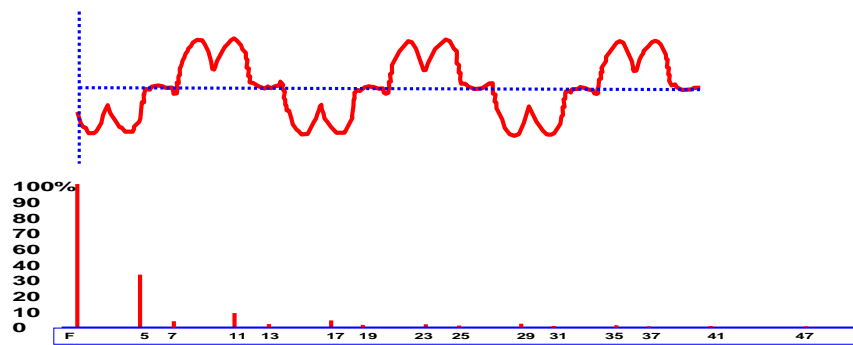


Fuente: Luis Alejandro Piedra Ortiz. IE PROYECTO ELECTRICO. Estudio de los Efectos y Métodos de Minimización de Distorsiones Armónicas en equipos de Distribución Industriales y Comerciales. p. 21

Las armónicas generadas por los controladores trifásicos para motores de CD y CA son las armónicas características de convertidores de seis pulsos (5^a, 7^a, 11^a, 13^a etc.). Las armónicas generadas por el controlador monofásico consisten de todas las armónicas impares (incluyendo las múltiples de tres).

Una muestra de los armónicos de corriente presentes en un rectificador de seis pulsos, se puede observar en la figura 18.

Figura 18. Espectro de corrientes armónicas de un motor de cc operando con un rectificador de seis pulsos



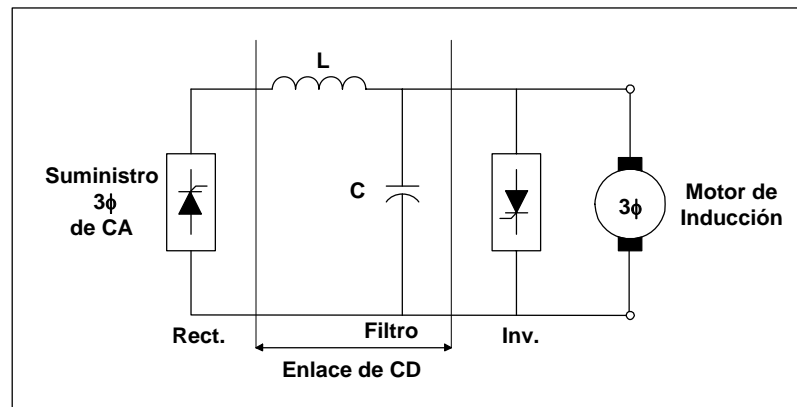
Fuente: Luis Alejandro Piedra Ortiz. IE PROYECTO ELECTRICO. Estudio de los Efectos y Métodos de Minimización de Distorsiones Armónicas en equipos de Distribución Industriales y Comerciales. p. 34.

1.3.3 Variador de frecuencia

La velocidad del motor de ca es usualmente controlada por el ajuste del voltaje y la frecuencia; esto puede ser realizado con un controlador de ca de voltaje ajustable y frecuencia ajustable. El controlador de la figura 19, consiste de un rectificador e inversor trifásico de seis pulsos conectado por un enlace de cd, un reactor de amortiguamiento y un gran filtro son incluidos en el enlace de cd. Este provee un voltaje a la sección inversora.

El rectificador es conectado a la alimentación trifásica y el inversor a la armadura (localizada en el estator) del motor de inducción trifásico, este tipo de convertidor es a menudo referido como un convertidor de enlace de cd.

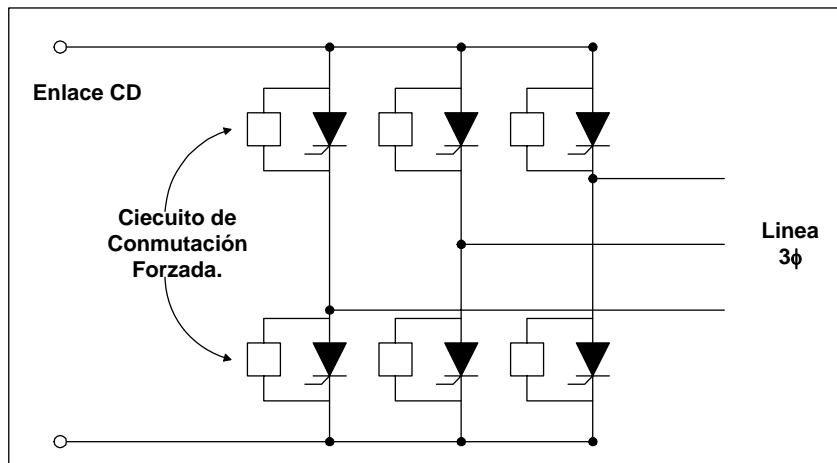
Figura 19. Arreglo típico de un controlador de ca, tensión y frecuencia ajustable



Fuente: Capítulo V. Convertidores de potencia de mediana capacidad. Laboratorio de alta tensión. Comisión Federal de Electricidad México. p. 45.

El voltaje ajustable es suministrado por el rectificador, mientras la frecuencia por la sección inversora mostrada en la figura. 20. El inversor es capaz de generar su propia frecuencia porque es de conmutación forzada. Los elementos necesarios para la conmutación están incluidos dentro del mismo inversor.

Figura 20. Frecuencia variable suministrada por un inversor de conmutación forzada

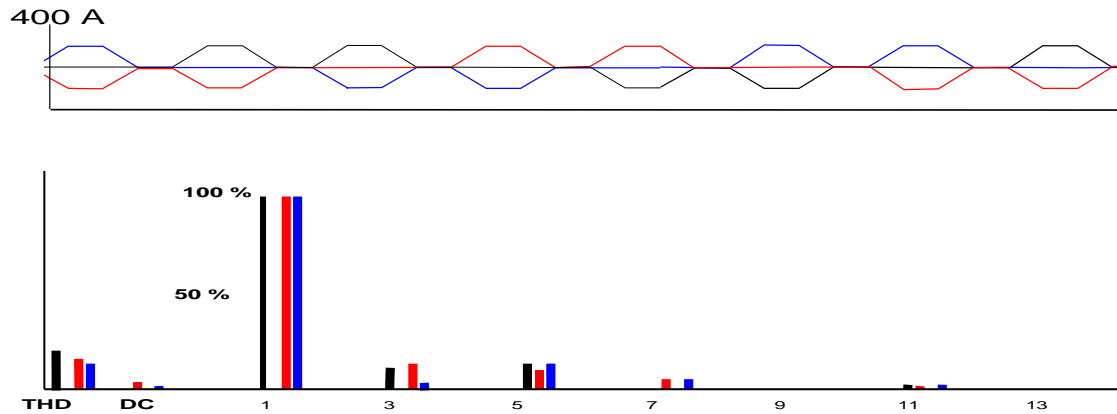


Fuente: Capítulo V. Convertidores de potencia de mediana capacidad. Laboratorio de Alta Tensión. Comisión Federal de Electricidad México. P. 45

Las armónicas generadas por los controladores trifásicos para motores de CD y CA son las armónicas características de convertidores de 6 pulsos (5^a, 7^a, 11^a, 13^a etc.). Las armónicas generadas por el controlador monofásico consisten de todas las armónicas impares (incluyendo las múltiples de 3).

En la figura 21 podemos darnos una idea de los armónicos generados por un variador de velocidad aplicado a un motor de inducción.

Figura 21. Corrientes y espectro armónico emitido por un dispositivo variador de frecuencia

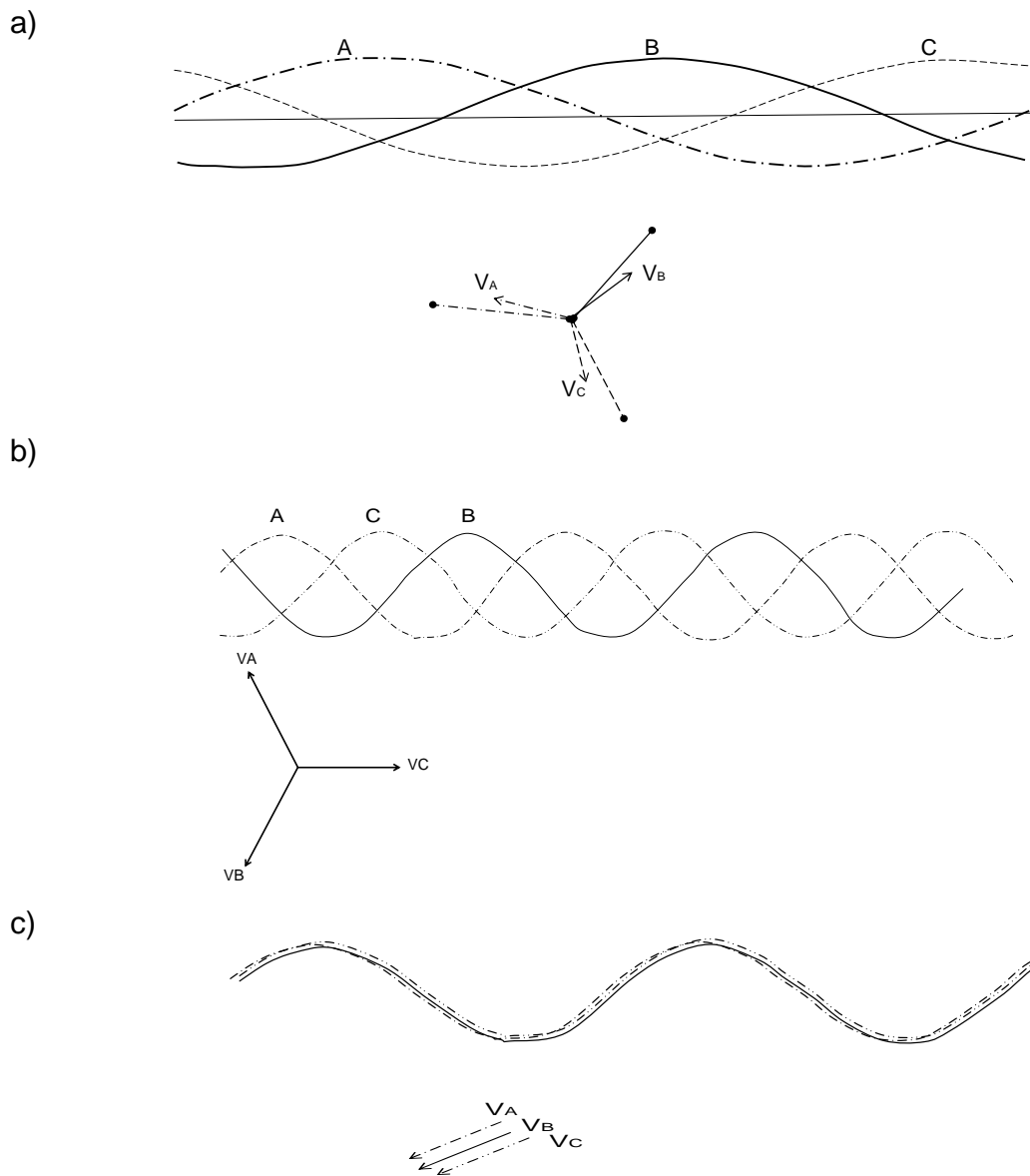


Fuente: Luis Alejandro Piedra Ortiz. IE PROYECTO ELÉCTRICO. Estudio de los Efectos y Métodos de Minimización de Distorsiones Armónicas en equipos de Distribución Industriales y Comerciales. p.24

1.3.4 Los armónicos en los sistemas trifásicos

Los armónicos en un sistema trifásico también cumplen con el teorema de Fortesque⁴ siendo así, que se clasifican como armónicos de secuencia positiva, negativa y cero. Los armónicos 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37 y 40 son de secuencia positiva; los armónicos 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38 son de secuencia negativa y los armónicos 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39 son de secuencia cero. La figura 22 ilustra gráficamente en forma fasorial y de onda los armónicos según su secuencia.

Figura 22. a) Armónicos de secuencia positiva. b) Armónicos de secuencia negativa c) armónicos de secuencia cero



Fuente: Power_Quality_Teaching_Toy_304. Ing. Alex McEachern.Alex@Power Standards.com

2. FILTROS DE ARMÓNICAS

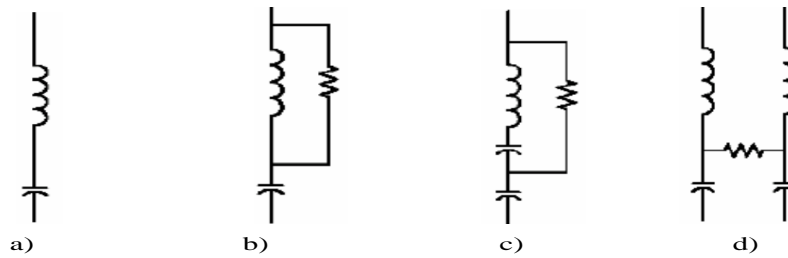
2.1 Tipos de filtros de armónicos

Para minimizar la distorsión armónica de la onda de tensión o corriente en en una red eléctrica se utilizan filtros. Los filtros se clasifican en filtros pasivos y en filtros activos.

2.1.1 Filtros pasivos

Son dispositivos eléctricos que en su diseño se utilizan reactancias inductivas, capacitivas y resistencias, debidamente sintonizadas a una frecuencia determinada⁵ algunos tipos de filtros pasivos son mostrados en la figura 23.

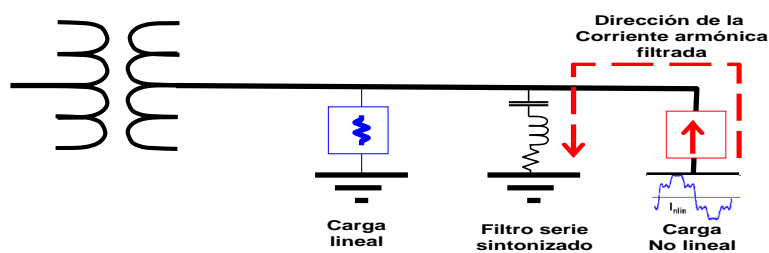
Figura. 23. Tipos de filtros a) Pasa banda b) Pasa altas o de primer orden c) Tipo C d) Tipo PI o puente



Fuente: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. UANL, Dr. Miguel Francisco Escalante, Monterrey, México. Octubre 2004. I CURSO AVANZADO DE CALIDAD DE ENERGÍA. Comunicación Personal.

Teóricamente, el filtro tiene una impedancia cero a la frecuencia de la corriente armónica que se trata de atenuar, lo cual proporciona una trayectoria de baja impedancia a la corriente armónica y evita que esta se propague en la red eléctrica. La trayectoria de baja impedancia es indicada en la figura 24.

Figura 24. Diagrama unifilar de una red con carga lineal, carga no lineal y el filtro de armónicos



Fuente: elaboración propia.

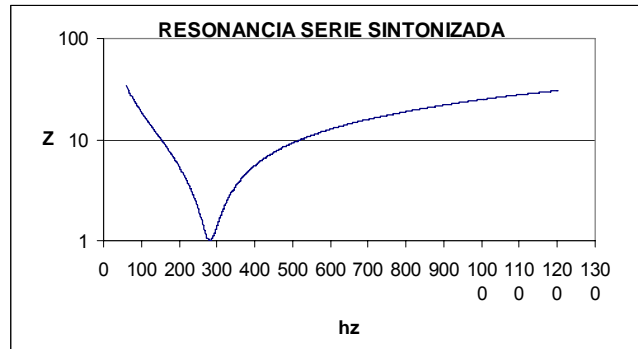
En el caso de una reactancia conectada en serie con la carga, la impedancia se eleva como función de la frecuencia armónica lo cual impide que estos armónicos se trasladen en la red.

2.1.1.1 Filtro pasa banda o filtro serie

Es el tipo de filtro más simple y de uso más común, se conecta en paralelo con la fuente de armónicos. En su diseño cuenta con una inductancia y una capacitancia en serie, sintonizadas a la frecuencia de una armónica de bajo orden. A la frecuencia de la armónica sintonizada la inductancia y la capacitancia tienen un valor igual pero de distinto signo por lo que se anulan mutuamente y la impedancia es puramente resistiva.⁶

La impedancia del filtro es capacitiva para armónicas de bajo orden hasta la 5ª, ver la figura 25, e inductiva para las armónicas sobre el punto de sintonía. La impedancia a la frecuencia de resonancia es casi nula, realizando un muy buen filtrado a esta frecuencia. Tiene el inconveniente de tener un alto valor de resonancia paralela con la red a una frecuencia por debajo del punto de sintonía, lo cual puede amplificar otros armónicos de menor frecuencia y filtrado deficiente de los armónicos muy por encima del punto de sintonía.

Figura 25. Respuesta a la frecuencia de la impedancia de un filtro serie



Fuente: elaboración propia.

2.1.1.2 Filtro pasa altas

Es efectivo para filtrar una frecuencia específica y todas las demás por encima de esta. Es conveniente para una sintonía en el séptimo u onceava armónica o mayores. La selección de la resistencia puede ajustarse para amortiguar resonancias paralelo de bajo orden. La resistencia a la frecuencia fundamental puede ser considerable⁷. En general no se aplica para armónicos del orden 5.

2.1.1.3 Filtro tipo C

Tiene características similares al filtro pasa altas, con la ventaja de que el resistor no consume potencia a la frecuencia fundamental. Se utiliza donde se requiere un amortiguamiento considerable en filtros sintonizados al 5to armónico o por debajo de este. Se emplea a menudo en aplicaciones de hornos de arco eléctrico o ciclo convertidores, para impedir la amplificación de armónicos de bajo orden y armónicos no enteros.

2.1.1.4 Filtro PI o puente

Consiste esencialmente de dos filtros pasa banda unidos en los puntos medios por un resistor. Tiene la ventaja de un buen filtrado en ambas frecuencias de resonancia, con un muy buen amortiguamiento de resonancias paralelo. El resistor puede tener una baja especificación de potencia con respecto al filtro pasa altas o de tipo C. Tiene la desventaja de que las dos ramas del filtro se deberán conmutar como un solo grupo

2.2 Filtros sintonizados

Los filtros sintonizados se caracterizan por tener una baja impedancia a la frecuencia a la que son sintonizados⁸.

2.2.1. Respuesta a la frecuencia

A la frecuencia de sintonía, los filtros sintonizados presentan una impedancia muy pequeña, derivando de manera efectiva las corrientes armónicas. Cuando la impedancia de la fuente es inductiva, existe un pico resonante a una frecuencia mas baja de la que el filtro fue sintonizado. Existe un aumento pronunciado en la impedancia por debajo de la frecuencia de sintonía debido a la proximidad de la frecuencia resonante. La impedancia se eleva con la frecuencia, principalmente a frecuencias mayores de la de sintonía.

En los filtros sintonizados la frecuencia resonante esta dada por

$$f_0 = 1 / (2 \pi (LC)^{1/2})$$

f_0 = Frecuencia de resonancia

L = Inductancia del filtro

C = Capacitancia del filtro

2.2.2. Ecuaciones características

La impedancia de la rama esta dada por:

$$Z = R + j (\omega L - 1 / \omega C)$$

Cuando la resonancia se presenta cuando la parte imaginaria es igual a cero y la impedancia queda limitada por el valor de R. La frecuencia de resonancia es

$$f_0 = 1 / (2 \pi (LC)^{1/2})$$

La impedancia inductiva y capacitiva para el armónico de orden n

$$X_{Ln} = n\omega L \quad X_{cn} = 1 / (n\omega C)$$

A la frecuencia de resonancia:

$$X_{Ln} = X_{cn}$$

El orden del armónico de resonancia es:

$$r = (X_c / X_L)^{1/2}$$

2.2.3. Q el factor de calidad del filtro

Es una medida de la agudeza de la sintonización, es decir, del ancho de banda del filtro, donde R determina el factor de calidad del filtro Q.

$$: \quad Q = (1/R) L/C$$
$$Q = X_{L5} / R = X_{C5} / R$$

2.2.4. Puntos de interés del factor Q

El valor de Q rara vez se considera respecto a la acción de filtrado. Los valores de R que se pueden usar para alterar significativamente las respuestas de los filtros pueden dar como resultado un incremento significativo en las pérdidas del mismo.

1. Un valor mas elevado de Q significa un valle pronunciado a la frecuencia de sintonía.
2. Típicamente, el valor de R consiste solamente de la resistencia intrínseca del inductor. En este caso el factor Q del filtro es igual a r veces la relación X/R del reactor sintonizado. Esto usualmente resulta en un valor muy grande de Q y una acción aguda de filtrado.

2.2.5. Consideraciones del filtro sintonizado

El pico de resonancia paralelo es función de la capacidad de corto circuito de la fuente, es decir de los MVA de falla del sistema trifásico. Cuantitativamente el pico de resonancia es menor cuando la capacidad de corto circuito del sistema es mayor, en otras palabras el sistema es más robusto y es afectado en menor cuantía por la resonancia armónica. Tal afirmación se comprueba a través de las gráficas presentadas en la figura 26 al comparar el pico de resonancia de b) y c) si se toma en cuenta que la escala es la misma.

Figura. 26. (1 de 2) Respuesta de un filtro para diferentes valores de MVA de corto circuito, carga no lineal de 6 polos, P= 3 MW, 0.5 f de p. a) Sistema sin filtro, MVA_1 , b) Sistema con filtro de 5° y MVA_1 , c) Sistema con filtro y con $MVA_2 > MVA_1$

a) Sistema sin filtro

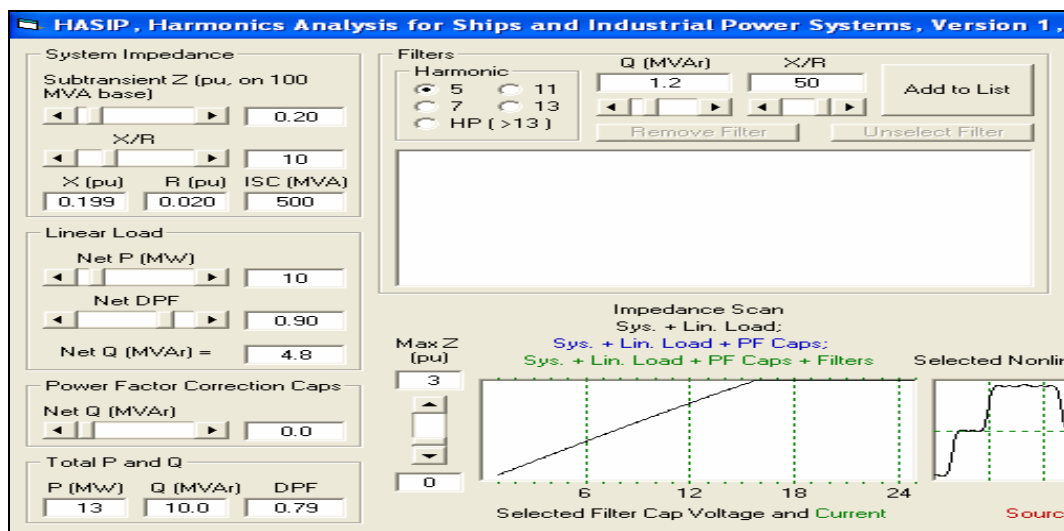
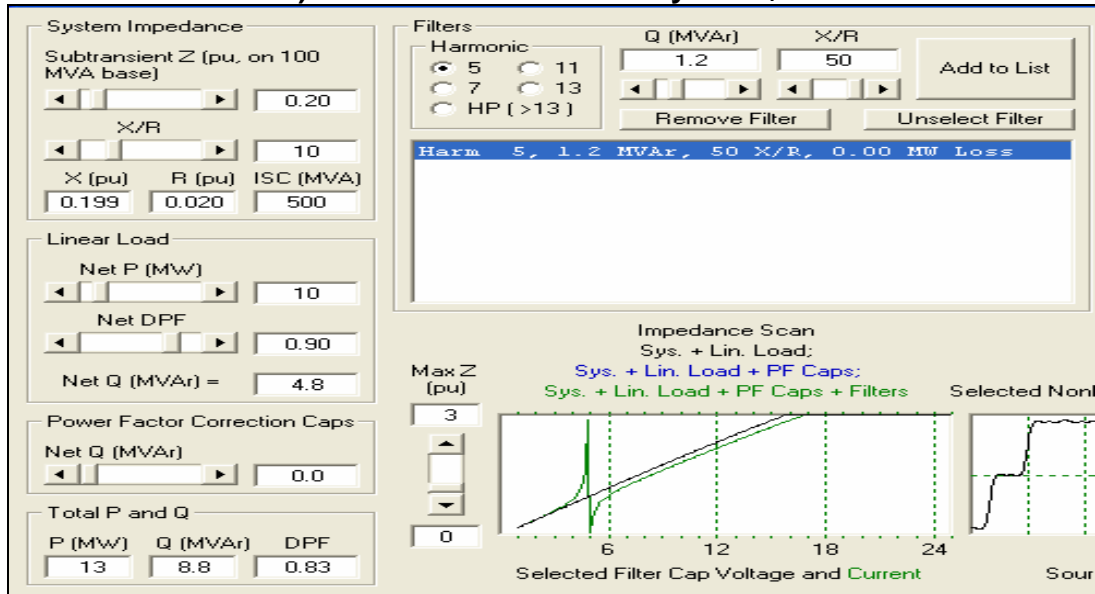
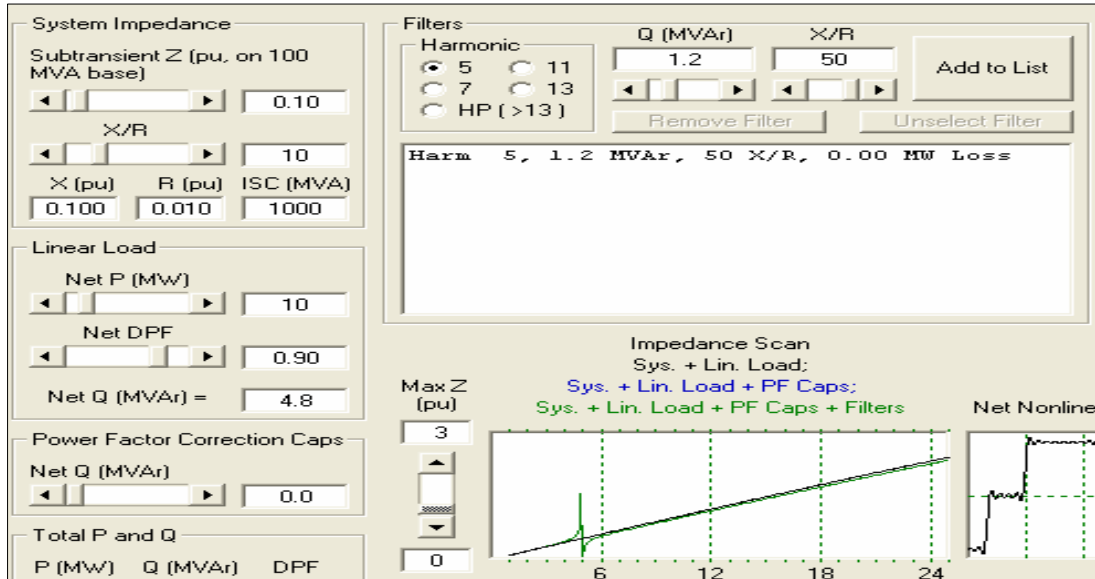


Figura 26. (2 de 2)

b) Sistema con filtro de 5° y MVA_1



c) Sistema con filtro y con $MVA_2 > MVA_1$



Fuente: *Harmonics Analysis for Ships and Industrial Power Systems (HASIP), Version 1, March 17, 2004. Power Systems Research Group, Department of Electrical & Computer Engineering, The University of Texas at Austin.*

2.2.5.1 Incremento de la impedancia

Un desplazamiento hacia arriba en la frecuencia de sintonía (por ejemplo por el efecto del envejecimiento de los condensadores) resultará en un incremento importante en la impedancia vista por la armónica⁹. Los mecanismos comunes que pueden resultar en la resintonización del filtro son:

- El disparo de los fusibles del condensador, dejando solo una sección del banco y resultando en una capacitancia más pequeña, lo que elevará la frecuencia de sintonía del filtro, las tolerancias de fabricación de la sintonía del reactor y las unidades del condensador.
- Las variaciones en la temperatura, que pueden producir un envejecimiento acelerado del banco de condensadores.
- Las variaciones de la topología o configuración del sistema.

Para minimizar los efectos de la resintonización, se recomienda que los filtros sean sintonizados aproximadamente de 3 a 15 % por debajo de la frecuencia deseada. Si se usan múltiples filtros, la frecuencia de resonancia paralelo será mas baja que la de sintonía del filtro y superior a la frecuencia del filtro sintonizado a una frecuencia menor.

2.2.5.2 Conexión de filtros múltiples

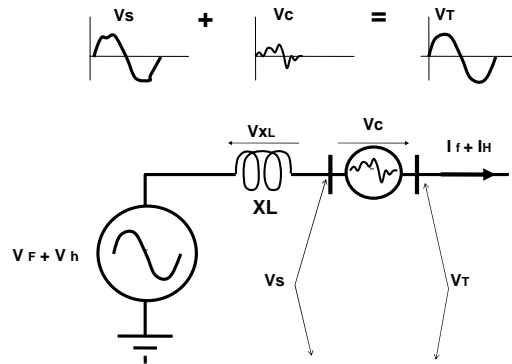
Los filtros deberán aplicarse y conectarse al sistema de potencia, iniciando por los de orden mas bajo. En caso de que se requiera reducir los KVAR del sistema, el filtro de mayor orden deberá de desconectarse primero.

2.3 Filtros activos se pueden clasificar en dos clases: tipo serie y tipo paralelo

2.3.1 Filtro activo serie

En el caso de tensiones armónicas, el filtro activo se comporta como un generador de voltaje controlado que produce el voltaje V_c . El sistema eléctrico de potencia es representado por una fuente de voltaje con una impedancia interna de valor X_L . El voltaje V_s en las terminales de salida del sistema generador es la suma del voltaje fundamental V_F y el voltaje armónico V_h , menos la caída de voltaje V_{XL} a través de X_L ¹⁰. El principio de funcionamiento de un filtro como este se presenta gráficamente en al figura 27.

Figura 27. Principio de operación de un filtro activo tipo serie

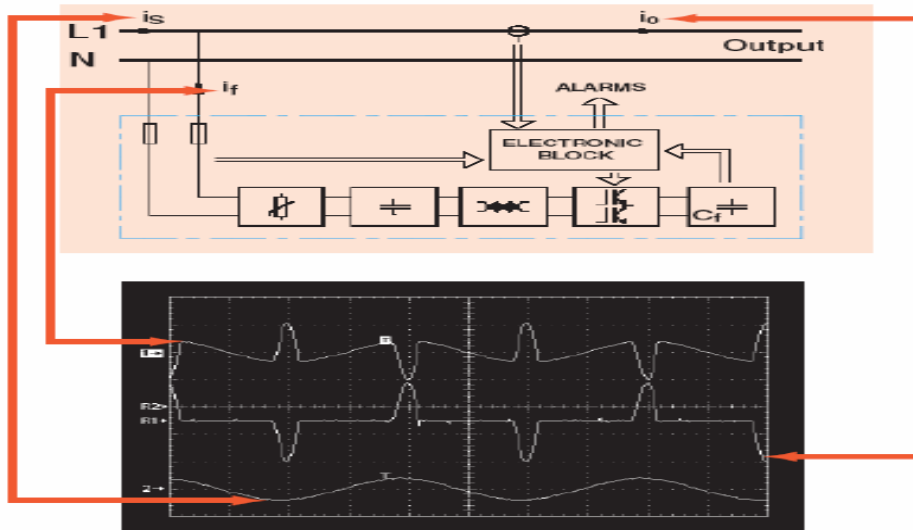


Fuente: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. UANL, Dr. Miguel Francisco Escalante, Monterrey, México. Octubre 2004. I CURSO AVANZADO DE CALIDAD DE ENERGÍA. Comunicación Personal.

2.3.2 Filtro activo paralelo

Los filtros activos utilizan sensores de armónicos para analizar la forma de onda de la corriente i_f y sistemas electrónicos para crear corrientes armónicas invertidas i_o , las que son inyectadas a la red. Los armónicos inyectados se anulan mutuamente con los armónicos de la carga, quedando una onda sinusoidal sin armónicos i_s como la mostrada en la figura 28. Son los filtros más eficaces para la compensación de armónicas desconocidas o cambiantes. En la figura 28 se muestra el diagrama de bloques de este tipo de filtro y un ejemplo de una posible forma de onda presente, la forma de onda generada por el filtro y la forma de onda resultante.

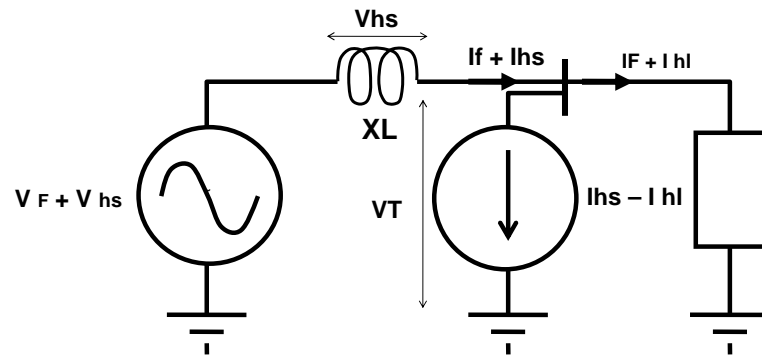
Figura 28. Diagrama de bloques de un filtro activo y ejemplo de forma de onda resultado de su aplicación



Fuente: Luis Alejandro Piedra Ortiz. IE PROYECTO ELECTRICO. Estudio de los Efectos y Métodos de Minimización de Distorsiones Armónicas en equipos de Distribución Industriales y Comerciales. Página 63.

El filtro activo paralelo se comporta como un generador de corriente controlada que puede compensar las corrientes armónicas de la carga I_{HL} , al igual que las corrientes armónicas de la fuente I_{HS} . Si el filtrado es ideal, el filtro genera una corriente igual a $(I_{HS}-I_{HL})$. En este caso, el voltaje V_T en la entrada de la carga será sinusoidal. Una representación esquemática del principio de operación de un filtro activo paralelo se puede ver en la figura 29.

Figura 29. Principio de operación de un filtro activo tipo paralelo



Fuente: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. UANL, Dr. Miguel Francisco Escalante, Monterrey, México. Octubre 2004. I CURSO AVANZADO DE CALIDAD DE ENERGÍA. Comunicación Personal.







3. MEDICIONES

3.1. Instrumento

Para efectos de garantizar la obtención de una medición que responda a los valores reales de corriente y tensión de la red analizada, se requiere que el instrumento de medición esté amparado con el respectivo certificado de calibración, con lo cual se validarán las mediciones bajo normas reconocidas internacionalmente.

Como ejemplo, se muestra una copia del certificado de calibración del instrumento con el cual se hicieron las mediciones presentadas, ver figura 30.

Figura 30. Certificado de calibración del instrumento de medición

 POWER INSTRUMENTS 255 North Union Street, Rochester, NY 14605 U.S.A. Telephone: 585-263-7700 Fax: 585-262-4777			
CERTIFICATE OF CALIBRATION			
S.O. NUMBER: RMA04368			
CUSTOMER NAME: REPRESENTACIONES Y SERVICIOS			
P.O. NUMBER: 542004			
MODEL NUMBER: ACE2000			
SERIAL NUMBER: A695-083001			
<p>This is to certify that the above referenced equipment has been calibrated using standards whose accuracies are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST), within the limits of the Bureau calibration services. Actual records pertaining to these standards are on file and are available for examination.</p>			
Certified By: AMETEK POWER INSTRUMENTS			
CALIBRATED BY: D. Casey			
DATE: May 10 , 2004			
TITLE: Technician			
NEXT CALIBRATION DUE ON: DATE: May 10 , 2005			
Below are the test report numbers, which are applicable to the metrology lab standards.			
2932305090218	251737	16830	
1017264756	21111	16787	
811/266673-02	WWVB	821/259564	
LCS001464/093099	266142-02	822/254143	
LCS001840/040500	822/250904		
			
PC3815/20021			ISO-9001 CERTIFIED

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Departamento de Calidad de Producto y Servicio. División de Calidad.

3.2 Características metrológicas

Las principales características del instrumento son las siguientes:

Rangos

Voltajes: 6-750 Vac, ± 800 Vdc

Voltaje (4 canales): 0-60 Vac, ± 70 Vdc

Corriente: 5 A rms AC o DC / 3 V rms AC o DC para pinzas de corriente.

Frecuencia: DC o 45-65 Hz.

Alta exactitud

Voltaje: 0.1% f.s.

Corriente: 0.1% f.s.

Funciones medidor de potencia:

RMS V inst./min./avg./max

RMSAinst./min./avg./max./neutral

3-fases desequilibradas instantáneas

W Inst./avg./max.

VAr Inst./avg./max.

Δ VAr Avg.

VA Inst./avg.

FP/displ.FP Inst./avg.

kWh Demandada/entregada

kVArh Demandada/entregada

Demanda W/VA/FP

Hz

Medición de Armónicos:

THD

0-50 armónica (modulo & ángulo)

3.3. Presentación de las mediciones

Para los propósitos de esta tesis, se presentan dos mediciones efectuadas en distintas entidades conectadas a la red de media tensión del área central del país. Durante el período de medición se ha obtenido un total de 999 registros por cada medición.

El instrumento se ajustó para que las mediciones cumplieran con los parámetros establecidos en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución:

Periodo de medición de siete días, Artículo 20.

Intervalos de medición k, de diez minutos, Artículo 21.

Medición de orden armónico 1 hasta la 40, Artículo 32.

Los resultados de las mediciones se muestran en las tablas siguientes:

Tabla III. Medición INDUSTRIA 1, datos técnicos

NOMBRE	CENTRO MTBT	CIRCUITO	SUBESTACIÓN	TIPO RED	TENSIÓN	KVA	CONEXIÓN
INDUSTRIA 1		69	MARIA MARQUES	RURAL	460/265	1000	YY

Tabla IV. Valores de distorsión armónica registrados en el período de medición

TOTAL DE REGISTROS	REGISTROS FUERA DE RANGO	REGISTROS EN RANGO	% DE TIEMPO FUERA DE NORMA	ENERGÍA TOTAL kWh	TIPO DE ARMONICOS
999	631	368	63%	34831	DE TENSIÓN
	124	875	12%		DE CORRIENTE

Fuente: Elaboración propia.

La tabla III, muestra los datos técnicos de la Industria 1. La tabla IV, presenta los 999 registros de la medición, de los cuales 631 registros están fuera de las tolerancias, en el caso de los armónicos de tensión, y 124 en los de corriente, que corresponden al 63% y 12%, respectivamente, del total de registros obtenidos en los siete días del periodo de medición.

TABLA V. Medición INDUSTRIA 2, datos técnicos

NOMBRE	CENTRO MTBT	CIRCUITO	SUBESTACIÓN	TIPO RED	TENSIÓN	KVA	CONEXIÓN
INDUSTRIA 2	3913159	54	RODRIGUEZ B.	RURAL	469/265	750	YY

Tabla VI. Valores registrados en el período de medición 2

TOTAL DE REGISTROS	REGISTROS FUERA DE RANGO	REGISTROS EN RANGO	% DE TIEMPO FUERA DE NORMA	ENERGÍA TOTAL KWh	TIPO DE ARMONICOS
999	998	1	99.90%	10693	DE TENSIÓN
	768	231	77%		DE CORRIENTE

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla V se puede ver los datos generales de la Industria 2. La tabla VI muestra que se obtuvieron 999 registros, de los cuales 998 registros están fuera de la tolerancias, en el caso de los armónicos de tensión, y 768 en los de corriente, que corresponden al 99.9% y 77%, respectivamente, del total de registros obtenidos en los siete días del período de medición.

En ambos casos se superó el 5% indicado en el Artículo 42 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, razón por la cual correspondería hacer efectivo el pago de la indemnización, como se mostrará en el capítulo 6.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE ARMÓNICAS

4.1. Índice de calidad de la distorsión armónica de la corriente de carga

El índice se evalúa de acuerdo a las disposiciones de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Según el Artículo 41, el índice se expresa así, para tensiones mayores de 1 kV y potencias de carga mayores de 10 kW:

$$\text{DATI} = \left(\sqrt{\sum I_i^2 / I_1^2} \right) \times 100$$

$$\text{DAII} = (I_i / I_1) \times 100$$

En donde:

DATI: Distorsión Armónica Total de Corriente.

DAII: Distorsión Armónica Individual de Corriente.

I_i : Componente de la intensidad de corriente de la armónica de orden i

I_1 : Componente de la intensidad de corriente de la frecuencia fundamental (60 Hz)

4.2. Tolerancias de la distorsión armónica de la corriente de carga

La distorsión armónica de tensión producida por una fuente de corriente armónica dependerá de la potencia del Usuario, del nivel de tensión al cual se encuentra conectado, y del orden de la armónica.

En la tabla VII, se establecen las tolerancias de corrientes armónicas individuales para distintos niveles de tensión, potencia máxima demandada y orden de armónica.

Tabla VII. Tolerancias para la distorsión armónica de corriente

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	P ≤ 10 kW V ≤ 1kV	P > 10Kw 1kV < V ≤ 60kV	P > 50kW v > 60kV
	INTENSIDAD ARMÓNICA MAXIMA (AMP)	DISTORSION ARMONICA INDIVIDUAL DE CORRIENTE DAII, EN %	
IMPARES NO MULTIPLOS DE 3			
5	2.28	12.0	6.0
7	1.54	8.5	5.1
11	0.66	4.3	2.9
13	0.42	3.0	2.2
17	0.26	2.7	1.8
19	0.24	1.9	1.7
23	0.20	1.6	1.1
25	0.18	1.6	1.1
> 25	4.5/n	0.2 + 0.8*25/n	0.4
IMPARES MULTIPLOS DE 3			
3	4.60	16.6	7.5
9	0.80	2.2	2.2
15	0.30	0.6	0.8
21	0.21	0.4	0.4
> 21	4.5/n	0.3	0.4
PARES			
2	2.16	10.0	10.0
4	0.86	2.5	3.8
6	0.60	1.0	1.5
8	0.46	0.8	0.5
10	0.37	0.8	0.5
12	0.31	0.4	0.5
> 12	3.68/n	0.3	0.5
DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE DATI, EN %	--	20	12

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Normas Técnicas de Servicio de Distribución, NTSD.

Se considera que una medición esta fuera de tolerancia, si del total de registros del archivo de armónicos, una cantidad mayor al cinco por ciento viola los límites establecidos en las tolerancias, de la tabla del Artículo 42.

En este caso, analizaremos un registro de los 999 con que cuenta cada una de las mediciones, los datos y los resultados se resumen en las tablas VIII y IX.

Como puede verse, el valor que resulta del promedio de las armónicas de las tres fases $D_{ATI(k)}$, es comparado con el valor de la tolerancia de la columna D_{ATI} , por medio de una diferencia ($D_{ATI(k)} - D_{ATI}$) y si el resultado es mayor que cero se le aplica la Distorsión Penalizable Individual de Armónicas (DPIAk) cuya ecuación es:

$$DPIAk = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATI(k)} - D_{ATI}}{D_{ATI}} \right] + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATI(k)} - D_{ATI}}{D_{ATI}} \right]$$

Tabla VIII. INDUSTRIA 1, intervalo de corriente medido el 16 de noviembre,

15:39

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIi i (K)	DAIi P MAYOR 10 KI W Y TENSION ENTRE 1 Y 60 KV	(DAIi (K) - DAIi i)	SI (DAIi (K) - DAIi i) ES MAYOR A CERO, ((DAIi (K) - DAIi i)/DAIi i)
Current.Harmonics % 2	0.67	0.63	0.62	0.64	10.00	-9.360	0.000
Current.Harmonics % 3	0.96	0.32	1.09	0.79	16.60	-15.811	0.000
Current.Harmonics % 4	0.23	0.23	0.23	0.23	2.50	-2.271	0.000
Current.Harmonics % 5	2.76	1.74	2.61	2.37	12.00	-9.631	0.000
Current.Harmonics % 6	0.22	0.22	0.22	0.22	1.00	-0.781	0.000
Current.Harmonics % 7	5.42	2.44	5.81	4.56	8.50	-3.940	0.000
Current.Harmonics % 8	0.18	0.16	0.17	0.17	0.80	-0.630	0.000
Current.Harmonics % 9	0.30	0.33	0.26	0.29	2.20	-1.906	0.000
Current.Harmonics % 10	0.20	0.19	0.20	0.20	0.80	-0.604	0.000
Current.Harmonics % 11	1.62	0.90	1.06	1.19	4.30	-3.106	0.000
Current.Harmonics % 12	0.17	0.16	0.17	0.17	0.40	-0.233	0.000
Current.Harmonics % 13	0.53	0.79	0.77	0.70	3.00	-2.305	0.000
Current.Harmonics % 14	0.17	0.17	0.16	0.17	0.30	-0.135	0.000
Current.Harmonics % 15	0.18	0.18	0.20	0.19	0.60	-0.413	0.000
Current.Harmonics % 16	0.12	0.12	0.12	0.12	0.30	-0.180	0.000
Current.Harmonics % 17	0.42	0.66	0.41	0.50	2.70	-2.204	0.000
Current.Harmonics % 18	0.17	0.16	0.17	0.16	0.30	-0.136	0.000
Current.Harmonics % 19	0.52	0.63	0.40	0.52	1.90	-1.384	0.000
Current.Harmonics % 20	0.16	0.16	0.16	0.16	0.30	-0.143	0.000
Current.Harmonics % 21	0.20	0.19	0.17	0.19	0.40	-0.214	0.000
Current.Harmonics % 22	0.16	0.16	0.16	0.16	0.30	-0.142	0.000
Current.Harmonics % 23	0.42	0.51	0.25	0.39	1.60	-1.206	0.000
Current.Harmonics % 24	0.13	0.13	0.13	0.13	0.30	-0.173	0.000
Current.Harmonics % 25	0.49	0.60	0.31	0.46	1.60	-1.135	0.000
Current.Harmonics % 26	0.15	0.14	0.14	0.14	0.30	-0.158	0.000
Current.Harmonics % 27	0.16	0.17	0.17	0.16	0.30	-0.136	0.000
Current.Harmonics % 28	0.13	0.14	0.13	0.13	0.30	-0.167	0.000
Current.Harmonics % 29	0.44	0.56	0.26	0.42	0.90	-0.480	0.000
Current.Harmonics % 30	0.12	0.12	0.12	0.12	0.30	-0.179	0.000
Current.Harmonics % 31	0.55	0.70	0.32	0.52	0.90	-0.376	0.000
Current.Harmonics % 32	0.10	0.11	0.08	0.10	0.30	-0.205	0.000
Current.Harmonics % 33	0.20	0.22	0.14	0.19	0.30	-0.114	0.000
Current.Harmonics % 34	0.14	0.16	0.12	0.14	0.30	-0.158	0.000
Current.Harmonics % 35	0.45	0.56	0.30	0.44	0.80	-0.360	0.000
Current.Harmonics % 36	0.12	0.12	0.12	0.12	0.30	-0.182	0.000
Current.Harmonics % 37	0.81	0.88	0.48	0.72	0.70	0.024	0.034
Current.Harmonics % 38	0.14	0.14	0.13	0.13	0.30	-0.167	0.000
Current.Harmonics % 39	0.32	0.35	0.25	0.30	0.30	0.005	0.016
Current.Harmonics % 40	0.16	0.15	0.13	0.15	0.30	-0.152	0.000
ORDEN	L1	L2	L3	DATI K	DATI	DATI K - DATI	(DATI K - DATI)/DATI
Current.Harmonics % THD	6.05	3.67	6.26	5.33	20.00	-14.673	0.000

Fuente: Elaboración propia.

En este intervalo están fuera de tolerancia DATI, los armónicos de corriente 37 y 39 cuyos valores promedios (DAIi_k) son 0.72 y 0.30. Luego se suma todos los resultados (de la 2 a la 40 armónica) y se les divide entre tres, y finalmente se suma el resultado de la valuación de la distorsión total, lo que constituye la distorsión penada DPIA_k.

Tabla IX. INDUSTRIA 2, intervalo de corriente medido el 17 de febrero,

16:15

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAII i (K)	DAII i P MAYOR 10 KW Y TENSION ENTRE Y 60 KV	(DAII i (K) - DAII i)	SI (DAII i (K) - DAII i) ES MAYOR A CERO, (DAII i (K) - DAII i)/DAII i)
Current.Harmonics % 2	0.26	0.23	0.23	0.24	10.00	-9.759	0.000
Current.Harmonics % 3	2.00	1.76	0.44	1.40	16.60	-15.198	0.000
Current.Harmonics % 4	0.18	0.17	0.16	0.17	2.50	-2.327	0.000
Current.Harmonics % 5	0.48	0.62	0.71	0.60	12.00	-11.397	0.000
Current.Harmonics % 6	0.18	0.17	0.16	0.17	1.00	-0.826	0.000
Current.Harmonics % 7	2.43	1.45	1.45	1.78	8.50	-6.722	0.000
Current.Harmonics % 8	0.13	0.12	0.12	0.12	0.80	-0.678	0.000
Current.Harmonics % 9	0.27	0.54	1.26	0.69	2.20	-1.508	0.000
Current.Harmonics % 10	0.17	0.17	0.15	0.16	0.80	-0.640	0.000
Current.Harmonics % 11	1.20	1.45	1.43	1.36	4.30	-2.941	0.000
Current.Harmonics % 12	0.15	0.14	0.13	0.14	0.40	-0.259	0.000
Current.Harmonics % 13	0.89	0.74	1.00	0.88	3.00	-2.125	0.000
Current.Harmonics % 14	0.15	0.14	0.13	0.14	0.30	-0.162	0.000
Current.Harmonics % 15	0.48	0.52	0.52	0.51	0.60	-0.095	0.000
Current.Harmonics % 16	0.09	0.09	0.08	0.09	0.30	-0.210	0.000
Current.Harmonics % 17	0.18	0.16	0.31	0.22	2.70	-2.484	0.000
Current.Harmonics % 18	0.14	0.14	0.13	0.13	0.30	-0.166	0.000
Current.Harmonics % 19	0.15	0.15	0.17	0.16	1.90	-1.744	0.000
Current.Harmonics % 20	0.13	0.12	0.12	0.12	0.30	-0.177	0.000
Current.Harmonics % 21	0.22	0.15	0.13	0.16	0.40	-0.235	0.000
Current.Harmonics % 22	0.13	0.12	0.11	0.12	0.30	-0.178	0.000
Current.Harmonics % 23	0.13	0.14	0.13	0.13	1.60	-1.468	0.000
Current.Harmonics % 24	0.10	0.10	0.09	0.10	0.30	-0.205	0.000
Current.Harmonics % 25	0.13	0.12	0.11	0.12	1.60	-1.480	0.000
Current.Harmonics % 26	0.12	0.11	0.10	0.11	0.30	-0.189	0.000
Current.Harmonics % 27	0.12	0.11	0.11	0.11	0.30	-0.187	0.000
Current.Harmonics % 28	0.11	0.11	0.10	0.11	0.30	-0.194	0.000
Current.Harmonics % 29	0.12	0.11	0.10	0.11	0.90	-0.787	0.000
Current.Harmonics % 30	0.11	0.11	0.10	0.10	0.30	-0.195	0.000
Current.Harmonics % 31	0.11	0.11	0.10	0.11	0.90	-0.794	0.000
Current.Harmonics % 32	0.03	0.04	0.04	0.04	0.30	-0.263	0.000
Current.Harmonics % 33	0.10	0.09	0.08	0.09	0.30	-0.211	0.000
Current.Harmonics % 34	0.09	0.08	0.08	0.08	0.30	-0.218	0.000
Current.Harmonics % 35	0.10	0.09	0.08	0.09	0.80	-0.710	0.000
Current.Harmonics % 36	0.09	0.08	0.08	0.09	0.30	-0.215	0.000
Current.Harmonics % 37	0.11	0.10	0.09	0.10	0.70	-0.600	0.000
Current.Harmonics % 38	0.10	0.09	0.09	0.10	0.30	-0.205	0.000
Current.Harmonics % 39	0.10	0.10	0.09	0.10	0.30	-0.202	0.000
Current.Harmonics % 40	0.09	0.08	0.08	0.08	0.30	-0.216	0.000
ORDEN	L1	L2	L3	DATI K	DATI	DATI K- DATI	(DATI K- DATI)/DATI
Current.Harmonics % THD	3.71	3.11	2.93	3.25	20.00	-16.752	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Para este registro de la INDUSTRIA 2, no se violaron los límites normados en ninguno de los órdenes armónicos.

4.3. Índice de calidad de la distorsión armónica de la tensión

El índice está dado por la distorsión armónica de la tensión, expresado como un porcentaje, se calcula utilizando las fórmulas indicadas a continuación¹¹:

$$\text{DATT (\%)} = \sqrt{(\sum Vi^2 / V1^2)} \times 100$$

$$\text{DAIT (\%)} = (Vi / V1) \times 100$$

En donde:

DATT: Distorsión Armónica Total de Tensión.

DAIT: Distorsión Armónica Individual de Tensión.

Vi: Componente de tensión de la armónica de orden i.

V1: Componente de tensión de frecuencia fundamental (60 Hz).

4.4. Tolerancias de la distorsión armónica de la tensión

Las tolerancias para la distorsión armónica de la tensión están expresadas en la tabla X. de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución.

Tabla X. Tolerancias para la distorsión armónica de tensión

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSION, DAIT [%]	
	BAJA Y MEDIA TENSION V≤60 kV	ALTA TENSION 60Kv<V≤ 230 kV
IMPARES NO MULTIPLoS DE 3		
5	6.0	2.0
7	5.0	2.0
11	3.5	1.5
13	3.0	1.5
17	2.0	1.0
19	1.5	1.0
23	1.5	0.7
25	1.5	0.7
> 25	0.2 + 1.3*25/n	0.1 + 0.6*25/n
IMPARES MULTIPLoS DE 3		
3	5.0	2.0
9	1.5	1.0
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
> 21	0.2	0.2
PARES		
2	2.0	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.5	0.4
10	0.5	0.4
12	0.2	0.2
> 12	0.2	0.2
DISTORSION ARMÓNICA TOTAL DE TENSION, DATT, EN %	8	3

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Normas Técnicas de Servicio de Distribución, NTSD.

Para el caso de la tensión, en ambas industrias analizaremos un registro de los 999 con que cuenta cada una de las mediciones, los datos y los resultados se resumen en las tablas XI. y XII. Como puede verse, el valor de cada armónica es evaluado respecto a la tolerancia de la columna $DATT_k \%$, por medio de $(DATT_k - DATT)$ y si el valor es mayor que cero se evalúa con la ecuación que constituye la distorsión penalizable DPA_k .

$$DPA_k = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATT(k)} - D_{ATT}}{D_{ATT}} \right] + \frac{1}{3} \sum_2^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATT_i(k)} - D_{ATT_i}}{D_{ATT_i}} \right]$$

Tabla XI. INDUSTRIA 1, intervalo de tensión del 16 de noviembre, 15:39

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIT I k	DAIT I (%) P MAYOR 10 KW Y TENSIÓN ENTRE 1 Y 60 KV	(DAIT I k-D AIT I)	SI (DAIT I k-D AIT I) ES MAYOR A CERO, ((DAIT I k-D AIT I) /DAIT I)
Voltage.Harmonics %Fundamental 2	0.15	0.13	0.13	0.14	2.00	-1.864	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 3	0.25	0.11	0.14	0.17	5.00	-4.835	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 4	0.10	0.11	0.10	0.10	1.00	-0.896	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 5	1.50	0.90	1.59	1.33	6.00	-4.669	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 6	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	-0.399	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 7	3.74	1.76	4.56	3.35	5.00	-1.647	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 8	0.09	0.08	0.08	0.08	0.50	-0.419	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 9	0.15	0.09	0.12	0.12	1.50	-1.380	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.50	-0.409	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 11	1.66	1.31	1.29	1.42	3.50	-2.078	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 12	0.07	0.08	0.07	0.07	0.20	-0.126	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 13	0.60	1.21	0.91	0.91	3.00	-2.091	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 14	0.08	0.09	0.07	0.08	0.20	-0.120	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 15	0.09	0.13	0.08	0.10	0.30	-0.200	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 16	0.05	0.08	0.05	0.06	0.20	-0.141	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 17	0.64	1.14	0.50	0.76	2.00	-1.243	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 18	0.07	0.08	0.07	0.07	0.20	-0.128	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 19	0.58	1.29	0.67	0.85	1.50	-0.652	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 20	0.08	0.12	0.07	0.09	0.20	-0.111	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 21	0.11	0.22	0.11	0.15	0.20	-0.052	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 22	0.08	0.14	0.08	0.10	0.20	-0.099	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 23	0.50	0.99	0.45	0.65	1.50	-0.853	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 24	0.05	0.06	0.05	0.05	0.20	-0.145	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 25	0.56	1.20	0.60	0.79	1.50	-0.713	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 26	0.08	0.16	0.08	0.11	0.20	-0.092	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 27	0.15	0.31	0.15	0.20	0.20	0.003	0.01
Voltage.Harmonics %Fundamental 28	0.09	0.18	0.10	0.12	0.20	-0.077	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 29	0.61	1.26	0.60	0.82	1.30	-0.478	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 30	0.05	0.06	0.05	0.05	0.20	-0.146	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 31	0.86	1.80	0.88	1.18	1.30	-0.119	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 32	0.12	0.25	0.12	0.16	0.20	-0.038	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 33	0.27	0.58	0.28	0.38	0.20	0.176	0.88
Voltage.Harmonics %Fundamental 34	0.18	0.38	0.18	0.25	0.20	0.049	0.24
Voltage.Harmonics %Fundamental 35	0.79	1.69	0.84	1.11	1.10	0.005	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 36	0.08	0.16	0.08	0.11	0.20	-0.093	0.00
Voltage.Harmonics %Fundamental 37	1.42	2.94	1.42	1.93	1.10	0.827	0.75
Voltage.Harmonics %Fundamental 38	0.14	0.31	0.16	0.20	0.20	0.002	0.01
Voltage.Harmonics %Fundamental 39	0.55	1.18	0.58	0.77	0.20	0.570	2.85
Voltage.Harmonics %Fundamental 40	0.23	0.50	0.23	0.32	0.20	0.120	0.60
ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DATT k	DATT	(DATTk-DATT)	((DATT k-D ATT) / D ATT)
Voltage.Harmonics % THD	5.13	6.01	5.74	5.63	8.00	-2.375	0.00

Fuente: Elaboración propia.

En este registro se violaron las tolerancias en los órdenes armónicos 27, 33, 34, 37, 38, 39 y 40.

Tabla XII. INDUSTRIA 2, intervalo de tensión del 17 de febrero, 16:15

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIT i k	DAITi (%) P MAYOR 10 KW Y TENSIÓN ENTRE 1 Y 60 KV	(DAIT i k-D AITi)	SI (DAIT i k-D AITi) ES MAYOR A CERO, ((DAIT i k-D AITi) /DAITi))
Voltage.Harmonics % 2	0.17	0.19	0.18	0.18	2.00	-1.82	0.000
Voltage.Harmonics % 3	56.11	57.01	57.44	56.85	5.00	51.85	10.371
Voltage.Harmonics % 4	0.15	0.15	0.14	0.14	1.00	-0.86	0.000
Voltage.Harmonics % 5	1.02	1.67	0.50	1.06	6.00	-4.94	0.000
Voltage.Harmonics % 6	0.11	0.12	0.12	0.12	0.50	-0.39	0.000
Voltage.Harmonics % 7	2.94	2.16	0.40	1.84	5.00	-3.16	0.000
Voltage.Harmonics % 8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	-0.40	0.000
Voltage.Harmonics % 9	11.31	11.40	11.99	11.57	1.50	10.07	6.712
Voltage.Harmonics % 10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.50	-0.39	0.000
Voltage.Harmonics % 11	0.27	0.75	0.69	0.57	3.50	-2.93	0.000
Voltage.Harmonics % 12	0.08	0.09	0.08	0.08	0.20	-0.12	0.000
Voltage.Harmonics % 13	1.10	1.24	1.06	1.13	3.00	-1.87	0.000
Voltage.Harmonics % 14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	-0.10	0.000
Voltage.Harmonics % 15	4.10	4.17	4.16	4.14	0.30	3.84	12.812
Voltage.Harmonics % 16	0.05	0.06	0.06	0.06	0.20	-0.15	0.000
Voltage.Harmonics % 17	0.30	0.32	0.34	0.32	2.00	-1.68	0.000
Voltage.Harmonics % 18	0.08	0.08	0.08	0.08	0.20	-0.12	0.000
Voltage.Harmonics % 19	0.64	0.66	0.65	0.65	1.50	-0.85	0.000
Voltage.Harmonics % 20	0.07	0.08	0.08	0.08	0.20	-0.12	0.000
Voltage.Harmonics % 21	1.57	1.59	1.60	1.59	0.20	1.39	6.935
Voltage.Harmonics % 22	0.07	0.07	0.07	0.07	0.20	-0.13	0.000
Voltage.Harmonics % 23	0.32	0.33	0.33	0.32	1.50	-1.18	0.000
Voltage.Harmonics % 24	0.05	0.06	0.06	0.05	0.20	-0.15	0.000
Voltage.Harmonics % 25	0.31	0.30	0.31	0.31	1.50	-1.19	0.000
Voltage.Harmonics % 26	0.06	0.07	0.06	0.07	0.20	-0.14	0.000
Voltage.Harmonics % 27	0.56	0.57	0.58	0.57	0.20	0.37	1.855
Voltage.Harmonics % 28	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20	-0.14	0.000
Voltage.Harmonics % 29	0.18	0.18	0.19	0.18	1.30	-1.12	0.000
Voltage.Harmonics % 30	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20	-0.14	0.000
Voltage.Harmonics % 31	0.08	0.08	0.08	0.08	1.30	-1.22	0.000
Voltage.Harmonics % 32	0.01	0.01	0.02	0.01	0.20	-0.19	0.000
Voltage.Harmonics % 33	0.11	0.12	0.12	0.12	0.20	-0.08	0.000
Voltage.Harmonics % 34	0.04	0.04	0.04	0.04	0.20	-0.16	0.000
Voltage.Harmonics % 35	0.07	0.07	0.07	0.07	1.10	-1.03	0.000
Voltage.Harmonics % 36	0.04	0.05	0.05	0.05	0.20	-0.15	0.000
Voltage.Harmonics % 37	0.06	0.06	0.06	0.06	1.10	-1.04	0.000
Voltage.Harmonics % 38	0.05	0.05	0.05	0.05	0.20	-0.15	0.000
Voltage.Harmonics % 39	0.07	0.07	0.07	0.07	0.20	-0.13	0.000
Voltage.Harmonics % 40	0.04	0.05	0.05	0.05	0.20	-0.16	0.000
ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DATT k	DATT	(DATTk-DATT)	((DATT k-D ATT) / D ATT))
Voltage.Harmonics % THD	57.52	58.40	58.88	58.27	8.00	50.27	6.283

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se violaron las tolerancias en los órdenes armónicos 3, 9, 15, 21,27 y el de THD. En la 3° armónica la tolerancia es de 5 y el dato del registro fue de 56.85, por lo que le corresponde un valor de DPAk de 10.371. El cual se evalúa con la ecuación que constituye la distorsión penalizable DPAk.

$$DPAk = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATT(k)} - D_{ATT}}{D_{ATT}} \right] + \frac{1}{3} \sum_2^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{AIT_i(k)} - D_{AIT_i}}{D_{AIT_i}} \right]$$

Según la normativa vigente una medición es considerada fuera de las tolerancias, cuando al menos el cinco por ciento del total de los registros validos violen las tolerancias.

Violar las tolerancias establecidas por la normativa conlleva una penalización económica por medio de la aplicación del pago de una indemnización, acompañado con el aumento de las perdidas en los conductores y los efectos negativos de las corrientes armónicas fluyendo por los dispositivos capacitivos de los equipos electrónicos conectados en la misma red eléctrica reduciendo su vida útil. Esto puede corregirse o bien ser llevado a nivel mínimo utilizando filtros especialmente diseñados para atenuar las armónicas más altas, como se muestra en el siguiente capítulo.

5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE TENSION POR RESONANCIA ARMÓNICA

5.1 Diseño de filtros pasivos compensadores de factor de potencia y rechazo de armónicos

Para solucionar el problema de las tensiones y corrientes por resonancia armónica, se puede implementar el uso de filtros pasivos, el cual beneficiará la calidad de energía al atenuar las corrientes armónicas y mejorar el factor de potencia.

A continuación se muestra la metodología de los cálculos para la selección del filtro de armónicas¹², así como un ejemplo de su aplicación.

5.1.1. Selección del banco de capacitores

Como primera instancia seleccionamos el banco de capacitores para mejorar el factor de potencia, para lo cual se proyecta el factor de potencia a valores superiores a 0.9.

$$Q = P * (\tan(\cos^{-1} FP_{\text{anterior}}) - \tan(\cos^{-1} FP_{\text{nuevo}}))$$

Donde

$$Q = \text{KVAR}_c$$

$$P = \text{kW}$$

FP= factor de potencia

5.1.2. Cálculo del orden de resonancia armónico

Luego se calcula el orden armónico de la resonancia con la siguiente ecuación:

$$H = \sqrt{MVA_{CC} / MVAR_{CAP}} = \sqrt{X_C / X_{CC}}$$

Donde:

MVA_{cc} = potencia de corto circuito

$MVAR_{cap}$ = potencia reactiva capacitiva

X_c = reactancia capacitiva

X_{cc} = reactancia de corto circuito

5.1.3. Cálculo de la frecuencia de resonancia

$$F_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC} = F \cdot \sqrt{X_{C1}/X_{L5}}$$

5.1.4. Cálculo de la reactancia capacitiva

$$X_{C1} = kV^2 / kVA_{rc}$$

Donde:

X_{C1} = reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental

kV = kilo Voltios

X_{L5} = reactancia inductiva a 5° armónico, a la frecuencia armónica h,

X_{Ch} = $(1/h) X_{C1}$

5.1.5. Cálculo de la reactancia inductiva

A la frecuencia armónica h:

$$X_{Lh} = X_{Ch}$$

A la frecuencia fundamental es

$$X_{L1} = (1/h) * X_{Lh}$$

5.1.6. Cálculo del voltaje pico a través de los capacitores

El voltaje pico a través de los capacitores no debe exceder del 120% del valor nominal.

$$V_{\text{PICO}} = \sqrt{2} V_{C1} + \sqrt{2} V_{Ch}$$

A la frecuencia fundamental es:

$$V_{C1} = X_{C1} * I_{C1}$$

5.1.7. Corriente a través del capacitor, se recomienda un 5% mayor que el nominal

$$I_{C1} = V_F / (X_{C1} - X_{L1}) = 1.05 * (V_L / 1.732) / (X_{C1} - X_{L1})$$

5.1.8. Corriente rms en los capacitores

Esta no debe exceder el 135% de la corriente de los capacitores.

$$I_L = \sqrt{I_{L1}^2 + I_{Lh}^2}$$

5.1.9. Capacidad del banco inductivo y del capacitivo

Determinar la potencia del banco de capacitores y de los reactores, necesaria tanto para corregir el factor de potencia como para filtrar las corrientes armónicas.

$$MVA_C = V_{CAP} * I_L / 1000$$

$$MVA_L = (I_{L1} * X_{L1} + I_{Lh} * X_{Lh}) / 1000$$

5.1.10. Determinar los esfuerzos reales y verificar que se encuentren dentro de los límites tolerables

Esto se logra aplicando los criterios que se describen a continuación.

5.1.10.1 Criterios para proteger el banco de capacitores

De acuerdo a las normas IEEE Std 519-1992 sobre regulación de armónicas y la NEMA/IEEE 18-1980 sobre los criterios para proteger los bancos de capacitores, estos pueden operar continuamente, hasta 1.1 p.u. de su voltaje nominal rms, provisto que:

- El voltaje cresta, incluyendo todas las armónicas no exceda $(1.2) * \sqrt{2} * (\text{voltaje nominal rms})$.
- La corriente rms sea igual o menor a 135% de la corriente nominal de los capacitores.
- La potencia del banco de capacitores considerando las corrientes armónicas correspondientes no exceda 135 % de la potencia nominal.

5.1.11 Verificar las condiciones de resonancia

Una vez seleccionados los parámetros de los filtros, es importante verificar que no se produzcan las condiciones de resonancia entre el banco de capacitores del filtro y la reactancia inductiva del sistema. Estrictamente, para esta condición es necesario hacer uso de un programa de flujos armónicos, para llevar a cabo simulaciones del sistema con el filtro diseñado y las peores condiciones que se pudieran presentar.

5.1.12 Tipo del reactor

Considerar que los reactores industriales para aplicaciones en media tensión son de núcleo de aire y los de núcleo de acero con entrehierro se pueden utilizar en media y baja tensión.

5.1.13 Reactor sintonizado

Los reactores utilizados en el diseño de filtros se construyen con núcleo de aire, lo que da características lineales respecto a frecuencia y corriente. Para aplicaciones en sistemas de potencia industriales, un 5% de tolerancia en la reactancia es aceptable, con una relación X/R de 50 a 150, para bajar la relación se puede usar un resistor serie. Se recomienda que el diseño del reactor deba tolerar un corto circuito en el punto entre el reactor y el capacitor.

Otro aspecto a considerar es el nivel básico de aislamiento (BIL), el cual debe ser el mismo que el de los transformadores de potencia al mismo nivel de voltaje. Los parámetros que incluyen las especificaciones del reactor son los siguientes:

- Corriente a 60 Hz.
- Espectro de corriente armónica.
- Corriente de corto circuito.
- Relación X/R.
- Voltaje del sistema.
- BIL (nivel básico de aislamiento).

5.1.14 Factor de calidad

Como se describió antes, y se repite por comodidad, el factor de calidad es una medida de la agudeza de la sintonización del filtro, o sea el ancho de banda del filtro se recomienda que Q tenga un valor entre 50-150 para obtener un mejor ancho de banda. Se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q = X_{L5} / R = X_{C5} / R$$

Donde:

- R Parte resistiva del reactor, en ohmios
- L Inductancia en Henrios
- C Capacitancia en Faradios
- Fo Frecuencia de resonancia

5.1.15 Ancho de banda del filtro

Es la relación de la frecuencia respecto al factor de calidad y denota la agudeza del filtrado¹³

$$B = F / Q \quad (\text{HZ})$$

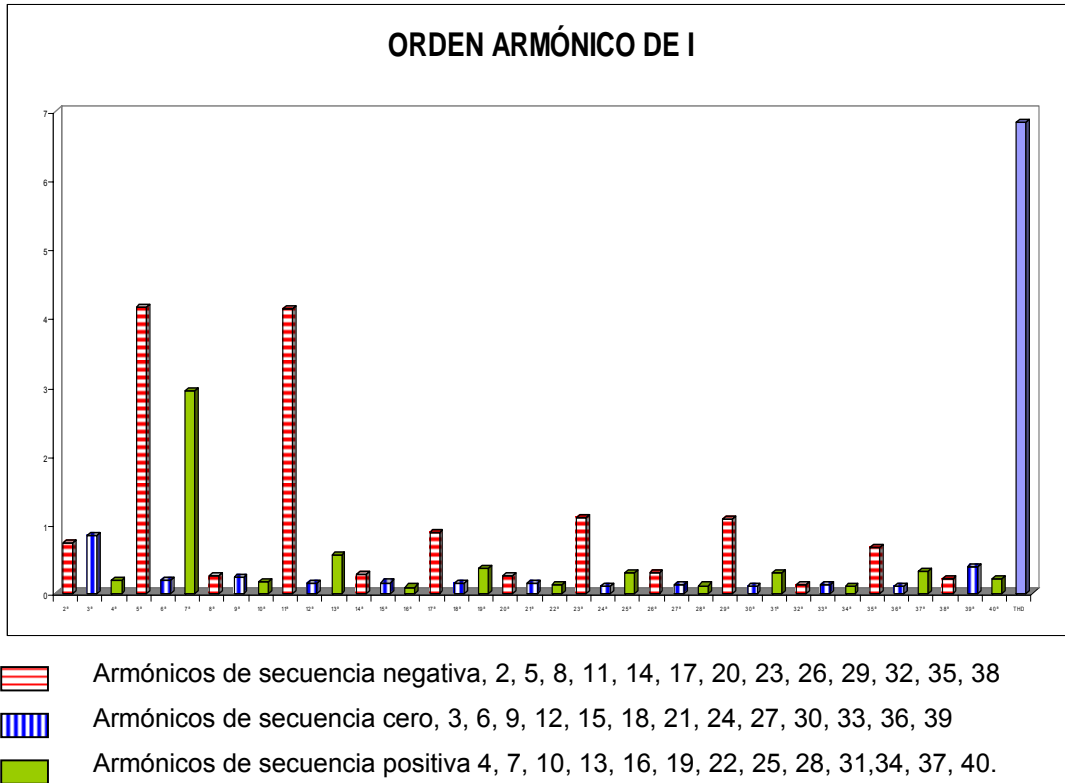
5.2. Ejemplo de aplicación

Se analizará una instalación donde se ha detectado valores altos de armónicos de secuencia negativa o sea el 2º, 5º, 8º, 11º etc. Como se aprecia en la figura 31.

5.2.1. Cálculo del filtro

En este caso particular la armónica dominante es la armónica de secuencia negativa, lo cual determina que se debe aplicar un filtro de 5º armónico.

Figura 31. Espectro armónico en la Industria 1



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la instalación bajo análisis se proporcionan en la tabla XIII.

Tabla XIII. Datos generales de la industria 1

NO. DE FASES	F1 (HZ)	KV LLNOM	MVA CC	FP ANTES	FP DISEÑO	MVA TRANSFORMADOR	MVA CARGA LINEAL	CARGA MVA EN EL TRANSFORMADOR	ARMONICA A FILTRAR	% DESVIACIÓN DE ARMONICA A FILTRAR	KV NOM CAPACITOR	[A] RECOMIENDADOS: 115-120 % #71	(% > Q NOMINAL)
3	60	13.8	6	0.734	0.95	1.00	0.150	0.5	5	6%	15	1.2	135%

Fuente. Elaboración propia.

5.2.2. Criterios de diseño

5.2.2.1. Capacitores

Se aplican las recomendaciones de las normas IEEE Std 519-1992 sobre regulación de armónicas y la NEMA/IEEE 18-1980, las cuales se presentan a continuación: KVARr 135 %, Voltaje rms 110 %, suma de voltajes pico 120 % y corriente rms 135 %.

5.2.2.2. Reactores

En media tensión es recomendado con núcleo de aire. Los de núcleo de acero con entrehierro se usan en media y baja tensión. Se acepta un 5% de tolerancia para aplicaciones de sistemas de potencia industriales.

La relación X/R a 60 Hz es de 50 a 150. Para bajar la relación se puede usar un resistor serie. El reactor debe tolerar un corto circuito en el punto entre el reactor y el capacitor.

Otro aspecto a considerar es el nivel básico de aislamiento (BIL), el cual debe ser el mismo de los transformadores de potencia al mismo nivel de voltaje.

5.2.2.3. Cálculos de diseño

Como primera instancia seleccionamos el banco de capacitores, para mejorar el factor de potencia, para lo cual se proyecta el factor de potencia de 0.95.

$$\begin{aligned} Q &= P * FP_{\text{anterior}}(\tan(\cos^{-1} FP_{\text{anterior}}) - \tan(\cos^{-1} FP_{\text{nuevo}})) \\ &= 0.5\text{MVA} * 0.734 * (\tan(\text{Acos}0.734) - \tan(\text{Acos}0.95)) \\ &= 219 \text{ kVAr}_c \end{aligned}$$

Luego se calcula el orden armónico de la resonancia con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{MVA_{CC} / MVAR_{CAP}} \\ H &= \sqrt{6 / 0.219} = 5.23 \end{aligned}$$

Frecuencia de resonancia

$$\begin{aligned} F_o &= F * H = \\ &= 4.7 * 60 = 282 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Reactancia capacitiva

$$\begin{aligned} X_{C1} &= 13.8^2 / 219 \\ &= 869 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Reactancia inductiva

A la frecuencia armónica h:

$$\begin{aligned}X_{Lh} &= X_{Ch} \\ &= (4.7*4.7/(4.7*4.7-1))*869 = 911 \text{ ohms}\end{aligned}$$

Reactancia inductiva es a la frecuencia fundamental

$$\begin{aligned}X_{L1} &= (1/h)*X_{L1} \\ &= 869/(4.7*4.7)= 34.79 \text{ ohms}\end{aligned}$$

Cálculo del voltaje pico a través de los capacitares, el voltaje pico a través de los capacitores no debe exceder el 120% del valor nominal.

$$\begin{aligned}V_{C1} &= I_{C1} * X_C \\ &= 9.64*869.80 = 8385. \text{ Voltios}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{C(h)} &= I5*X_{C5} \\ &= 4.18*179.96 = 752 \text{ Voltios}\end{aligned}$$

$$V_c = 8385 + 752 = 9137. \text{ Voltios}$$

Valor que equivale al 115% del Voltaje nominal, por lo que se considera que cumple con el criterio de que V_c debe ser menor 120% de V_n .

Corriente a través del capacitor, se recomienda un 105% mayor que el nominal.

$$\begin{aligned}I_{C1} &= 1.05*(V_L/1.732) / (X_{C1} - X_{L1}) \\ &= 1.05*7960 / (869.80-34.79) \\ &= 9.54 \text{ Amperios}\end{aligned}$$

La corriente rms, no debe exceder el 135% de la corriente de los capacitores.

$$\begin{aligned} I_L &= \text{raíz}(I_{L1}^2 + I_{L5}^2) \\ &= \text{raíz}(9.54^2 + 4.18^2) = 10.42 \text{ Amperios} \end{aligned}$$

$$I_{\text{rms}_{\text{real}}} = 1.2 * 10.42 = 12.50 \text{ amperios}$$

Determinar la potencia del banco de capacitores y de los reactores, necesaria tanto para corregir el factor de potencia como para filtrar las corrientes armónicas.

$$\begin{aligned} \text{MVA}_C &= V_{\text{CAP}} * I_L * 3 / 1000000 \\ &= 12.50 * 9,027.45 * 3 / 1000000 \\ &= 0.34 \end{aligned}$$

Aplicando la recomendación de $Q_c < 135\%$

$$\begin{aligned} Q_{C_{\text{mín}}} &= 0.34 / 1.35 \\ &= 0.25 \end{aligned}$$

A la tensión de 15 kV nominal de fábrica:

$$\begin{aligned} Q_{C_{\text{mín}}} &= 0.25 * (8.96 / 7.60)^2 \\ &= 0.30 \text{ MVAR}_{C_{\text{mín}}} \end{aligned}$$

I nominal del capacitor

$$\begin{aligned} I_{\text{nom cap}} &= Q_{\text{Cmín}}/KV_{\text{n cap}} \\ &= 0.30*1000/(15*1.732) \\ &= 11.54 \text{ A} \end{aligned}$$

Ic = (< 1.35 p.u. recomendado por IEEE-18)

$$\begin{aligned} I_n &= I_{\text{rms}}/I_{\text{ncap}} \\ &= 12.50/11.54 \\ &= 1.083 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Por lo cual se considera que la corriente en el capacitor cumple con el valor < 1.35 p.u. recomendado.

La tensión en el capacitor debe ser menor del 110% de la tensión nominal.

$$\begin{aligned} KV_{\text{cap}} &= (h_5^*h_5 / (h_5^*h_5 - 1)) KV_{\text{sistema}} \\ &= (25/25-1)*13.8 = 14.375 \text{ KV} \end{aligned}$$

Si la tensión nominal del capacitor es de 15 kV, entonces

$$V_{\text{capacitor}} < 110\% \text{ Voltaje}_{\text{rms}} = 14.375/15 = 0.96 \%$$

Por lo cual se considera que cumple la recomendación de IEEE-18.

Potencia del filtro

$$\begin{aligned} Q_{\text{FILTRO}} &= (VC \cdot \text{RAIZ}(3))^2 / (X_C - X_L) / 1000000 \text{ MVAr} \\ &= 9027.45^2 \cdot 3 / (869.80 - 34.79) / 1000000 \\ &= 0.293 \text{ MVAr} \end{aligned}$$

Factor de calidad

$$Q = X_{L5} / R = 34.79 / 0.5 = 69.58$$

Lo cual esta dentro del rango recomendado de 50 a 150.

Ancho de banda B

$$B = F_5 / Q = 282 / 69.58 = 4.05 \text{ Hz}$$

Esto se puede interpretar como que el filtro actuará sobre los valores de corriente armónica entre 282 +/- 4 Hz, minimizándolos.

Con los valores calculados podemos ahora hacer nuestro requerimiento de adquisición del filtro a un fabricante o bien comprar los capacitores y reactores para hacer nuestro propio filtro.

6. CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

6.1. Penalización económica por exceder los límites de las tolerancias de la distorsión armónica de la tensión

Se plantea la consideración económica desde el punto de vista de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, desde esta perspectiva, la mala calidad de energía que el Distribuidor entrega a un usuario tiene penalización económica con lo cual se pretende que el Distribuidor se vea obligado a implementar soluciones que mejoren la calidad de la energía, entregando una tensión libre de distorsión armónica. La penalización por responsabilidad del Distribuidor en la distorsión de la forma de onda de la tensión se hace por medio de las ecuaciones del Artículo 34 de dichas Normas, debiendo hacer efectivo el pago de la indemnización cuando corresponda¹⁴.

Para la penalización, los registros con energía en malas condiciones se evalúan con la siguiente expresión:

$$DPA_k = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATT(k)} - D_{ATT}}{D_{ATT}} \right] + \frac{1}{3} \sum_{i=2}^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{AIT_i(k)} - D_{AIT_i}}{D_{AIT_i}} \right]$$

Donde:

- DPA_k: Es la Distorsión Penalizable de Armónicas para cada intervalo de medición k.
- D_{ATT(k)}: Es la Distorsión Armónica Total de Tensión, registrada en el intervalo de medición k .
- D_{ATT}: Es la tolerancia para la Distorsión Armónica Total de la Tensión, establecida en el Artículo 32 de estas Normas.
- D_{AIT_i(k)}: Es la Distorsión Armónica Individual de Tensión i, registrada en el Intervalo de Medición k.
- D_{AIT_i}: Es la tolerancia para la Distorsión Armónica Individual de Tensión i, establecida en el Artículo 32 de estas Normas.

En cada Intervalo de medición (k) registrado con energía suministrada en malas condiciones de calidad (intervalos con DPA mayor que cero), se utilizará el siguiente criterio para la valorización de la energía suministrada en condiciones inadecuadas (Q/kWh) para el cálculo de la Indemnización:

$$\begin{array}{ll}
 0 < \text{DPA}_k \leq 1 & \text{CENS} * (\text{DPA}_k)^2 \quad \text{Q/kWh} \\
 1 < \text{DPA}_k & \text{CENS} * \text{E}(k) \quad \text{Q/kWh}
 \end{array}$$

La Indemnización se determina como:

$$\text{Indemnización (Q)} = \sum_{k \text{DPA}_k < 1} \text{CENS} * (\text{DPA}_k)^2 * \text{E}(k) + \sum_{k \text{DPA}_k > 1} \text{CENS} * \text{E}(k)$$

Donde:

E(k): Energía registrada en cada Intervalo de Medición k.

6.2. Penalización económica por exceder los límites de las tolerancias de la distorsión armónica de la corriente de carga.

En los casos en que los Distribuidores verifiquen que alguno de sus Usuarios ha excedido las tolerancias establecidas en el Artículo 42 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución para la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga, el Usuario deberá pagar al Distribuidor una Indemnización determinada en función a la distorsión penalizable individual de armónicas.

Se define como Distorsión Penalizable Individual de Armónicas (DPIAk) a la Distorsión Armónica de la Corriente de Carga, registrada en cada Intervalo de medición k, que supere las tolerancias establecidas, según la siguiente expresión.

$$D_{PIAk} = \text{Max} \left[0, \frac{D_{ATI(k)} - D_{ATI}}{D_{ATI}} \right] + \frac{1}{3} \sum_2^{40} \text{Max} \left[0, \frac{D_{AII_i(k)} - D_{AII_i}}{D_{AII_i}} \right]$$

Donde:

- D_{PIAk} : Es la Distorsión Penalizable Individual de Armónicas para cada Intervalo de Medición k.
- $D_{ATI(k)}$: Es la Distorsión Armónica Total de la Corriente de Carga, registrada el intervalo de medición k, referida a la potencia Contratada por el Usuario.
- D_{ATI} : Es la tolerancia para la Distorsión Armónica Total de la Corriente de Carga.
- $D_{AII_i(k)}$: Es la Distorsión Armónica Individual de Corriente de Carga i, registrada en el Intervalo de Medición k, que inyecta el Usuario en la red. Las corrientes y las distorsiones medidas deben ser expresadas en valores absolutos de corrientes o en valores porcentuales con respecto a la intensidad de carga correspondiente con la potencia contratada por el Usuario, según corresponda.
- D_{AII_i} : Es la tolerancia para Distorsión Armónica Individual de la Corriente de Carga i.

En el caso anterior, en cada intervalo (k) en donde se verifique un valor de DPIA mayor que cero, se utilizará el siguiente criterio para la valorización de la energía consumida en condiciones inadecuadas (Q/kWh) para el cálculo de la indemnización:

$0 < \text{DPIA}_k \leq 1$	$\text{CENS} * \text{DPIA}_k^2$	Q/kWh
$1 < \text{DPIA}_k$	$\text{CENS} * E(k)$	Q/kWh

6.3. CÁLCULO DE LA INDEMNIZACIÓN POR EXCEDER LAS TOLERANCIAS PARA LA TENSIÓN ARMÓNICA, ARTÍCULO 34 DE LAS NTSD

INDUSTRIA 1. El orden 27, 33, 34, 37, 38, 39 y 40 de la tensión armónica están fuera de tolerancia, como se muestra en la tabla XIV. Como Costo de la Energía No Suministrada –CENS-, definido conforme al Artículo 58 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, se utilizará el valor de 12.591. La energía para los tres intervalos es de 34.86 kWh.

Tabla XIV. Armónicos de tensión fuera de tolerancia INDUSTRIA 1.

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIT i k	DAITI (%) P MAYOR 10 KW Y TENSIÓN ENTRE 1 Y 60 KV	(DAIT i k-D AITI)	SI (DAIT i k-D AITI) ES MAYOR A CERO, ((DAIT i k-D AITI) /DAITI))
Voltage.Harmonics %Fundamental 27	0.15	0.31	0.15	0.20	0.20	0.003	0.015
Voltage.Harmonics %Fundamental 33	0.27	0.58	0.28	0.38	0.20	0.176	0.880
Voltage.Harmonics %Fundamental 34	0.18	0.38	0.18	0.25	0.20	0.049	0.243
Voltage.Harmonics %Fundamental 37	1.42	2.94	1.42	1.93	1.10	0.827	0.752
Voltage.Harmonics %Fundamental 38	0.14	0.31	0.16	0.20	0.20	0.002	0.010
Voltage.Harmonics %Fundamental 39	0.55	1.18	0.58	0.77	0.20	0.570	2.850
Voltage.Harmonics %Fundamental 40	0.23	0.50	0.23	0.32	0.20	0.120	0.598
ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DATT k	DATT	(DATTk-DATT)	((DATT k-D ATT) / D ATT))
Voltage.Harmonics % THD	5.13	6.01	5.74	5.63	8.00	-2.375	0.00

$\frac{((DATT k-D ATT) / D ATT)}{DATT = 8}$ <p>ARTICULO 31, NTSD</p>	$DPAk = \text{Max} \left[0, \frac{D_{AT1k} - D_{AT1}}{D_{AT1}} \right] + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \text{Max} \left[0, \frac{D_{AT1, i+1} - D_{AT1}}{D_{AT1}} \right]$	ENERGIA TRIFASICA POR INTERVALO EN Kwh
0.00	1.78	34.86

Fuente: elaboración propia

El DPAk calculado es el siguiente:

$$DPAk = 0 + \{0.015 + 0.880 + 0.243 + 0.005 + 0.752 + 0.010 + 2.850 + 0.598\} / 3$$

$$= 5.353 / 3 = 1.78$$

$$\text{Indemnización (Q)} = \sum_{\text{KDPak} \leq 1} \text{CENS} * (\text{DPAK})^2 * E_{(K)} + \sum_{\text{KDPak} > 1} \text{CENS} * E_{(K)}$$

Para un kDPAk >1

$$\text{Indemnización (Q)} = 0 + \{12.591 * 34.86\} = \text{Q } 438.93$$

Este cálculo se efectúa para cada uno de los registros y luego se suman los montos obtenidos. En este caso, los 631 registros fuera de tolerancia, que equivalen al 62% del total, sumaron Q134, 277.01.

INDUSTRIA 2. El orden 3, 9, 15, 21 y 27 de la tensión armónica están fuera de tolerancia, ver tabla XV. El Costo de la Energía No Suministrada (CENS) es igual a 13.028. La energía fuera de tolerancia es 44.07 kWh.

Tabla XV. Armónicos de tensión fuera de tolerancia Industria 2.

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIT i k	DAITi (%) P MAYOR 10 KW Y TENSIÓN ENTRE 1 Y 60 KV	(DAIT i k-D AITi)	SI (DAIT i k-D AITi) MAYOR A CERO, ((DAIT i k-D AITi)/DAITi)	ES
Voltage.Harmonics % 3	56.11	57.01	57.44	56.85	5.00	10.371	51.85	
Voltage.Harmonics % 9	11.31	11.40	11.99	11.57	1.50	6.712	10.07	
Voltage.Harmonics % 15	4.10	4.17	4.16	4.14	0.30	12.812	3.84	
Voltage.Harmonics % 21	1.57	1.59	1.60	1.59	0.20	6.935	1.39	
Voltage.Harmonics % 27	0.56	0.57	0.58	0.57	0.20	1.855	0.37	
ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DATT k	DATT	(DATTk-DATT)	((DATT k-D ATT)/D ATT)	DATT = 8 ARTICULO 31, NTSD
Voltage.Harmonics % THD	57.52	58.4	58.88	58.265	8	50.27	6.28	
((DATT k-D ATT)/D ATT) DATT = 8 ARTICULO 31, NTSD				$\text{DPAk} = \text{Max} \left[0, \frac{\text{DATTk} - \text{DATT}}{\text{DATT}} \right] + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \text{Max} \left[0, \frac{\text{DATT}_{i+1} - \text{DATT}_i}{\text{DATT}_i} \right]$				ENERGIA TRIFASICA POR INTERVALO EN Kwh
6.28				30.89				44.07

Fuente: Elaboración propia.

El DPA_k calculado es el siguiente:

$$DPA_k = \frac{6.28 + (51.85 + 10.07 + 3.84 + 1.39 + 0.37 + 6.28)}{3} = 30.89$$

Por lo tanto el $DPA_k > 1$ y utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Indemnización (Q)} = \sum_{KDPAK \leq 1} \text{CENS} * (DPA_k)^2 * E_{(K)} + \sum_{KDPAK > 1} \text{CENS} * E_{(K)}$$

Para un $kDPA_k > 1$

$$\text{La Indemnización es (Q)} = 0 + \{13.028 * 44.07\} = Q 574.14$$

Este cálculo se hace por cada uno de los registros fuera de tolerancia y luego se suman los montos obtenidos. En este caso los 998 registros fuera de tolerancia, que equivalen al 99.90% del total, sumaron Q141,110.63.00 que el Distribuidor deberá pagar al usuario.

6.4. CÁLCULO DE INDEMNIZACIÓN POR EXCEDER LAS TOLERANCIAS ARMÓNICAS DE CORRIENTE, DEL ARTÍCULO 42 DE LAS NTSD

La indemnización se determina de la siguiente manera:

$$\text{Indemnización (Q)} = \sum_{\text{KDPIA} \leq 1} \text{CENS} * (\text{DPIA}_K)^2 * E_{(K)} + \sum_{\text{KDPIA} > 1} \text{CENS} * E_{(K)}$$

Se calculan sólo los registros fuera de tolerancia, o sea:

Para la INDUSTRIA 1, el orden 37 y 39 de la corriente armónica están fuera de tolerancia, como se muestra en la tabla XVI. El CENS es igual a 12.591 y la energía para los intervalos es de 34.86 kWh.

Tabla XVI. Armónicas del usuario fuera de tolerancia Industria 1

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAII i (K)	DAII i P MAYOR 10 KW Y TENSION ENTRE 1 Y 60 KV	(DAII i (K) - DAII i)	SI (DAII i (K) - DAII i) ES MAYOR A CERO, ((DAII i (K) - DAII i)/DAII i))
Current.Harmonics % 37	0.81	0.88	0.48	0.72	0.70	0.024	0.034
Current.Harmonics % 39	0.32	0.35	0.25	0.30	0.30	0.005	0.016
ORDEN	L1	L2	L3	DATI K	DATI	DATI K- DATI	(DATI K- DATI)/DATI
Current.Harmonics % THD	6.05	3.67	6.26	5.33	20.00	-14.673	0.000

(DATI K- DATI)/DATI = 20 ARTÍCULO 42	DATI NTSD	$\text{DPIA}_K = \text{Max} \left[0, \frac{\text{DATH}_k - \text{DATH}}{\text{DATH}} \right] + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{40} \text{Max} \left[0, \frac{\text{DAII}_{i,k} - \text{DAII}_i}{\text{DAII}_i} \right]$	ENERGIA TRIFASICA POR INTERVALO EN Kwh

Fuente: Elaboración propia.

$$DPIA_k = \{0.034+0.016\}/3 = 0.05/3 = 0.0166$$

$$\text{Indemnización (Q)} = \sum_{KDPIA \leq 1} \text{CENS} * (DPIA_k)^2 * E_{(K)} + \sum_{KDPIA > 1} \text{CENS} * E_{(K)}$$

Como el $DPIA_k$ es ≤ 1 :

$$\text{Indemnización (Q)}_{KDPIA \leq 1} = \{12.591 * 0.0166^2 * 34.86\} + 0 = Q 0.12$$

Este cálculo se repite por cada uno de los registros fuera de tolerancia y luego se suman los montos obtenidos. En esta medición los 124 registros fuera de tolerancia, que equivalen al 12 % del total, sumaron Q389.63.

INDUSTRIA 2, en el intervalo observado no existe corriente armónica fuera de tolerancia, como se puede apreciar en la columna 8 de la tabla XVII. El CENS utilizado es igual a 13.028. La energía fuera de tolerancia es 44.07 kWh.

Tabla XVII. Armónicas de Usuario fuera de tolerancia Industria 2.

ORDEN	L1	L2	L3	PROMEDIO L1, L2, L3 = DAIi i (K)	DAII i P MAYOR 10 KW Y TENSION ENTRE 1 Y 60 KV	(DAII i (K) - DAIi i)	SI (DAII i (K) - DAIi i) ES MAYOR A CERO, ((DAII i (K) - DAIi i)/DAII i)
Current.Harmonics % 2	0.26	0.23	0.23	0.24	10.00	-9.759	0.000
Current.Harmonics % 3	2.00	1.76	0.44	1.40	16.60	-15.198	0.000
▪	0.18	0.17	0.16	0.17	2.50	-2.327	0.000
▪	0.48	0.62	0.71	0.60	12.00	-11.397	0.000
▪	0.18	0.17	0.16	0.17	1.00	-0.826	0.000
▪	2.43	1.45	1.45	1.78	8.50	-6.722	0.000
ORDEN	L1	L2	L3	DATI K	DATI	DATI K- DATI	(DATI K- DATI)/DATI DATI = 20 NTSD ARTICULO 42
Current.Harmonics % THD	3.71	3.11	2.93	3.25	20.00	-16.752	0.000

(DATI K- DATI)/DATI DATI = 20 NTSD ARTICULO 42	$DPIA_K = \text{Max} \left[0, \frac{D_{AII_i} - D_{AII}}{D_{AII}} \right] - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{25} \text{Max} \left[0, \frac{D_{AII_i, K} - D_{AII_i}}{D_{AII_i}} \right]$	ENERGIA TRIFASICA POR INTERVALO EN Kwh
0.00	0.00	44.07

Fuente: Elaboración Propia.

En este registro, tabla XVII, la indemnización es cero porque no hubo ninguna armónica de corriente fuera de las tolerancias y el THD en las tres fases fue menor que la tolerancia.

Este cálculo se repite por cada uno de los registros fuera de tolerancia y luego se suman los montos obtenidos. El registro analizado, por no estar fuera de las tolerancias, no se penaliza; sin embargo de la medición completa hay 768 registros fuera de tolerancia, que equivalen al 77 % del total, sumaron Q 8,957.05, cuyo monto deberá ser pagado al Distribuidor por el usuario.

6.5. Aplicación de las indemnizaciones de las NTSD

Los montos de las indemnizaciones obtenidas mediante el análisis de mediciones realizadas en los servicios eléctricos de los usuarios conectados en las redes de media tensión, se harán efectivas solo cuando una de las partes afectadas lo requiera, tal y como esta establecido en la resolución de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Resolución-CNEE-56-2003.

CONCLUSIONES

1. La presencia de armónicos en las redes causa una serie de problemas que incluyen deterioro de la calidad de la onda de tensión.
2. Las corrientes armónicas son generadas por cargas no lineales.
3. La aplicación de las NTSD sobre armónicos permiten determinar el grado de contaminación por armónicos encontrados en las instalaciones.
4. Es posible diseñar un filtro de armónicas que atenúe los efectos de las armónicas en la red eléctrica y evitar que afecten a otros usuarios conectados en el mismo circuito. Los datos obtenidos pueden servir para su diseño o bien para especificar el mismo ante un proveedor.
5. Del resultado de la cuantificación económica de las indemnizaciones resultantes de las mediciones de armónicos, así como de la efectiva aplicación de las NTSD en este tema, dependerá si la inversión se realiza o no.

RECOMENDACIONES

1. La solución del problema de bajo factor de potencia en instalaciones industriales donde existe una cantidad importante de carga no lineal debe analizarse mediante la información obtenida de una medición de calidad de energía que incluya medición de potencia y armónicos.
2. Los parámetros de la medición deberán ajustarse a los requerimientos descritos en las Normas Técnicas de Servicio de Distribución de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
3. Existe el marco legal definido en la Ley General de Electricidad, su Reglamento y las Normas Técnicas de Servicio de Distribución de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica para analizar y resolver los problemas que se puedan dar por la contaminación armónica de las redes eléctricas de distribución.
4. La aplicación de filtros para minimizar la distorsión armónica que sobrepasa las tolerancias, dependerá tanto del criterio técnico como del económico, en cuanto a la relación grado de distorsión contra monto de indemnización.

5. El diseño del filtro se debe sustentar en los datos obtenidos de una medición de calidad de energía, que incluya registros de armónicos tanto de tensión como de corriente y en la metodología de cálculo estudiada en el capítulo cinco.

6. La información obtenida de la aplicación de la metodología propuesta puede ser útil para el diseño del filtro o bien para su especificación ante un fabricante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chapman, Stephen J. Máquinas eléctricas. 4ª ed. México: Mc Graw Hill. 2005.
2. Dorf, Richard C. Circuitos eléctricos. 2ª ed. Colombia, ALFAOMEGA. 1997.
3. Economical Solutions to Meet Harmonic Distortion Limits, www.mtecorp.com.
4. Fink, Donald G. y H. Wayne Beauty. Manual de ingeniería eléctrica. 11ª ed. México: Mc Graw-Hill. 1995.
5. Gonzalez López, Francisco Javier. Armónicas temas relacionados con la calidad de la potencia eléctrica. Guatemala, s.e. 1999.
6. *Harmonic Reduction using Broad Band Harmonic Filters*, www.geindustrial.com
7. IEEE Std 18-1992. Criterios para proteger bancos de capacitores. [http--standards_ieee_org-reading-ieee-interp-18-2002.mht](http://standards.ieee.org-reading-ieee-interp-18-2002.mht).
8. IEEE Std 399-1997. "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis", USA. 1998.
9. IEEE Std 519-1992. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", USA, 1993.
10. Kennedy, B. Power quality primer, USA, McGraw-Hill. 2000.
11. Navarro, A. Corrientes armónicas. Técnica Salgar S.A. de C.V.
12. Piedra Ortiz, Luis Alejandro. Estudio de los efectos y métodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución eléctrica comerciales e industriales, Tesis Ing. Eléctrica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería. 2005.

13. Ryan, M.C. Power Quality, 3^a ed. Canada, s.e. 1998.

14. Wakileh, George J. *Power systems armonics: fundamentals, analysis and filter design*. Germany, s.e. 2001.

REFERENCIAS

1

Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas. 4ª ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 2005. p. 708.

2

IEEE. Sección México. Ingeniero Enríquez Harper, Ingeniero Jesús Pacheco Agosto, Ingeniero Jesús Martínez Rodríguez. Control de Armónicas en Sistemas Eléctricos Industriales, Curso Tutorial, Calidad de Servicio de Energía Eléctrica en Distribución. pp. 53-55

3

<http://faraday.fie.umich.mx>

4

John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Análisis de Sistemas de Potencia, traducido de 1ª ed. México: Editorial Mc Graw Hill, 2003. p. 391.

5

George J. Wakileh. *Power System Harmonics* (Alemania: Springer, 2001) p. 105.

6

Ing. Gilberto Enríquez Harper. IEEE, 1998. Curso Tutorial, Capítulo XI: Filtros de armónicas, México, p.112.

7

Dr. Miguel Francisco Escalante. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. UANL, MONTERREY, MEXICO. OCTUBRE 2004. I CURSO AVANZADO DE CALIDAD DE ENERGÍA. Comunicación Personal.

8

George J. Wakileh. *Power System Harmonics* (Alemania: Springer, 2001) pp 106-107.

9

Dr. Francisco de la Rosa. IEEE Senior Member Instructor. Octubre de 2006. Curso Calidad de Energía: Teoría y Técnica de Solución. Cuernavaca Morelos, México. Comunicación Personal.

10

Ing. Gilberto Enríquez Harper. IEEE, 1998. Curso Tutorial. Capítulo XII: Otras Técnicas de Mitigación, México. P.129.

11

Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE. Normas Técnicas de Servicio de Distribución, NTSD. Guatemala: Editorial Espacios Publicitarios, 1999. p.9.

12

Dr. Francisco de la Rosa. IEEE Senior Member Instructor. Octubre de 2006. Curso Calidad de Energía: Teoría y Técnica de Solución. Cuernavaca Morelos, México. Comunicación Personal.

13

Richard C. Dorf. Circuitos Eléctricos. 2ª ed. Colombia, Editorial ALFAOMEGA. 1997. p.719.

14

Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. Normas Técnicas de Servicio de Distribución, NTSD. Guatemala: Editorial Espacios Publicitarios, 1999. p.10.