

# Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos

## Theory and design of harmonic filters for electrical systems

Juan Manuel Gers

### RESUMEN

En este artículo se presenta un método para diseñar filtros sintonizados en sistemas eléctricos. En él se incluye el procedimiento de medición y análisis de parámetros eléctricos. El diseño del filtro parte de requerimientos de reactivos para el dimensionamiento inicial del capacitor. Con un primer valor de éste se seleccionan la inductancia y la resistencia de acuerdo al Q apropiado para el sistema. Utilizando el flujo de armónicos se calculan los niveles de corriente por los elementos y se verifica que no excedan los nominales. En caso de ser ellos excedidos se modifican los parámetros y se hacen nuevas corridas hasta que se obtengan valores satisfactorios. El procedimiento es ilustrado en una planta industrial aunque puede ser usado igualmente en sistemas de distribución asociados a empresas de energía.

### ABSTRACT

This article presents a method to design tuned filters in electrical systems. The article includes a procedure for the measurement and analysis of electrical parameters. The filter design starts from the reactive requirements for the sizing of the capacitor. With a first value of this, the inductance and reactance are selected according to the appropriate Q for the system. The values of currents through the different elements are calculated with a harmonic flow to verify that they do not exceed the nominal values. If they are exceeded, the parameters are modified and new runs are carried out until good values are attained. The overall procedure is illustrated with an industrial plant although it can be also used with distribution systems associated to utilities.

### PALABRAS CLAVES

Armónicos, filtros, distorsión de voltaje, distorsión de corriente.

### KEY WORDS

Harmonics, filters, voltage distortion, current distortion.

### INTRODUCCIÓN

La distorsión en las formas de onda de los voltajes y corrientes en un Sistema de Potencia, es un problema cada vez mayor debido al incremento en cantidad y capacidad de dispositivos electrónicos no-lineales en los sistemas de potencia. La distorsión de una señal referente a una sinusoidal pura se expresa en términos de componentes armónicos o armónicos simplemente. En una señal eléctrica, un armónico es definido como el contenido de la señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia original del sistema.

Para determinar si hay una buena calidad en el servicio de energía, debe conocerse con certeza la magnitud y tipo de los armónicos presentes en la red y la fuente que los produce, con el fin de determinar la medida remedial más apropiada. Para el efecto debe seguirse un método de solución que garantice que las magnitudes de operación satisfagan las características de equipos estandarizados y que las sobretensiones por efecto de armónicos no filtrados sean tolerables. Además se verifica que los valores satisfagan los límites indicados en la norma IEEE-519. Un aspecto que finalmente se menciona es el relacionado con la especificación apropiada de los elementos de acuerdo con equipos de fabricación normalizada. Los siguientes párrafos presentan la fundamentación y el proceso respectivo.

## I. CONCEPTOS GENERALES

### I.1 Fuentes que generan armónicos

Los armónicos de voltaje y corriente son generados por cargas especiales, comúnmente denominadas cargas deformantes. Las principales cargas generadoras de armónicos en un sistema eléctrico de potencia son las siguientes:

- Hornos de arco voltaico
- Drives que alimentan motores de DC
- Drives que alimentan motores de AC
- Rectificadores AC/DC

En baja tensión aparecen otros productores de armónicos, aunque de menor importancia por cuanto sus efectos son más limitados; entre éstos se incluyen: soldadores eléctricos, dispositivos con transformadores de núcleo saturable, lámparas fluorescentes y en general alumbrado que requiera el empleo de balastos, fuentes AC/DC con tiristores de uso frecuente en instalaciones de computadores, etc.

### I.2 Efectos de los armónicos

Como consecuencia de la inyección de corrientes armónicas en un sistema eléctrico, pueden ser citados entre otros, los siguientes efectos indeseables:

- Calentamiento en cables, transformadores y máquinas rotativas.
- Mal funcionamiento de los equipos electrónicos de control, de protección, de medida, de telecomunicaciones, etc.
- Errores en los medidores tipo inducción.
- Aparición de sobretensiones armónicas, lo que puede ocasionar fallas, especialmente en bancos de condensadores.

Es evidente la necesidad de limitar los armónicos producidos e inyectados por los usuarios en el sistema eléctrico para que los problemas antes mencionados sean eliminados o reducidos a niveles aceptables por normas reconocidas.

### I.3 Resonancias

La presencia de capacitores y reactores para compensación del factor de potencia puede originar resonancias, las cuales, a su vez, producen corrientes o voltajes excesivos que afectan los equipos del sistema.

### I.3.1 Resonancia paralelo

Una resonancia paralelo resulta en una impedancia muy alta presentada por el sistema a la corriente armónica correspondiente a la frecuencia de resonancia. Puesto que la mayoría de cargas generadoras de armónicos pueden ser consideradas como fuentes de corriente, el fenómeno resulta en elevados voltajes y corrientes armónicas en las ramas de la impedancia paralelo.

Una resonancia puede ocurrir donde exista un capacitor conectado al mismo barraje de una fuente de armónicos. Considerando la Figura 1, la impedancia equivalente del Barraje A a tierra es:

$$Z_{eq} = \frac{X_{th} X_c}{X_{th} + X_c}$$

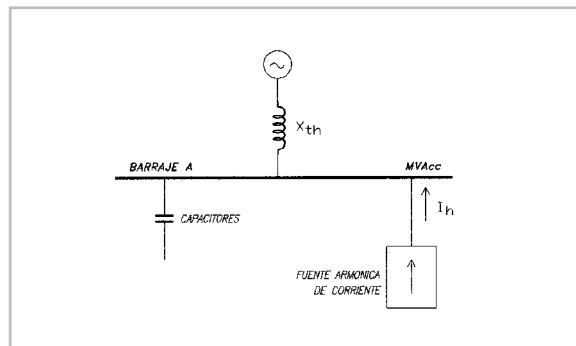


Figura 1. Resonancia paralelo en el barraje "A"

La condición de resonancia paralelo ocurre cuando el denominador de la expresión anterior se reduce a cero:

$$X_{th} + X_c = 0$$

$$X_{th} = -X_c$$

Las reactancias a la frecuencia angular de resonancia ( $\omega_n$ ) se expresan así:

$$X_{th} = \omega_n L \quad y \quad X_c = \frac{1}{\omega_n C}$$

Además con base en la impedancia a la frecuencia angular fundamental ( $\omega$ ):

$$\omega L = \frac{V^2}{MVA_{cc}}$$

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{MVA_{cap}}$$

Despejando valores para L y C y reemplazando en la condición de resonancia se obtiene:

$$W_n \frac{V^2}{W MVA_{cc}} = \frac{W V^2}{W_n MVA_{cap}}$$

Resolviendo para la frecuencia de resonancia paralelo fp (Wn = 2πfp), se obtiene:

$$f_p = f \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVA_{cap}}}$$

donde:

- f<sub>p</sub>: Frecuencia de resonancias paralelo (Hz)  
 f: Frecuencia fundamental (Hz)  
 MVA<sub>cc</sub>: Capacidad de cortocircuito del barraje  
 MVA<sub>cap</sub>: Capacidad de los capacitores del barraje a la frecuencia fundamental.

### 1.3.2 Resonancia serie

Bajo condiciones de resonancia serie, el sistema ofrece una impedancia muy baja a voltajes armónicos de frecuencia igual a la de resonancia. Por lo tanto, pequeños voltajes armónicos en el sistema pueden originar elevadas corrientes armónicas en los equipos.

Como se explicará mas adelante, los filtros de armónicos tienen por función introducir una resonancia serie en un barraje dado del sistema. De esta forma, corrientes armónicas inyectadas por cargas deformantes, pueden ser fácilmente drenadas a tierra.

## 2. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA

La teoría de Fourier establece que cualquier función continua y periódica puede ser representada por la suma de una componente sinusoidal fundamental más una serie de armónicos sinusoidales de orden superior con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

Una señal cualquiera periódica puede expandirse en series de Fourier siempre que cumpla con las condiciones de Dirichlet:

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

En estas condiciones, una función f(θ) con período 2π se representa en serie Fourier de la siguiente forma:

$$f(\theta) = \frac{A_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n * \cos n\theta + B_n * \sin n\theta)$$

donde:

$$A_o = \frac{1}{\pi} * \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) * d\theta$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} * \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) * \cos \theta * d\theta$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} * \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) * \sin n\theta * d\theta$$

En el caso de una función de tiempo, f(t), con período T, se obtiene:

$$\theta = \frac{2\pi}{T} * t = \omega t$$

donde:

$\omega = 2 * \pi / T$  = frecuencia angular.

Considerando la serie de Fourier en función del tiempo, ella adopta la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{A_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n * \cos n \omega t + B_n * \sin n \omega t)$$

donde:

$$A_n = \frac{2}{T} * \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \cos n \omega t * dt$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$B_n = \frac{2}{T} * \int_{-T/2}^{T/2} f(t) * \sin n \omega t * dt$$

Esta ecuación puede ser escrita de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{A_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n * \cos (n \omega t - \alpha)$$

donde:

$$C_n = \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)}$$

$$\alpha = \arctg (B_n / A_n)$$

“Cn” representa la magnitud y “α” la fase del armónico n-ésimo de la función f(t).

Una vez efectuada la descomposición armónica de una señal, se obtiene la magnitud y el ángulo de fase de cada

uno de los armónicos que aparecen en la misma. Con base en esta información se define el THD así:

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{C_2^2 + C_3^2 + \dots + C_n^2}}{C_1} \times 100$$

donde:

$C_1$ : Magnitud de la componente de frecuencia fundamental.

$C_i$ : Magnitud de la componente armónica i-ésima.

Una vez determinado el THD para una señal de voltaje o corriente, se debe comparar su valor con los límites establecidos por la norma correspondiente. Esto con el fin de determinar si la distorsión se considera excesiva.

### 3. INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Los instrumentos para medición de armónicos han evolucionado considerablemente en los años recientes. Los diseños más modernos consisten en analizadores digitales que registran componentes armónicos con frecuencias hasta de 50 veces la frecuencia fundamental (3000 Hz). Presentan siete (7) canales de entrada: tres para voltajes de línea, tres para corrientes de línea y un canal de voltaje para propósito general.

Los registros son entregados normalmente como tablas de datos y formas de onda, los cuales incluyen la siguiente información:

- Tabla resumen con parámetros de los seis canales (tres voltajes y tres corrientes) registrados. Los parámetros son: valor RMS, THD, TIF, It y desbalance NEMA.
- Tabla con distribución espectral en magnitudes por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.
- Tabla con distribución espectral en ángulo de fase por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.
- Formas de onda para cada uno de los seis canales.
- Espectro de frecuencia para cada uno de los seis canales.

Típicamente los rangos de operación para los canales de voltaje y corriente son 0-750 VAC y 5-15 A, respectivamente.

Para efectuar mediciones en puntos de alto voltaje, 1 kV o mayores, se requiere de la utilización de transformadores de potencial y de corriente. En tales situaciones debe

prestarse atención al hecho que los transformadores de potencial pueden variar su relación de transformación a frecuencias superiores a la fundamental. Esta variación puede introducir errores en la medición.

Los transformadores de potencial inductivos tienen una respuesta de frecuencia casi plana hasta frecuencias entre 700 y 1000 Hz, mientras que los TP tipo capacitivo tienen una respuesta de frecuencia completamente irregular para frecuencias superiores a 60 Hz, razón por la cual estos transformadores pueden ampliar o atenuar los armónicos de la onda bajo medición.

Teniendo en cuenta la respuesta de frecuencia del transformador de potencial tipo inductivo es posible realizar mediciones confiables de armónicos hasta el 15%, sin que haya atenuación o amplificación de las componentes armónicas. Esto no resulta una limitación dado que los armónicos predominantes en sistemas de potencia son del orden de 11° o menores. Para otros efectos como interferencia telefónica, en donde se requiere medir radiofrecuencias, no es adecuado un TP con una respuesta de frecuencia tan estrecha.

Los transformadores de corriente presentan una respuesta de frecuencia prácticamente plana hasta aproximadamente 5 KHz. Por esto la situación no es de cuidado al usar los TC.

En cada punto de medición se registraron los voltajes de fase,  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$  y las corrientes de línea  $I_a$  e  $I_b$ . La corriente  $I_c$  no estaba disponible, por la cual el canal para la corriente de neutro I-N, registró un valor tan alto.

Las señales de voltaje y corriente fueron obtenidas del bloque de prueba del punto de facturación del usuario a 34.5 kV. El bloque de prueba es alimentado por TP's y TC's con precisión de medida y proporcionan un método seguro para cortocircuitar los TC's y conectar las bobinas de corriente del registrador.

El equipo de registro se interconecta con un microcomputador lap-top IBM o compatible mediante una conexión serial RS232. Esto permite que el software de soporte ejecutado en el microcomputador, almacene en medio magnético la información registrada por el analizador y al mismo tiempo despliegue en pantalla las formas de onda de las señales analizadas.

Cada vez que se realiza un registro, los datos correspondientes son almacenados en un disco flexible bajo un ar-

chivo con nombre dado por el operario, pero con hora y fecha de registro asignados directamente por el software. Los archivos de los registros son posteriormente editados para la elaboración del informe.

#### 4. ANÁLISIS DE MEDIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS

Los efectos de los armónicos pueden eliminarse reduciendo la magnitud de las corrientes o voltajes armónicos que se producen en el sistema. La reducción puede hacerse mediante la instalación de filtros o mediante conexión de la carga a un nivel de tensión para lo cual el efecto de los armónicos será menos considerable.

La magnitud de armónicos admisible en un sistema se encuentra establecida por la norma IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems". Dicha norma establece los límites admisibles, tanto en voltaje como en corriente, para el intercambio de potencia entre la compañía de servicio público y un sistema industrial.

Según la norma, debe determinarse el THD en las señales de voltaje y corriente en el PUNTO DE CONEXIÓN DEL USUARIO A LA RED - (POINT OF COMMON COUPLING).

La norma indica los niveles máximos admisibles para el THD en corriente, de acuerdo con la tensión de la red, y de acuerdo con la relación  $I_{cc}/I_n$  para el usuario en cuestión. El valor  $I_{cc}$  representa el nivel de cortocircuito en el PCC, y el valor  $I_n$  representa la corriente nominal del usuario. De esta manera, se admite que usuarios más pequeños generen niveles de armónicos mas elevados, por cuanto su efecto en las redes de energía será más reducido.

##### 4.1 Selección y dimensionamiento del filtro

El objetivo de un filtro de armónicos es proporcionar una trayectoria a tierra de baja impedancia para los armónicos de voltaje o corriente, con el fin de facilitar su circulación a tierra y prevenir su propagación en el resto del sistema. En este sentido, los filtros deben ser ubicados lo más cerca posible del punto donde se generan los armónicos.

El tipo de filtro requerido depende del número de armónicos a eliminar del sistema.

En general, se tienen dos (2) tipos de filtros para armónicos:

- Filtros sintonizados
- Filtros amortiguados

Un filtro sintonizado es un circuito RLC como el indicado en la Figura 2, el cual presenta una impedancia mínima a la frecuencia de un armónico definido, tal como se indica en la Figura 3. La impedancia de este tipo de filtro está dada por la siguiente expresión:

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

la cual se reduce a R a la frecuencia de resonancia ( $f_n$ ) para lo cual

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

los parámetros R, L y C pueden obtenerse de las siguientes relaciones :

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$X_o = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

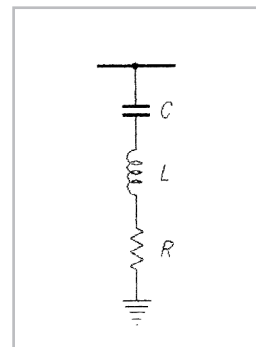


Figura 2 Filtro sintonizado.

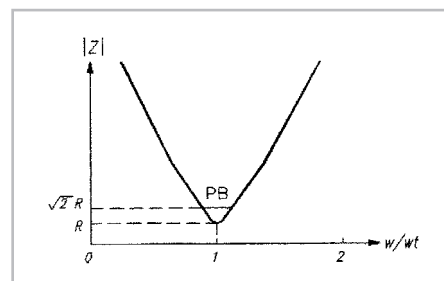


Figura 3 Característica de frecuencia del filtro sintonizado.

De otro lado se define Q como el factor de calidad del filtro, el cual determina el ancho de la banda de sintonía del mismo. Valores típicos para Q están en el rango de 30

a 60 de acuerdo con la referencia (4). Puede demostrarse que para filtros sintonizados:

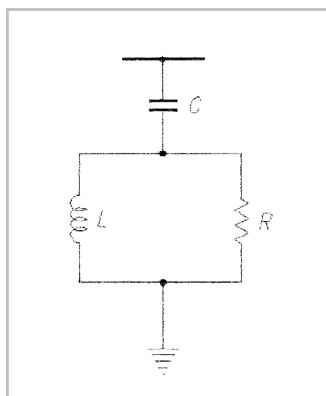
$$Q = \frac{X_o}{R}$$

Un filtro amortiguado es un circuito RLC como el indicado en la Figura 4, el cual presenta una característica de frecuencia como la indicada en la Figura 5. Se observa que la impedancia es mínima a frecuencias mayores a la de sintonía (filtro paso-alto). Los parámetros R, L y C para el filtro amortiguado están dados por las siguientes relaciones :

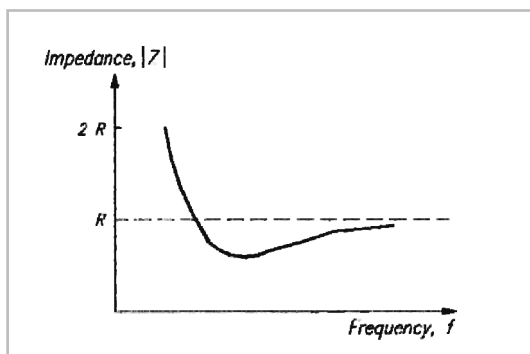
$$f_o = \frac{1}{2\pi CR}$$

$$m = \frac{L}{R^2 C}$$

donde m toma valores entre 0.5 y 2.



**Figura 4. Filtro amortiguado.**



**Figura 5. Característica de frecuencia del filtro amortiguado.**

Los filtros sintonizados son utilizados para la eliminación de armónicos individuales de bajo orden con magnitudes

considerables. En tal caso se utiliza un filtro compuesto por varias ramas RLC, cada una de ellas sintonizada a una de las frecuencias de los armónicos que se quieran eliminar.

Los filtros amortiguados paso-alto se utilizan normalmente para eliminar conjuntos de armónicos, generalmente mayores a 13, con magnitudes relativamente menores.

La determinación de las características nominales de las componentes de un filtro es un proceso iterativo, que parte de los requerimientos de reactivos para el dimensionamiento inicial del capacitor. Con un primer valor de éste se seleccionan la inductancia y la resistencia de acuerdo al Q apropiado para el sistema. Utilizando el flujo de armónicos se calculan los niveles de corriente por los elementos y se verifica que no excedan los nominales. En caso de ser ellos excedidos, se modifican los parámetros y se hacen nuevas corridas.

En el proceso se debe determinar el filtro mínimo que desempeñe la labor de eliminación de armónicos requerida, suministrando adicionalmente la potencia reactiva necesaria para compensar el factor de potencia en la carga deformante. Se requiere además que los componentes del filtro no queden sometidos a sobrecargas ni a sobrevoltajes durante su operación normal.

El tamaño de un filtro es definido por la potencia que los componentes del filtro disipan a la frecuencia fundamental (60 Hz). La potencia del capacitor utilizado normalmente se determina de los requerimientos de potencia reactiva de la carga deformante. Los demás elementos se seleccionan para proporcionar al filtro la respuesta de frecuencia deseada.

El criterio ideal de diseño es eliminar completamente la distorsión producida por la carga. Sin embargo, dicho criterio resulta técnica y económicamente impracticable debido a la magnitud y costos de los filtros finalmente requeridos.

Un criterio más práctico consiste en diseñar un filtro para reducir las distorsiones a niveles aceptables acogiendo una norma para tal fin.

## 4.2 Cambios de niveles de tensión

El cambio en el nivel de tensión de alimentación de un usuario representa una alternativa efectiva en algunos

casos para disminuir el efecto de los armónicos del usuario sobre el sistema de distribución.

Al cambiar el nivel de tensión a uno mayor, los niveles de cortocircuito aumentan en relación a la corriente de carga del circuito. Por tanto la relación  $I_{cc}/I_n$  aumenta, permitiendo un THD mayor en la corriente de carga de acuerdo con las Tablas 10.3, 10.4 y 10.5 tomadas de la norma IEEE Std 519-1992. Posteriormente se ilustrará mediante un modelo de computador, cómo el efecto de una carga deformante dada es menor cuando mayor sea el nivel de tensión del punto de conexión.

En usuarios con niveles de distorsión intermedios, la conexión a un mayor nivel de tensión constituye una alternativa para incrementar el margen de distorsión admitido en el punto de conexión con la red de distribución

### 4.3 Modelos de flujos de armónicos

La simulación de un sistema mediante un programa de Análisis de Armónicos tiene por objetivo evaluar los efectos de implementar en el sistema las medidas correctivas descritas anteriormente.

Con un flujo de armónicos se pretende concretamente obtener los siguientes objetivos:

- Cuantificar la reducción en el THD de corriente y voltaje en los circuitos con excesivo contenido de armónicos.
- Verificar la reducción o eliminación del armónico o armónico predominante del sistema.
- Determinar los efectos de trasladar usuarios con cargas deformantes de un nivel de tensión a otro con mayores niveles de cortocircuito.
- Determinar las corrientes y voltajes a los que estarán sometidos los componentes de un filtro para estimar sus características nominales.

El programa aquí utilizado en las simulaciones permite determinar la característica de respuesta a la frecuencia del sistema, así como también los niveles de armónicos en el sistema originados por fuentes de armónicos conocidas. Posee capacidades gráficas que permiten presentar por pantalla o imprimir cualquier tipo de gráfica de impedancia contra frecuencia o señales en el dominio del tiempo.

Incluy, entre otras, las siguientes características:

- Cálculo de flujos armónicos de potencia.
- Soporta la representación completa de cualquier sistema de potencia, incluyendo desbalances en cargas, dispositivos con características dependientes de la frecuencia y fuentes múltiples de armónicos. Dependiendo de la situación, pueden seleccionarse modelos trifásicos o monofásicos para los componentes del sistema.
- Incluye modelos para todos los componentes de un sistema de potencia, tales como: líneas, cables, transformadores, motores, capacitores y cargas.

Incluye también modelos para dispositivos generadores de armónicos, tales como: transformadores, hornos de arco, rectificadores, inversores, cicloconvertidores y capacitores estáticos.

El modelo desarrollado para análisis por computador de un sistema tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

- Las cargas que generan armónicos se modelan como fuentes de corriente. El espectro de frecuencia de la fuente de corriente corresponde al determinado mediante el registrador a través de mediciones.
- Las líneas de transmisión se representan por sus parámetros R y L. El programa permite incluir dependencia de la impedancia con la frecuencia.
- El Sistema de Generación o de Suministro de Energía se representa por su equivalente Thévenin calculado a partir del nivel de cortocircuito existente. A través del programa se puede modelar la variación de la impedancia con la frecuencia.
- Los reactores y capacitores son incluidos con modelos internos del programa.
- Otros usuarios con niveles de distorsión despreciables son representados por fuentes de corriente sinusoidales puras.

### 4.4 Ejemplo del diseño de filtro para una planta industrial

Se presenta a continuación una ilustración sobre una planta industrial con un alto contenido de armónicos generados por dos conjuntos de drives asociados a dos transformadores identificados para propósitos de ilustración como T1 y T2, 13200/440 V. el primero de 2800 KVA y el segundo de 2000 KVA.



#### 4.4.1 Cálculos preliminares

No resulta práctico eliminar completamente la distorsión en los transformadores sino llevarla a valores que se encuentren dentro de los límites especificados por las normas. La Tabla 1 presenta la distorsión total existente en cada transformador y los valores a los cuales se pretende llevar dichas distorsiones mediante la instalación de filtros.

Reducción de distorsiones de corrientes		
Equipo	Distorsiones de corriente THD (%)	
	Existente	Objetivo
"Transformador T1: 2.8 MVA 13.2/0 44 kV"	15.0	8.0
"Transformador T2: 2.0 MVA 13.2/0 44 kV"	30.6	8.0

Tabla 1. Distorsión total de cada transformador

El valor objetivo corresponde a la distorsión total admisible al nivel de carga efectiva del transformador. Puesto que la carga en ambos transformadores es menor al 100%, la distorsión admisible es mayor al 5% de la Norma IEEE Std C57.12.00-1980.

Dado que no se requieren capacitores para compensar el factor de potencia en los transformadores T1 y T2, se inicia el cálculo con capacitores de reducida potencia, por ejemplo 160 kVAR para ambos transformadores.

La reactancia capacitiva viene dada por:

$$X_c = \frac{(0.48 \text{ kV})^2}{0.160 \text{ MVAR}} = 1.44 \text{ Ohmios}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = 1842.07 \times 10^{-6} \text{ Faradios}$$

El filtro debe estar sintonizado para una frecuencia próxima al armónico a eliminar. Se toma el 4.7 armónico, por debajo del 5° para permitir tolerancias durante la construcción del filtro y para evitar resonancias cerca del 5° armónico.

$$W_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$2\pi (4.7 \times 60) = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Reemplazando el valor de C, se obtiene:

$$L = 0.1729 \times 10^{-3} \text{ Henrios}$$

Que corresponde a una reactancia a 60 Hz de:

$$XL = 0.065 \Omega$$

La relación X/R en un reactor normalmente varía entre 50 y 150. Para este caso se toma una relación de 50, por lo tanto:

$$R = \frac{X_L}{50} = \frac{0.065}{50} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ Ohmios}$$

Por tanto, los parámetros preliminares encontrados para el filtro son:

$$C = 1842.07 \mu\text{f}$$

$$L = 0.1729 \text{ mH}$$

$$X / R = 50 \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

Estos parámetros son utilizados en el modelo desarrollado en el programa de Análisis de Armónicos para verificar que el filtro elimina la distorsión.

#### 4.4.2 Modelo de computador

La Figura 6 presenta el Diagrama Unifilar del modelo utilizado para el Análisis de Armónicos. Este modelo incluye:

- Sistema detrás del barraje de sincronización 13.2 kV representado por una impedancia Thevenin.
- Sistema desarrollado en el interruptor 1B-6, 13.2 kV del sistema bajo consideración.
- Topología completa del área.
- Generadores 2 y 3 representados como fuentes de corriente con distorsión armónica despreciable.
- Las cargas deformantes en el sistema han sido representadas por fuentes de corriente con distribución espectral dada por las mediciones efectuadas.
- Las líneas y transformadores se representan por sus impedancias características.

La Figura 7 presenta los flujos de potencia activa y reactiva monofásica iniciales. Se observan los siguientes niveles de generación en los turbogeneradores:

Gen. 2:  $P_2 = 3 \times 2023.9 \text{ kW} = 6071.7 \text{ kW}$ ,  $F_p = 0.834$

Gen. 3:  $P_3 = 3 \times 661.6 \text{ kW} = 1984.8 \text{ kW}$ ,  $F_p = 0.835$

Los niveles de carga en cada área de la planta corresponden a las condiciones de máxima demanda.





### 4.4.3 Simulaciones por computador

Utilizando el modelo descrito en el numeral anterior se analizó el impacto de instalar los filtros diseñados en el numeral 4.4.1. Se verifican los siguientes parámetros:

- Variación de distorsiones totales en voltajes y corrientes de todo el sistema.
- Reducción en la distorsión de la corriente de carga de los transformadores T1 y T2
- Nivel de carga en los componentes del filtro diseñado
- Factor de potencia en los transformadores T1 y T2

Como se mencionó anteriormente, el diseño del filtro es un proceso iterativo. La Tabla 2 presenta en forma resumida las (11) diferentes alternativas consideradas.

El objetivo del proceso es determinar el filtro mínimo que desempeñe la labor de eliminación de armónicos requerida. Se requiere además que los componentes del filtro no queden sometidos a sobrecargas durante su operación normal.

Se observa de la Tabla 2 que los ocho primeros diseños originan sobrecarga sobre alguno de los componentes del filtro. Por lo tanto se plantean tres alternativas válidas para los filtros correspondientes a los casos 9, 10 y 11.

Nº	CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO DISEÑADO						CORRIENTE DE CARGA				THD (%) CORR. DE CARGA	
	FILTRO 1			FILTRO 2			FILTRO 1		FILTRO 2		T1	T2
	Xc	Vn	In	Xc	Vn	In	A(rms)	%	A(rms)	%		
1	1,440	480	192.50	1.44	480	192.5	424	220	516	268	4.84	8.24
2	0.523	480	529.20	0.523	480	529.2	648	122	718	135	4.42	6.57
3	0.261	480	1058.90	0.261	480	1058.9	1122	106	1184	111	3.99	1.90
4	0.818	600	423.40	0.818	600	423.4	505	119	585	138	4.64	7.44
5	0.692	600	500.00	0.692	600	500.0	548	109	624	124	4.56	7.14
6	1,067	800	479.00	1,067	800	479.0	497	103	579	120	4.66	7.53
7	2x2.13	800	433.02	2x2.13	800	433.0	462	106	548	126	4.71	7.85
8	2x1.6	800	577.20	2x1.60	800	577.2	514	89	594	103	4.62	7.40
9	2x1.6	800	577.20	2x1.33	800	692.8	514	89	636	91.8	4.63	7.06
10	0.640	800	721.69	0.53	800	866.0	574	79.5	712	82.2	4.53	6.58
11	1,440	1200	481.12	1.2	1200	577.3	428	88.9	535	92.7	4.85	8.00

Tabla 2. Alternativas para el diseño de filtros.

### 4.4.4 Selección del diseño definitivo

La Tabla 3 resume las características de los tres diseños que cumplen los requerimientos de eliminación de armónicos y carga en los componentes del filtro. Del análisis de las simulaciones efectuadas con los tres filtros se ha elaborado la Tabla 4.4 de la cual se concluye:

- Los filtros operan a un menor régimen de carga proporcionando un mayor margen de operación en la alternativa 2 (79.5 y 82.2%).
- El voltaje en terminales de los capacitores es menor en la alternativa 2 (1.08 y 1.10 p.u.).

- El voltaje en el barraje de 440 V de los transformadores T1 y T2 es prácticamente el mismo para las 3 alternativas. Sin embargo, la alternativa 2 redonda en menores distorsiones totales (4.05 y 4.84%).
- El suministro de potencia reactiva es menor en la alternativa 3, lo cual constituye un factor favorable importante. Sin embargo, la potencia aportada por las alternativas 1 y 2 no se considera excesiva toda vez que no origina sobretensiones ni deterioro del factor de potencia equivalente del Feeder 1B-6.
- El nivel de carga y distorsión en la corriente de los dos transformadores es admisible en las tres alternativas. La alternativa 2 acarrea el mínimo régimen en T1 (71.8%) y un régimen levemente superior en T2 (65.2%).

Adicionalmente, debe considerarse:

- La alternativa 1 requiere la instalación de un filtro compuesto por dos unidades LC en cada transformador lo que implica mayores requerimientos de espacio.
- La alternativa 3 requiere de componentes con un mayor nivel de aislamiento dada su operación a mayores voltajes.

Por las anteriores razones se considera la alternativa 2 de la Tabla 3 como la mejor opción para el sistema. La Figura 4 presenta la distribución de flujo de potencia activa y reactiva monofásicos cuando se instalan los filtros de alternativa 2 en el sistema.

Nº	VALORES NOMINALES (60 Hz)					
	FILTRO 1 (T1)			FILTRO 2 (T2)		
	kVAR	VOLT. (V)	In (A rms)	kVAR	VOLT. (V)	In (A rms)
Nº 1	2 x 400	800	577.3	2 x 480	800	692.8
Nº 2	1000	800	721.7	1200	800	866.0
Nº 3	1000	1200	481.1	1200	1200	577.3

Tabla 3. Alternativas para eliminación de armónicos.

## 4.5 Ejemplo del cambio de voltaje en el nivel de armónicos

Como se indicó anteriormente, el nivel de distorsión admitido en la corriente depende de la relación  $I_{cc}/I_n$  del punto de conexión del usuario.

Al cambiar el nivel de tensión a uno mayor, los niveles de cortocircuito aumentan en relación con la corriente de

carga del circuito. Por tanto la relación  $I_{cc}/I_n$  aumenta, permitiendo un THD mayor en la corriente de carga de acuerdo con la norma IEEE Std 519-1992.

A manera de ilustración, considérese la carga de un circuito de distribución llamado Arroyondo II:

$$MVA_{carga} = \sqrt{3} \times 34.5 \text{ Kv} \times 0.351 \text{ KA} = 20.97$$

Esta carga a 115 tomaría la siguiente corriente:

$$I_L = \frac{20.97 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 115 \text{ Kv}} = 105.3 \text{ A}$$

El nivel de cortocircuito en la S/E que la alimenta, Yumbo 115 kV es de 14.13 KA.

La relación  $I_{cc}/I_n$  es 115 Kv sería:

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{14.13 \text{ KA}}{0.1053 \text{ KA}} = 134.18$$

De acuerdo con la norma IEEE 519-1992 se admitiría un THD en la corriente de 15%. Si la distorsión total en el circuito Arroyondo II es de un 10%, no sería violatoria en 115 Kv como lo es en 34.5 kV.

Esta alternativa no sería viable en el caso de otro circuito alimentado desde la misma subestación llamado Arroyondo I, que presenta una distorsión de 30.40%, tomando una corriente de carga de 97 A:

$$MVA_{carga} = \sqrt{3} \times 34.5 \text{ Kv} \times 0.097 \text{ KA} = 5.79$$

La corriente de carga a 115 Kv sería:

$$I_L = \frac{5.79 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 115 \text{ Kv}} = 29.068 \text{ A}$$

$$I_{cc/I_n} = \frac{14.13 \text{ KA}}{0.029068} = 486.10$$

ALTERNATIVA	PORCENTAJE DE CARGA EN FILTROS		VOLTAJES (p.u.)				THD (%) VOLTAJES	
	FILTRO 1	FILTRO 2	CAP 1	CAP 2	T1 (440 V)	T2 (440 V)	T1 (440 V)	T2 (440 V)
Nº 1	89.0	91.8	1.09	1.11	1.02	1.04	4.22	5.14
Nº 2	79.5	82.2	1.08	1.10	1.02	1.04	4.05	4.84
Nº 3	88.9	92.7	1.14	1.17	1.01	1.04	4.54	5.77
ALTERNATIVA	KVAR PROPORCIÓN		NIVEL DE CARGA T1			NIVEL DE CARGA T2		
	FILTRO 1	FILTRO 2	A	% In	THD (%)	A	% In	THD (%)
Nº 1	345	436.02	2666	72.6	4.63	1688	64.3	7.05
Nº 2	399	507.00	2637	71.8	4.53	1711	65.2	6.58
Nº 3	279	355.80	2724	74.1	4.85	1665	63.4	8.00

Tabla 4. Comparación de alternativas.

Aún con esta relación  $I_{cc}/I_n$ , la distorsión de corriente en el circuito (30.40%) superaría el límite admitido por la Norma.

Mediante el programa de computador se simuló la conexión de la carga del circuito Arroyohondo I al barraje 115 KV de Yumbo. La magnitud de la carga en el circuito se mantuvo constante, lo mismo la distribución espectral de la corriente de carga.

La Tabla 5 presenta los niveles de distorsión en la Subestación después de llevar a cabo la reubicación del circuito Arroyohondo I.

PUNTO DE MEDICIÓN	MAGNITUD	THN (%) conexión 34,5k V	THD (%) conexión 115k V
Barraje 34.5 Kv	V	0.67	0.54
Mulalo	I	2.37	2.40
Quintex	I	0.00	0.00
Cencar	I	3.33	3.43
Arroyohondo I	I	38.91	32.44
Arroyohondo II	I	7.35	7.36
Industria	I	1.61	1.61
Bitaco	I	10.90	10.79
Calima	I	1.74	1.78
Palmaseca	I	1.39	1.35
Trafo 1 Lado 34.5 Kv	I	2.41	2.25
Trafo 2 Lado 34.5 Kv	I	2.41	2.25

**Tabla 5. Reducción de THD con conexión de Arroyohondo I a 115 KV.**

Se observa de la Tabla lo siguiente:

- La distorsión total del voltaje en Yumbo 34.5 KV se reduce en 19.40%.
- La distorsión total de la corriente de carga en los transformadores 115/34.5 KV se reduce en 6.64%.
- Se introduce una distorsión total de 0.17% en la señal de voltaje de 115 KV en S/E Yumbo.
- Tal como se indicó anteriormente, al conectar el circuito Arroyohondo I a 115 KV se produce un aumento en la relación  $I_{cc}/I_n$  para ese circuito. Sin embargo, el THD de la corriente (32.44%) sigue siendo mayor que el límite establecido por la norma para la nueva relación  $I_{cc}/I_n$ .

- La reubicación del circuito Arroyohondo I no permite llevar el THD de corriente a límites admisibles. La distorsión de voltajes originada por el circuito no es considerable en 34.5 KV ni en 115 KV. Por lo tanto, se concluye que los armónicos de corriente generados en el circuito deben ser filtrados por el usuario en su propio sistema antes de inyectarlos a la red de distribución. La conexión a 115 KV no permite aliviar la distorsión de corrientes en el circuito.

## CONCLUSIONES

Este artículo contiene información general sobre la teoría y medición de armónicos y las medidas remediales para impedir que ellos afecten severamente los diferentes componentes de un sistema de potencia.

Dentro de las medidas remediales principales se ha descrito una metodología para el diseño de filtros, lo cual ha sido complementado con un ejemplo para una industria típica.

Se han mencionado igualmente, dentro de las medidas remediales, los cambios de niveles de voltaje, cuyo efecto se ilustró también con otro ejemplo. En éste, se mostró que el cambio del nivel de tensión no necesariamente lleva los niveles de armónicos a valores admisibles y que, por lo tanto, esta medida debe ser acompañada con la instalación de uno o varios filtros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 IEEE Standard 519-1981  
"Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".
- 2 IEEE Standard C57.12.00-1980  
"General Requirements for Liquid - Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers".
- 3 ANSI/IEEE Standard C57.110-1986  
"Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non sinusoidal Load Currents".
- 4 J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger "Power System Harmonics"  
John Wiley & Sons. New Delhi 1985.

- 5 IEEE Standard 18-1980  
"IEEE Standard for Shunt Power Capacitors".
- 6 Engineering Recommendation P-7/2  
Electric Research Association - ERA United Kingdom.
- 7 LO, K. L., GERS, J.M., Feeder Reconfiguration for Losses Reduction in Distribution Systems, Proc. of the UPEC 94 Conference, University College Galway, Ireland, September 1994.
- 8 CHANG, N.E., Determination of Primary Feeder Losses, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 87, No. 12, pp. 1991-1994, 1968
- 9 BAGHZOUZ, Y., Effects of Nonlinear Loads on Optimal Capacitor Placement in Radial Feeders.
- 10 McGRANAGHAN, M. F. et al, Distribution Feeder Harmonic Study Methodology, IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 12, December 1984, pp. 3663-3671.
- 11 McGRANAGHAN, M. F. et al, Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, March 1981 pp. 1362-1369.
- 12 RIZY, D.T. et al, Transient and Harmonic Voltages Associated with Automated Capacitor Switching on Distribution Systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 3, August 1987, pp. 713-723.

## ACERCA DEL AUTOR

Juan M. Gers obtuvo el título de ingeniero eléctrico en la Universidad del Valle en Cali, Colombia en 1977. Obtuvo una maestría en Sistemas de Potencia en la Universidad de Salford de Inglaterra en 1981. Realizó un doctorado en la Universidad de Strathclyde en Escocia y se graduó en 1998 con una investigación sobre Automatización de Sistemas de Distribución.

Estuvo vinculado a la empresa de energía EPSA, (anteriormente CVC) como ingeniero de diseño de subestaciones entre 1970 y 1977. En 1981 fundó a GERS S.A. que es una empresa de consultoría en ingeniería eléctrica establecida en Colombia y que tiene una afiliada en Florida llamada GERS USA LLC de la cual es su gerente. Ha sido conferencista invitado de varias entidades en USA entre las que están Penn State University, Basler Electric, Beckwith Electric y Megger en EEUU. Ocupó el cargo de viceministro de Minas y Energía de Colombia en el segundo semestre de 2002 y fue profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle por más de 20 años.

Es autor de más de 30 artículos técnicos y coautor del libro 'Protection of electricity distribution networks' editado por el IEE de Inglaterra, en 1998 con una segunda edición en 2004. Juan Manuel es Chartered Engineer de la IEE y miembro activo del Power Systems Relaying Committee de la IEEE.