



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

ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Erick Alejandro Ralda Mijangos

Asesorado por el Ing. Carlos Francisco Gressi López

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ERICK ALEJANDRO RALDA MIJANGOS

ASESORADO POR EL ING. CARLOS FRANCISCO GRESSI LOPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2009

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. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Adolfo Villeda Vásquez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

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:

ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 18 de agosto de 2005.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'E' followed by the name 'Ralda Mijangos' written in a cursive script.

Erick Alejandro Ralda Mijangos

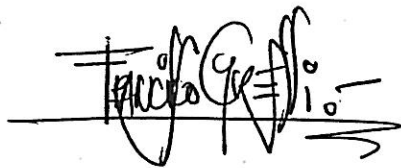
Guatemala, 27 de febrero de 2006

Ing. Guillermo Bedoya
Coordinador del Área de Potencia
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica-Eléctrica
USAC

Estimado Ingeniero,

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que tuve ante mi la tesis del Bachiller Erick Alejandro Ralda Mijangos, con número de carné 96-16596, titulada: "**ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**", la cual tras revisarla y hacer las correcciones necesarias, no encuentro inconveniente en aprobarla.

Sin otro particular, me suscribo atentamente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Francisco Gressi López', written over a horizontal line.

Ing. Carlos Francisco Gressi López
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 12. 2009.
Guatemala, 28 de ABRIL 2009.

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

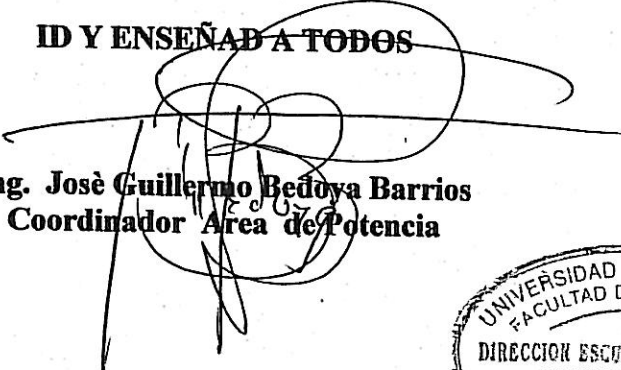
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA, del
estudiante; **Erick Alejandro Ralda Mijangos**, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

~~ID Y ENSEÑAR A TODOS~~


Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro

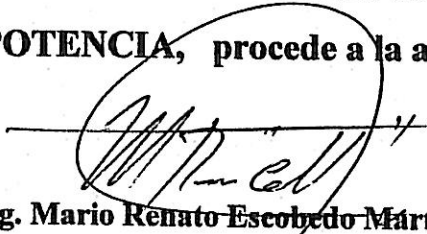




FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 18.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Erick Alejandro Ralda Mijangos, titulado: **ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR

GUATEMALA, 28 DE ABRIL 2,009.





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: **ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**, presentado por el estudiante universitario **Erick Alejandro Ralda Mijangos**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, mayo de 2009



AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a todas las personas que de una u otra manera han influido para que yo este acá. A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por haber sido mi casa todos estos años y haberme dado la formación necesaria para enfrentarme al mundo, a mis profesores, por compartir sus conocimientos y por ser parte importante de mi formación profesional; a mis compañeros de estudio, al lado de los que recorrí este largo camino que hoy está dando sus frutos, y a mi familia: mis abuelitos, tíos y primos, gracias por todo su cariño y apoyo

Dedico este proyecto con el cual culminan mis estudios universitarios principalmente a Dios, por darme la sabiduría para afrontar los retos y por prestarme la vida todos los días, y luego a las tres personas más importantes de mi vida: A mi bebita linda que viene en camino y a mi esposa Patty, por ser mi compañera y por apoyarme en los momentos difíciles (los amo mucho), y principalmente a mi viejito, por todas las penas y sufrimientos que pasaste para que yo este aquí hoy, siempre has sido mi héroe y estoy orgulloso de ser un Ralda, lo logramos!!!

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
OBJETIVOS	XI
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	XV

1. CONCEPTOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

1.1 Serie trigonométrica de Fourier.....	1
1.2 Tipos de armónicas y denominaciones.....	4
1.3 Factores de distorsión armónica.....	7
1.4 Resonancia.....	13

2. ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

2.1 Introducción	19
2.2 Transformadores.....	20
2.2.1 Generalidades	20
2.2.2 Armónicos en transformadores monofásicos	21
2.2.3 Armónicos en transformadores trifásicos	23
2.3 Máquinas rotatorias	25
2.3.1 Generalidades	25
2.3.2 Distribución de fmm en las bobinas.....	26
2.3.3 Bobinas trifásicas	28
2.3.4. Ancho o paso de bobina.....	29
2.3.5 Armónicos de dientes de ranura.....	34
2.4 Hornos de Arco.....	36

3. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

3.1	Introducción	39
3.2	Efectos en equipos	41
3.2.1	Capacitores	41
3.2.2	Líneas de transmisión y conductores.....	43
3.2.3	Máquinas rotativas	46
3.2.4	Protecciones y Mediciones	52
3.2.5	Pérdidas.....	55
3.2.6	Sistemas de potencia.....	58
3.2.7	Interruptores (<i>Circuit Breakers</i>).....	59
3.2.8	Sistemas de Control.....	59

4. MEDICIONES Y STANDARES PARA EL ANÁLISIS ARMÓNICO

4.1	Introducción	61
4.2	Distorsión armónica total (THD)	61
4.3	Limites admisibles de distorsión armónica en los sistemas de potencia	63
4.4	Norma IEEE 519.....	65

5. CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

5.1	Introducción	69
5.2	Herramientas para el análisis armónico.....	69
5.2.1	Transformadores de corriente (CTs).....	69
5.2.2	Transformadores de potencial (PTs).....	71
5.3	Métodos de cancelación de armónicos.....	73
5.4	Filtros armónicos	82

6. APLICACIÓN EN GUATEMALA

6.1 Filtros LCL..... 87

6.2 Ejemplo real..... 90

CONCLUSIONES 99

RECOMENDACIONES 101

BIBLIOGRAFÍA 103

LISTA DE SÍMBOLOS

c.a.	Corriente alterna
c.d.	Corriente directa
fmm	Fuerza magnetomotriz
$f(t)$	Función variante en el tiempo
Hz	Hertz
pu	Valor por unidad
P	Potencia real
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
PCC	Punto común de acople
PLC	Controlador lógico programable
Z	Impedancia
CT	Transformador de corriente
PT	Transformador de potencial
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>

GLOSARIO

Armónicos: Las formas de onda senoidales están compuestas por un número infinito de ondas senoidales de diferentes frecuencias, incluyendo la onda a frecuencia fundamental. El término “componente armónico” o simplemente “armónico”, se refiere a cualquiera de las componentes senoidales mencionadas, la cual es un múltiplo de la frecuencia fundamental (60 Hz, 120Hz, 180 Hz, 240Hz, etc).

Capacitor: Un capacitor es un dispositivo que sirve para almacenar carga y energía. Está formado por dos placas conductoras (metálicas) de forma arbitraria aisladas una de otra por medio de un dieléctrico, las cuales poseen una carga de igual magnitud pero de polaridades contrarios, lo cual ocasiona que se produzca un campo eléctrico entre las mismas.

Frecuencia: Es el número completo de ciclos completos de una onda de corriente alterna (voltaje o corriente) que ocurren durante un segundo.

Filtro: Dispositivo encargado de permitir o restringir el paso de cierto rango de frecuencias para las que es diseñado.

Impedancia: La resistencia es el valor de oposición al paso de la corriente (sea directa o alterna) que tiene el resistor o resistencia. La reactancia es el valor de la oposición al paso de la corriente (solo corriente alterna) que tienen los condensadores (capacitores) y las bobinas (inductores). En este caso existe la reactancia capacitiva debido a los condensadores y la reactancia inductiva debido a las bobinas. Cuando en un mismo circuito eléctrico se tienen estos elementos combinados (resistencias, condensadores y bobinas) y por ellos circula corriente alterna, la oposición de este conjunto de

elementos al paso de la corriente alterna es conocida como impedancia.

Inductancia: La inductancia básica consiste en un hilo conductor enrollado en un “núcleo” determinado (metal, aire, etc). Si se hace circular una corriente a través de dicho arrollamiento, alrededor de la misma se crea un campo magnético que tiende a oponerse a los cambios bruscos de la intensidad de la corriente. Al igual que un condensador, una bobina puede utilizarse para diferenciar entre señales rápida y lentamente cambiantes (altas y bajas frecuencias).

Onda periódica: Una onda es una perturbación que se propaga a través del espacio y transporta energía. Las ondas periódicas son aquellas ondas que tienen una repetitividad, es decir, la perturbación local que las origina se produce en ciclos repetitivos.

Resonancia: La resonancia en electricidad es un fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) y que es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia inductiva iguale a la capacitiva y, por lo tanto, se anulen entre si, independientemente si los elementos estén en serie o en paralelo.

Serie de Fourier: En matemáticas, una serie de Fourier, que es llamada así en honor de Joseph Fourier (1768-1830), es una representación de una función periódica como una suma de funciones periódicas. Fourier fue el primero que estudió tales series sistemáticamente, aplicándolas a la solución de la ecuación del calor y publicando sus resultados iniciales en 1807 y 1811.

Sistema monofásico: En ese sistema se utilizan dos líneas: una única fase y un conductor neutro, conociéndose esto como un circuito bifilar (dos hilos). Cuando el sistema está compuesto por dos fases y un neutro, en el cual la tensión entre las fases es exactamente el doble de la tensión entre cualquiera de ellas y el neutro se llama circuito trifilar.

Sistema trifásico: Este es un sistema formado por tres líneas de alimentación, conocidas como fases, por las cuales circulan tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y valor eficaz, desfasadas entre si 120 grados por fase. Se obtiene por la rotación de tres bobinas igualmente espaciadas en el interior del campo magnético constante que genera tres fases.

OBJETIVOS

- **General**

Estudiar los efectos de los armónicos en los sistemas de potencia de generación y transmisión.

- **Específicos:**

1. Estudiar las características principales de los sistemas de generación.
2. Definir y estudiar los parámetros eléctricos de los sistemas de potencia.
3. Observar los efectos de los armónicos en los componentes de un sistema de potencia (transformadores, generadores, líneas de transmisión, etc.)
4. Conocer los estándares establecidos para la generación de armónicos en Guatemala, y las leyes de la CNNE que los rigen.
5. Ver los efectos que se presentan en los sistemas eléctricos cuando hay demasiada distorsión armónica.
6. Estudiar las técnicas de reducción de armónicos en equipos.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación explica en que consisten los armónicos, y por qué se han vuelto con el paso de los años y con los avances tecnológicos en un factor a tomar muy en cuenta al momento de diseñar un sistema eléctrico de potencia.

Se muestran las formas más comunes de donde se originan los armónicos en motores y transformadores, y se explica además la manera en que los mismos afectan individualmente a todos los componentes del sistema de potencia: capacitores, líneas de transmisión, interruptores, medidores, relevadores, protecciones, barras, etc.

Se describen además, las normas establecidas en Guatemala para el control y análisis de armónicos según el órgano rector que es la Comisión Nacional de Energía Eléctrica –CNEE- así como el parámetro IEEE 519.

Finalmente, se presenta un ejemplo de control de armónicos en una máquina extrusora a la que se le aplicó un filtro LCL para la supresión de las componentes armónicas.

INTRODUCCIÓN

Desde principios de los 90, el concepto de “calidad de potencia” ha ido ganando cada vez más notoriedad dentro del ámbito de la Ingeniería Eléctrica, y hoy día, se ha convertido en una cuestión de sumo interés tanto para las compañías productoras y distribuidoras, como para los fabricantes de equipos y los consumidores finales. Aunque el término “calidad de potencia” resulta familiar entre los ingenieros eléctricos, su uso no está exento de críticas, ya que no se puede hablar de la calidad de una magnitud física como lo es la potencia.

En el IEEE (*Institute for Electrical and Electronics Engineers*), el término “calidad de potencia” ha ganado un estatus oficial, como lo refleja el comité IEEE SCC22 (*IEEE Standards Coordinating Committee on Power Quality*), el cual coordina las necesidades de estandarización en este área. El diccionario del IEEE, basándose en el estándar IEEE 1100-1999, ofrece la siguiente definición para este término: *“La calidad de potencia es el concepto de alimentación y puesta a tierra de un equipo sensible en la manera apropiada para la operación de aquel equipo.”*

El hecho de que la calidad de potencia haya pasado a ser un tema de emergente interés entre los ingenieros eléctricos, no significa que no fuese importante en el pasado. Los armónicos de tensión y corriente se convirtieron en un asunto a tener en consideración desde el momento en que se energizó el primer sistema de potencia de corriente alterna. Las formas de onda de tensión de los primeros generadores distaban mucho de ser perfectamente senoidales, y desde el principio, los efectos de los armónicos desconcertaron y atormentaron a los encargados de controlar y mantener dichos sistemas.

Los equipos de control basados en microprocesadores y los sistemas electrónicos de potencia son más sensibles a las perturbaciones que sus antecesores de hace 10 ó 20 años. El artículo usualmente citado por haber

introducido el término de “calidad de potencia” trataba el incremento de sensibilidad los ordenadores ante perturbaciones de la tensión. Además, cuanto más sofisticado es un equipo, mayores suelen ser las consecuencias económicas de las anomalías en su funcionamiento.

Los modernos sistemas basados en electrónica de potencia no sólo resultan sensibles a una mala calidad de tensión, sino que también causan perturbaciones que afectan al resto de los consumidores. El creciente énfasis en conseguir sistemas de mayor eficiencia y mejores prestaciones ha dado lugar a un desmesurado crecimiento de los equipos alimentados o accionados mediante convertidores estáticos de potencia. En una previsión realizada por el EPRI (*Electric Power Research Institute*), se estimaba que en el año 2000, un 60% de la energía eléctrica consumida sería procesada mediante convertidores estáticos. Estos convertidores absorben corrientes no-sinusoidales, o lo que es lo mismo inyectan armónicos de corriente en la red, lo cual da lugar a una serie de efectos nocivos en el sistema de potencia.

Dentro de este grupo de sistemas electrónicos de potencia, los equipos que más proliferan son los rectificadores (controlados o no controlados), las fuentes de alimentación interrumpida, los variadores de velocidad, las reactancias electrónicas y las fuentes de alimentación conmutadas. Aunque la acción individual de cada uno de estos equipos no provoca unos niveles alarmantes de corrientes armónicas, la acción conjunta de todos ellos causa una seria distorsión en el voltaje de alimentación. En casos específicos pueden existir sistemas que inyectan elevados niveles de corrientes armónicas en la red, creando individualmente distorsión en la tensión del sistema de potencia. Entre estos equipos se encuentran los grupos de lámparas de descarga, las máquinas de soldadura por puntos, las fundiciones por arco, los hornos de inducción y los dispositivos de corte con plasma.

Un problema de calidad de energía, entonces, se define como cualquier fenómeno de origen eléctrico que dificulta o interrumpe el correcto funcionamiento de los sistemas y equipos eléctricos.

La importancia de la calidad de energía es que ésta significa productividad, en la actualidad los sistemas eléctricos están cambiando muy rápidamente de sistemas electromecánicos a sistemas electro-electrónicos, se automatizan las líneas de producción, el empleo cada vez más importante de la electrónica de potencia, las nuevas características de las cargas formadas por equipos sensibles (basados en microprocesadores). Dicha transformación responde a un necesario aumento de la productividad industrial, de una utilización más eficiente de la energía eléctrica y el aprovechamiento de los rápidos avances tecnológicos.

En el pasado, las compañías suministradoras trataban a los consumidores de energía eléctrica como “cargas”. Las interrupciones y otras perturbaciones en la tensión formaban parte de este trato, y eran las compañías suministradoras la que decidían aquello que debía ser mejorado en cada momento. Hoy día, esto ha dado como resultado que los consumidores sean tratados como “clientes”, a los que se les suministra un producto con determinadas características, las cuales deben ser medidas, predichas, garantizadas, mejoradas, etc. Por este motivo, se ha hecho necesaria toda una reglamentación que establezca las características de dicho producto, la forma en que el mismo debe ser adquirido por el consumidor, y las responsabilidades de cada una de las partes.

Según la resolución 9-99 de la CNEE con fecha 7 de abril de 1999, la cual contiene las normas técnicas del servicio de distribución, el objetivo de dichas normas es el siguiente:

“Artículo 2. Objetivo de las Normas. El objetivo de estas Normas es establecer derechos y obligaciones de los prestatarios y Usuarios del Servicio Eléctrico de Distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, indemnizaciones, sanciones y/o multas, respecto de los siguientes parámetros:

a) Calidad del Producto suministrado por el Distribuidor:

- Regulación de Tensión,
- Desbalance de Tensión en Servicios Trifásicos,
- Distorsión Armónica, y
- Flicker.

b) Incidencia del Usuario en la Calidad del Producto:

- Distorsión Armónica,
- Flicker, y
- Factor de Potencia.

c) Calidad del Servicio Técnico:

- Interrupciones.

d) Calidad del Servicio Comercial:

- Calidad del Servicio Comercial del Distribuidor, y
- Calidad de la Atención al Usuario.

Artículo 3. Alcance de las Normas. Estas Normas serán de aplicación obligatoria para todos los Participantes que hacen uso de los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica.”

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 Serie trigonométrica de Fourier

El proceso de calcular la magnitud y fase de una onda, periódica fundamental y sus armónicas en un período T se denomina análisis armónico. Nuestro interés por las funciones periódicas es porque muchas fuentes eléctricas de utilidad práctica generan formas de onda periódicas. Además los generadores de potencia, aunque están diseñados para producir una forma de onda senoidal, en la práctica no pueden producir una onda seno pura. Sin embargo, la función senoidal distorsionada es periódica y, por supuesto, es de interés determinar con exactitud las consecuencias de alimentar sistemas de potencia con un voltaje senoidal ligeramente distorsionado.

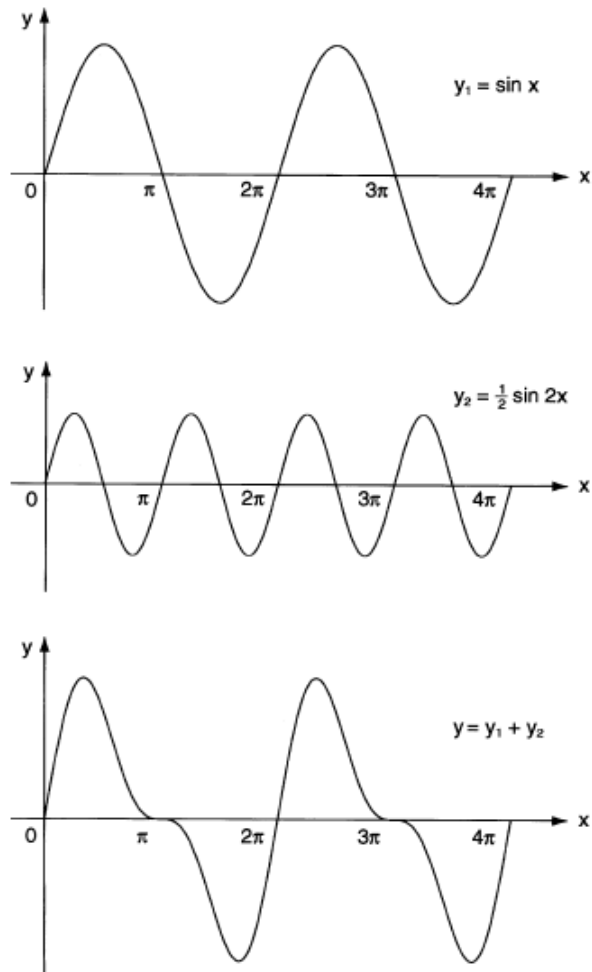
En los primeros años del siglo XIX, el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1786-1830), en sus investigaciones sobre conducción de calor en una varilla metálica, se vio conducido al descubrimiento notable de ciertas series trigonométricas que llevan ahora su nombre. Desde entonces las series de Fourier y sus generalizaciones de series integrales de Fourier, han llegado a hacer una parte integral de los conocimientos básicos de científicos, ingenieros y matemáticos, tanto desde el punto de vista aplicado como del teórico.

Lo que descubrió Fourier durante sus investigaciones sobre problemas de flujo de calor es que una función periódica se puede representar como una suma infinita de funciones seno o coseno armónicamente relacionadas.

La idea básica del teorema de Fourier es simple. Sabemos que tanto la función $\cos(x)$ como $\sin(x)$ tienen un periodo igual a 2π , y además las funciones $\cos(2x)$ y $\sin(2x)$ tienen un periodo igual a $2\pi/2 = \pi$, y en general las funciones $\cos nx$ y $\sin nx$ tienen periodos iguales a $2\pi/n$. Pero si formamos cualquier “combinación lineal” de estas funciones – es decir, multiplicando cada

una por una constante y sumando los resultados – la función resultante aun tiene periodo 2π (Fig 1).

Figura 1. Gráficas de $\sin x$, $\frac{1}{2} \sin 2x$, y su suma.



De esto se observa entonces que si $f(x)$ es una función periódica con periodo 2π ; o sea $f(x+2\pi) = f(x)$ para toda x en su dominio. De aquí se forma la siguiente suma finita

$$S_n(t) = a_0 + a_1 \cos t + a_2 \cos 2t + a_3 \cos 3t + \dots + a_n \cos nt \\ + b_1 \sin t + b_2 \sin 2t + b_3 \sin 3t + \dots + b_n \sin nt$$

donde mientras mas términos n haya más mejorará la aproximación de $S_n(t)$ con la $f(t)$, y para los valores de $n \rightarrow \infty$ habrá una igualdad entre ambas; es decir, $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n(t) = f(t)$, entonces la ecuación se puede expresar de la siguiente manera.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{sen}(n \omega t) \quad (1)$$

En la ecuación (1), a_0 , a_n y b_n se conocen como *coeficientes de Fourier* y se calculan a partir de $f(t)$. El término $\omega_0(2\pi/T)$ representa la frecuencia fundamental de la función periódica $f(t)$. Los múltiplos enteros de ω_0 (es decir $2\omega_0$, $3\omega_0$, $4\omega_0$, etc.) se llaman frecuencias armónicas de $f(t)$. Así, $2\omega_0$ es el segundo armónico, $3\omega_0$ el tercero, etc.

Desde el punto de vista de su aplicación, todas las funciones periódicas se pueden expresar en términos de una serie de Fourier. Matemáticamente, las condiciones de una función periódica $f(t)$, que aseguran que $f(t)$ se pueda expresar como una serie de Fourier convergente son:

1. $f(t)$ debe tener un solo valor. Para cada valor de t debe corresponder un y solo un valor de f .
2. $f(t)$ debe tener un número finito de discontinuidades en el intervalo periódico.
3. $f(t)$ debe tener un número finito de máximos y mínimos en el intervalo periódico.

Estas son condiciones suficientes, pero no necesarias. Por ello, si $f(t)$ cumple estos requisitos, se puede expresar como una serie de Fourier. No obstante, si $f(t)$ no cumple con estos requisitos, quizás todavía pueda expresarse en términos de una serie de Fourier. No se conocen aun las condiciones *necesarias* para $f(t)$.

En particular, se calcula primero la respuesta a cada fuente generada por la representación de $f(t)$ en serie de Fourier y luego se suman todas las respuestas individuales para obtener la respuesta total.

Después de definir una función periódica en su período fundamental, los coeficientes de Fourier se determinan a partir de las relaciones

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad n = 1 \Rightarrow \infty$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \operatorname{sen}(n\omega t) dt \quad n = 1 \Rightarrow \infty$$

En las últimas dos ecuaciones, el coeficiente n indica el n -ésimo coeficiente de la secuencia de enteros 1, 2, 3, ... Observar que a_0 es el valor medio de $f(t)$, a_n es dos veces el valor medio de $f(t) \cos n\omega t$, y b_n es dos veces el valor medio de $f(t) \operatorname{sen} n\omega t$

1.2 Tipos de armónicas y denominaciones

Un problema de calidad de potencia se puede entender como una perturbación que hace que la tensión o la corriente de un sistema eléctrico difiera de su apariencia ideal. Sin embargo, es necesario disponer de una catalogación más detallada de dichas perturbaciones para poder clasificar sus medidas y describir cada fenómeno electromagnético que provoca problemas en la calidad de potencia.

La distorsión en las formas de onda se da cuando los efectos de los armónicos dan lugar a que la forma de onda de tensión o corriente de régimen permanente difiera de la onda senoidal pura. En general, existen cinco tipos elementales de distorsión de la forma de onda, que son:

1. **Armónicos:** Son tensiones o corrientes senoidales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental. La combinación de los armónicos y de la onda senoidal de frecuencia fundamental da lugar a formas de onda distorsionadas. Generalmente, las cargas no lineales dan lugar a la inyección de armónicos de corriente, los cuales, al circular por el sistema de potencia, dan lugar a una distorsión armónica en las tensiones.
2. **Interarmónicos:** Son componentes armónicos de la tensión o de la corriente, cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la fundamental. Los interarmónicos pueden presentarse a frecuencias discretas, o distribuidos a lo largo de una determinada banda del espectro. Las principales fuentes generadoras de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los cicloconvertidores, los hornos de inducción y los dispositivos generadores de arco eléctrico.
3. **Microcortes:** Son huecos estrechos, que aparecen periódicamente en la forma de onda de la tensión como consecuencia de la conmutación de la corriente entre las fases de los convertidores estáticos conectados en la red. En la literatura anglosajona, este fenómeno es conocido como “*notch*”. La duración de estos *notches* suele ser de algunas centenas de microsegundos, y generalmente son provocados por la conmutación de los rectificadores controlados y no controlados.
4. **Componentes de continua:** Consisten en la aparición de componentes de continua en las formas de onda de tensión o corriente. Estas componentes continuas pueden ser debidas a perturbaciones geomagnéticas o a asimetrías en los convertidores estáticos de potencia.

5. **Ruido de alta frecuencia:** Son señales indeseables con un espectro armónico disperso, cuya frecuencia suele ser inferior a 200 kHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente, y suelen estar originadas por sistemas electrónicos de potencia.

Los principales inconvenientes causados por los armónicos se pueden resumir en:

Efectos cuasi-instantáneos

- Fallo de interruptores automáticos por efecto di/dt ;
- Operación incorrecta de contactores y relés;
- Interferencia con sistemas de comunicación (telemandos y sistemas telefónicos); y
- Reseteo de ordenadores y errores en PLCs.

Efectos medios o cuadráticos

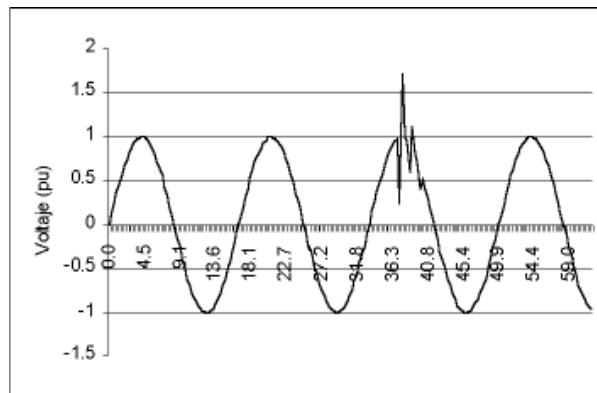
- Calentamiento y, en ciertos casos, hasta la destrucción de condensadores por sobretensión. Su impedancia decrece proporcionalmente al orden de los armónicos presentes;
- Sobrecalentamiento y averías en transformadores;
- Calentamiento de motores de inducción;
- Pérdidas en el cobre de los conductores por efecto piel. Este efecto es proporcional a la frecuencia en corriente alterna, ya que el flujo de corriente se acumula en los extremos del cable por lo que se reduce la sección efectiva del mismo;
- Pérdidas dieléctricas en condensadores;
- Flujos de corriente en los conductores del neutro, incluso en redes equilibradas, producidos por los armónicos triples (3, 6, 9, 12, etc.)

1.3 Factores de distorsión armónica

Cuando o el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión armónica puede deberse a:

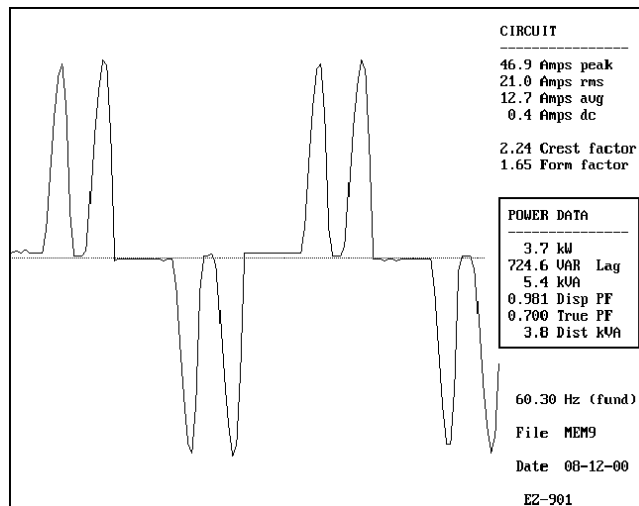
- Fenómenos transitorios tales como arranque de motores, conmutación de capacitores (Figura 2), efectos de tormentas o fallas por cortocircuito, entre otras.

Figura 2. Distorsión en el voltaje provocada por la conmutación de capacitores



- Condiciones permanentes que estén relacionadas con las armónicas de estado estable (variadores de velocidad por ejemplo – Figura 3). En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión, la cual, en casos en donde esta es baja, no ocasiona problemas al momento de operar equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión (las cuales se listarán en capítulos posteriores), dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.

Figura 3. Forma de onda de corriente resultante en un variador de velocidad

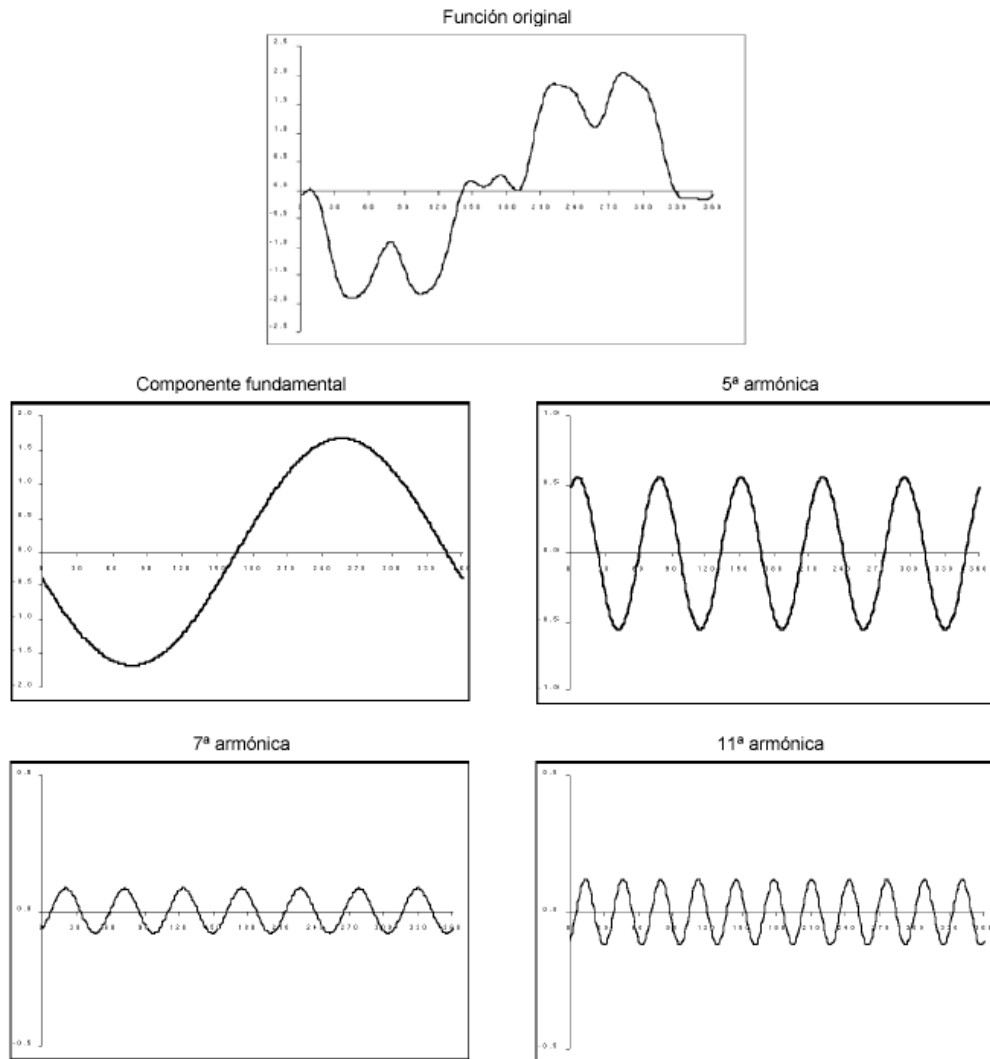


Para que se las deformaciones en las señales sean consideradas como distorsión armónica, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita.
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- Que la distorsión sea permanente, esto quiere decir que la distorsión armónica se presente en cualquier instante de tiempo, es decir, que no sea pasajera.

Una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original. (Fig. 4)

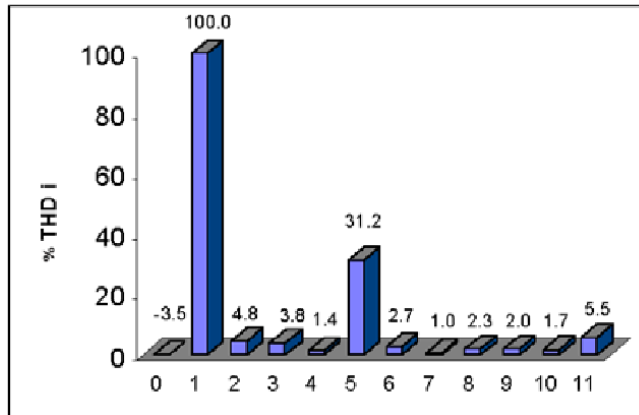
Figura 4. Ejemplo de una forma de onda original y sus componentes armónicos



Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares.

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o voltaje utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes A_n que expresadas con relación a la amplitud A_1 de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida. (Fig. 5)

Figura 5. Espectro de las componentes armónicas relativas a la fundamental de la Fig. 4



Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación se presentan las expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

Valor eficaz (rms): Es el valor obtenido de sumar las señales de voltaje o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.

Corriente eficaz (rms):

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

Voltaje eficaz (rms):

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

Distorsión armónica total (THD)

La THD es definida como la relación entre el contenido armónico de una señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito. Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales (I y V).

La THD esta definida por la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

Distorsión de demanda total (TDD)

La TDD es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga, los cuales no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión de corriente en la norma IEEE 519. La TDD esta definida por la siguiente ecuación:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

donde:

I_h = Magnitud de la armónica individual;

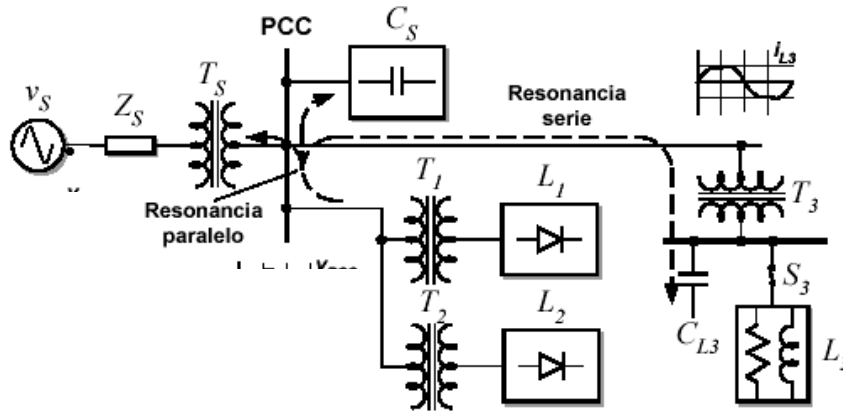
h = orden armónico;

I_L = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede ser también estimada.

Para explicar la relación entre los armónicos de tensión y de corriente, consideremos el sistema de potencia simplificado de la Figura 6. Los sistemas de potencia son principalmente inductivos a la frecuencia fundamental, despreciándose normalmente los efectos capacitivos de las líneas de distribución, y su impedancia equivalente es conocida como “impedancia de cortocircuito” (Z_S). Cuando los armónicos de corriente generados por alguna carga (en este caso L_1 y L_2) circulan a través de esta impedancia, se produce

una caída de tensión en la misma, y como resultado, aparece distorsión en la tensión del punto común de acople (PCC – *Point of Common Coupling*) con el resto de cargas del sistema.

Figura 6. Sistema de potencia con sus respectivas resonancias



Cuando en el sistema de potencia se insertan bancos de condensadores, ya sea en el lado del consumidor para corregir el factor de potencia (C_{L3}), o en la barra de la subestación para regular el nivel de tensión (C_S), la impedancia de cortocircuito pasa a ser un parámetro decisivo en el análisis de la respuesta en frecuencia del sistema resultante.

En si, la inserción de condensadores en el sistema de potencia no genera armónicos, sin embargo su presencia puede ocasionar situaciones de severa distorsión.

En un sistema de potencia, cuando una de esas frecuencias coincide con alguna de las frecuencias de los armónicos de tensión o corriente, se puede desencadenar una situación de resonancia, y las tensiones y corrientes a esa frecuencia pueden alcanzar valores peligrosamente elevados. Esta es la raíz de la mayoría de los problemas relacionados con la distorsión armónica en sistemas de potencia.

1.4 Resonancia

Se llama resonancia a la condición que existe cuando una excitación senoidal de amplitud constante produce una respuesta de amplitud máxima. El sistema resonante puede ser eléctrico, mecánico, hidráulico, acústico o de cualquier otro tipo. Se puede pensar en una frecuencia que se ajusta hasta que se obtiene la resonancia; también se puede ajustar el tamaño, la forma y el material del objeto mecánico sujeto a vibración, aunque esos procedimientos no sean fáciles de llevar a cabo físicamente.

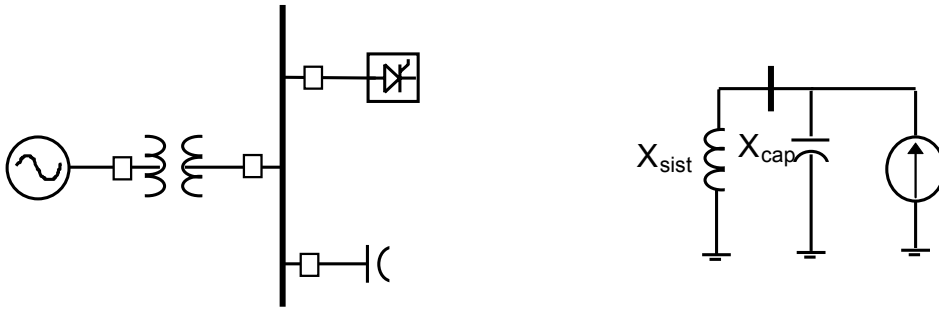
Las condiciones de resonancia eléctrica son aquellas en las que un sistema pasa de ser inductivo a capacitivo o viceversa, este cambio puede provocar problemas muy graves como sobre-corrientes o sobre-voltajes los cuales ocasionan el fallo e incluso la destrucción de equipos que se encuentren expuestos a estos fenómenos de resonancia.

En un circuito de dos terminales que contenga por lo menos un inductor y un capacitor, la resonancia se define como la condición que existe cuando la impedancia de entrada de la red es puramente resistiva, es decir cuando la reactancia capacitiva y la inductiva se “anulan” entre sí. Una red está en resonancia cuando el voltaje y la corriente de las terminales de entrada de la red se encuentran en fase.

RESONANCIA EN PARALELO

La resonancia en paralelo se da cuando las impedancias de un elemento inductivo con un capacitivo se igualan y, a su vez, estos elementos se encuentran en paralelo. Desde un punto de vista práctico, este efecto se presenta cuando el equivalente del sistema al cual se conecta un banco de capacitores, se iguala a la impedancia equivalente del banco (quedando en paralelo). (Fig. 7)

Figura 7. Circuito resonante paralelo



Este equivalente paralelo está dado por:

$$Z_{eq} = \frac{X_{sist} X_{cap}}{X_{sist} - X_{cap}}$$

Entonces, al igualarse estas impedancias a una cierta frecuencia, la impedancia equivalente se hace infinita, y al existir una fuente de corriente a esa frecuencia en paralelo, entonces se tienen sobre-voltajes que ocasionan grandes corrientes entre el sistema y el banco de capacitores.

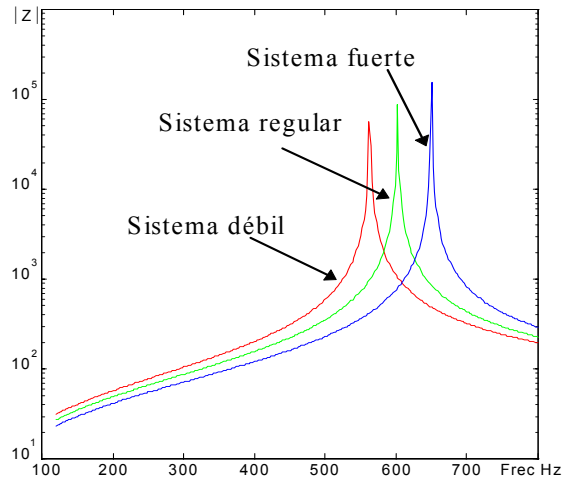
De esta manera, para que estas dos impedancias sean iguales se necesita que exista esta frecuencia llamada de resonancia, la cual está dada por:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{I}{LC}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{sist}}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVar_{CAP}}} \times 60 \text{ Hz}$$

donde MVA_{CC} es la capacidad de corto circuito donde esta conectado el banco de capacitores y los $MVar_{CAP}$ son la capacidad del banco de capacitores.

Como se puede observar si se tiene una planta la cual esta conectada a un mismo voltaje y tiene un mismo banco de capacitores, pero diferentes valores MVA_{CC} entonces el sistema responde de manera distinta, tal y como lo muestra la figura 8.

Figura 8. Efecto del sistema a la resonancia paralelo

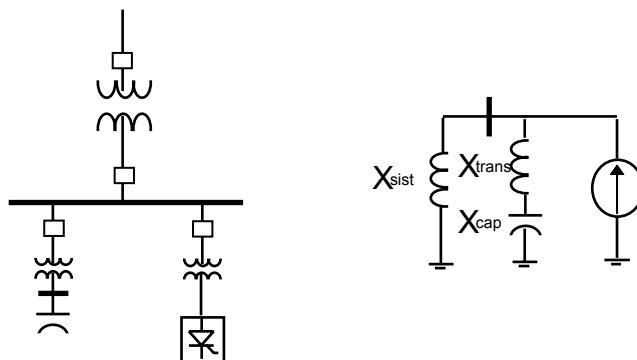


La figura 8 muestra que a medida que el sistema sea más débil se tiene que las frecuencias de resonancia se acercan cada vez más a frecuencias que pueden existir en el sistema como por ejemplo la 3^a, 5^a o 7^a armónica, ocasionando así problemas casi seguros de resonancia que llevan a la destrucción al banco de capacitores.

RESONANCIA SERIE

Es similar que la resonancia paralelo, pero en este caso ocurre estando la impedancia inductiva en serie con la impedancia capacitiva. En forma práctica esta resonancia serie puede presentarse en sistemas industriales los cuales tengan una configuración similar a la figura 9.

Figura 9. Sistema resonante serie



Entonces al igualarse la impedancia del transformador con el banco de capacitores, se tiene que la impedancia equivalente esta dada por:

$$Z_{eq} = X_{trans} - X_{cap}$$

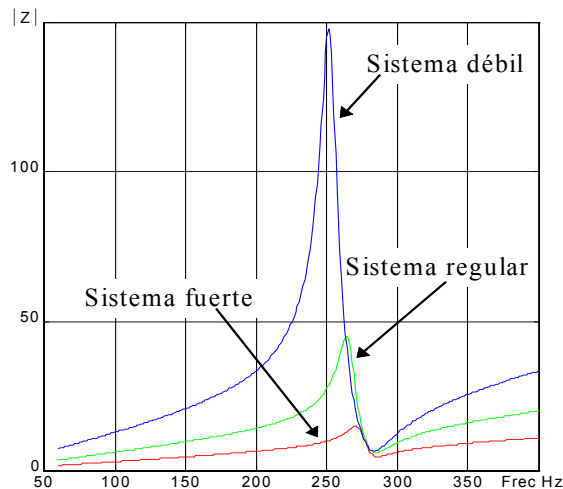
donde al igualarse estas impedancias se tiene una equivalente igual a cero, dando como resultado una corriente elevada a través de estos elementos.

De esa manera la frecuencia de resonancia serie esta dada por

$$f_{res} = \sqrt{\frac{I}{L_{trans} C}} \times 60 \text{ Hz} = \sqrt{\frac{X_{cap}}{X_{trans}}} \times 60 \text{ Hz}$$

La figura 10 muestra el efecto del sistema ante la resonancia serie.

Figura 10. Efecto del sistema a la resonancia serie



La figura 10 muestra que a medida que el sistema es más débil, se tienen impedancias muy grandes antes de la resonancia, pudiendo ocasionar estos picos sobre-voltajes armónicos muy fuertes.

FERRORESONANCIA

La Ferroresonancia es un fenómeno usualmente caracterizado por sobrevoltajes e irregulares formas de onda, y está asociado con la excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia en serie.

La inductancia en un circuito simple resonante es normalmente de núcleo de aire y su valor no cambia, en un circuito ferroresonante ésta tiene un núcleo de material ferromagnético que varía con el voltaje aplicado en sus terminales, existen entonces varios posibles puntos de operación y en alguno de ellos puede producirse la resonancia.

Para que se presente la ferroresonancia debe existir un circuito LC en serie, con un elemento de características no lineales. La capacitancia puede ser aportada por los conductores o los cables y la inductancia por un transformador con núcleo de material ferromagnético.

2. ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

2.1 Introducción

Existe un gran número de dispositivos que producen distorsiones armónicas. Actualmente la distorsión armónica constituye un gran problema, debido al uso de cargas no-lineales. Algunas de estas fuentes han existido desde la colocación de los sistemas de potencia.

Fuentes Tradicionales de Armónicas:

Anteriormente, la propagación de las armónicas se relacionaba con el diseño y la operación de transformadores y máquinas rotatorias; de hecho, la primera fuente generadora de armónicas en esos días era la corriente magnetizante de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas, trabajando en estado estable, no provocan una distorsión significativa en la red eléctrica, pero cuando hay fluctuaciones de voltaje en la red y cuando operan en un rango afuera de sus especificaciones, pueden aumentar su contenido armónico con niveles de distorsión considerables. Otras cargas que producen armónicas son la luz fluorescente y los hornos de arco.

Las armónicas son producidas por cargas no lineales las cuales demandan corrientes distorsionadas de la fuente de alimentación. Los sistemas de potencia son generalmente capaces de aguantar considerables corrientes armónicas sin que ocurran problemas importantes, porque el sistema de potencia es generalmente robusto en relación a la carga, por lo tanto la impedancia del sistema es pequeña comparada con la impedancia de la carga.

Con una impedancia pequeña del sistema, el flujo de la corriente distorsionada a la carga causará una distorsión de voltaje mínima en los buses.

Con una distorsión de voltaje pequeña, no se verá afectada la operación de otras cargas y equipos.

2.2 Transformadores

2.2.1 Generalidades

El hierro es usado en un transformador para reducir la reluctancia al flujo que lo atraviesa. Muy poca corriente es requerida para inducir un flujo magnético en el núcleo de un transformador. Los núcleos de los transformadores no son construidos con bloques sólidos de hierro, ya que se inducen corrientes circulatorias con altas pérdidas de energía. Construyendo el núcleo con láminas delgadas se reducen estas corrientes. En los núcleos tradicionales se emplea generalmente acero con un 4% de silicio. Este material proporciona facilidad de manipulación, pérdidas pequeñas por histéresis, corrientes de Foucault y una adecuada permeabilidad a inducciones magnéticas elevadas. Si a esta aleación la sometemos a un tratamiento térmico adecuado se obtiene un material que, comparado con el hierro, tiene mejores propiedades para los flujos magnéticos y además una resistividad mayor.

Cuando se conecta una fuente de c.a. a un transformador, fluye corriente por el circuito primario, aun cuando el circuito secundario permanezca abierto. Esta corriente es la necesaria para crear el flujo en el núcleo ferromagnético, y puede considerarse formada por dos componentes:

1. Corriente de magnetización, o corriente requerida para producir el flujo en el núcleo del transformador.
2. Corriente de pérdida en el núcleo, o corriente requerida para alimentar las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault (corrientes parásitas).

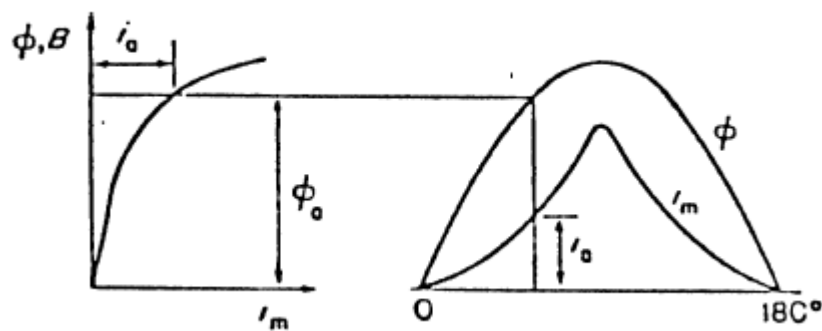
Los transformadores generan armónicos de corriente debido a la característica no lineal de su núcleo ferromagnético. Para que exista un flujo senoidal en el núcleo de los transformadores, es preciso que las corrientes magnetizantes presenten distorsión, principalmente de tercer armónico, que da lugar a un sobrepico en las mismas, más algo del quinto y séptimo armónico.

Este fenómeno se ve agravado con el grado de saturación del núcleo del transformador, principalmente si las corrientes circulantes presentan alguna componente continua.

2.2.2 Armónicos en transformadores monofásicos

La saturación en los transformadores provoca la generación de armónicas, puesto que se trata de un elemento no lineal, las armónicas generadas por la saturación son las armónicas impares, principalmente la 3ª. La generación de estas armónicas se presenta en estado estable para cuando el transformador está sobrecargado, provocando que el transformador opere en su región no lineal como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Característica de saturación de un transformador



Otra de las formas más comunes de la generación de armónicas en el transformador es en el momento de su energización. Durante este fenómeno transitorio de la energización, el transformador es rico en armónicas pares e

impares y este proceso puede llegar a durar algunos minutos. Este fenómeno se muestra en la figura 12.

Figura 12. Corriente de energización de un transformador trifásico

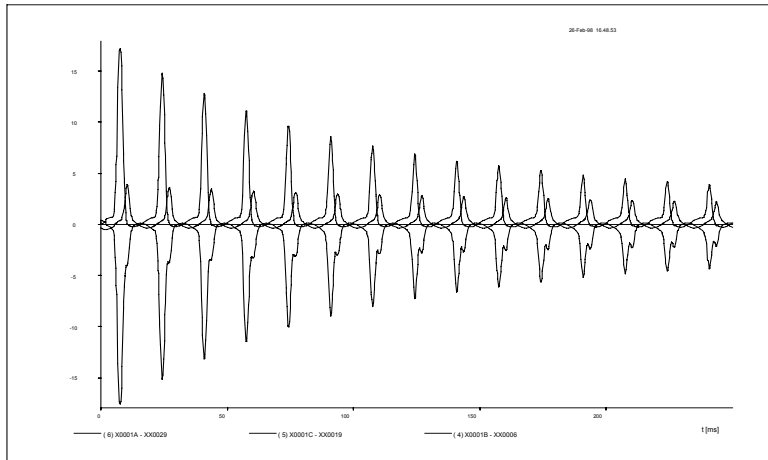
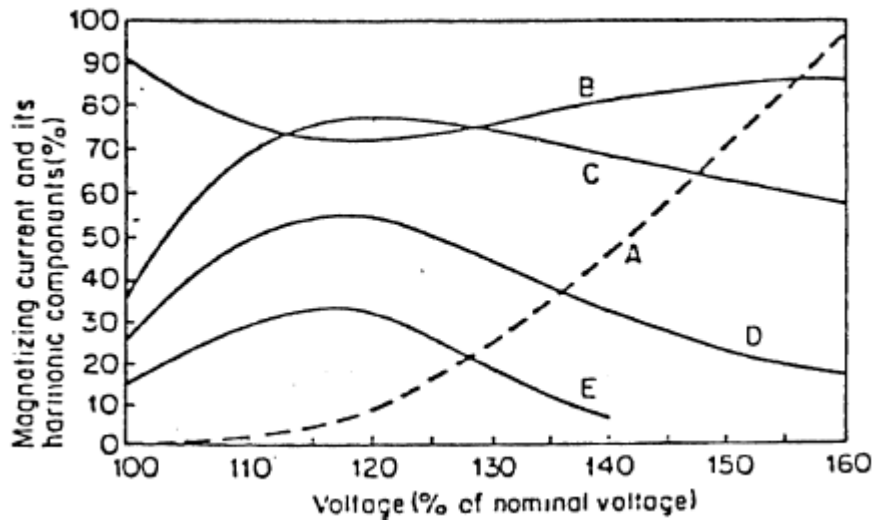
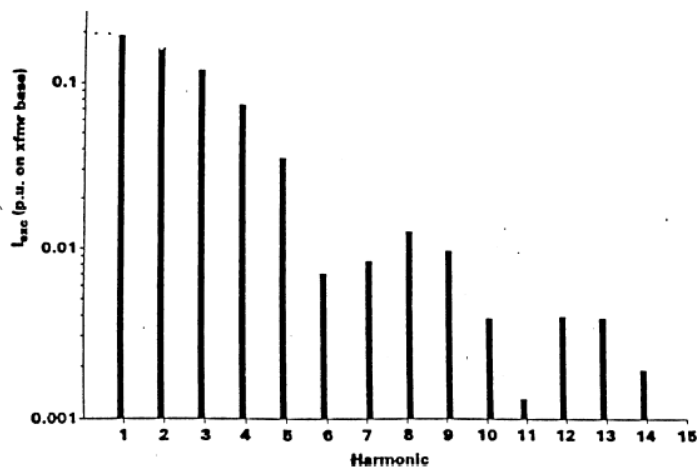


Fig. 13. Armónicas generadas por la corriente magnetizante de transformadores. A: Corriente magnetizante en porcentaje de la corriente nominal; B: Corriente fundamental en porcentaje de la corriente nominal; C, D y E: Armónicas 3, 5 y 7 en porcentaje de la corriente fundamental.



Cuando existe una condición asimétrica que genera una componente continua (corrimiento), tal como se aprecia en la figura 14, se generan una serie de armónicas entre las que hay también armónicas pares.

Fig. 14. Armónicas en la corriente magnetizante de un transformador con magnetización asimétrica (10% de componente continua).



2.2.3 Armónicos en transformadores trifásicos

Armónicos en transformadores en estrella

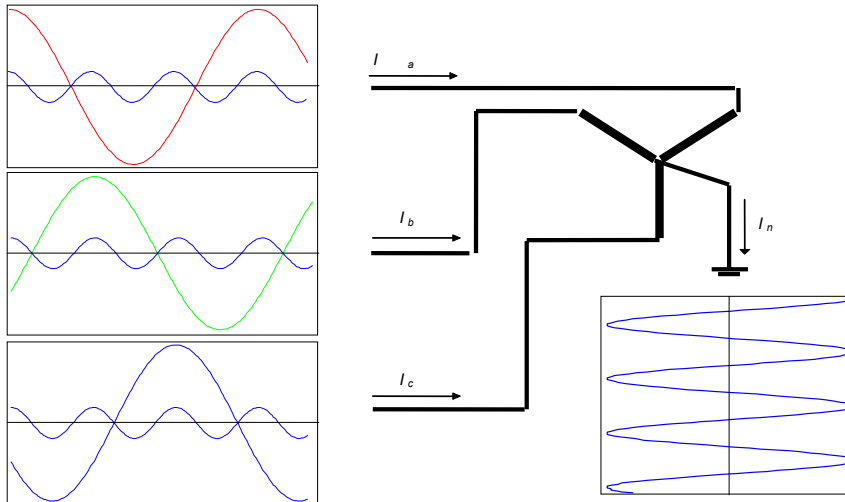
La conexión estrella-estrella presenta dos serios inconvenientes:

- Si las cargas del transformador no están balanceadas producen, a su vez, fuertes desbalances entre los voltajes de fase del mismo.
- Existe un problema grave con los terceros armónicos de voltaje.

Si se aplica un sistema trifásico de tensiones a un transformador Y – Y, los voltajes de las diferentes fases estarán desfasados 120° entre si. No obstante, los componentes de tercer armónico de las tres fases están en fase entre si, ya que hay tres ciclos de tercer armónicos por cada ciclo de frecuencia fundamental. Siempre existirán componentes de tercer armónico en un transformador debido a la no linealidad del núcleo, y estos componentes se

suman dando como resultado un componente mayor de voltaje tercer armónico de tensión que puede llegar a ser mayor que el mismo voltaje fundamental.

Figura 15. Circulación de la tercera armónica por el neutro de transformadores



En los transformadores conectados en estrella no aterrizada, se suman entre si las terceras armónicas y las armónicas de orden impar, que tienden a forzar el neutro para sacarlo de su centro geométrico. Esto ocasiona un desequilibrio de los voltajes secundarios, tanto de fase como de línea. Además como no hay trayectoria cerrada para la circulación de las armónicas tanto en el primario como en el secundario de un transformador conectado en estrella – estrella, las ondas de voltaje de salida también se distorsionan. Por este motivo, prácticamente nunca se usan conexiones en estrella sin aterrizar en sistemas de transmisión y distribución de potencia.

El neutro se mantiene en su centro geométrico si simplemente se conecta a tierra ya sea en el primario o en el secundario, o en ambos. Con ello se tiene un circuito cerrado para cualquier corriente desbalanceada, o corriente armónica hacia el conductor neutro.

Armónicas en transformadores en delta

Cuando se conectan tres transformadores monofásicos en delta, se observa un voltaje debido a las armónicas antes de cerrar la malla. En transformadores trifásicos, si tomamos la fase A como la fase de referencia, la fase B es desplazada 120° con respecto a la fase A. La armónica de la fase B está desplazada $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ con respecto a la fase A. Igualmente la tercera armónica de la fase C está desplazada $3 \times 240^\circ = 720^\circ$ con respecto a la fase A de referencia. Así, es obvio que las armónicas generadas por A, B y C están en fase entre si y en fase con sus fundamentales respectivas. Esto explica por que el voltaje de malla que se mide no es cero antes de cerrar dicha malla.

Ahora bien, cuando se cierra la malla, o se conecta un resistor entre sus terminales abiertas, la malla cerrada sirve como “trampa” para las corrientes armónicas. Todas las corrientes impares que se generan por la corriente de excitación del transformador se suman entre si y forman corrientes de circulación alrededor de la delta, como lo hacen las corrientes fundamentales normales de fase de la delta. Si bien es cierto que la corriente adicional circulante que crean las armónicas se suman a las pérdidas óhmicas de potencia de los transformadores, la conexión en delta o malla tiene la ventaja, en los sistemas delta – estrella, de mantener el neutro en el centro geométrico de los voltajes de fase y de línea de la estrella del secundario.

2.3 Máquinas rotatorias

2.3.1 Generalidades

Las máquinas rotativas también pueden generar armónicos, aunque en menor medida que los transformadores. Dichas corrientes armónicas se deben principalmente a las variaciones periódicas de velocidad o de carga, a la

saturación de la máquina, a la disposición de los embobinados o de las ranuras, y a las imperfecciones en los polos de las máquinas síncronas.

Un estator de diseño sencillo en el que todas las espiras de cada fase están concentradas en un par de ranuras produce una distribución no senoidal de densidad de campo magnético cuya forma depende de la configuración del rotor que se coloque en el interior del estator. Esta distribución no senoidal produce campos armónicos de voltaje y corriente en el estator. En resumen, la concentración de toda una fase en un solo par de ranuras es una manera ineficiente de utilizar la superficie del rotor.

Partiendo de este diseño sencillo, se han efectuado modificaciones en los estatores de las máquinas reales de c.a., que han servido para controlar los componentes armónicos en los voltajes de salida. Dos de estas modificaciones han sido las bobinas de paso fraccionario y la distribución de los devanados.

2.3.2 Distribución de fmm en las bobinas

Bajo condiciones ideales, la fuerza magnetomotriz (fmm) del entrehierro es uniforme y tiene un valor máximo de \sqrt{NI} , donde I es la corriente rms por conductor y N es el número de conductores por ranura. La representación en el dominio de la frecuencia de la distribución de fmm rectangular es:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left[\text{sen} \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} + \frac{1}{3} \text{sen} 3 \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} - \frac{1}{5} \text{sen} 5 \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} \right] \quad \text{Amp-vueltas}$$

La distribución de fmm rectangular es reducida a una componente rectangular y sus armónicas. El valor de la amplitud de los enésimos armónicos son: $1/n$ veces obtenidos en la onda fundamental. En las ranuras de los polos los enésimos armónicos son $1/n$ veces los pasos polares fundamentales.

En general para corriente alterna de frecuencia angular $\omega = \pi f$, la ecuación deberá ser:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left[\text{sen}(\omega.t) \sum \frac{1}{2} \text{sen} n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{para } n = \text{impar} \quad \text{Amp-vuel}$$

donde λ es la longitud de onda.

En la práctica, las bobinas son distribuidas a lo largo de una superficie, con g ranuras por polo y por fase, mientras que la fmm de las g bobinas son desplazadas unas a otras en el espacio.

Los valores de los desplazamientos angulares son diferentes para varias armónicas y también son diferentes los polos de ranuras.

Para una máquina de fase m el número de ranuras por polo es $Q = mg$ y el ángulo eléctrico entre ranuras es π / Q . El factor de distribución viene dado por:

$$K_d = \frac{\text{f. m. m resultante}}{\sum \text{f. m. m de bobinas individuales}}$$

y la fmm en una fase de la bobina polifásica viene dada por:

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left[g * \text{sen}(\omega.t) \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen} n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{para } n = \text{impar} \quad \text{Amp-vuel}$$

2.3.3 Bobinas trifásicas

Las bobinas de una máquina trifásica son desplazadas $\pi/3$ en tiempo y espacio, la corriente por $\pi/3$ en el tiempo, las correspondientes fmm son:

$$F_1(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g * \text{sen}(\omega.t) \cdot \left[\sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen } n * n \frac{2\pi.x}{\lambda} \right] \quad \text{Amp-vuel}$$

$$F_2(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g * \text{sen}\left(\omega.t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \left[\sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n * n \frac{2\pi.x}{3} - \frac{2\pi}{\lambda}\right) \right] \quad \text{Amp-vuel}$$

$$F_3(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} g * \text{sen}\left(\omega.t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \left[\sum_{n=1}^{\alpha} \frac{K_{dn}}{n} \text{sen}\left(n * n \frac{2\pi.x}{3} - \frac{4\pi}{\lambda}\right) \right] \quad \text{Amp-vuel}$$

La fmm total es $F_t = F_1 + F_2 + F_3$, y para los enésimos armónicos es:

$$F_3(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \left\{ g * \frac{K_{dn}}{2n} \left[\cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} - \omega.t\right) - \cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} + \omega.t\right) + \right. \right.$$

$$\left. \cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} + \omega.t - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} + \omega.t - (n+1)\frac{2\pi}{3}\right) \right\}$$

$$- \cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} + \omega.t - (n-1)\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi.n.x}{\lambda} + \omega.t - (n+1)\frac{2\pi}{3}\right)$$

Para n impar n = 1, 3, 5,etc.

Amp-vu

De esta ecuación se concluye que la fmm es una onda viajando en dirección positiva, donde los armónicos triples (3ª, 9ª, 15ª, etc.) están ausentes, la quinta armónica es una onda que viaja en dirección negativa y la séptima es una onda que viaja en dirección positiva.

2.3.4. Ancho o paso de bobina

Un paso polar es la distancia angular entre dos polos adyacentes. Medido en grados mecánicos, el paso polar de una máquina es:

$$\rho_p = \frac{360}{p} \quad [\text{grados mecánicos}]$$

donde ρ_p es el paso polar en grados mecánicos y p es el número de polos de la máquina. Independientemente del número de polos, un paso polar es siempre igual a 180° eléctricos.

Si las bobinas del estator tienen el mismo ángulo que un paso polar, se denominan bobinas de paso completo. Si se tiene un ángulo menor que el ángulo de paso polar se llaman bobinas de paso fraccionario.

Con frecuencia el ancho de una bobina de paso fraccionario se expresa mediante una fracción que indica la porción del paso polar que ella abarca. Por ejemplo, una bobina con $5/6$, ocupa cinco sextas partes de la distancia entre dos polos adyacentes. Como otra alternativa, el ancho de una bobina se puede dar en grados eléctricos.

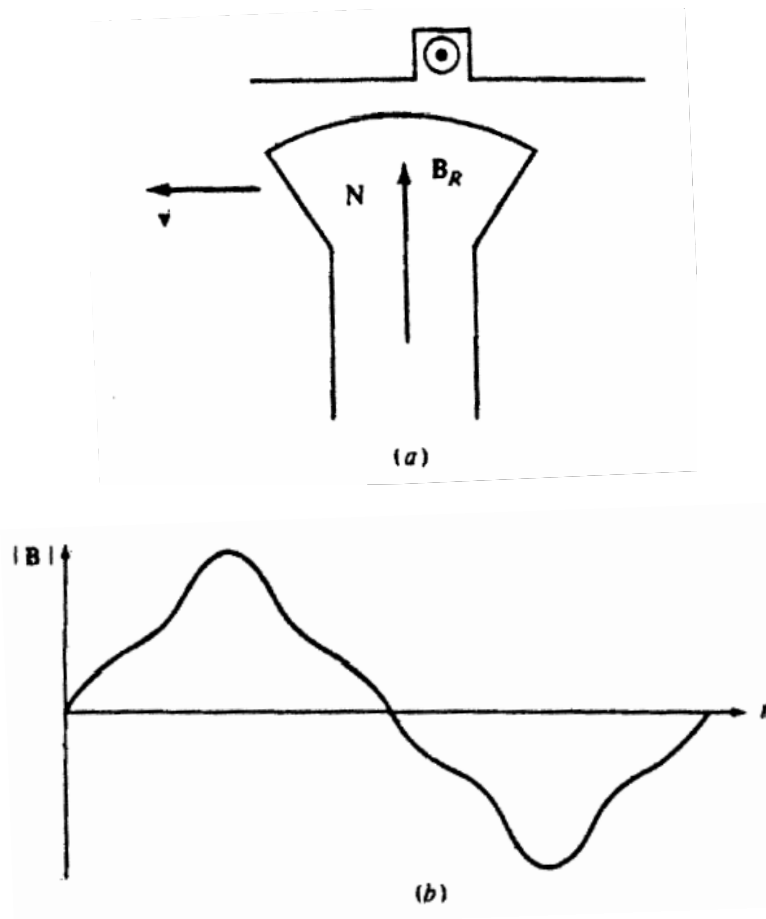
$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_r} * 180^\circ \quad [\text{grados eléctricos}]$$

donde θ_m es el ángulo mecánico, en grados, cubiertos por la bobina, y ρ_r es el paso polar de la máquina dado en grados mecánicos, o sea:

$$\rho = \frac{\theta_m P}{2} \quad [\text{grados mecánicos}]$$

donde θ_m es el ángulo mecánico, en grados, cubiertos por la bobina, y P es el número de polos de la máquina. La mayoría de los estatores reales tienen bobinas de paso fraccionario pues así se logran importantes ventajas.

Figura 16. Corte de un polo de una máquina sincrónica y flujo resultante



Existe una buena razón para emplear devanados de paso fraccionario y ella tiene que ver con el efecto de la distribución no senoidal de densidad de flujo en las máquinas reales. Analizando la figura 16, se muestra una máquina sincrónica de polos salientes cuyo rotor se mueve frente a la superficie del estator. Como la reluctancia de la trayectoria del campo magnético es menor en el centro del polo que en sus extremos (en el entrehierro es mas pequeño), el flujo se concentra en ese punto inducido en el devanado. Este voltaje no es senoidal y tiene componentes armónicas de frecuencias altas.

La onda de voltaje resultante es simétrica con respecto al campo magnético del rotor, por lo tanto no tiene armónicos pares, pero si contiene todos los armónicos impares (tercero, quinto, séptimo, noveno, etc.), los cuales deben ser eliminados con el diseño de la máquina. En general los armónicos de frecuencia altas tienen menor amplitud, de tal manera que mas allá de cierto limite (por encima del noveno armónico mas o menos), se pueden ignorar los efectos de los armónicos superiores.

Cuando las tres fases se conectan en estrella o delta, como resultado de dicha conexión se eliminan algunos armónicos de salida. El tercero es uno de ellos. Si las ondas fundamentales de voltaje de cada una de las tres fases están dadas por:

$$e_a = E_{M1} \text{sen } \omega.t \quad \text{v}$$

$$e_b = E_{M1} \text{sen}(\omega.t - 120^\circ) \quad \text{v}$$

$$e_c = E_{M1} \text{sen}(\omega.t - 240^\circ) \quad \text{v}$$

entonces las componentes de terceros armónicos de estos voltajes estarán dadas por:

$$e_a = E_{M3} \text{sen } 3\omega.t \quad \text{v}$$

$$e_b = E_{M3} \text{sen}(3\omega.t - 360^\circ) \quad \text{v}$$

$$e_c = E_{M3} \text{sen}(3\omega.t - 720^\circ) \quad \text{v}$$

Es decir, las componentes de terceros armónicos de voltaje son todas iguales y están en fase. Si la máquina sincrónica se conecta en estrella, el tercer armónico de voltaje entre cada dos terminales será cero (aunque en cada fase existan componentes grandes de terceros armónicos de voltaje). Si la máquina se conecta en delta, las tres componentes de terceros armónicos se suman y hacen circular una corriente de tercer armónico por los devanados en delta de la máquina. Estos terceros armónicos quedan aplicados a través de las impedancias internas de la máquina y nuevamente se tendrá un voltaje en terminales cuyo componente de tercer armónico no es significativo.

Este cálculo también es aplicado a los demás armónicos que sean múltiplos del tercero (como el noveno armónico). Estas frecuencias se llaman armónicos triples y en las máquinas trifásicas se eliminan automáticamente.

Devanados de paso fraccionario

Una forma de eliminar el contenido de armónicos es mediante el diseño del rotor para lograr una distribución de flujo aproximadamente senoidal. Aunque este procedimiento ayuda a disminuir el contenido de armónicas en la onda de voltaje, tampoco pueden eliminarlas todas. Un recurso adicional es utilizar devanados de paso fraccionario en el diseño de la máquina.

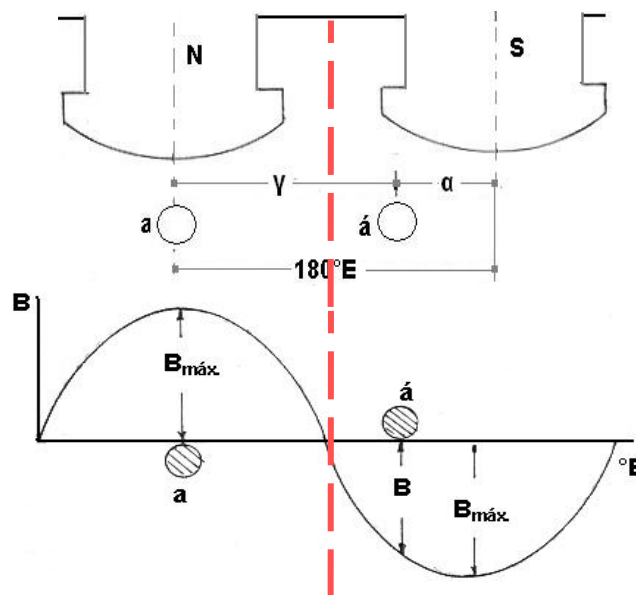
En un devanado de paso fraccionario, el ángulo eléctrico del armónico de orden n es igual a n veces el ángulo eléctrico de la componente de frecuencia fundamental, y esto es lo que se aprovecha para reducir los armónicos producidos por el estator de una máquina. En otras palabras, si para la frecuencia fundamental el ancho de una bobina es de 150 grados eléctricos, para la frecuencia del segundo armónico será de 300 grados, para la frecuencia del tercer armónico será de 450 grados y así sucesivamente. Si p representa el ángulo eléctrico de una bobina a frecuencia fundamental y v es el orden del armónico que está utilizando, entonces la bobina tendrá vp grados eléctricos a

la frecuencia de este armónico, por lo tanto el factor de paso podría expresarse por:

$$k_p = \text{sen} \frac{v\rho}{2}$$

Aquí, la consideración importante es que el factor de paso de un devanado es diferente según la frecuencia de cada armónico. Mediante una selección apropiada del factor de paso, es posible eliminar casi todos los componentes armónicos de frecuencias superiores en la salida de una máquina.

Figura 17. Devanados de paso fraccionario



Los componentes de los terceros y novenos armónicos apenas se disminuyen con este factor de paso, pero este carece de importancia ya que de todas maneras ellas no aparecen en los terminales de la máquina. Entre los efectos de los armónicos triples y el paso de la bobina se logra eliminar total o parcialmente los armónicos terceros, quinto, séptimo y quedando la frecuencia fundamental. Por lo tanto, con devanados de paso fraccionario se puede reducir drásticamente el contenido de armónicos en el voltaje de salida de una

máquina, aunque también se disminuye ligeramente el valor pico de la onda fundamental.

2.3.5 Armónicos de dientes de ranura.

Aunque los devanados distribuidos presentan ventajas sobre los devanados concentrados en términos de la resistencia del estator, utilización y facilidad de construcción, el uso de devanados distribuidos introduce un problema adicional en el diseño de las máquinas. La presencia continua de ranuras en la cara interior del estator produce variaciones en la reluctancia y el flujo en la superficie del estator. Estas variaciones producen componentes armónicos de voltaje llamados armónicos de diente o de ranura. La frecuencia de estos armónicos esta determinada por la distancia entre ranuras adyacentes y esta dada por:

$$V_{ran} = \frac{2MS}{P} \pm 1$$

donde:

V_{ran} = orden armónico

S = numero de ranuras en el estator

M = un numero entero

P = numero de polos de la máquina

El valor $M = 1$ produce el armónico de ranura de menor frecuencia, que es el que mayores inconvenientes genera, ya que tiene mayor amplitud que cualquier otro armónico. Como estos armónicos dependen de las distancias entre ranuras adyacentes, distribuir los devanados o modificar el ancho de las bobinas no reduce sus efectos. Una bobina empieza en una ranura y termina en otra; es decir su ancho es un múltiplo entero de la distancia que produce los armónicos de ranura, en primer lugar.

Los problemas que ocasionan los armónicos de ranura en las máquinas de corriente alterna son:

- Inducción de armónicos en el voltaje de salida de los generadores de c.a.
- La interacción entre los armónicos de ranura del estator y del rotor producen pares parásitos en motores de inducción. Estos pares pueden afectar seriamente la forma de la característica par-velocidad de la máquina.
- Aparición de vibraciones y ruido en la máquina.
- Incremento en las pérdidas en el núcleo al introducir voltajes y corrientes con componentes de alta frecuencia en los dientes del estator.

Los armónicos de ranura son especialmente problemáticos con motores de inducción, donde pueden introducir en el circuito magnético del rotor armónicos de una frecuencia tal que sus efectos puedan incluso reforzar el par de la máquina.

Para disminuir los armónicos de ranura, comúnmente se utilizan dos procedimientos que son: devanados fraccionarios y rotores con conductores inclinados. Los devanados fraccionarios tienen un número no entero de ranuras por polo, particularmente en el rotor. Se puede construir un estator con $2 \frac{1}{2}$ ranuras por polo.

El desbalance producido entre los polos adyacentes por los devanados fraccionarios ayuda a reducir los armónicos de orden quinto y séptimo y también los armónicos de ranura. Este procedimiento se puede utilizar para reducir armónicas en cualquier tipo de máquinas de c.a.

El otro procedimiento empleado para reducir las armónicas de ranura es más común y consiste en inclinar los conductores del rotor. Este se utiliza fundamentalmente en motores de inducción, donde los conductores se colocan ligeramente inclinados, de tal manera que cuando un extremo de un conductor se encuentre frente a una ranura del estator, el otro extremo se encuentre frente a una ranura vecina. Como los dos extremos del conductor están separados una ranura (distancia que, eléctricamente, corresponde a un ciclo completo del armónico de ranura de menor frecuencia), las componentes de voltaje debidas a las variaciones de flujo por armónicos de ranura, se anulan.

2.4 Hornos de Arco

Un horno de arco es una carga compleja, no únicamente por la fluctuación en el consumo de potencia reactiva, sino también porque la corriente del horno está altamente distorsionada. Es difícil describir las características de la corriente de un horno de arco.

Debido al incremento en el costo de la energía, el bajo factor de potencia con que opera un horno de arco debe tratarse de mejorar colocando bancos de capacitores para compensar el consumo de los reactivos de la carga.

El horno de arco, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria, teniendo valores cercanos a la resonancia, debido a la respuesta en frecuencia del banco de capacitores con la reactancia propia de la línea de alimentación, ocasionando problemas de sobre-voltajes y sobre-corrientes, causando frecuentemente la operación de los fusibles de los bancos de capacitores, fallas en el equipo de medición, etcétera.

Figura 18. Espectro de frecuencias para los períodos de a) fundición y b) refinado en un horno de arco

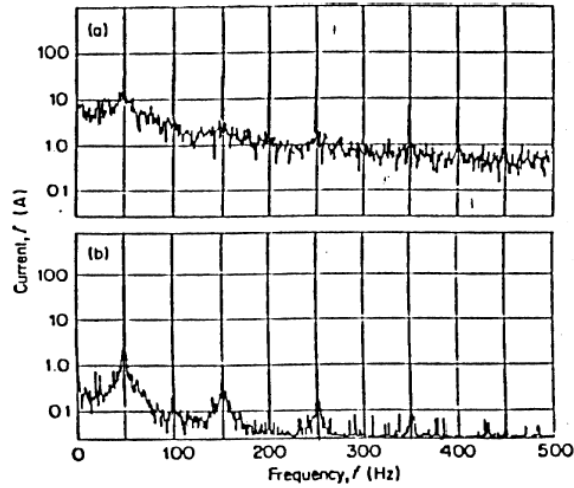


Figura 19. Gráficas probabilísticas de las magnitudes de las armónicas y la fundamental en el horno de arco.

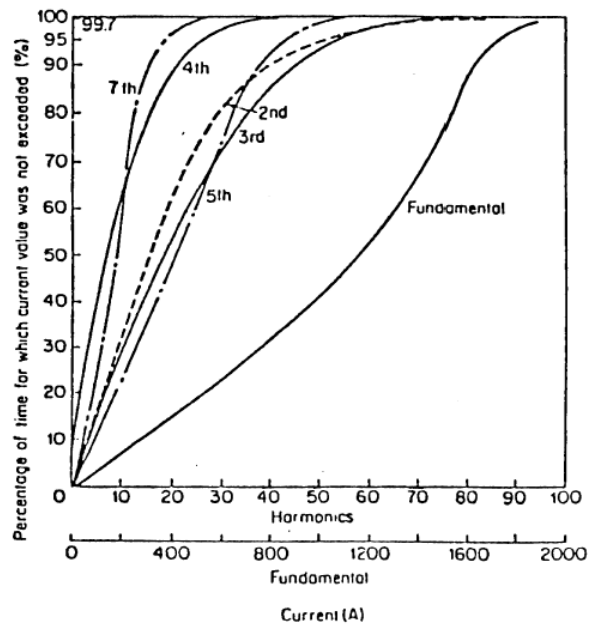
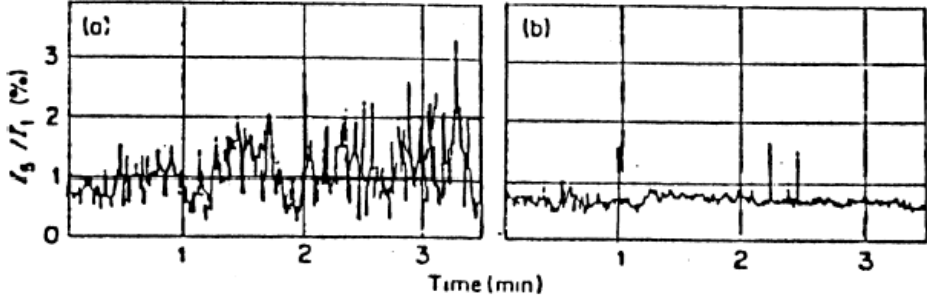


Figura 20. Quinta armónica como porcentaje de la fundamental a) fundición y b) refinado



3. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

3.1 Introducción

El análisis de las señales armónicas en los sistemas eléctricos de potencia ciertamente no es un tópico moderno, antiguamente la inyección de armónicas al sistema eléctrico solo incluía a los circuitos rectificadores y los transformadores saturados como fuente de las señales armónicas. Actualmente, gracias a una serie de estudios realizados sobre armónicas, se conoce que cualquier carga no lineal produce armónicos, es decir, es una verdadera fuente de corriente armónica.

En los sistemas eléctricos de potencia c.a., las corrientes armónicas fluirán por el camino de menor impedancia. Normalmente la fuente de potencia es el camino de baja impedancia, por lo tanto, la mayoría de las corrientes armónicas fluirán hacia ella, sin embargo, si existen instalaciones de capacitores de potencia, podrían ocurrir dificultades cuando la reactancia capacitiva de los capacitores de potencia sea igual a la reactancia inductiva equivalente del sistema.

Las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales, están desfasadas noventa grados con respecto al voltaje que las produce, fluyendo una potencia distorsionante de la fuente a la red eléctrica y viceversa, que sólo es consumida como pérdidas por efecto Joule que se transforman en calor.

Algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son:

- Aumento en las pérdidas por efecto Joule (I^2R)
- Sobrecalentamiento en los conductores del neutro.

- Sobrecalentamiento en motores, generadores, conductores y transformadores, reduciendo su vida útil.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla de los bancos de capacitores.
- Falla en los transformadores.
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.

Los efectos dependerán de la proporción que exista entre la carga no lineal y la carga total del sistema, tomando en cuenta que se debe mantener la distorsión dentro de los límites establecidos por las normas.

Generalmente cuando la carga no lineal representa menos del 20% de la carga total, la distorsión armónica de corriente estará dentro de los límites establecidos en la norma IEEE 519, sin que exista la necesidad de efectuar algún tipo de filtrado.

Si se cuenta con equipo electrónico sensible en plantas industriales o instalaciones médicas, donde las cargas no lineales sean solo una pequeña proporción, pueden llegar a ocurrir problemas en su funcionamiento atribuibles al sistema de puesta a tierra, conmutación de capacitores remotos, transitorios, o distorsión armónica producida por otros usuarios, debiendo identificar las causas y tomar las acciones correctivas, las cuales podrían requerir la instalación de protecciones o filtros.

Los problemas causados por la distorsión armónica, ocurren usualmente cuando la carga no lineal representa más del 20% de la total y por la presencia de bancos de capacitores que presentan condiciones de resonancia.

3.2 Efectos en equipos

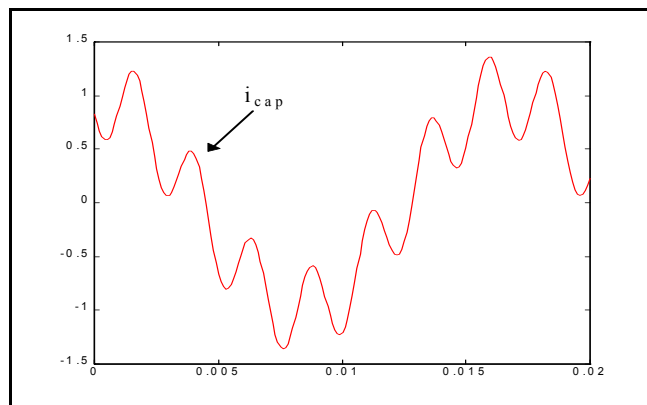
3.2.1 Capacitores

En los sistemas eléctricos de potencia, se usan los bancos de capacitores para mejorar o corregir el factor de potencia, pero su frecuencia constituye una de las componentes que afectan las características de la llamada respuesta a la frecuencia del sistema, ya que la conexión de los capacitores puede dar lugar a condiciones de resonancia en serie o en paralelo, que eventualmente amplifiquen los problemas de armónicas.

La impedancia de los capacitores disminuye al aumentar la frecuencia, de acuerdo a la ecuación de la impedancia capacitiva. Por tanto, si la tensión está distorsionada, entonces por los capacitores que se usan para la corrección del $\cos \phi$ circularán corrientes armónicas relativamente importantes. Por otra parte, la existencia de inductancias en algún punto de la instalación aumenta el riesgo de que se produzca resonancia con los condensadores, lo que puede hacer que la amplitud de los armónicos se vea magnificada en los mismos.

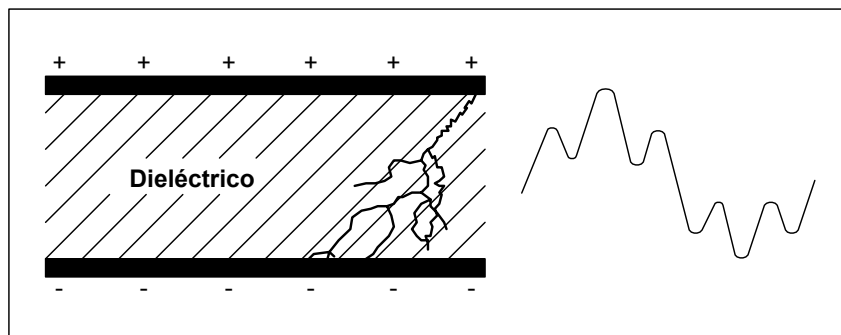
Cuando hay suficiente generación armónica proveniente de transformadores de distribución, convertidores conmutados lineales y equipos de arco, en alimentadoras o cercanos a estos puntos, las armónicas de la onda de voltaje se incrementan.

Figura 30. Corriente típica de un capacitor que se encuentra en resonancia con el sistema



La distorsión de voltaje armónico podría causar destrucción del aislamiento de los capacitores. Cuando las armónicas causan que el voltaje aplicado al banco de capacitores se distorsione, el voltaje pico podría ser bastante alto para causar una descarga parcial o corona dentro del dieléctrico del capacitor como se muestra en la figura 31. Esto podría eventualmente resultar en un corto circuito en las bobinas y una falla total del banco de capacitores.

Figura 31. Descarga parcial o corona en el dieléctrico del capacitor como resultado de la distorsión de voltaje causada por armónicas



Las altas corrientes armónicas también causan la fusión de fusibles en los bancos de capacitores, dando como resultado una disminución en la potencia reactiva suministrada al sistema, y en el caso de una planta industrial un decremento en el factor de potencia.

Los efectos capacitivos en el sistema de potencia, son divididos en tres distintos modelos:

- a) Los capacitores que se localizan cerca generan distorsión en los equipos.
- b) Los capacitores que se localizan distantes producen una mala operación en algunas fuentes armónicas específicas.

- c) Cuando una pequeña carga de capacitores no distribuidos es conectada a un sistema de distribución para corregir el factor de potencia, produce distorsión de voltaje sobre alimentadoras.

En el sistema de potencia, los armónicos provocan resonancias serie y paralelo entre las impedancias propias del sistema y los elementos capacitivos conectados al mismo (generalmente bancos de compensación de reactiva y filtros pasivos), lo que puede dar lugar a la aparición de tensiones excesivas en las barras, y a la circulación de corrientes elevadas por los condensadores.

En los bancos de capacitores, la existencia de voltajes armónicos en la red ocasiona la circulación de corrientes armónicas a través de los mismos. Aunque no aparezcan resonancias, la circulación de una corriente excesiva por los bancos de condensadores aumentará el calentamiento, provocará fallos de aislamiento, y disminuirá la vida útil de los mismos.

3.2.2 Líneas de transmisión y conductores

Para propósitos de análisis, las líneas de transmisión frecuentemente se consideran totalmente sin pérdidas. Sin embargo, en la realidad, hay varias formas en que la potencia se pierde en la línea de transmisión, entre las que se pueden enumerar: pérdida del conductor, pérdida por radiación, pérdida por el calentamiento del dieléctrico, pérdida por acoplamiento, y descarga luminosa (efecto corona).

Pérdida del conductor

Debido a que la corriente fluye, a través de una línea de transmisión, y la línea de transmisión tiene una resistencia finita, hay una pérdida de potencia inherente e inevitable. Esto a veces se llama pérdida del conductor o pérdida por calentamiento del conductor. Debido a que la resistencia se distribuye a lo largo de la línea de transmisión, la pérdida del conductor es directamente proporcional al cuadrado de la longitud de línea. Además, ya que la disipación

de potencia es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, la pérdida del conductor es inversamente proporcional a la impedancia característica. Para reducir las pérdidas del conductor, simplemente debe acortarse la línea de transmisión, o utilizar un cable de diámetro más grande (deberá mantenerse en mente que cambiar el diámetro del cable, también cambia la impedancia característica y, en consecuencia, la corriente).

La pérdida del conductor depende en parte de la frecuencia. Esto se debe a una acción llamada efecto piel. Cuando fluye una corriente a lo largo de un cable redondo aislado, el flujo magnético asociado con él lo recorre en la forma de círculos concéntricos. En consecuencia, las líneas de flujo cerca del centro del conductor, rodean la corriente y reducen la movilidad de los electrones rodeados. Esta es una forma de auto inductancia (inductancia propia) y hace que la inductancia cerca del centro del conductor sea mayor que en la superficie. Por lo tanto, mientras mayor sea la frecuencia de la corriente, esta fluirá, en su mayoría, a lo largo de la superficie (piel externa) del conductor, y en poco porcentaje en el centro del mismo.

Por lo tanto, la resistencia c.a. del conductor es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. La relación de la resistencia en c.a. con la resistencia en c.d. de un conductor se llama la relación de resistencia. Aproximadamente arriba de los 100 MHz, el centro de un conductor puede descartarse completamente y no tendrá absolutamente ningún efecto en el cálculo de la pérdida total en el conductor.

Pérdida por radiación

Si la separación entre los conductores en una línea de transmisión es una fracción apreciable de una longitud de onda, los campos electrostáticos y electromagnéticos que rodean al conductor hacen que la línea actúe como antena y transfiera energía a cualquier material conductor cercano. La cantidad de energía difundida depende del material dieléctrico, los espacios del conductor y la longitud de la línea. La manera de evitar estas pérdidas por

radiación es protegiendo adecuadamente del cable. Entonces, por ejemplo, un cable coaxial tiene menos pérdidas por radiación que las líneas de dos cables paralelos, ya que el cable coaxial está mucho más protegido. La pérdida por radiación, al depender de la longitud de onda, es entonces directamente proporcional a la frecuencia.

Pérdida por calentamiento del dieléctrico

Una diferencia de potencial, entre dos conductores de una línea de transmisión provoca la pérdida por calentamiento del dieléctrico. El calor es provocado por la energía que se propaga a lo largo de la línea. Para líneas dieléctricas de aire, la pérdida por calentamiento es despreciable. Sin embargo, para líneas sólidas, la pérdida por calentamiento del dieléctrico se ve incrementada con la frecuencia.

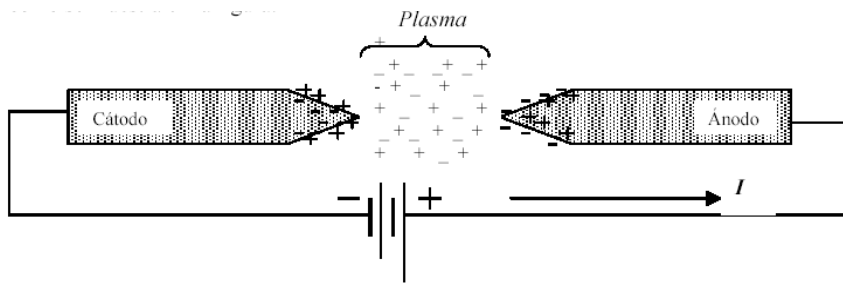
Pérdida por acoplamiento

La pérdida por acoplamiento ocurre cada vez que se hace una conexión desde o hacia una línea de transmisión o cuando se conectan dos puntos separados de una línea de transmisión. Las conexiones mecánicas son discontinuas (lugares donde se encuentran materiales diferentes). Las discontinuidades tienden a calentarse, radiar energía y, por lo tanto, disipar potencia.

Corona (descargas luminosas)

La corona es una descarga luminosa que ocurre entre los dos conductores de una línea de transmisión, cuando la diferencia de potencial, entre ellos, excede el voltaje de ruptura del aislante dieléctrico entre ellos. Generalmente, este efecto va acompañado de destellos entre los dos conductores. En la Figura 32 se puede ver un ejemplo sencillo de la situación bajo la que ocurre el efecto corona.

Fig. 32 Principio básico del efecto corona



La circulación de armónicos de corriente por las líneas de transporte y distribución origina caídas de tensión armónicas en las impedancias de éstas, lo que se traducirá en la existencia de tensiones armónicas en las líneas y barras.

En los conductores, los armónicos de corriente generan un incremento de las pérdidas por efecto *Joule*. Hay que destacar que las corrientes de alta frecuencia, debido al efecto piel, sólo circulan por la superficie de los conductores, concentrando el calentamiento en esas zonas.

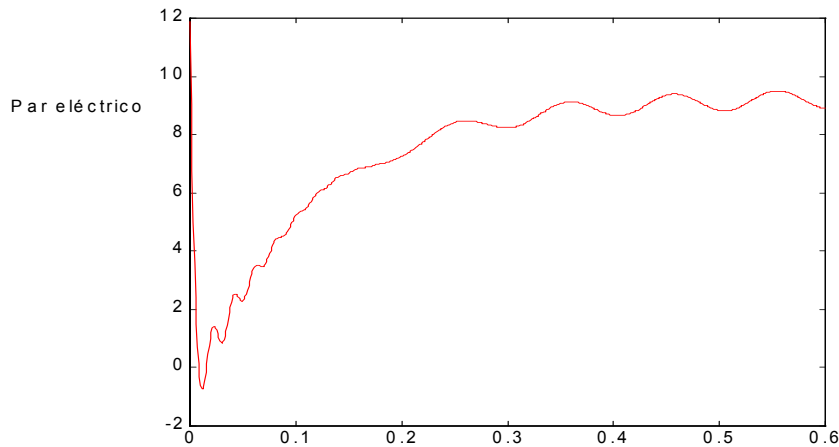
3.2.3 Máquinas rotativas

Las maquinas rotativas tales como los motores y generadores siempre se encuentran expuestos a operar bajo condiciones no ideales, muchas de las cuales son provocadas por las armónicas, las cuales tienen un efecto considerable sobre la operación y funcionamiento de las mismas.

Motores de inducción

El efecto principal causado por las armónicas y desbalances en un sistema cualquiera sobre los motores, es el calentamiento del mismo, lo cual provoca pérdidas en el núcleo, así como pares parásitos en el mismo, provocando pares pulsantes (Fig.33) que llevan al motor a una degradación rápida.

Figura 33. Par eléctrico del motor ante condiciones desbalanceadas



Uno de los casos más complicados del análisis de armónicos en la operación de motores se da cuando el voltaje de alimentación del mismo incluye voltajes armónicos múltiplos de tres (3^a , 9^a , 12^a), y estos voltajes pueden no estar balanceados.

En el siguiente ejemplo (figuras 34 y 35) se muestra la respuesta de un motor de inducción de rotor devanado con una alimentación de $V_a = 0.95 \angle 0^\circ$, $V_b = 1 \angle -120^\circ$, $V_c = 1 \angle 120^\circ$ p.u., conteniendo la 3^a armónica con una magnitud del 15% del valor nominal con un desfase de 0 grados.

Figura 34. Señal del voltaje de alimentación

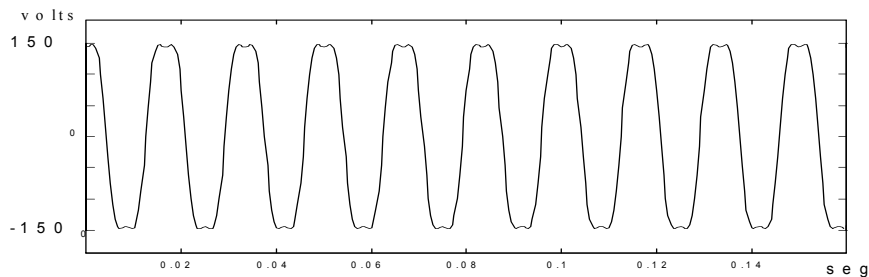
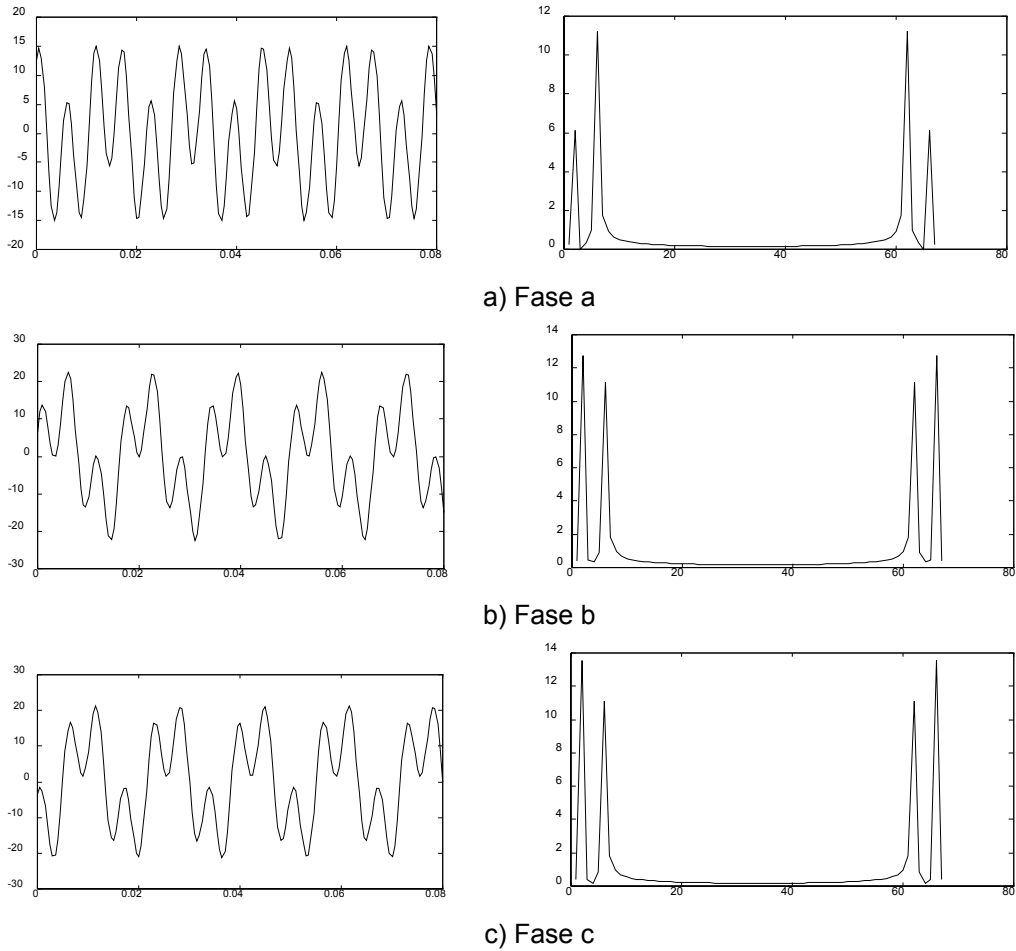


Figura 35. Corriente en las fases del estator y sus respectivas armónicas



Estas gráficas muestran que la tercera armónica provoca una conversión de frecuencias en el rotor del motor, lo que se traduce en sobre-corrientes con alto contenido de tercera armónica.

Así como el caso anterior se pueden presentar todas las combinaciones posibles mostradas en el siguiente cuadro descriptivo, a las cuales esta expuesto un motor de inducción de rotor devanado.

Cuadro Descriptivo. Respuesta de la corriente del motor inducción en condiciones no ideales

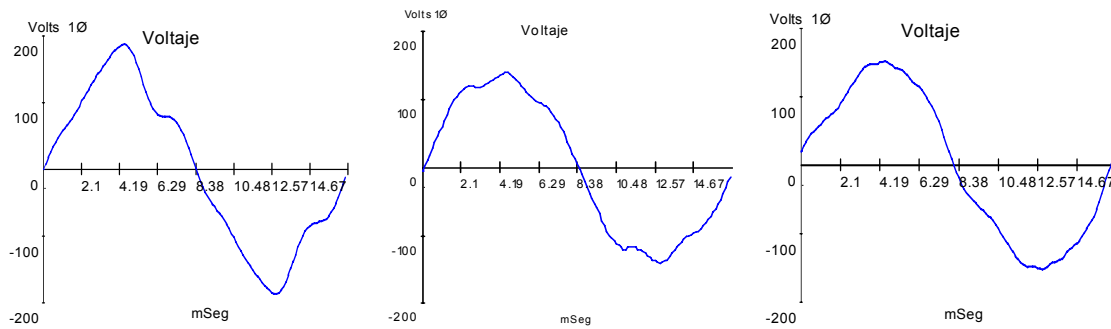
Fuente		Rotor	Corrientes del estator
balanceado	senoidal	balanceado	Senoidal balanceada.
	senoidal	desbalanceado	Contiene sub-armónicas 36-59 Hz.
balanceado	no senoidal	balanceado	Si existe la 3 armónica en el voltaje, se amplifica en la corriente (casi igual a la fundamental).
	no senoidal	desbalanceado	Presenta sub-armónicas y si existe la 3 armónica en el voltaje, se amplifica en la corriente.
desbalanceado	senoidal	balanceado	Senoidal desbalanceadas
	senoidal	desbalanceado	Se genera la 3 armónica con una magnitud pequeña
desbalanceado	no senoidal	balanceado	Si existe la 3 armónica en el voltaje, está se amplifica en la corriente con magnitud superior a la fundamental.
	no senoidal	desbalanceado	Sobre-corrientes de hasta muchas veces su valor nominal cuando existe la 3 armónica en el voltaje.

Generador síncrono

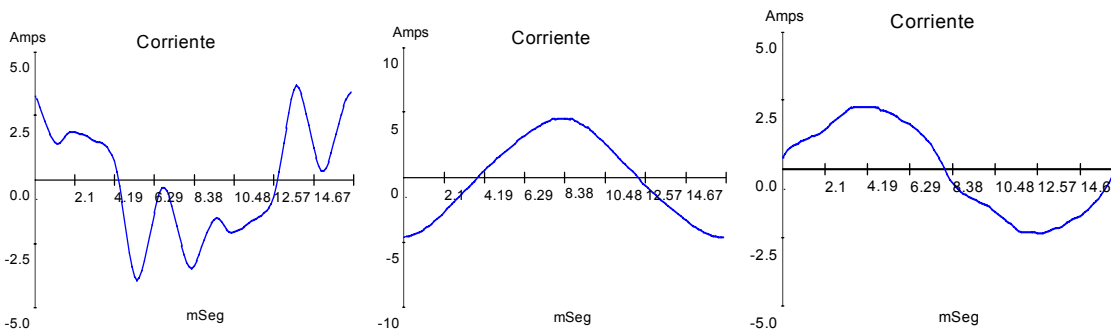
Cuando un generador síncrono alimenta una carga desbalanceada se produce una circulación de corriente de secuencia negativa, esta corriente de secuencia negativa se induce al rotor del generador provocando este, a su vez, una corriente de tercera armónica en el estator.

Este proceso continúa provocando la distorsión armónica de la corriente y por ende, la del voltaje. La figura 36 muestra las mediciones hechas a un generador síncrono de 8 KW que alimenta una carga desbalanceada, la cual esta conectada en estrella aterrizada, la carga de la fase *a* es capacitiva, la *b* inductiva, y la *c* resistiva.

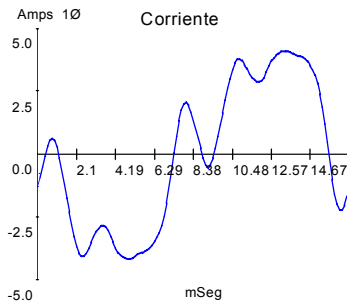
Figura 36. Respuesta de un generador al alimentar una carga desbalanceada



a) Voltajes de las tres fases abc



b) Corrientes de las tres fases abc y de neutro



Supongamos el ejemplo de un generador síncrono que alimenta una carga a través de un rectificador, se tiene entonces un sistema trifásico balanceado no senoidal, esto indica que habrá circulación de corrientes de secuencia positiva (fundamental y 7^a) y de secuencia negativa (5^a y 11^a), de esta manera sucederá el fenómeno de conversión de frecuencias en el generador, provocando así que las armónicas se generen en dos lados: el lado

de la carga y de la generación, razón por la cual se dificulta el control de las armónicas, como se observa en las figuras 37 y 38.

Figura 37. Conjunto de generador, filtro de la 5ª armónica y rectificador

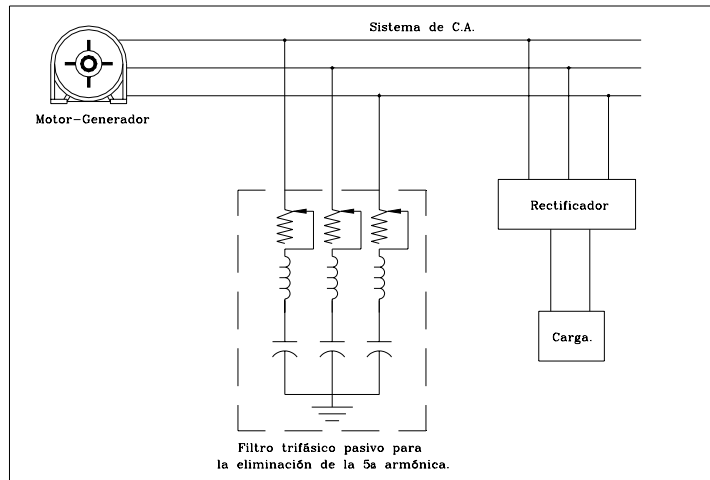
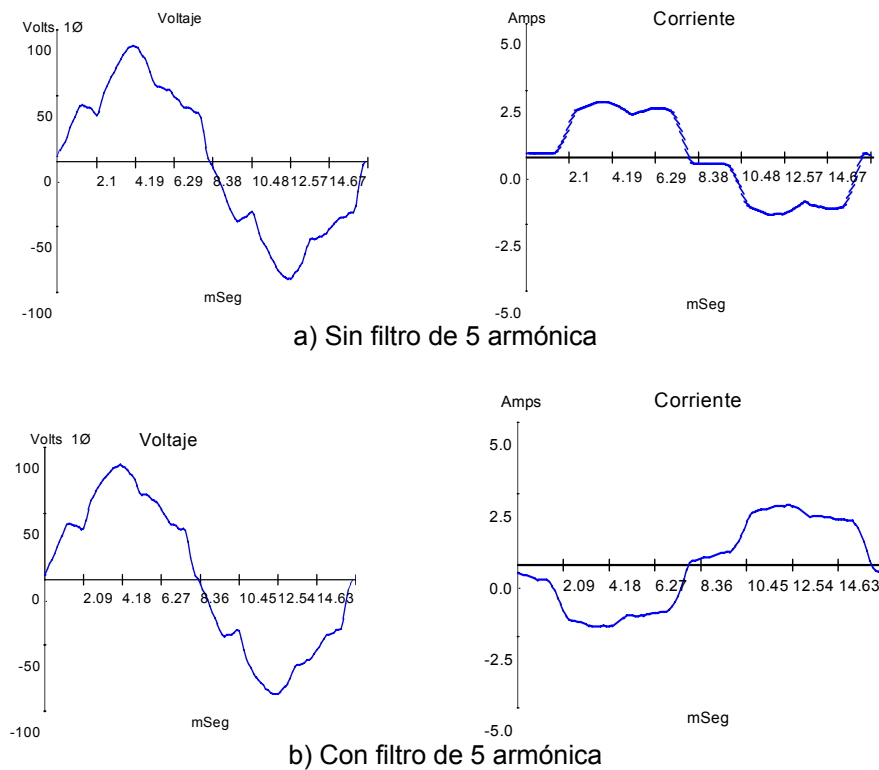


Figura 38. Voltaje y corriente del generador que alimenta a un rectificador



Las gráficas anteriores muestran que el filtro no está cumpliendo cabalmente su función por el hecho de que la quinta armónica proviene de ambos lados del filtro.

3.2.4 Protecciones y Mediciones

En un sistema eléctrico, el bloque de generación constituye un elemento claramente diferenciado del resto de equipos en el mismo. Ante una situación de perturbación, provocada por cualquier causa, este bloque debe mantenerse en servicio, siempre que sea posible, para evitar mayores consecuencias al sistema. No siempre se consigue esto, principalmente por las limitaciones eléctricas, mecánicas y térmicas de la turbina, alternador o los servicios auxiliares de la central, frente a las exigencias, que en ocasiones pueden ser demasiado severas, impuestas por la propia avería o falla.

También pueden producirse averías internas en sus arrollamientos del rotor y el estator, que pueden ser muy dañinas para la máquina. Detectar este tipo de faltas necesita, en muchas ocasiones, el uso de sistemas de cierta sofisticación.

Es importante definir las necesidades que las propias centrales demandan de la red de transporte, para garantizar:

- La seguridad de las centrales ante incidentes en la red.
- La estabilidad del sistema eléctrico.
- La continuidad de la producción.
- La disminución de los costos de producción y que se mantenga el período de vida útil restante de las centrales, por disminución de paradas no programadas.

Las protecciones de generación se pueden clasificar según el tipo de defecto:

- Cortocircuitos a tierra y entre fases.
- Funcionamientos anormales del sistema de intercambio Generación/Red, que afectan al generador.
- Funcionamientos anormales del generador y de la turbina primaria.

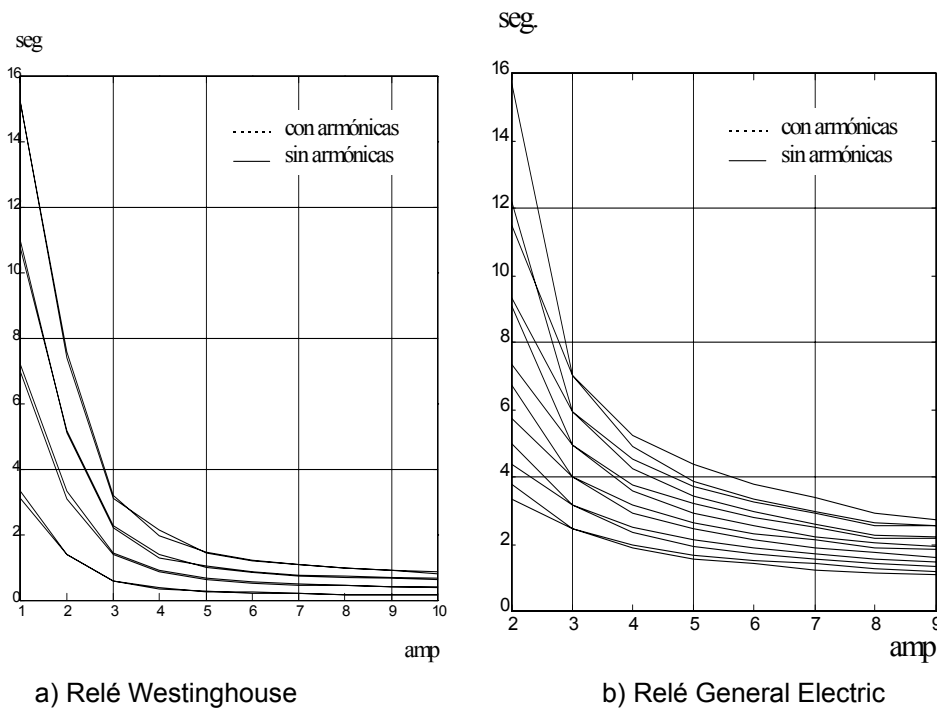
En las líneas de transmisión, los sistemas de protección contra cortocircuitos utilizan dispositivos, cuyo principio de medida es fundamentalmente de cuatro tipos:

- Medición de la distancia desde el punto de la protección hasta el de la falla (protección de distancia). Su tiempo de actuación presenta una característica escalonada, dependiendo la zona en que se encuentre la falla.
- Medición del valor de la corriente desde el punto en que se encuentra la protección hacia la falla, así como el control de su dirección (protección de sobre-corriente). Puede actuar instantáneamente, o con tiempo tanto menor cuanto mayor sea el valor de la intensidad. En el primer caso, su umbral de actuación será lo suficientemente alto para asegurar que la falla está en la línea que se ha protegido.
- Medición del desfase entre las corrientes de ambos extremos de la línea (protección de comparación de fase). La protección de cada extremo compara la fase relativa de las intensidades entre extremos de línea, interpretando como falla si existe algún desfase superior a uno de tolerancia.
- Medición del valor de la suma de corrientes que confluyen en la línea (protección diferencial). Utilizada tradicionalmente solo en líneas muy cortas, su uso se ha hecho posible de forma generalizada, al aplicar a las protecciones la tecnología digital y las comunicaciones de banda ancha. Su tiempo de actuación es instantáneo.

Los sistemas de protección experimentan efectos indeseables como consecuencia de los armónicos, generando disparos inesperados y retardos en la actuación de dichas protecciones. En interruptores automáticos, el aumento del valor de pico de la corriente asociado con la presencia de armónicos puede dificultar la extinción del arco eléctrico.

En la figura 39 se muestra la característica de tiempo inverso de un relé Westinghouse y de relé General Electric de inducción. Ambos presentan unas variaciones en la presencia de armónicas de corriente (corriente proveniente de un rectificador no controlado de 6 pulsos con carga resistiva), y por lo tanto se corre el riesgo de tener una mala coordinación en las protecciones para cuando el relé esta expuesto a armónicas.

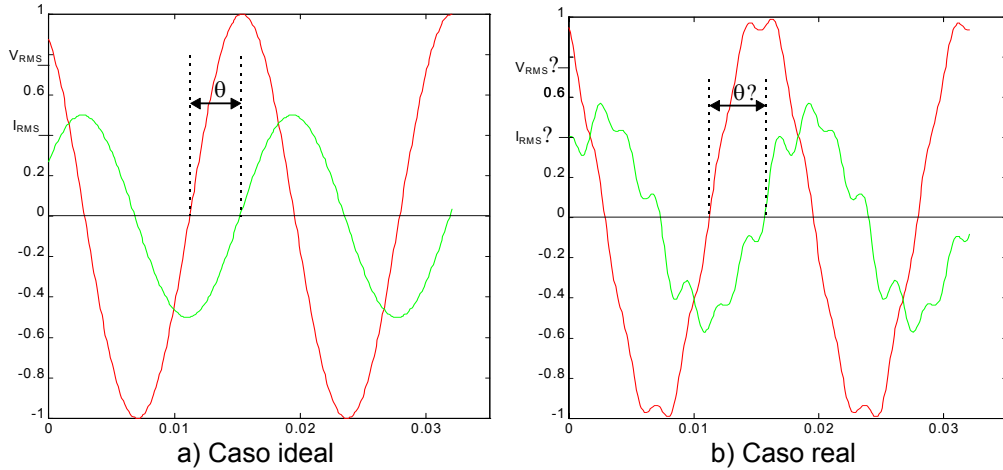
Figura 39. Curvas de tiempo inverso de un relé 51 de inducción en la presencia de armónicas



La existencia de armónicos de tensión y corriente da lugar a errores en los equipos de medida y contadores de energía, ya que muchos de estos equipos están diseñados para trabajar con ondas de tensión y corriente prácticamente senoidales, o con un espectro de frecuencias muy estrecho. Un ejemplo es el

de los contadores de disco, los cuales no miden con precisión las potencias debidas a los armónicos. En la figura 40 se ilustra el funcionamiento ideal de un wathorímetro de inducción comparado con su funcionamiento real.

Figura 40. Voltaje y corriente de una carga en un wathorímetro de disco.



3.2.5 Pérdidas

Ya que la corriente *RMS* se incrementa en la presencia de armónicas, igualmente las pérdidas se verán incrementadas como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 P &= RI_{RMS}^2 = R(I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2 + I_{3RMS}^2 + \dots) \\
 &= RI_{1RMS}^2 + R(I_{2RMS}^2 + I_{3RMS}^2 + \dots) \\
 &= P_{60Hz} + P_H
 \end{aligned}$$

Se puede observar que las pérdidas se incrementan cuando existen armónicas, así se puede pensar que, como en los hogares se tiene contaminación armónica, existen pérdidas adicionales ocasionadas por las mismas.

Pérdidas por armónicas en hogares

La figura 41 muestra un diagrama ejemplificado de varios equipos comunes que se encuentran en un hogar, estos equipos producen armónicas las cuales pueden producir errores en la medición así como pérdidas por transmisión.

Figura 41. Diagrama unifilar de un hogar

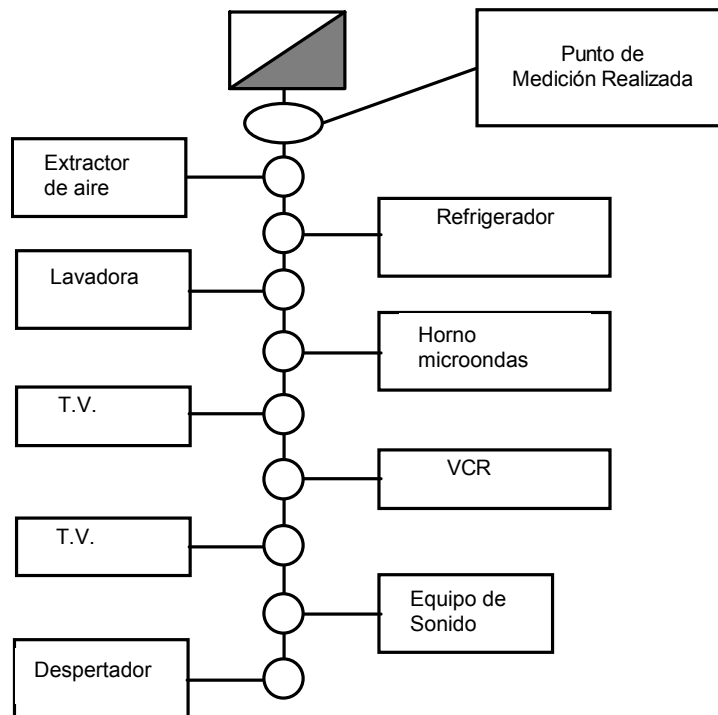
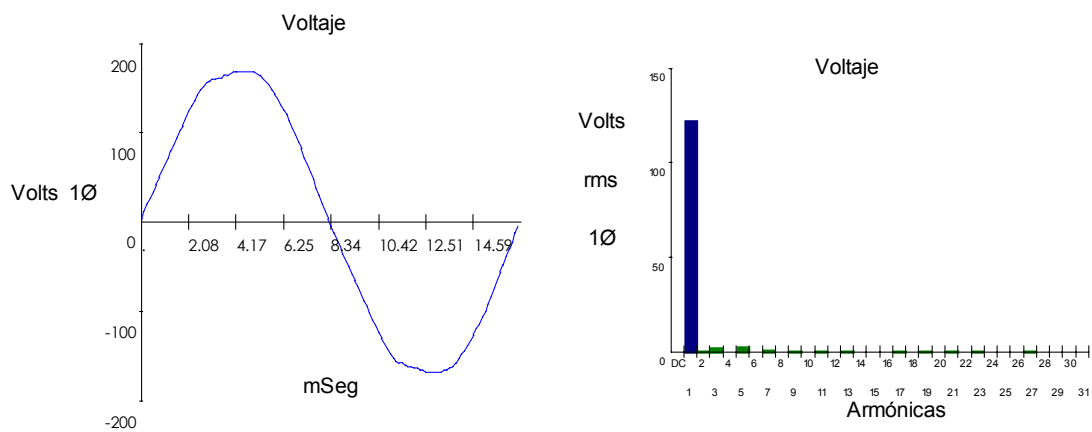
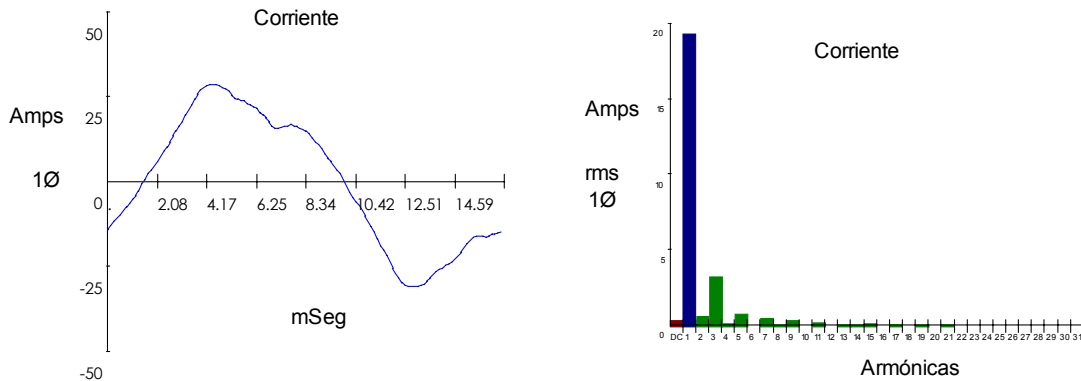


Figura 42. Forma de onda del voltaje de entrada a un hogar.



Pero la corriente detectada por el medidor colocado como se muestra en la figura 41 es la siguiente:

Figura 42. Forma de onda de la corriente armónica en un hogar



En el siguiente cuadro demostrativo se observan el desglose de las armónicas detectadas, así como las frecuencias y desfases de las mismas.

Tabla 1 Armónicas del voltaje.

Armónicas	Frec.	V Mag	%V RMS	V \emptyset°
DC	0.00	0.07	0.06	0
1	59.96	122.28	99.98	0
2	119.92	0.16	0.13	-89
3	179.88	2.04	1.67	58
4	239.85	0.02	0.01	0
5	299.81	2.56	2.10	169
6	359.77	0.04	0.03	-180
7	419.73	0.98	0.80	53
8	479.69	0.02	0.01	-160
9	539.65	0.37	0.30	-127
10	599.62	0.02	0.01	-153
11	659.58	0.17	0.14	-136
12	719.54	0.02	0.01	172
13	779.50	0.28	0.23	42

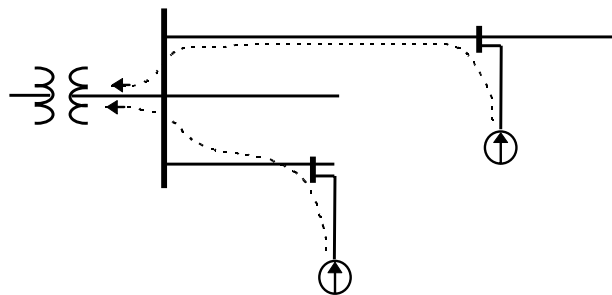
Como se ha observado, aún los hogares pequeños generan una “contaminación” armónica considerable, de este modo estas armónicas viajarán de “regreso” a lo largo de los circuitos de alimentación, provocando pérdidas.

Además de esto, y debido a que los hogares poseen wathhorímetros de inducción, se tendrá un error adicional provocado por una medición errónea.

3.2.6 Sistemas de potencia

En los casos anteriores se observó que las armónicas pueden fluir libremente por las redes eléctricas provocando a su paso una gran cantidad de problemas, además de las pérdidas en si. De esta manera se tiene que al estar siendo alimentados circuitos de tipo residencial, comercial e industrial, se provocará, a su vez, la propagación de las armónicas hacia las redes de distribución como se muestra a continuación.

Figura 43. Esquema ilustrativo del retorno de las armónicas hacia las redes de distribución



Algunas compañías suministradoras del servicio que han analizado la problemática de la propagación de armónicas, han llegado a afirmar que las armónicas son el mayor problema de la calidad de la energía eléctrica que venden.

Tal es el caso, por ejemplo, de *Taiwan Power Company* , que maneja un sistema de subtransmisión de 69/11.4 kv con 40 transformadores delta-estrella de 25 MVA en 18 subestaciones, y quien entre sus principales problemas reporta daños en sus bancos de capacitores, los cuales son atribuidos a las armónicas, a los efectos en la corriente del neutro del transformador detectada por el relevador 51N, y sobretodo, a lo pobre de la calidad de la energía eléctrica cuando se tiene cierto valor de distorsión considerable en el voltaje de sus transformadores.

En el sistema de potencia, los armónicos provocan resonancias serie y paralelo entre las impedancias propias del sistema y los elementos capacitivos conectados al mismo (generalmente bancos de compensación de reactiva y filtros pasivos), lo que puede dar lugar a la aparición de tensiones excesivas en las barras, y a la circulación de corrientes elevadas por los condensadores.

3.2.7 Interruptores (*Circuit Breakers*)

Los fusibles e interruptores termomagnéticos realizan sus disparos de protección en base a la magnitud del calentamiento producido por el valor rms de la corriente que circula a través de ellos, por lo que protegen de manera efectiva a los conductores de fase y al equipo contra sobrecargas por corrientes armónicas. Por otro lado, la capacidad interruptiva no se ve afectada por las componentes armónicas en los sistemas eléctricos puesto que durante condiciones de falla, las fuentes que contribuyen a la misma son de frecuencia fundamental.

3.2.8 Sistemas de Control

En las terminales de transmisión de corriente directa en alto voltaje y en compensadores estáticos de VARs, la distorsión puede causar errores en el encendido de los tiristores. Aunque esto es normalmente tomado en cuenta al momento de diseñar un sistema de control, los cambios inesperados en el sistema podrían crear nuevas resonancias dando como resultado la amplificación armónica causando problemas en estas instalaciones.

Además del incremento en generadores de armónicas y puntos resonantes en la red, los sistemas eléctricos y las cargas se han hecho más sensibles a las armónicas. Existen varias áreas de nueva y continúa preocupación:

- 1.- Computadoras, herramientas controladas por computadoras y varios tipos de controladores digitales, son especialmente susceptibles a las armónicas, así como también otros tipos de interferencia.
- 2.- Las armónicas pueden dañar por calentamiento el dieléctrico de los cables subterráneos.
- 3.- Las fallas en los bancos de capacitores con frecuencia se deben a las armónicas.
- 4.- Los medidores inductivos pueden ser afectados por las armónicas.
- 5.- Diseños menos conservadores de generadores y transformadores, agravan los problemas térmicos causados por armónicas

Los problemas con armónicas en la actualidad tienen consecuencias más serias y complejas que en el pasado. Por tanto, una combinación de dispositivos que generen armónicas, con ciertos parámetros de configuración del sistema y bajo determinadas condiciones de operación pueden, en verdad, dar origen a serios problemas de armónicas.

El personal de planificación y/o diseño de sistemas eléctricos de potencia o industriales deben tener la habilidad de reconocer y evitar o mitigar tales problemas.

4. ESTÁNDARES EN EL ANÁLISIS ARMÓNICO

4.1 Introducción

Últimamente se ha dado un apareamiento en la industria de equipos causantes de perturbaciones armónicas, los cuales son una preocupación creciente y estos llevan a la necesidad de establecer criterios y procedimientos para lograr una armonía entre estos equipos y los equipos sensibles a las perturbaciones de tensión.

Estos criterios y procedimientos suministran elementos que permiten a las empresas de energía evaluar la calidad del servicio con respecto a los niveles de distorsiones armónicas, controlar las perturbaciones causadas por las cargas no lineales en operación y cuantificar el impacto de la instalación y ampliación de cargas generadoras de armónicos.

La base de estos criterios es establecer un conjunto de recomendaciones que tengan aplicación práctica, además, se debe garantizar a los usuarios el suministro de energía de calidad para satisfacer sus necesidades. Se deben, también, crear criterios para ser aplicados en las etapas de planeamiento y operación de las empresas eléctricas.

4.2 Distorsión armónica total (DAT)

La frecuencia fundamental del sistema de potencia es 60Hz, pero la presencia de elementos y fenómenos no lineales, incluyendo la saturación de los transformadores, convertidores, aparatos de estado sólido, motores de velocidad variable, etc., generan componentes de frecuencia los cuales son múltiplos de la componente fundamental. La presencia de estos componentes de alta frecuencia puede causar recalentamiento, mala operación, vibraciones mecánicas y disparo de equipos, así como también reducción de la capacidad de los transformadores.

Los componentes más comunes en el sistema de potencia son las armónicas impares de bajo orden. En un sistema trifásico con neutro, la suma vectorial de los voltajes y corrientes de fase es cero si el sistema está balanceado; y aún cuando no esté balanceado, siempre habrá alguna cancelación. Sin embargo, las armónicas múltiplos de 3 no se cancelan. Ellas se suman en el neutro y ayudan a contribuir al recalentamiento. Por esta razón las armónicas múltiplos de 3 son tratadas como una categoría separada. Las armónicas pares son el resultado de asimetrías y pueden causar desplazamientos de corriente directa en los equipos, están agrupadas en una categoría separada y tienen límites más restrictivos.

La magnitud de las armónicas decrece rápidamente a medida que crece su orden. Para todos los propósitos prácticos, las armónicas de orden mayor a 40 no requieren ser consideradas.

El indicador de contenido armónico en el suministro de voltaje es dado por la Tasa de Distorsión Armónica Total (DAT):

$$DAT = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (V^{(i)})^2}}{V^{(1)}}$$

Frecuentemente la DAT es expresada en porcentaje. La DAT ya sea de corriente o de voltaje, puede ser calculada. Para los voltajes trifásicos balanceados se utilizan los voltajes línea neutro en la forma indicada. En el caso desbalanceado habrá una DAT para cada fase. La DAT tiene la ventaja de ser fácilmente calculada, también tiene la ventaja que está en uso común como una medida rápida de los niveles de distorsión de la cantidad que está en estudio. La desventaja principal es que la información detallada del espectro total nunca es completa.

La DAT tiene varias propiedades entre las que se encuentran las siguientes:

- La DAT es cero para una onda perfectamente senoidal;
- Mientras aumenta la distorsión, la DAT se hace más y más larga;
- Regularmente se toma el valor de 5% como la división entre la distorsión alta y distorsión baja, aunque un 5% puede ser considerado como elevado.

4.3 Límites admisibles de distorsión armónica en los sistemas de potencia

De acuerdo con la resolución CNEE 9-99 con fecha 07/04/99, las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) tienen como objetivo “Establecer los derechos y obligaciones de los prestatarios y usuarios del Servicio Eléctrico de Distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, indemnizaciones, sanciones y/o multas”

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica de forma continua y sistemática fiscaliza el cumplimiento de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) en los siguientes parámetros:

- Calidad del Producto Suministrado por el Distribuidor (Regulación de Tensión, Desbalance de tensión en servicios trifásicos, **Distorsión Armónica** y Flicker)
- Incidencia del Usuario en la calidad del producto (**Distorsión Armónica**, Flicker y Factor de Potencia)
- Calidad del Servicio Técnico (Interrupciones)
- Calidad del Servicio Comercial (Servicio comercial prestado por el distribuidor y Calidad de atención al usuario)

La aplicación de la Norma Técnica del Servicio de Distribución (NTSD) dio inicio a partir de la finalización de la etapa de transición, durante esta etapa se exigirá tanto a los distribuidores como usuarios, el cumplimiento de los índices o indicadores individuales y globales de calidad de todos los parámetros contenidos en las normas, según les corresponda. Los incumplimientos en las tolerancias establecidas como admisibles para esta etapa, serán consideradas para efecto de la determinación de una indemnización, sanción y/o multa, según corresponda. Esta etapa inicio para la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. en el mes de junio del año 2000 y para las empresas Distribuidora de Electricidad de Oriente S.A. y Distribuidora de Electricidad de Occidente S.A. en el mes de noviembre del mismo año.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica establece ciertos límites de distorsión armónica, los cuales se muestran a continuación:

Tabla I. Límites de distorsión armónica en Guatemala (CNEE)

Orden de la armónica (n)	Tasa de distorsion individual (%)	
	BT y MT (V < 66kV)	AT (66kV < V < 230kV)
(impares multiples de 3)		
3	5	2
9	1.5	1
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
(impares no multiples de 3)		
5	6	2
7	5	2
11	3.5	1.5
13	3	1.5
17	2	1
19	1.5	1
(pares)		
2	2	2
4	1	1
6	0.5	0.5
8	0.5	0.4
10	0.5	0.4
12	0.2	0.2

4.4 Norma IEEE 519

Esta norma, originaria de Estados Unidos, ofrece abundante información acerca de las causas y efectos de las perturbaciones armónicas en sistemas de potencia. La filosofía que subyace detrás de este estándar busca, por un lado, limitar la inyección de corrientes armónicas por parte de los consumidores individuales para que no creen unos niveles inaceptables de distorsión en la tensión del sistema de potencia en condiciones normales de funcionamiento, y por otro, acotar la distorsión armónica de la tensión ofrecida por la compañía suministradora.

El estándar IEEE 519-1992 especifica los valores máximos de distorsión y los valores máximos de corrección. Un límite de distorsión armónica de 5% es el punto en donde los armónicos empiezan a tener un efecto en detrimento en los sistemas de distribución eléctricos. Además este estándar establece una serie de recomendaciones y requisitos en el control de los armónicos en sistemas eléctricos de potencia, especifica lo siguiente:

- El control sobre la cantidad de armónicos de corriente inyectados en el sistema tendrá lugar en el punto final de consumo.
- Si se asume que la inyección de armónicos de corriente se encuentra dentro de unos límites razonables, el control sobre la distorsión de voltaje será ejercido por la entidad que tiene el control sobre la impedancia del sistema, la cual generalmente es la compañía suministradora.

La relación de corto circuito esta dada por:

$$R_{sc} = I_{sc} / I_L$$

donde:

$$I_{sc} = S_{sc} / \sqrt{3} U_{nom} = U_{nom} / \sqrt{3} Z$$

siendo U_{nom} la tensión nominal de línea a línea, y Z la impedancia de la red en el Punto de Acople Común con el resto de cargas del sistema (PAC).

De una manera general, el objetivo de esta norma es limitar la inyección de corrientes armónicas para que la tensión en el PAC no presente ningún armónico individual con una amplitud superior a un 3% de la componente fundamental, y que globalmente, el THD de tensión no sea superior al 5% en sistemas en los que no existe una resonancia paralelo a una frecuencia específica.

Tabla II. Bases para la limitación de las corrientes armónicas en función del Rsc en el PCC, según IEEE 519 – 1992.

R_{sc} (en el PCC)	Maximo de armónicos permitido (en % del Voltaje nominal)	Suposicion Relacionada
10	2.50 - 3.00	Sistema dedicado
20	2.00 - 2.50	1 - 2 consumidores grandes
50	1.00 - 1.50	Algunos consumidores relativamente grandes
100	0.50 - 1.00	5 - 20 consumidores de tamaño medio
1000	0.05 - 0.10	Muchos consumidores pequeños

Tabla III. Límites de inyección de corriente armónica especificados en IEEE 519 – 1992

I _{sc} / I _L	Tasa individual admisible en relacion a I_L (%)					TDD (%)
	h<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h>35	
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (120 V - 69 kV)						
< 20 (1)	4.00	2.00	1.50	0.60	5.00	5.00
20 - 50	7.00	3.50	2.50	1.00	8.00	8.00
50 - 100	10.00	4.50	4.00	1.50	12.00	12.00
100 - 1000	12.00	5.50	5.00	2.00	15.00	15.00
>1000	15.00	7.00	6.00	2.50	20.00	20.00
SISTEMAS DE SUBTRANSMISION (69 kV - 161 kV)						
< 20 (1)	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
20 - 50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.00
50 - 100	5.00	2.25	2.00	0.75	0.35	6.00
100 - 1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.50
>1000	7.00	3.50	3.00	1.25	0.70	10.00
SISTEMAS DE TRANSMISION (> 161 kV)						
<50 (1)	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
≥ 50	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75

(1) = Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión de corriente, con independencia del valor de I_{sc} / I_L

(*) Los armónicos pares están limitados a un 25% de los límites para los armónicos impares.

(**) No está permitida la inyección de componentes de corriente continua.

Los límites mostrados anteriormente deben ser usados en el diseño de sistemas considerando el peor de los casos en condiciones normales de funcionamiento (condiciones que duren más de una hora). Para períodos más cortos, durante arranques o en condiciones inusuales, estos límites pueden ser superados en un 50%.

5. CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

5.1 Introducción

El monitoreo de la calidad de la energía en las primeras etapas de planeación de una planta o de la instalación de cargas sensibles, proporciona información sobre si existe o no problemas de calidad de la energía. El monitoreo puede consistir inicialmente en examinar los registros que tenga a mano la compañía de servicio eléctrico y localidad. Estos pueden suministrar información sobre la regulación de voltaje, los niveles de distorsión armónica, las interrupciones prolongadas y las momentáneas y otros aspectos de las condiciones de estado estable y transitorio.

5.2 Herramientas para el análisis armónico

El equipo utilizado para la medición de armónicos cae dentro de dos grupos. Uno comprende transductores de medición, incluyendo los transformadores de corriente (CTs) y los transformadores de potencial (PTs). El otro comprende grabadoras e instrumentos de análisis tales como Osciloscopios y analizadores de espectro. Dicho equipo debe cumplir con las siguientes características:

- Medir como mínimo la armónica 25 (1500 Hz)
- Mostrar la magnitud y ángulo de las armónicas
- Mostrar valores *RMS* y *THD* como mínimo

Contar con transductores de corriente y potencial adecuados para frecuencias de hasta 3000 Hz. Errores $< 1\%$ y $< 3\%$ para TC's y TP's respectivamente.

5.2.1 Transformadores de corriente (CTs)

Los CTs instalados para protección y medición son generalmente convenientes para mediciones de corrientes armónicas, ya que tienen una

respuesta a la frecuencia adecuada. Esto significa que, sobre el rango de frecuencias de interés en estudios de armónicas, éstos CTs no introducirán errores significativos en las mediciones.

La precisión del CT se define en términos de su "factor de corrección de relación" o RCF. El RCF se define como corriente primaria dividida por el producto de la relación de vueltas y la corriente de burden secundaria. El término "burden", al referirse a un transformador de instrumento, denota la impedancia del circuito conectada al devanado secundario. Idealmente, el RCF de 1.0 (100%); significa que no hay error en la lectura por parte del transformador de instrumento. Hasta 10 kHz aproximadamente, el error es despreciable. El rango de interés para los estudios armónicos se extiende cuando mucho hasta 3 kHz

- Aplicación de Transformadores de Corriente

En general, las siguientes recomendaciones se aplican al uso de CTs para la medición de armónicas en el sistema de potencia:

1. Para mediciones de frecuencias hasta 3000 Hz (50^{ava} armónica en sistemas de 60 Hz), los CTs usados para medición o protección dan buenos resultados.
2. Si el ángulo de fase de la corriente es importante, el *burden* del CT debe ser resistivo. Los *burdens* inductivos tales como las bobinas de los relevadores causarán desfasamiento en el ángulo de fase.
3. Para la precisión máxima, la relación de taps mas alta debe ser usada para minimizar la corriente de magnetización. El *burden* del CT debe ser minimizado para reducir el voltaje secundario y, por consiguiente, la corriente de magnetización. Si es posible, el secundario del TC deberá ser corto-circuitado.

Hay muchos CTs tipo pinza disponibles comercialmente que pueden conectarse a los cables secundarios del CT., y así alimentar la señal de corriente a un osciloscopio o analizador de onda.

5.2.2 Transformadores de potencial (PTs)

Dos tipos de PTs se usan para mediciones en los sistemas de potencia (60 Hz): el magnético y el capacitivo. Generalmente estos transformadores son suficientemente precisos para mediciones de armónicas

El (RCF) para un TP se define de una manera similar a la de un TC: el RCF es el voltaje primario dividido por el producto de la relación de vueltas y el voltaje secundario. Puede verse que, dependiendo del burden (R_b), el error es menor al 2% hasta 5 kHz. El TP magnético es muy utilizado en aplicaciones industriales.

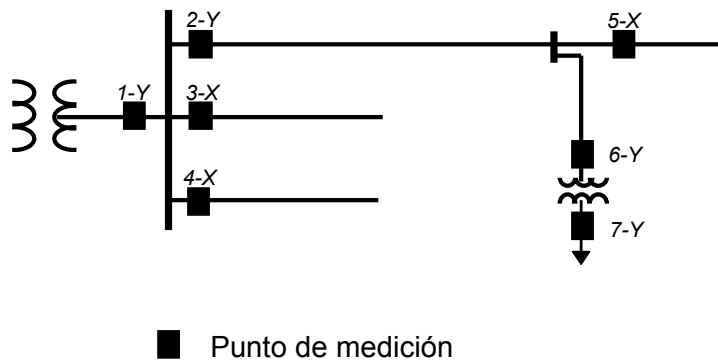
Una vez que se tiene el equipo de medición es importante conocer los puntos en los cuales se deben hacer las mediciones para poder tener un conocimiento global de la propagación de las armónicas, estas mediciones deben ser:

- Mediciones de las corrientes de fase y neutro
- Mediciones de los voltajes de fase

En los sistemas de distribución las mediciones deberán de hacerse de acuerdo al sistema, estas pueden ser en las subestaciones y en los alimentadores.

Estos lugares de medición se muestran en la figura 44.

Figura 44. Puntos de medición en sistemas de distribución

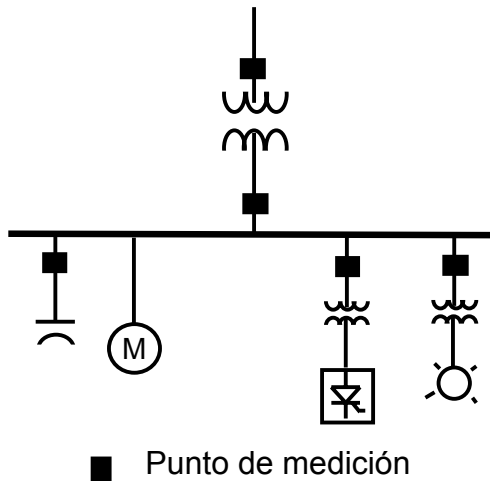


La importancia de la medición es hacerlas preferentemente en el secundario del transformador principal, de tal manera que si se tiene un contenido apreciable de armónicas, se prosiga a identificar la procedencia mediante la medición y discriminación de los distribuidores. Como se puede observar en el sistema de la figura 44 el número indica el orden de las mediciones y la X indica la medición sin armónicas y la Y la medición con armónicas.

Para las plantas industriales es recomendable hacer las mediciones en los siguientes puntos:

- Punto de conexión con el sistemas
- Nodos internos de la planta
- Cargas no lineales
- Bancos de capacitores

Figura 45. Medición en sistemas industriales



Como se puede observar es de vital importancia saber identificar a las cargas que generan armónicas, pues en las mayorías de los casos éstas mediciones son utilizadas por el software de propagación de armónicas para realizar una serie de estudios.

5.3 Métodos de cancelación de armónicos

La distorsión armónica de la corriente existe, en mayor o menor medida, en todos los sistemas de potencia. Generalmente, los armónicos de corriente deben ser controlados sólo cuando éstos llegan a ser problemáticos. Las tres causas más comunes que hacen problemática la circulación de armónicos de corriente son:

- La fuente de generación de corrientes armónicas es demasiado grande.

- El Punto Común de Acople (PCC) de la carga está lejano, con lo que el camino seguido por los armónicos de corriente es demasiado largo. Este problema se agrava cuando la línea de suministro es débil, presentando una elevada impedancia hacia arriba del PCC. En este caso, la circulación de los armónicos de corriente crea una elevada distorsión en la tensión del sistema.
- La respuesta del sistema de potencia a uno o varios de los armónicos inyectados da lugar a situaciones de resonancia. En este caso, las tensiones o corrientes armónicas se ven magnificadas, alcanzando niveles superiores a los límites tolerables.

Las opciones básicas para controlar la circulación de corrientes armónicas son:

- Modificar la respuesta de frecuencia del sistema de potencia.
- Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga.
- Añadir filtros que permitan derivar o bloquear los armónicos de corriente.

Modificar la respuesta de frecuencia del sistema de potencia

Las medidas comúnmente adoptadas para modificar la respuesta adversa del sistema de potencia ante los armónicos son:

- Añadir inductancias en serie con los condensadores de los bancos de compensación de potencia reactiva para que la frecuencia de resonancia no coincida con ninguno de los armónicos presentes en el sistema.
- Cambiar la capacidad del condensador de los bancos de compensación de potencia reactiva. Generalmente esta es la solución más barata tanto para consumos industriales como domésticos y de servicios.
- Mover la batería de condensadores a otro punto del sistema de potencia donde la impedancia de cortocircuito sea diferente, o donde existan mayores pérdidas, lo cual dará lugar a un mayor coeficiente de amortiguamiento. Esta solución no suele ser adecuada para

consumidores industriales, ya que la batería de condensadores no se puede alejar lo suficiente como para notar diferencias apreciables.

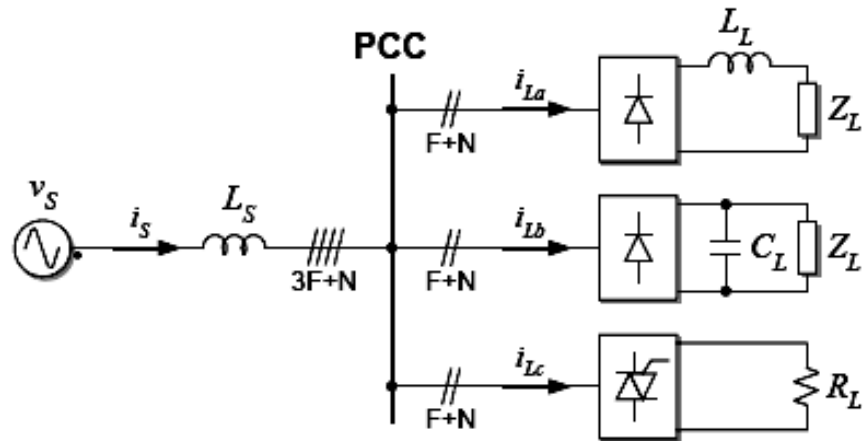
- Añadir filtros pasivos paralelo para cambiar la respuesta frecuencial del sistema. Esta técnica se presenta con más detalle al final del capítulo, siendo preciso remarcar aquí que la existencia de múltiples filtros pasivos en sistemas complejos puede dar lugar a la aparición de resonancias anómalas, que finalmente empeoren el comportamiento del sistema.
- Eliminar algunas baterías de condensadores. Esta medida es aplicable cuando se admite que el incremento de las pérdidas, la bajada en la tensión de la red, y la penalización en el factor de potencia, son efectos aceptables en pos de resolver el problema de la resonancia armónica en el sistema de potencia.

Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga

Para describir las medidas que permiten modificar la distribución armónica de las corrientes solicitadas por la carga, se supondrá la situación de carga representada en la figura 46, la cual da lugar al espectro armónico de la figura 47. En este escenario existen tres cargas distorsionantes monofásicas conectadas entre fase y neutro, que dan lugar a una composición armónica trifásica sumamente heterogénea.

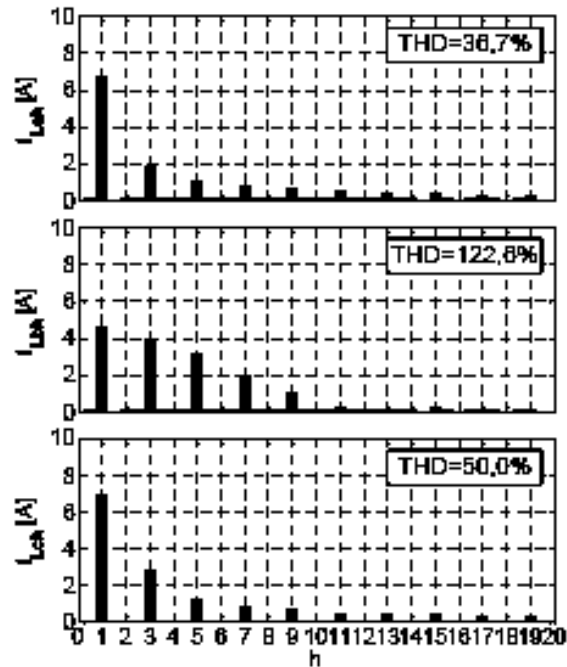
Estas cargas consisten en un rectificador monofásico que posee una elevada inductancia en el lado de continua, el cual se puede considerar como una fuente de corriente distorsionante; un rectificador monofásico con un gran condensador en el lado de continua, el cual se puede tratar como una fuente de tensión distorsionante; y un regulador de una lámpara de incandescencia basado en un triac (*dimmer*), el cual se puede considerar como una carga resistiva no lineal.

Figura. 46 Composición de cargas en una situación genérica



Respecto a las formas de onda asociadas a estas cargas, En las figura 47 se representa la distribución armónica de las corrientes solicitadas por cada una de las cargas.

Figura 47. Espectro armónico de las corrientes

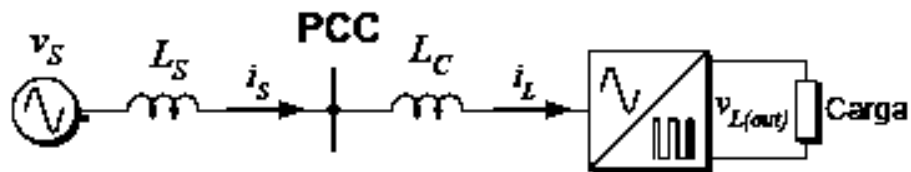


Existen varias medidas que son comúnmente adoptadas para modificar la corriente solicitada por las cargas.

Colocar Inductancias limitadoras

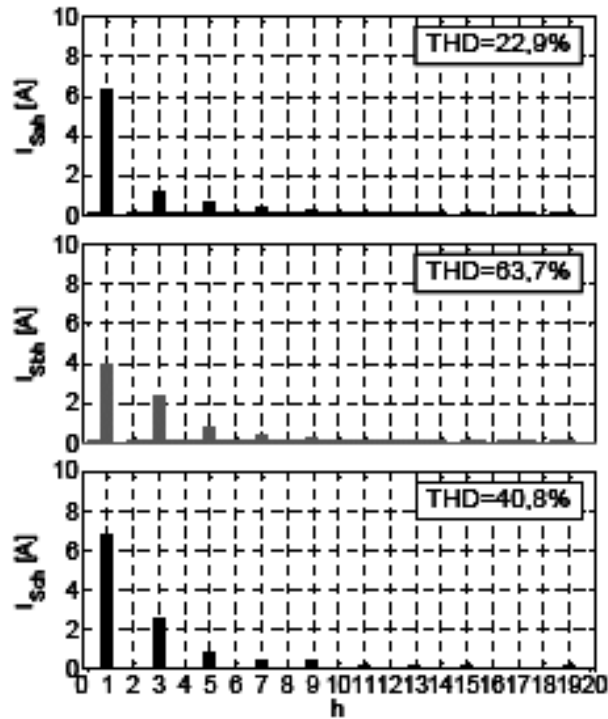
Colocar inductancias limitadoras (L_C) en el lado de lado de alterna de los convertidores, véase la figura 48. Esta solución resulta sencilla, fiable y relativamente barata, aunque su efectividad es limitada, siendo necesarias inductancias de grandes dimensiones, y aumentando las caídas de tensión en las líneas.

Figura 48. Inserción de una inductancia limitadora en el lado de alterna



Las corrientes en el lado de fuente se ven amortiguadas debido al incremento de la impedancia de la línea, y cómo las tensiones en el *PCC* han mejorado respecto a la situación original. En la figura 48 se observa como esta solución resulta adecuada tanto para el rectificador con carga capacitiva, como para el *dimmer*, sin embargo, en el rectificador con carga inductiva, el aumento de la impedancia de la línea da lugar que se alarguen los tiempos de conmutación de la corriente entre las diferentes ramas del convertidor, lo cual repercute negativamente en la forma de tensión que recibe la carga conectada en su lado de continua.

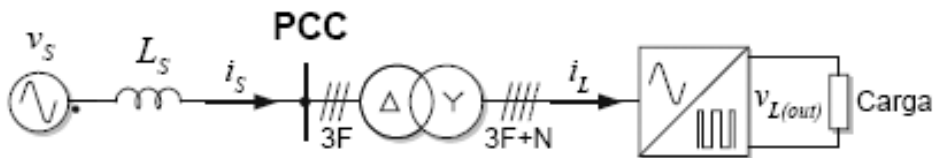
Figura 48. Espectro armónico con la inserción de una inductancia limitadora



Alimentación de la carga con un transformador en delta

Alimentar la carga mediante un transformador con el primario en triángulo, véase la figura 49. Con esta solución se impedirá la circulación de corrientes con polaridades iguales en el lado primario del transformador. Si las corrientes consumidas por las cargas no lineales estuvieran perfectamente equilibradas, esta solución eliminaría la circulación de los armónicos múltiplos de 3 por el lado de fuente. De manera general, el transformador Δ -Y lo que está consiguiendo es la cancelación de las corrientes circulantes por el conductor de neutro del lado de carga.

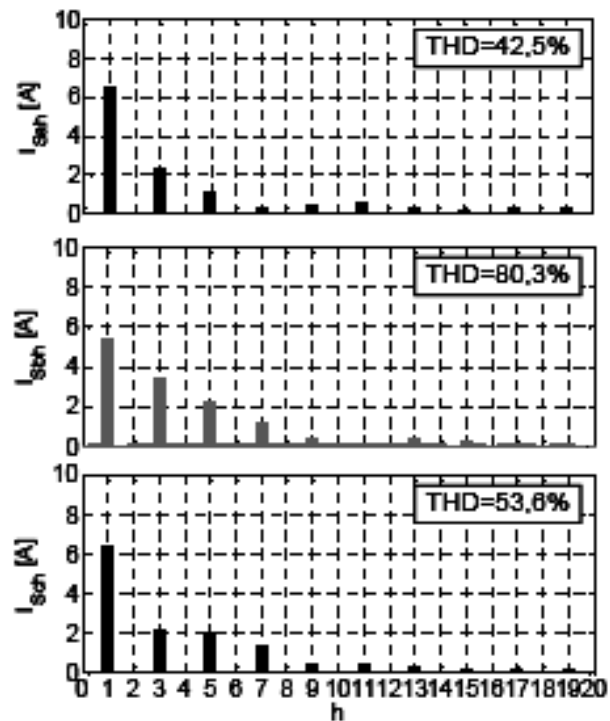
Figura 49. Inserción de un transformador Δ -Y



Esta disposición produce un desfase de 30° entre las tensiones de los dos secundarios del transformador. Los armónicos de orden $6h \pm 1$, siendo h un número impar, se cancelan en el primario del transformador. Según esto, los primeros armónicos eliminados son el 5º y el 7º, que son precisamente los más importantes por su amplitud (figura 50).

Los primeros armónicos que aparecerían en el lado de primario serían el 11º y el 13º. Esta solución se usa mucho en rectificadores de alta potencia, donde se aumenta el número de rectificadores y devanados secundarios, con su adecuado desfase relativo, llegándose a montajes de hasta 72 fases, como los utilizados en aplicaciones de electrólisis.

Figura 50. Reducción de 5ª y 7ª armónica con transformador en Δ -Y



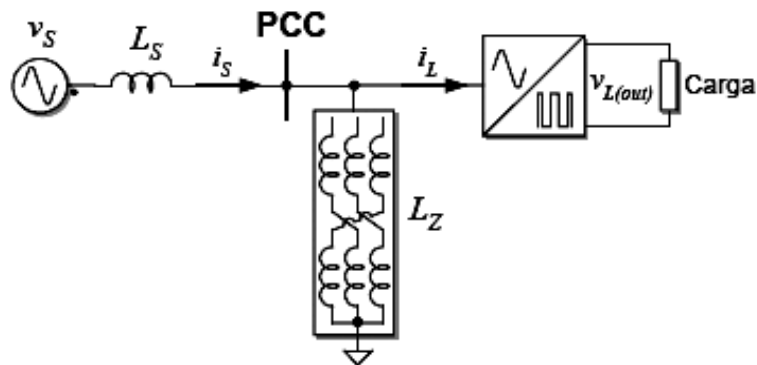
Dentro de esta categoría, otra solución interesante consiste en la utilización de un transformador con el primario en estrella (sin neutro) y el secundario en zig-zag. Si las cargas alimentadas mediante este transformador son idénticas, los amperio-vueltas de orden $3h$ se ven compensados en el secundario del mismo, no circulando dichas corrientes por el primario. Este montaje da la ventaja de que la impedancia ofrecida por el transformador a estos armónicos es baja, ya que sólo depende de la impedancia de los devanados secundarios. Lógicamente, si las corrientes consumidas por las fases de la carga con índice $3h$ no son idénticas, su compensación no será perfecta.

Reactancia zigzag en paralelo con la carga trifásica

La reactancia en zig-zag presenta una impedancia muy baja ante componentes con la misma polaridad, coincidente con la inductancia de dispersión de las bobinas, y una impedancia elevada ante componentes de secuencia positiva y negativa. Por tanto, la conexión de esta reactancia en paralelo con la carga ofrece un camino de baja impedancia a las corrientes homopolares solicitadas por ésta, con lo que la corriente de neutro hacia arriba de su punto de conexión se verá fuertemente atenuada (figura 51).

Lógicamente, la efectividad de esta solución depende de la impedancia que presente la red en el *PCC*.

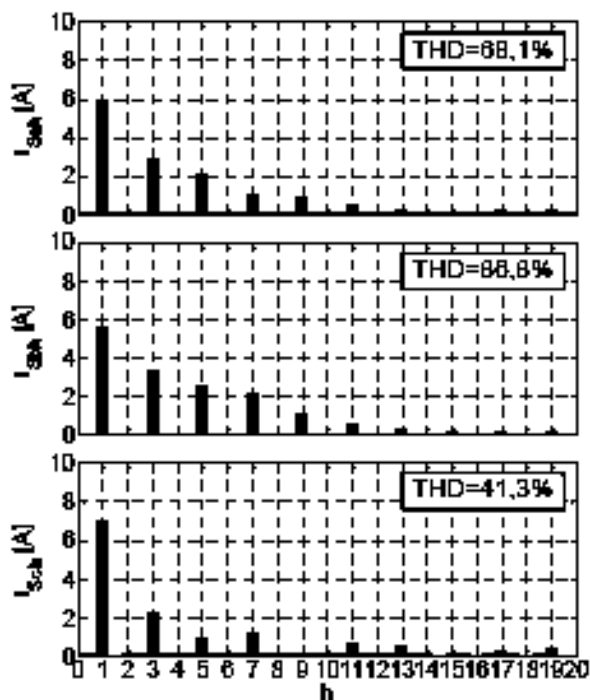
Figura 51. Inserción de una reactancia zigzag en paralelo con la carga



En el supuesto de que las corrientes solicitadas por la carga sean equilibradas, la reactancia en zig-zag cancelará la circulación de armónicos con índice $3h$ en el lado de fuente.

En los espectros armónicos de la figura 52 se aprecia como la componente de frecuencia fundamental de la corriente en ciertas fases ha aumentado respecto a la situación original.

Figura 52. Espectro armónico con la inserción de una reactancia en zig-zag



Esto se debe a que el conjunto de cargas de la figura 51 absorbían cierta cantidad de corriente de secuencia homopolar y frecuencia fundamental. El hecho de “cortocircuitar” dichas corrientes homopolares mediante la reactancia en zig-zag da lugar a que la magnitud de la corriente de frecuencia fundamental que circula por el lado de fuente aumente en determinadas fases del sistema.

Adaptar la instalación

Esta solución realmente no modifica la corriente solicitada por las cargas, aunque sí permite que el sistema soporte la circulación de los armónicos de corriente. Dentro de esta categoría de soluciones se pueden adoptar medidas tales como: la utilización de conductores con neutros separados para cada fase, el sobredimensionamiento del conductor de neutro, el cambio de tomas en los transformadores, o el correcto dimensionamiento de dichos transformadores en función del contenido armónico de la corriente (descalificación del transformador).

5.4 Filtros Armónicos

El efecto de las corrientes armónicas en la red de alimentación superpuesta se puede reducir a niveles insignificantes conectando circuitos de filtrado directamente a la parte de baja tensión.

Los circuitos en resonancia deben estar sintonizados de tal forma que presenten una impedancia para las corrientes armónicas individuales que se aproxime a cero y que sea muy reducida en comparación con la impedancia del sistema de suministro de energía.

Las corrientes armónicas de los convertidores son absorbidas de esta forma en gran medida por los circuitos de filtrado, solamente un pequeño remanente entra en el sistema superpuesto de forma que el voltaje se distorsiona en menor grado y las interferencias con otras cargas se evitan en gran medida.

Puesto que los circuitos de filtrado representan una carga capacitiva para la frecuencia básica del sistema, además de las corrientes armónicas también aparece una corriente capacitiva a la frecuencia de la corriente básica, como resultado contribuyen a compensar la potencia reactiva de los convertidores y de otras cargas del sistema.

Filtros Activos

El principio de los filtros activos consiste en una fuente controlada de corriente cuyas armónicas tienen la misma magnitud y desfasadas 180° de las armónicas a eliminar. El principio de funcionamiento de estos filtros se muestra en la figura 53.

Figura 53. Filtro activo Shunt

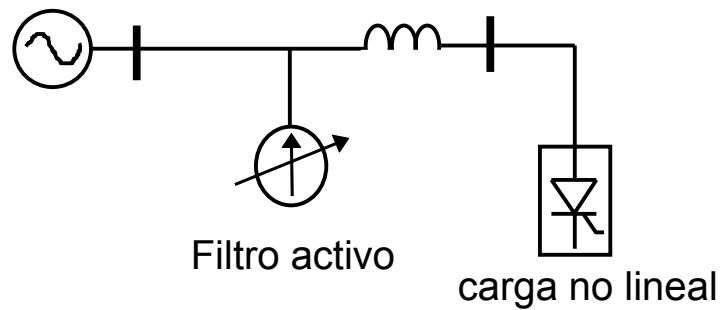
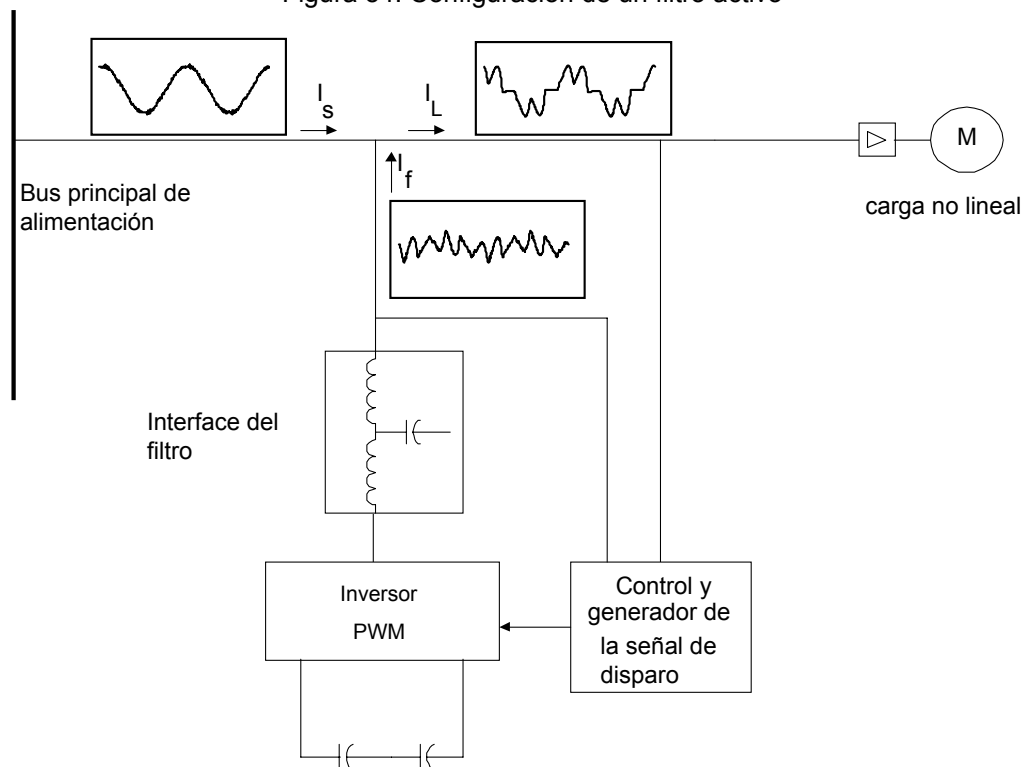


Figura 54. Configuración de un filtro activo

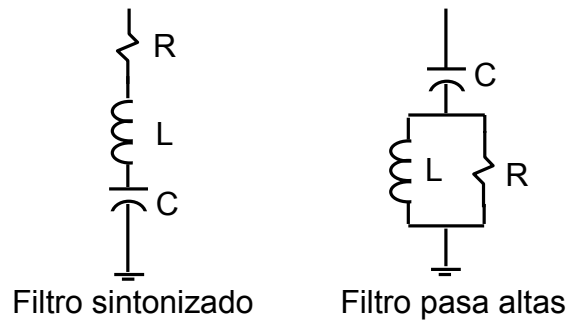


Filtros Pasivos

El filtro pasivo es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado.

Estos filtros son los más utilizados en los sistemas eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia. La figura 55 muestra la configuración de estos filtros.

Figura 55. Filtros pasivos shunt



La acción principal del filtro es presentar una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente. De esta manera a partir de un valor del banco de capacitores se obtiene el valor del reactor del filtro:

$$X_{cap} = \frac{KV^2}{MV ar_{CAP}}$$

$$X_{reac} = \frac{X_{cap}}{h^2}$$

donde h es la armónica a la cual está sintonizado el filtro, y por tanto a la corriente que se quiere drenar.

El filtro sintonizado es utilizado para eliminar en forma individual las armónicas más bajas como la 3^a, 5^a y 7^a. En cambio el filtro pasa altas es

utilizado para eliminar un rango de armónicas las cuales tienen un valor pequeño de corriente, por lo general son usados para eliminar de la armónicas 11^a en adelante.

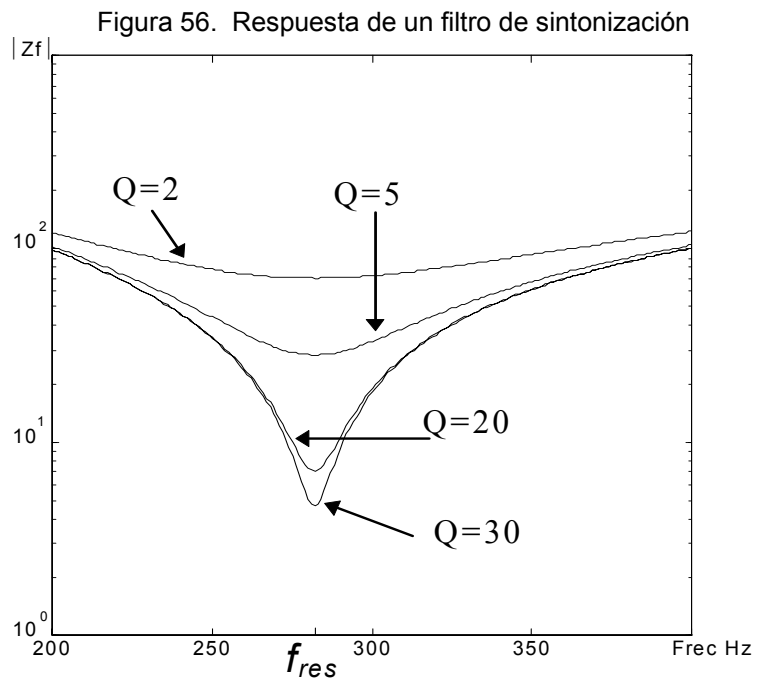
Filtro sintonizado

El cálculo de la resistencia del filtro esta dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{X_{\text{reac}}(f_{\text{res}})}{Q}$$

Q Factor de calidad $20 < Q < 30$

La figura 56 muestra la respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad.

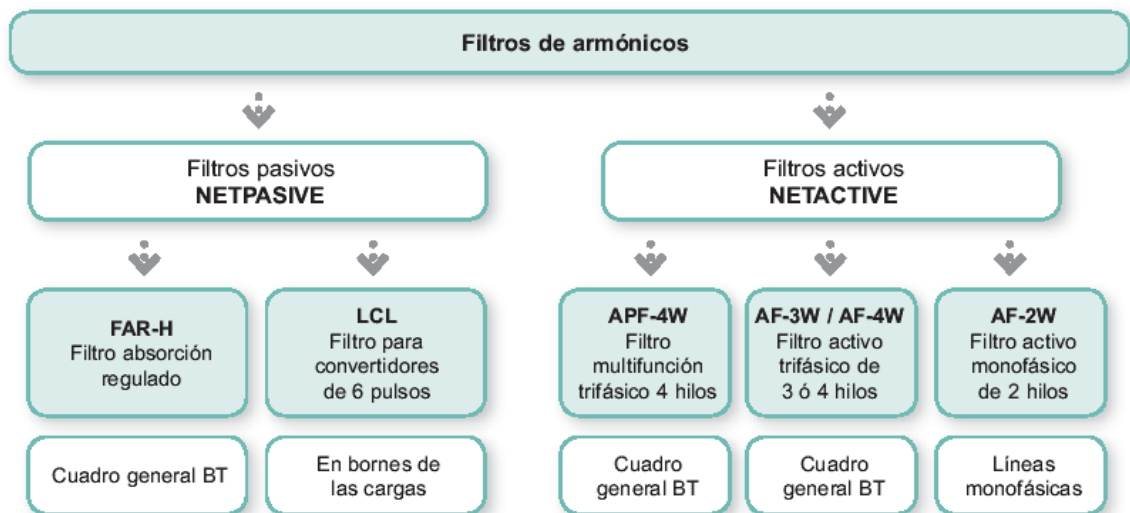


6. APLICACIÓN EN GUATEMALA

La Empresa CONELEC, fundada en 1977, tiene una trayectoria exitosa en el mercado guatemalteco. Los mercados de atención son el industrial, en las áreas de control y automatización, monitoreo y control de la energía, calidad de energía, Protección industrial, etc.

En el ámbito de compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos, la empresa CONELEC utiliza equipo Circutor, dicho equipo ofrece, específicamente para el filtrado de armónicos, filtros pasivos (NETPASSIVE) y activos (NETACTIVE).

Figura 57. Clasificación de los Filtros de Armónicos CIRCUTOR



La instalación de una u otra serie de filtros va a depender de:

- Tipo de anomalía existente en la instalación;
- Configuración de la instalación a filtrar, es decir, grado de concentración de las cargas perturbadoras; y
- Lugar óptimo de montaje del equipo de filtrado.

Los filtros pasivos o de absorción tienen como misión la eliminación de armónicos en las instalaciones industriales donde el contenido de armónicos es elevado.

Estos filtros tienen como función eliminar las corrientes armónicas de diferentes rangos mediante su absorción. El principio de funcionamiento está basado en una serie de conjuntos de reactancias y condensadores, sintonizados a la frecuencia o frecuencias, de las corrientes armónicas existentes.

A la frecuencia de sintonía, la impedancia del filtro es muy baja, por lo que absorbe la corriente del armónico a eliminar.

Existen dos tipos de filtros de absorción diferenciados según su lugar de aplicación:

FAR-H

Filtro de absorción regulado cuyo objetivo principal es la absorción de corrientes armónicas. Su ubicación es en el cuadro general de baja tensión.

LCL

Filtro de absorción individual para convertidores de 6 pulsos, tales como convertidores de frecuencia para motores, SAI, soldaduras etc. Se instala en la entrada del convertidor.

En el siguiente ejemplo, se verá la aplicación de un Filtro para convertidores, serie LCL.

6.1 Filtros LCL

Se trata esencialmente de filtros pasivos a base de una combinación serie-paralelo de inductancias y condensadores, adaptados a filtrar la entrada de los convertidores electrónicos. Los filtros **LCL** son un paso más adelante de la simple reactancia de reducción de rizado y están diseñados para reducir el THD (I) a valores inferiores a un 10 %, de forma que permitan cumplir con las normas IEC 61000-3.4 y IEEE 519. A plena carga se consiguen reducciones de THD(I) por debajo del 5 %.

Funciones de un filtro LCL

La función principal de los LCL, es la de filtrar los armónicos de corriente de orden 5, 7 y de manera minoritaria 11 y 13, generados por los convertidores de 6 pulsos, reduciendo el THD (I) a valores inferiores al 10 %.

Además, otras ventajas que aporta el filtro son:

- Eliminación de microcortes debidos a la conmutación
- Disminución del consumo y aumento de la vida de los equipos
- Mejora la calidad de la energía
- Mejora del factor de potencia real (reactiva + armónicos)

Selección del Filtro LCL

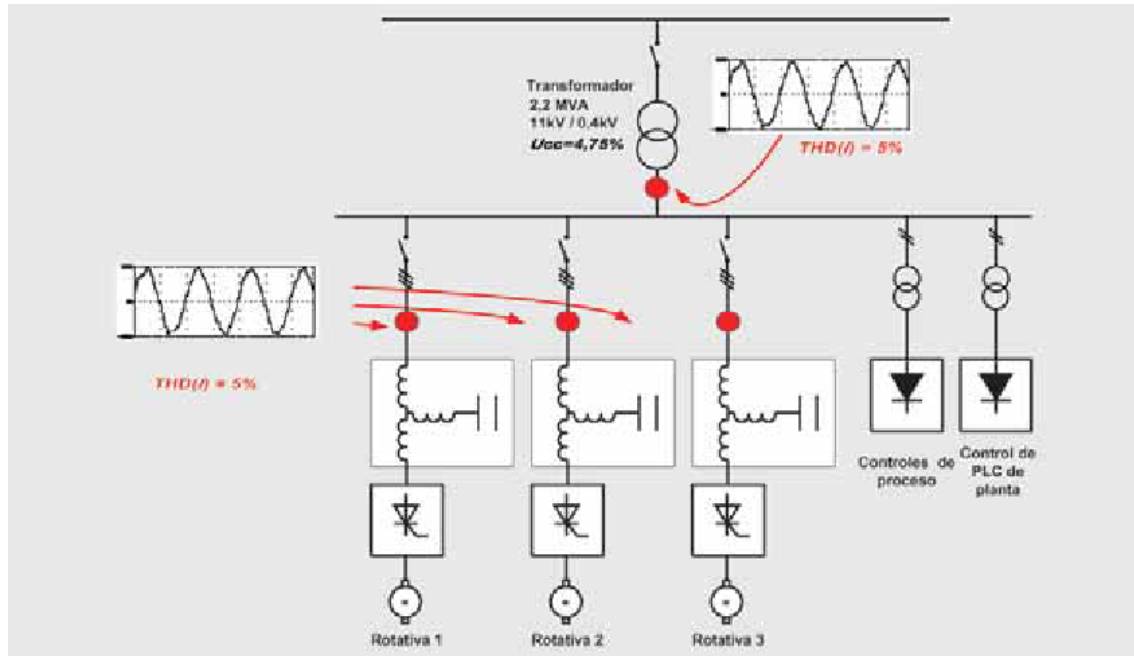
Los filtros LCL se seleccionan en función de la corriente consumida por el convertidor y de la frecuencia de la red. Para convertidores de muy baja potencia puede utilizarse un filtro LCL para la alimentación de varios convertidores, siempre y cuando funcionen a la vez.

Si se alimentan gran número de convertidores que pueden arrancar o parar por separado se pierde en gran parte la eficacia del filtro. En tal caso es mejor que cada convertidor tenga su propio filtro.

Conexión del Filtro LCL

El filtro debe ser conectado de forma individual, en serie con la carga a filtrar justo a la entrada de la carga generadora de armónicos.

Figura 58. Esquema de ubicación de los filtros LCL



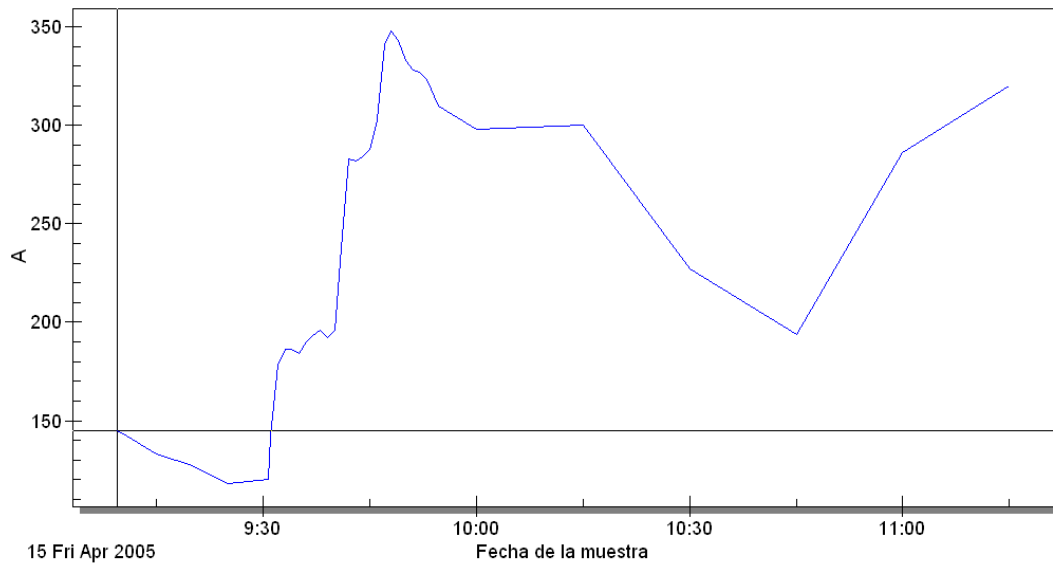
6.2 Ejemplo real

El siguiente ejemplo es el análisis hecho en el año 2005 para corregir un problema de armónicos en una máquina extrusora en una fábrica de plásticos, a continuación se presentan los gráficos de las mediciones hechas por el personal antes y después de colocar los filtros CIRCUTOR LCL.

Las gráficas del antes fueron tomadas en el lapso de las 9:09 am a las 11:15 am del 15/04/2005, mientras que las gráficas del después fueron tomadas después de colocar el filtro LCL de las 11:45 am a las 12:07 del mismo día.

CORRIENTE

EXTRU8.A5I (Corriente: III)

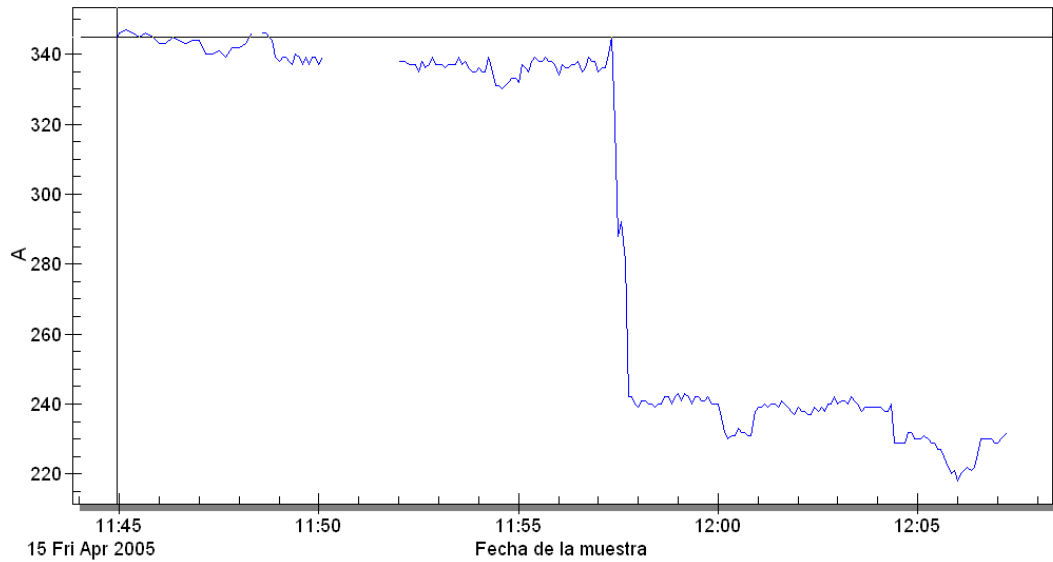


Act : 15/04/2005 09:09:23
Act : 145 (A)

Desde : 15/04/2005 09:09:23
Máx : 348 (A)

Hasta : 15/04/2005 11:15:00
Min : 118 (A)

Lcl_08.a5i (Corriente: III)

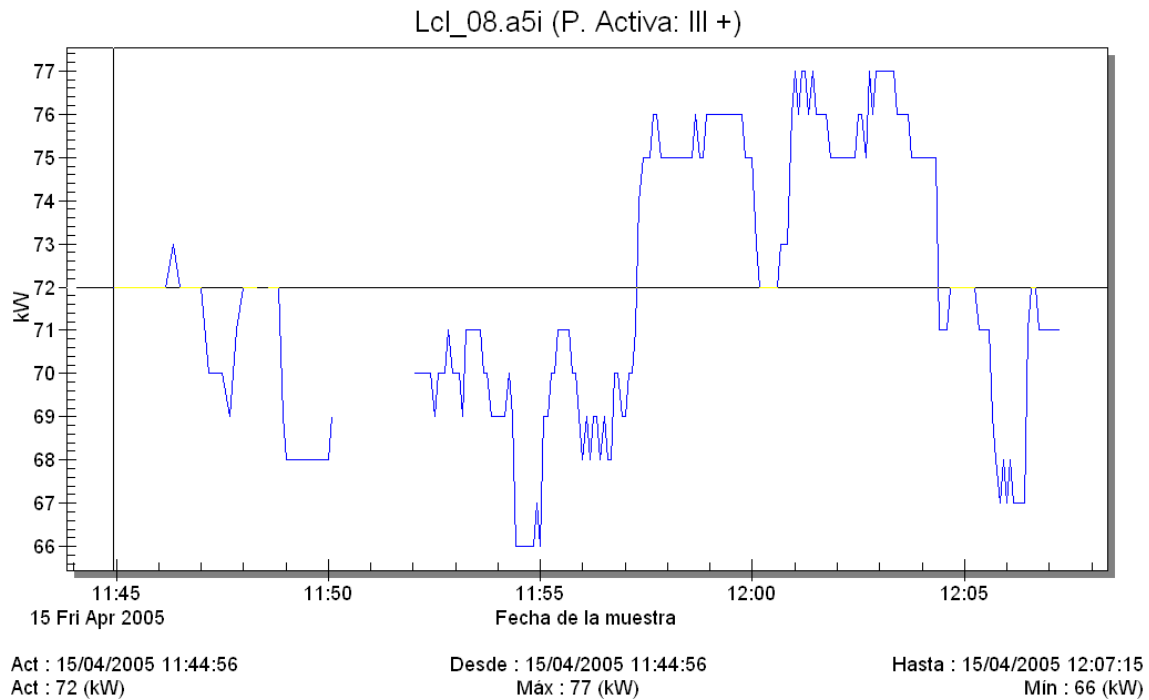
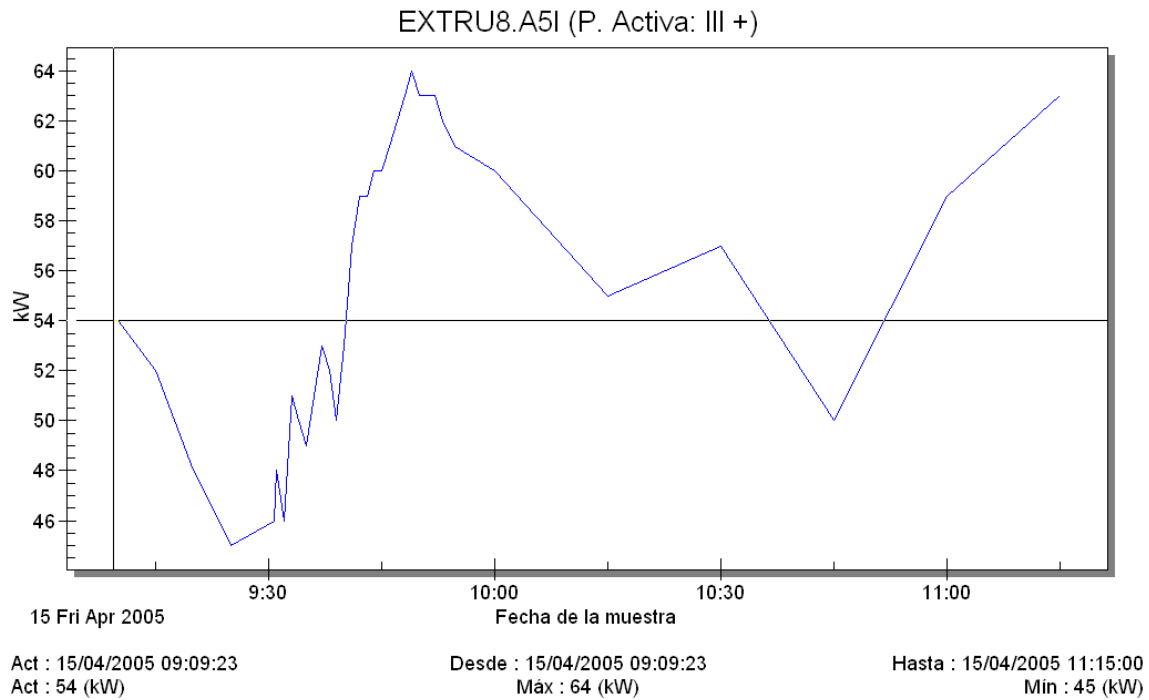


Act : 15/04/2005 11:44:56
Act : 345 (A)

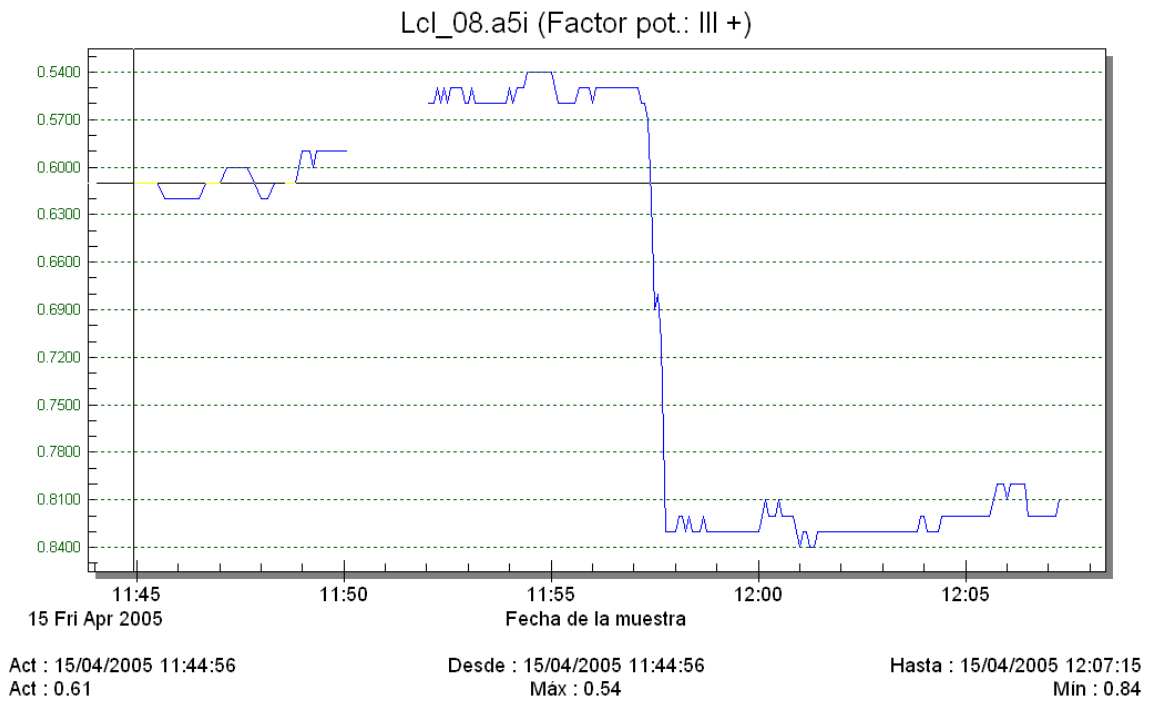
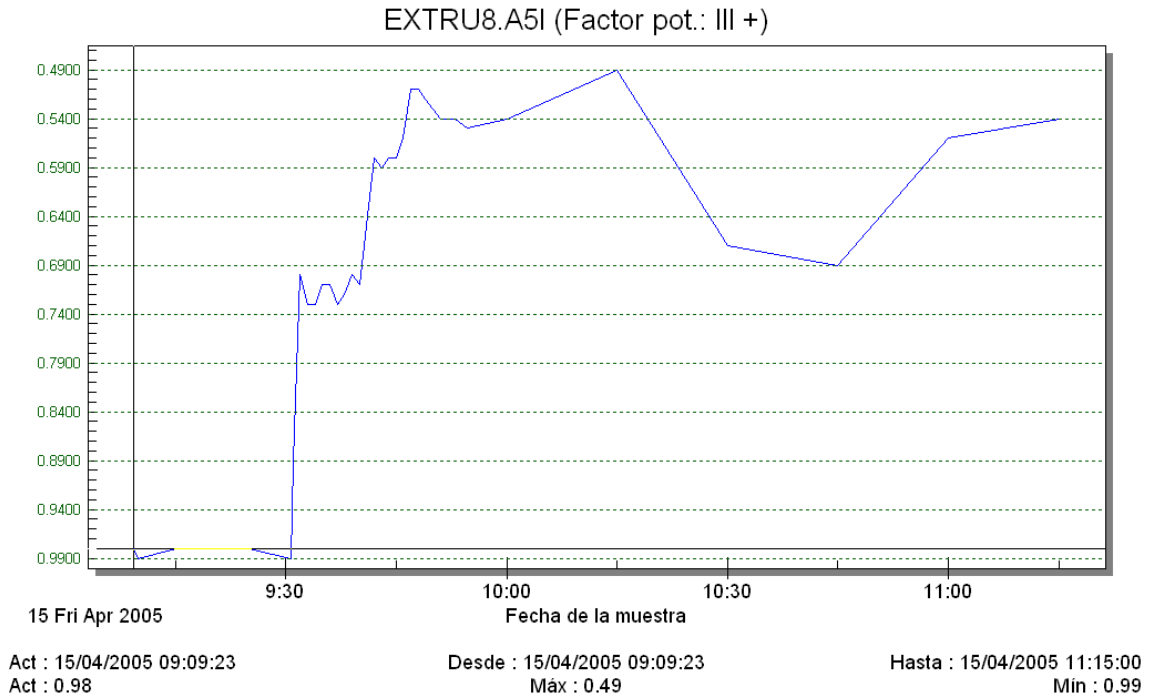
Desde : 15/04/2005 11:44:56
Máx : 347 (A)

Hasta : 15/04/2005 12:07:15
Min : 218 (A)

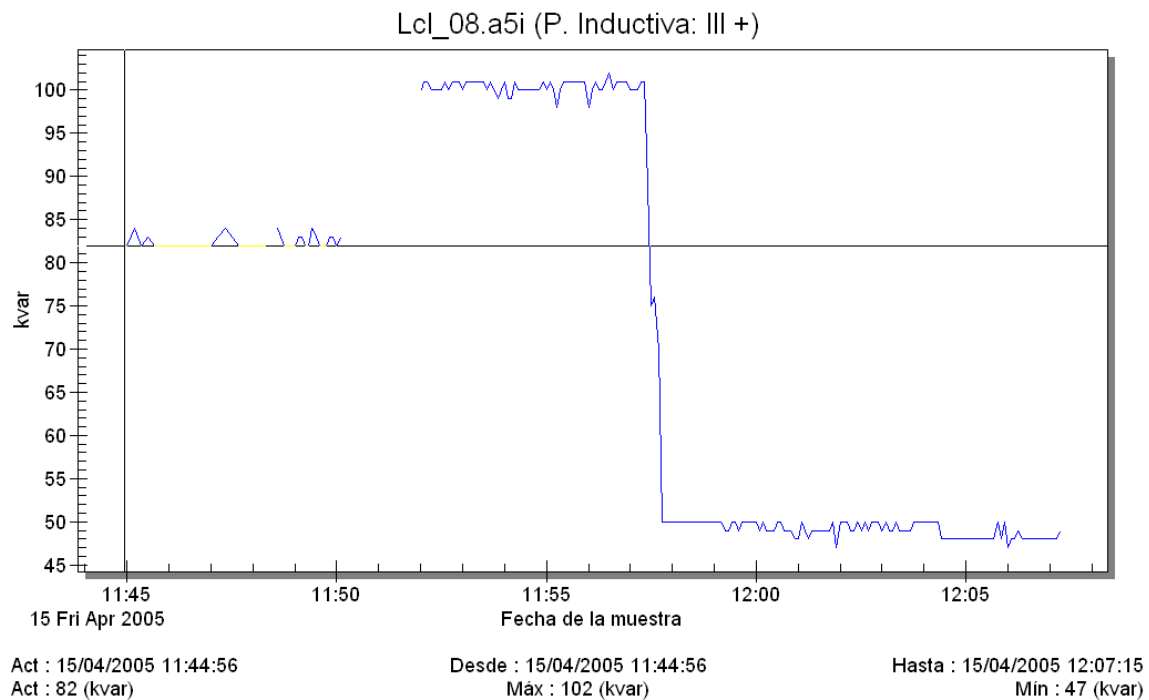
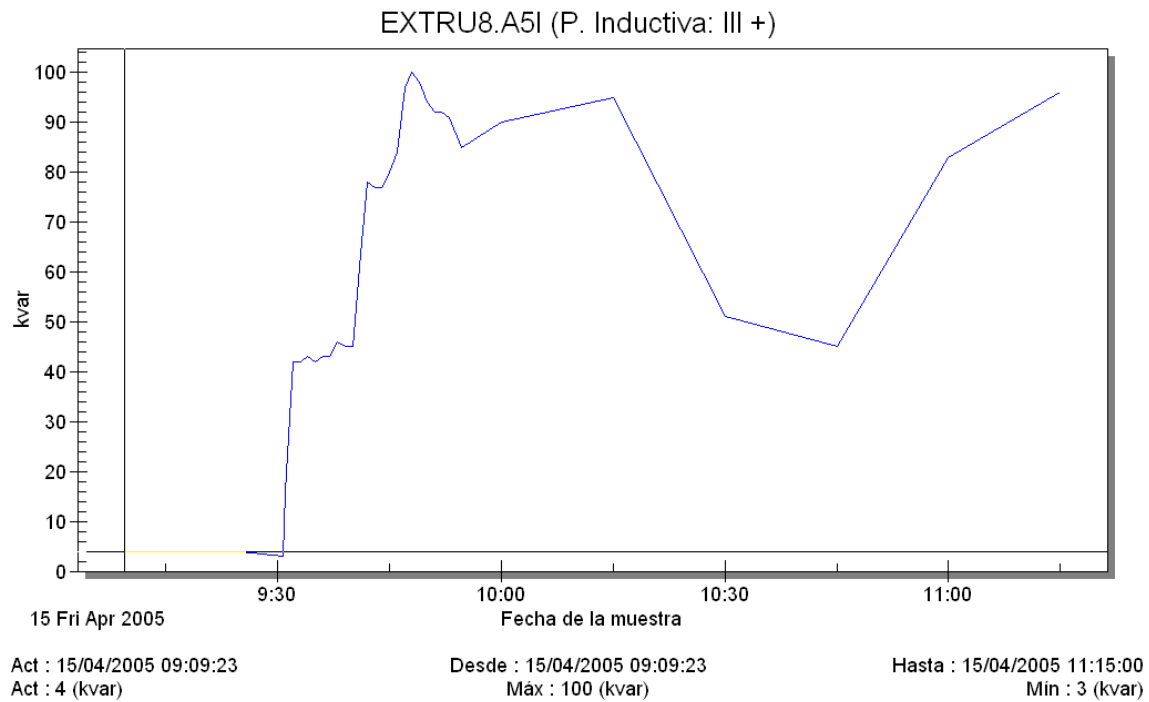
POTENCIA ACTIVA



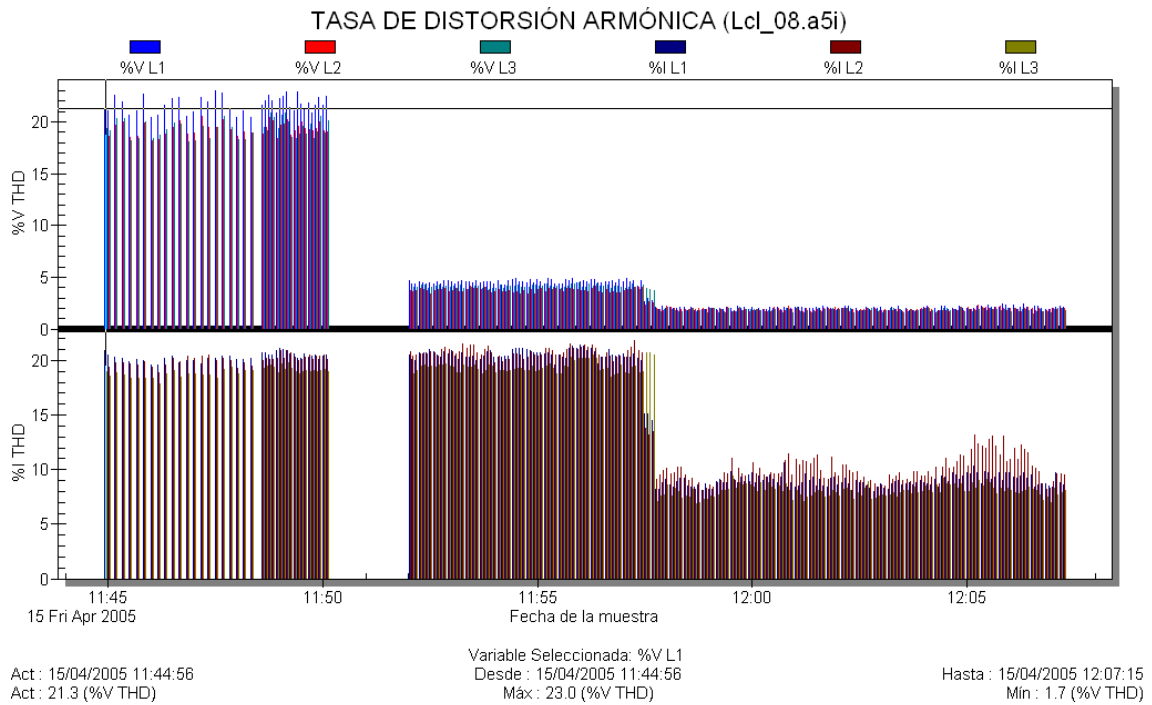
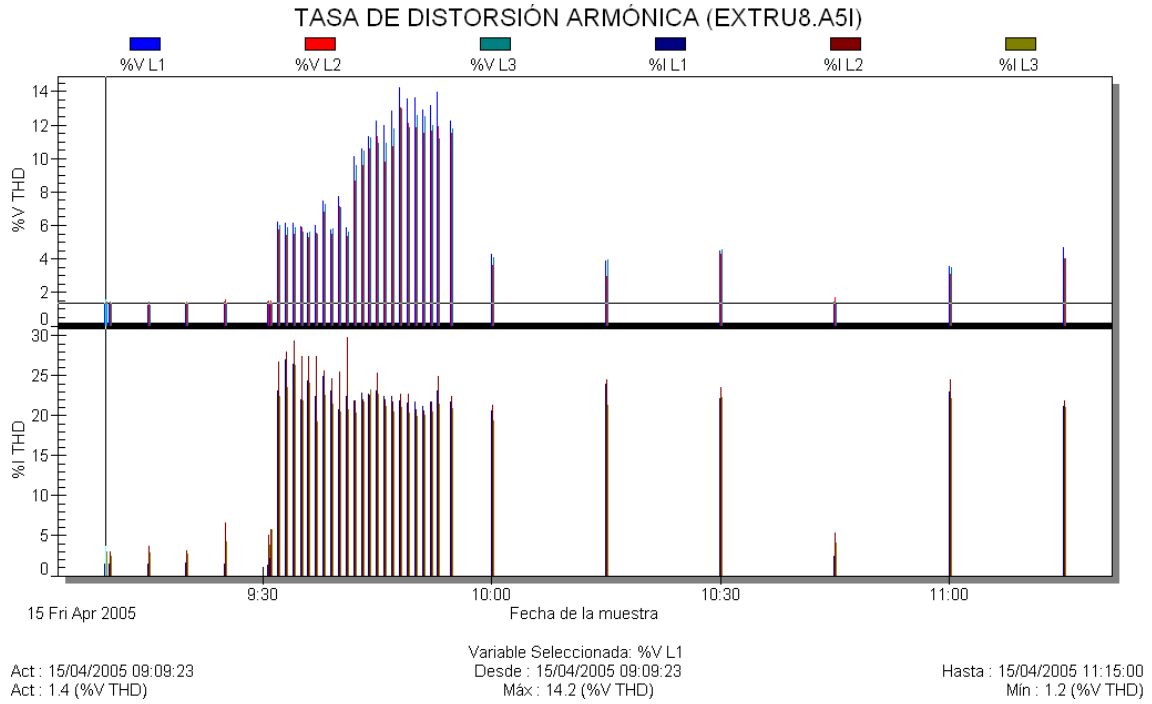
FACTOR DE POTENCIA



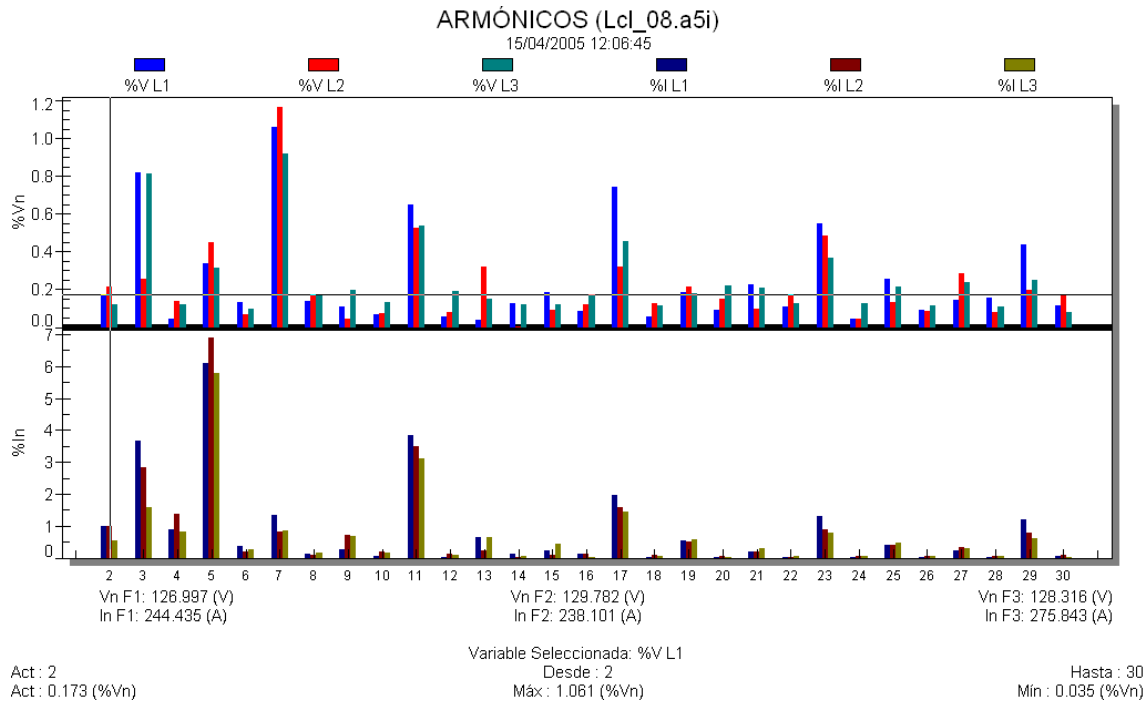
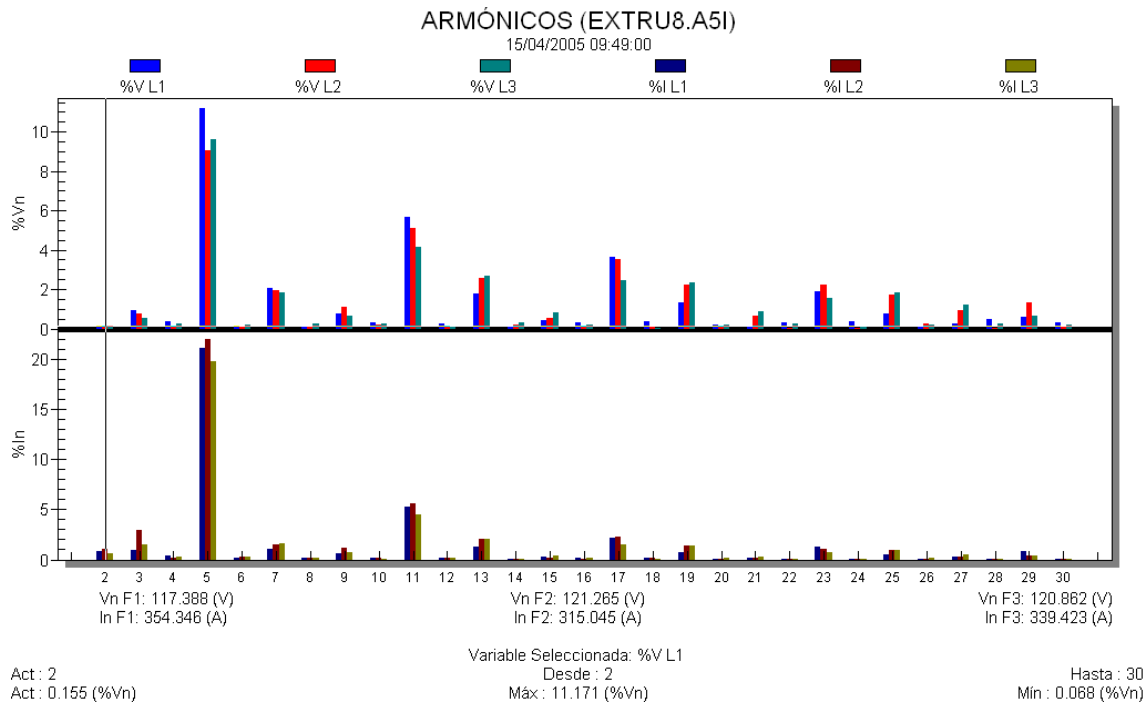
POTENCIA INDUCTIVA



TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA



ARMÓNICOS PRESENTES



FORMA DE ONDA DE LAS 3 FASES

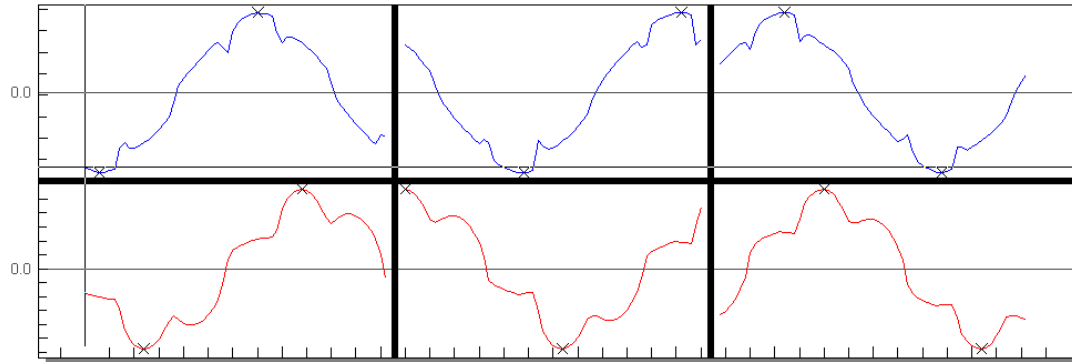
FORMA DE ONDA (EXTRU8.A5I)

15/04/2005 09:49:00

Vn F1: 117 (V)
THD: 13.5 %
Máx: 180 (V)
Min: -180 (V)

Vn F2: 121 (V)
THD: 12.1 %
Máx: 185 (V)
Min: -186 (V)

Vn F3: 121 (V)
THD: 11.9 %
Máx: 187 (V)
Min: -187 (V)



In F1: 354 (A)
THD: 21.6 %
Máx: 569 (A)
Min: -578 (A)

In F2: 315 (A)
THD: 22.7 %
Máx: 524 (A)
Min: -526 (A)

In F3: 339 (A)
THD: 20.3 %
Máx: 548 (A)
Min: -555 (A)

Act : -167 (V)

Máx : 180 (V)

Min : -180 (V)

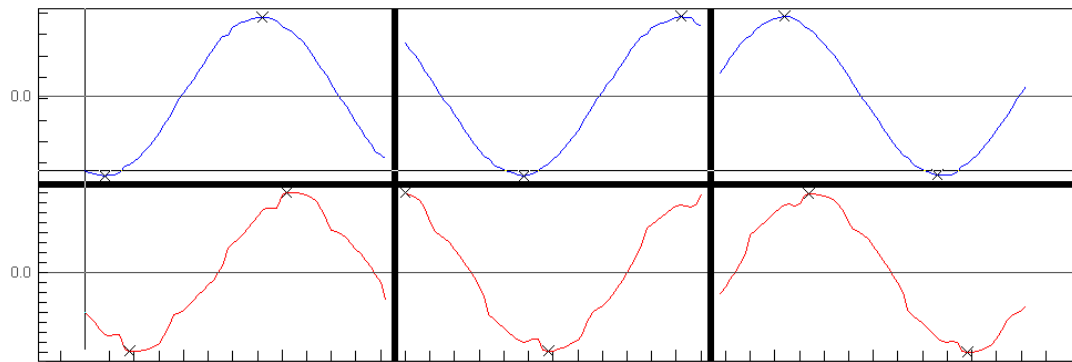
FORMA DE ONDA (Lcl_08.a5i)

15/04/2005 12:06:45

Vn F1: 127 (V)
THD: 1.9 %
Máx: 179 (V)
Min: -180 (V)

Vn F2: 130 (V)
THD: 1.7 %
Máx: 186 (V)
Min: -186 (V)

Vn F3: 128 (V)
THD: 1.7 %
Máx: 186 (V)
Min: -183 (V)



In F1: 244 (A)
THD: 8.7 %
Máx: 372 (A)
Min: -360 (A)

In F2: 238 (A)
THD: 8.7 %
Máx: 341 (A)
Min: -335 (A)

In F3: 276 (A)
THD: 7.2 %
Máx: 394 (A)
Min: -400 (A)

Act : -166 (V)

Máx : 179 (V)

Min : -180 (V)

En las graficas del “después” puede observarse el cambio en los valores medidos, uno de los mayores cambios observados fue el del factor de potencia, el cual oscilaba entre 0.49 y 0.69 y después de la implementación del filtro se mantuvo arriba del valor de 0.78.

La potencia activa también aumento de un valor máximo de 64kW a 77kW y los gráficos de los Armónicos presentes nos muestran que el valor máximo del Voltaje presente disminuyó de 11.17 (valor máximo antes) a un valor de 1.061 (valor máximo después).

CONCLUSIONES

1. Los sistemas eléctricos tienen por finalidad proporcionar un servicio que satisfaga las necesidades de los consumidores, a un costo que se adecue a su consumo.
2. No es posible evitar que los sistemas sufran problemas que provoquen interrupciones momentáneas o prolongadas u otros factores que disminuyan la calidad del servicio.
3. Los armónicos son corrientes o tensiones cuyas frecuencias siempre son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de alimentación.
4. Los armónicos son creados por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal.
5. Las armónicas generadas en los sistemas de potencia son producidas por las diferentes fuentes conectadas a la red: convertidores estáticos, maquinas rotativas, transformadores, equipos de arco, etc.
6. Las corrientes armónicas siempre fluirán por el camino de menor impedancia en las ramas del circuito, y ya que la fuente de potencia es normalmente el camino de menor impedancia, la mayoría de corrientes armónicas fluirán hacia ella.
7. Las corrientes armónicas pueden ocasionar un excesivo calentamiento en las maquinas rotativas, ya que aumentan las pérdidas por efecto *Joule*.

8. Los dispositivos tales como voltímetros y relés de sobre-corriente, solo detectan la corriente fundamental y, debido a las fases desbalanceadas producto de la distorsión armónica, pueden producir una operación errónea en dichos dispositivos.
9. El efecto de los componentes armónicos sobre los bancos de capacitores causa un incremento en las pérdidas eléctricas y produce calentamiento en los mismos.
10. En los transformadores, la influencia de los terceros armónicos puede provocar: sobrecalentamiento en los devanados del transformador y carga y esfuerzos en el aislamiento.
11. En las líneas de transmisión, los armónicos incrementan las pérdidas: pérdida del conductor, pérdida por radiación, pérdida por el calentamiento del dieléctrico, pérdida por acoplamiento, y descarga luminosa (corona).
12. Las protecciones pueden dar disparos falsos ante la presencia de armónicas y pueden provocar un retardo en la actuación de las mismas, mientras que los medidores pueden dar errores en las lecturas, ya que muchos de estos equipos están diseñados para trabajar con ondas de tensión y corriente prácticamente senoidales.

RECOMENDACIONES

1. Limitar los efectos de las perturbaciones dentro de niveles aceptables, de forma que garantice a los usuarios el suministro de energía de calidad satisfactoria a sus necesidades.
2. Establecer criterios y procedimientos que puedan ser aplicados al momento de planificar una instalación o al estar en funcionamiento la misma, para prever los efectos de conectar ciertas cargas al sistema.
3. Dividir responsabilidades del problema de armónicos entre los consumidores y la empresa de suministro de energía, ya que ella establece límites de distorsión de tensión en el punto de unión, que son responsabilidad de la concesionaria y límites de distorsión de corriente en el punto de unión, que son responsabilidad del consumidor.
4. Monitorear la calidad de energía en las primeras etapas de planeación de una planta, sistema en general o de la instalación de cargas sensibles, para obtener información sobre si existen o no problemas de calidad de energía.
5. Sintonizar los circuitos en resonancia de tal forma que presenten una impedancia para las corrientes armónicas individuales que se aproxime a cero y que sea muy reducida en comparación con la impedancia del sistema de suministro de energía.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chapman, Stephen J. "Máquinas Eléctricas", Editorial McGraw-Hill, México 1990.
2. Stevenson, William D. "Análisis de sistemas eléctricos de potencia", Segunda Edición, McGraw-Hill, 1979.
3. Kosow, Irving L. "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Segunda Edición, 1993.
4. Fitzgerald, A.E. "Máquinas Eléctricas", McGraw-Hill, New York, 1961.
5. www.schneider-electric.com.ar. Cuaderno Técnico Schneider No. 152, "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento". Biblioteca Técnica Schneider, Argentina, Versión Argentina, 2003.
6. www.schneider-electric.com.ar. Cuaderno Técnico Schneider No. 182, "Los interruptores de BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas". Biblioteca Técnica Schneider, Argentina Versión Argentina, 2003.
7. www.schneider-electric.com.ar. Cuaderno Técnico Schneider No. 183, "Armónicos, rectificadores y compensadores activos". Biblioteca Técnica Schneider, Argentina, Versión Argentina, 2003.
8. "Memoria de Labores Mayo 2003- Abril 2004", Comisión Nacional de Energía Eléctrica, www.cnee.gob.gt.
9. "Memoria de Labores 97-2002", Comisión Nacional de Energía Eléctrica, www.cnee.gob.gt

10. Publicaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile, www.elo.utsfm.cl. (2003)
11. Publicaciones del Instituto Técnico de Morelia, www.elec.itmorelia.edu.mx , Programa de Graduandos en Ingeniería Eléctrica. (2002)
12. www.circutor.es. Cuaderno Técnico R5/6/7. "Baterías de rechazo y filtros de armónicos, Circutor España (2007)
13. www.circutor.es. Cuaderno Técnico R3/4. "Baterías automáticas, BT", Circutor España (2007)
14. www.leyden.com.ar/esp/pdf/filtros_de_armonicas.pdf (2003)
15. <http://franjagol.tripod.cl/corrientesarmonicas/> (2004)
16. http://faraday.fie.umich.mx/titulacion/ARMoNiCAS_causas.pdf (2001)
17. www.conelecsagt.com (2008)