

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE THD

ORLANDO SAID BAYTER FONTALVO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGIENERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CARTAGENA
2005**

DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE THD

ORLANDO SAID BAYTER FONTALVO

Tesis de grado entregado al Director:

MPE. JUAN CARLOS MARTÍNEZ SANTOS

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGIENERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CARTAGENA
2005**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, 22 de febrero del 2006

DEDICATORIA

Les dedico esta tesis a todas las personas que creyeron en la realización de este proyecto y aquellos que me brindaron su apoyo contundente en el desarrollo de este. Por otra parte dedico este proyecto a todos los profesores que durante tanto tiempo me brindaron sus conocimientos para la elaboración de esta.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco Juan Carlos Martínez Santos mi director de tesis por lo aprendido y la ayuda que me brindo a realizar este proyecto también le doy gracias a Alfredo Ponce Iglesias por colaborarme con el Modulo de Evaluación de motorola, él cual fue de gran ayuda para construir esta investigación.

RESUMEN DE INFORME FINAL

Diseño y construcción de un prototipo de un medidor de THD

Autor

Orlando Said Bayter Fontalvo

Objetivo General

Identificar las características que componen la calidad de la red eléctrica según el estándar IEEE Std 519-92 con el fin de crear un prototipo de un medidor de Distorsión Armónica Total

Metodología

Esta investigación es de tipo descriptiva o experimental y se va a abordar de esta manera por las siguientes razones:

La investigación se va a desarrollar en base a muestras obtenidas en la red eléctrica.

Los experimentos que se van a realizar con un modulo de evaluación de Motorola EVMDSP56F807.

Resultados

El primer resultado obtenido se deduce a partir de los datos obtenidos del análisis realizado con ayuda de Matlab, en el cual “a mayor número de muestras menor es el porcentaje de error de THD”. Si no se tiene cuidado con la selección de la frecuencia de muestreo y el número de muestras a analizar, el error crece.

Las medidas realizadas a señales provenientes de un generador de señales muestran valores de THD² del orden de 0,0 y 0,1 sin señal. Para señales senoidales, el THD² varía entre 2,0 y 4,0, lo que equivale a 1,41% y 2,00%, lo que es normal para señales obtenidas a partir de un generador, principalmente debido a que la señal es conformada a partir de circuitos digitales. Para señales triangulares las medidas se asemejan a los valores obtenidos con señales senoidales. Para señales cuadradas los valores son mayores al 25%, que son los valores esperados.

Director

Juan Carlos Martínez Santos

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	
PARTE 1: CONCEPTOS PRELIMINARES	14
I. ¿Qué es distorsión armónica?	
II. ¿Cómo se calcula el THD?	
PARTE 2: EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA	22
I. Origen de los armónicos	
II. Efectos instantáneos	
III. Efectos a largo plazo	
IV. ¿Cómo y en qué casos se mide el THD?	
PARTE 3: MEDICIÓN DEL THD	43
1. ¿Qué es un medidor de THD?	
2. ¿Qué características debe cumplir un medidor de THD?	
3. Puntos de medición	
PARTE 4: PROTOTIPO DE MEDIDOR DE THD?	51
I. Toma y análisis de datos de la red eléctrica.	
II. Implementación del algoritmo de THD en el DSP.	
PARTE 5: PLAN DE NEGOCIOS	56
I. Resumen ejecutivo	
II. La idea del negocio	
III. Bien que se va a producir	
IV. Factores fundamentales de diferenciación	
V. Equipo y organización	
VI. Análisis del mercado	
VII. Plan de mercadeo	
VIII. Plan comercial	
IX. Plan de producción	
X. Plan de inversión	
XI. Diagramas de riesgo.	
PARTE 6: CONCLUSIONES	71
I. Resultados	
II. Conclusiones	

III. Recomendaciones

PARTE 7: REFERENCIAS	74
I. Bibliografía	
II. Enlace	
a. Portal	
b. Investigadores	
PARTE 8: ANEXOS.	77
I. Función de Matlab para el cálculo de THD	
II. Archivo [thd.c] y [events.c]	
III. Recomendaciones para reducir el efecto de los armónicos	

1. INTRODUCCIÓN

En un sistema de potencia eléctrica, los equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa como por los clientes, están diseñados para operar a 50 ó 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias de 50 ó 60 ciclos sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario. La forma de onda existente esta compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental. En la figura 1 se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60Hz) más una onda de frecuencia distinta. El término componente armónico o simplemente armónico, se refiere a cualquiera de las componentes sinusoidales mencionadas previamente, la cual es múltiplo de la fundamental. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en porcentaje de la fundamental.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 * 60\text{Hz} = 180\text{Hz}$.

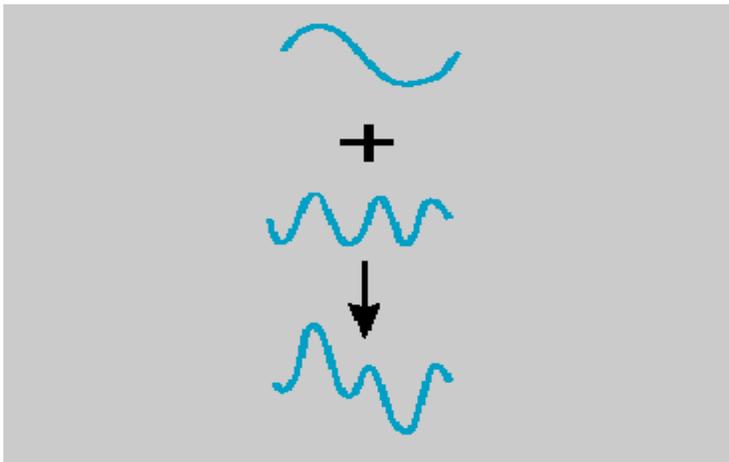


Figura 1[4]. Descomposición de una onda distorsionada

El orden el armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Por principio, la fundamental f_1 tiene rango 1.

Cualquier fenómeno periódico puede ser representado por una serie de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin (n\omega t - \delta_n)$$

Donde:

Y_0 = Es la componente de corriente directa, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de distribución [1].

Y_n = Valor rms de la componente (n^{th}) armónica.

φ_n = Angulo de fase de la componente (n^{th}) armónica cuando $t = 0$.

Los armónicos por encima del orden 23 son despreciables [1].

La cantidad de armónicos es generalmente expresada en términos de su valor *rms* dado que el efecto calorífico depende de este valor de la onda distorsionada.

Para una onda sinusoidal el valor eficaz es el máximo valor dividido por raíz de 2. Para una onda distorsionada, bajo condiciones de estado estable, la energía disipada por el efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas:

$$RI^2t = RI_1^2t + RI_2^2t + \dots + RI_n^2t$$

Donde:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2$$

o también:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2}$$

suponiendo que la resistencia se tome como una constante

Este cálculo permite intuir uno de los principales efectos de los armónicos que es el aumento de la intensidad eficaz que atraviesa una instalación debido a las componentes armónicas que lleva asociada una onda distorsionada.

El porcentaje de armónico y la distorsión total armónica cuantifican la distorsión armónica que puede existir en una red de suministro eléctrico.

La tasa de armónicos o porcentaje de armónicos, expresa la magnitud de cada armónico con respecto a la fundamental.

La distorsión total armónica (THD), cuantifica el efecto térmico de todos los armónicos. La CIGRE propone la siguiente expresión para el cálculo de esta magnitud:

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

Donde:

Y_n : Magnitud del armónico n.

Y_n : Magnitud de la onda de frecuencia fundamental.

2. CONCEPTOS PRELIMINARES

2.1 ¿QUE ES DISTORSIÓN ARMÓNICA?

Existe distorsión armónica cuando la onda sinusoidal, considerada pura, que generan las centrales eléctrica sufre deformaciones en las redes de alimentación a los consumidores. Para determinar el grado de deformación de una onda de tensión o de intensidad que no es sinusoidal pura – aunque sí periódica, con 60Hz de frecuencia – se recurre al análisis de frecuencia. El proceso normalmente se realiza mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), un algoritmo que permite calcular la energía contenida de las diferentes ondas sinusoidales puras que componen la onda deformada. Estos contenidos se refieren como:

- La componente fundamental de la onda (60Hz de frecuencia).
- Las componentes de frecuencias armónicas (múltiplos de 60Hz), que reciben la denominación de armónicos de tensión o de intensidad. Su presencia debe limitarse.
- De otra forma, aparecen en las redes otras componentes de la onda de tensión que se designan interarmónicos, cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la fundamental. Los interarmónicos se presentan tanto a unas ciertas frecuencias como en forma de espectro de banda ancha. Son de poca importancia, por lo que generalmente no se les tiene en cuenta.

A los armónicos se les denominan normalmente por su orden, un número que resulta de la relación existente entre su propia frecuencia y la de la componente fundamental.

En la Figura 2 se representa una onda de tensión de 60Hz deformada que contiene únicamente:

- Componente fundamental
- Armónico de orden 5

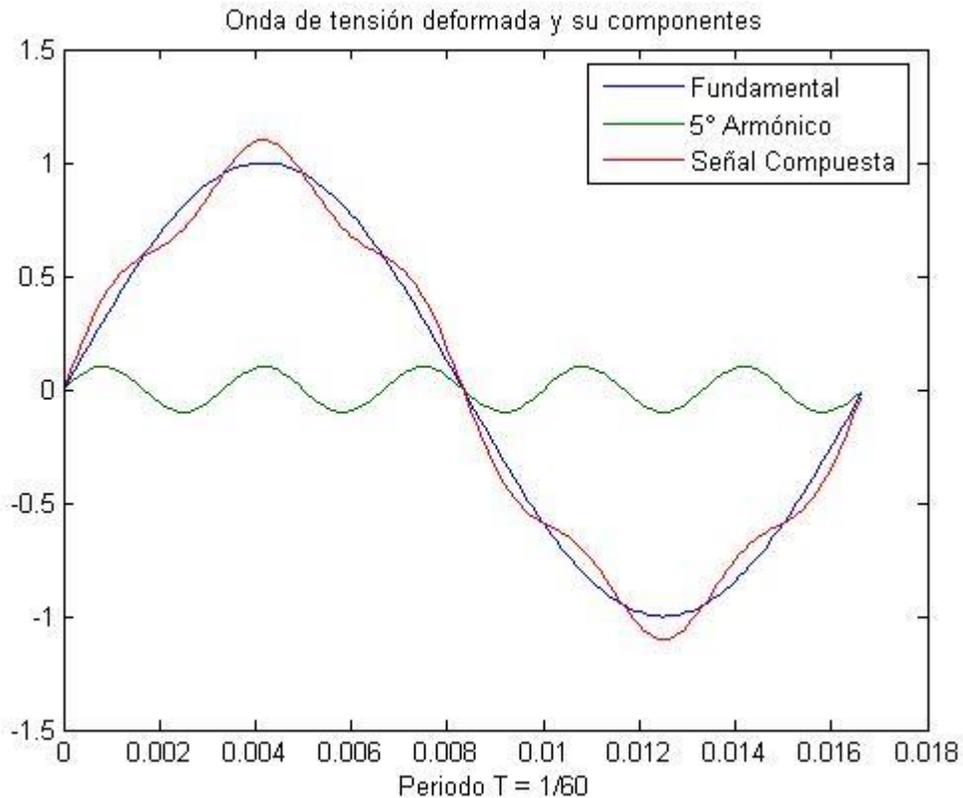


Figura 2. Onda de tensión deformada y sus componentes

Los contenidos o tasas de los diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de acuerdo con la siguiente relación:

$$u_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%$$

En este formulado, U_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y U_1 , la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

2.2. ¿CÓMO SE CALCULA EL THD?

La distorsión Armónica total se puede calcular de varias maneras que se enunciarán a continuación:

1. Cálculos de los armónicos usando fuentes de corriente.

Las fuentes de los armónicos pueden estar representadas por una fuente ideal de corriente para el propósito del análisis. En este análisis se determina el comportamiento en cada frecuencia de los armónicos, tanto de los dispositivos lineales como de los dispositivos no lineales, los cuales pueden estar remplazados con una fuente de corriente diferente, como se indica en la Figura 3.

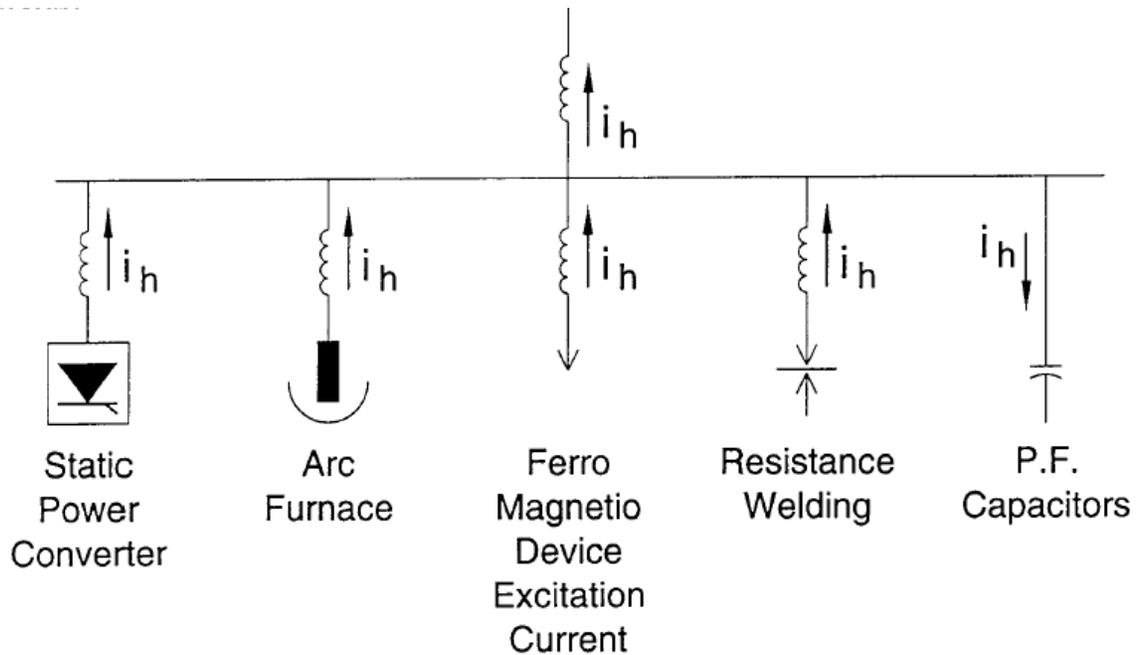


Figura 3. Representación de las fuentes de Armónicos

2. Cálculo de la respuesta en frecuencia del sistema.

Una vez las características de la fuente son determinadas, la respuesta del sistema para estas fuentes debe estar calculada. Los elementos importantes del modelo utilizados para realizar estos cálculos incluyen lo siguientes:

- Sistema de corto circuito equivalente de impedancia
- Características de líneas y cables sobre el sistema.
- Características de cargas.

Para calcular la respuesta de la frecuencia del sistema se deben seguir algunos pasos los cuales son:

- Cálculos Simples
- Simulación por computador

En este proyecto no se calcula el THD sino se mide, por eso para entender como se va a medir en este proyecto es necesario definir algunos conceptos de la Transformada de Fourier.

Transformada Discreta de Fourier (DFT)

La Transformada de Fourier en Tiempo Discreto (DTFT del inglés Discrete Time Fourier Transform) es el equivalente discreto de la Transformada de Fourier donde se ha transformado la variable continua 't' por la variable discreta 'nTs' siendo 'Ts' el periodo de muestreo. La Transformada de Fourier de una señal discreta x[n] es:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\omega n}$$

La Transformada Discreta de Fourier es un método muy eficiente para determinar el espectro en frecuencia de una señal. Permite convertir una secuencia de valores en el dominio del tiempo a una secuencia de valores equivalente en el dominio de la frecuencia. La Inversa de la Transformada Discreta de Fourier (IDFT) realiza el proceso contrario. El par de ecuaciones de la DFT son:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W^{nk} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot W^{-nk} \quad n = 0, 1, \dots, N - 1$$

Donde las constantes 'W' son conocidas como **factores twiddle** y están definidas como:

$$W = e^{-j2\pi/N}$$

Se debe observar que 'W' es una función de longitud N, por ello, también suele expresarse como W_N . El inconveniente de realizar unos algoritmos que implementen tal cual estas fórmulas es la cantidad de tiempo requerido para computar la salida. Esto es debido a que los índices k y n deben variar de 0 a N-1

para conseguir el rango de salida completo y, por tanto, se deben realizar N^2 operaciones.

El término genérico Transformada Rápida de Fourier abarca distintos algoritmos con distintas características, ventajas y desventajas.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

En la fórmula de la Transformada Discreta de Fourier obtener $X(k)$ para un 'k' determinado requiere aproximadamente N sumas complejas y N productos complejos, ya que:

$$X(k) = x(0) + x(1) \cdot W^k + x(2) \cdot W^{2k} + x(3) \cdot W^{3k} + \dots + x(N-1) \cdot W^{(N-1)k}$$

para $k = 0, 1, \dots, N-1$. Si lo que se desea es obtener $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$ entonces se necesitarán un total de aproximadamente N^2 sumas complejas y N^2 productos complejos. Esto quiere decir que los requerimientos computacionales de la DFT pueden ser excesivos especialmente si el tamaño de N es grande. La FFT aprovecha la periodicidad y simetría del factor twiddle 'W' para el cálculo del Transformada Discreta de Fourier. La periodicidad de 'W' implica:

$$W^k = W^{k+N}$$

$$W^k = -W^{k+N/2}$$

La FFT descompone la DFT de N puntos en transformadas más pequeñas. Una DFT de N puntos es descompuesta en dos DFT's de $(N/2)$ puntos. Cada DFT de $(N/2)$ puntos se descompone a su vez en dos DFT's de $(N/4)$ puntos y así sucesivamente. Al final de la descomposición se obtienen $(N/2)$ DFT's de 2 puntos cada una. La transformada más pequeña viene determinada por la base de la FFT. Para una FFT de base 2, N debe ser una potencia de 2 y la transformada más pequeña es la DFT de 2 puntos. Para implementar la FFT existen dos procedimientos: diezmado en frecuencia (DIF del inglés Decimation In Frequency) y diezmado en el tiempo (DIT del inglés Decimation In Time). En este proyecto se ha utilizado el procedimiento DIF.

Los pasos para realizar la medición son los siguientes.

- Tomar unas muestras de la red eléctrica (de voltaje), en este paso se seleccionan unas muestras de la central generadora de energía eléctrica.
- Realizar la transformada rápida de fourier.

- Eliminar el ruido.
- Analizar hasta el 31th armónico.
- Se calcula el valor absoluto de la magnitud de la señal y se utiliza la formula de THD de voltaje.

3. EFECTO DE LOS ARMÓNICOS

Los armónicos de corriente y voltajes sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución.

Para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz [4].

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionadas serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos instantáneos.
- Efectos a largo plazo debido al calentamiento.

3.1. ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo φ

respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos inductancias, resistencias y condensadores.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en *estrella-estrella* con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. Para entender esto más fácilmente se mencionan algunos conceptos previos. En la figura 4 se ha representado la variación de la impedancia de una inductancia respecto a la frecuencia. La fórmula que determina dicha función es la siguiente:

$$X_L = L \times \omega \times 2 \times \pi \times f$$

Análogamente, en la figura 5 se ha representado la misma curva para una impedancia capacitiva.

La fórmula que determina dicha función es:

$$X_c = \frac{-1}{(2 \times \pi \times f) \times C}$$

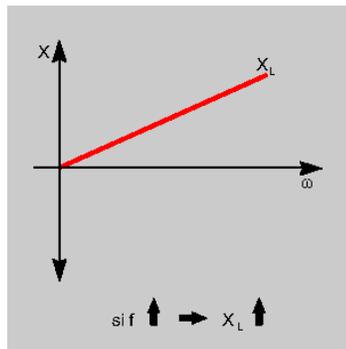


Figura 4 [4].
Variación de la impedancia inductiva en función de la frecuencia

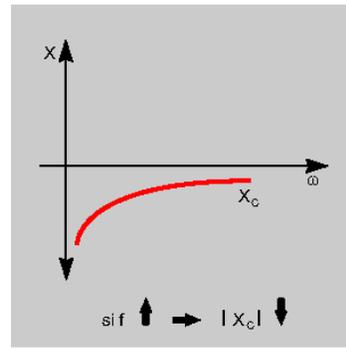


Figura 5 [4].
Variación de la impedancia capacitiva en función de la frecuencia

O sea, a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia, ejemplo 3Ω a 60Hz, 5Ω a 120Hz, etc., Filtros eléctricos y electrónicos, servomecanismos de motores, variadores de velocidad de motores tienen estas características. Estos tipos de elementos no generan armónicos si son energizados con una tensión de una sola frecuencia, sin embargo, si distorsionan la entrada sí existe más de una frecuencia y pueden alterar el contenido de armónicos. Estos elementos pueden mitigar o incrementar el problema del contenido de armónicos. Las dos categorías de equipos generadores de armónicos, pueden originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra.

En la tabla 1 se indican los elementos generadores de armónicos más comunes. En determinadas circunstancias la sobrecarga o daño de equipos pueden ser la causa de generación de armónicos. La gran cantidad de los armónicos en la mayoría de los sistemas de potencia son generados por los equipos de los usuarios.

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos. Aún ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos. Las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

Los sistemas de iluminación del tipo lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente. Una tasa del 25% del tercer armónico es observada en ciertos casos [1]. La tasa individual del armónico 3^{ro} puede incluso sobrepasar el 100% para ciertas lámparas fluocompactadas modernas [2], y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro, ya que este conduce la suma de las corrientes

de tercera armónica de las tres fases, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

La impedancia de un reactor saturado está variando con la circulación de corriente a través de ella, resultando en una considerable distorsión de corriente. Este es el caso por ejemplo de transformadores sin carga sometidos a un sobrevoltaje continuo.

Las máquinas rotativas producen armónicos de ranura de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable. Las pequeñas máquinas sincrónicas son sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3^{er} orden que pueden tener una incidencia sobre:

- El calentamiento permanente (aun sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

Los armónicos son atenuados de una manera normal a medida que la potencia eléctrica es adsorbida. En raros casos pueden contribuir a la potencia real que toma un motor pero es muy raro y no presentan ningún efecto positivo, en general los armónicos producen calor a medida que circulan por los conductores y aparatos eléctricos. Por otro lado cuando los armónicos se combinan con armónicos generados por diferentes fuentes, pueden propagarse a diferentes distancias.

Tabla 1.a) Fuentes de frecuencia armónicas

CONVERTIDORES DE AC-DC	ELEMENTOS MAGNÉTICOS SATURABLES
Hornos de arco AC-DC	Capacitores en paralelo
Balastos de lámparas fluorescentes	Variadores de velocidad de motores
Motores de inducción sobrecargados	Oscilaciones de baja frecuencia
Convertidores multifase	Problemas de neutro
Transformadores estrella-estrella	Capacitores serie
Corriente de Inrush	

Tabla 1.b) Fuentes de frecuencia no armónicas.

CONTROLADORES DE VELOCIDAD	CONVERTIDORES DE FRECUENCIA
Motores de inducción de doble alimentación.	Motor generador mal puesto a tierra.

La tabla 2 [4] muestra algunos elementos eléctricos generadores de armónicos y el espectro de corriente inyectado por los mismos.

tipo de carga	armónicos generados	comentarios
transformador	orden par e impar	componente en CC
motor asíncrono	orden impar	inter y subarmónicos
lámpara descarga	3° + impares	puede llegar al 30 % de I1
soldadura arco	3°	
hornos arco CA	espectro variable inestable	no lineal-asimétrico
rectificadores con filtro inductivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I1/h$	SAI-variadores V
rectificadores con filtro capacitivo	$h = K \times P \pm 1$ $I_h = I1/h$	alimentación equipos electrónicos
cicloconvertidores	variables	variadores V
reguladores PWM	variables	SAI-conversidor CC-CA

Tabla 2. Receptores y espectro de corrientes armónicas inyectadas por diferentes cargas.

3.2. EFECTOS INSTANTÁNEOS

Armónicos de voltajes pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje. Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de un metro clase 2 será incrementado un 0,3%, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5% para el 5° armónico [1].

Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas asociadas con las corrientes armónicas causan vibraciones y ruido, especialmente en equipos electromagnéticos (transformadores, reactores, entre otros).

Torques mecánicos pulsantes, debido a campos de armónicos rotatorios pueden producir vibraciones en máquinas rotatorias.

Distorsiones son observadas cuando líneas de comunicación y control son distribuidas a lo largo de líneas de distribución eléctrica que conducen corrientes distorsionadas. Parámetros que deben tenerse en cuenta incluyen: la longitud que se encuentran dichas líneas en paralelo, las distancias entre los dos circuitos y las frecuencias armónicas (el acoplamiento aumenta con la frecuencia)

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos esta la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (*breakers*) y equipos y/o sistemas digitales de protección [7].

Para el caso de equipos protegidos contra sobrevoltajes cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con voltajes sinusoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición está diseñado para responder ante valores *rms* de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática medida. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido [7]. En estos casos el ajuste de la protección deberá depender de las características de la forma de onda: voltajes pico y *rms*, tiempo de crecimiento de la onda, entre otros. Las protecciones convencionales no tienen en cuenta todos estos parámetros y lo que toman como base del proceso de protección, lo hacen sobre la suposición de que la forma de onda es puramente sinusoidal lo cual puede ser aceptado para algunas formas de onda pero incorrecto para otras que pueden ser dañinas [7].

3.3. EFECTOS A LARGO PLAZO

El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.

Calentamiento de capacitores

Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida (δ) del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida, esto se representa en la figura 6.

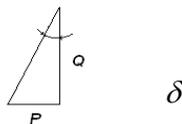


Figura 6.

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} \quad \text{Triángulo relacionado con la potencia}$$

del capacitor, (potencia activa (P), reactiva (Q), aparente (R)).

Valores de alrededor de 10^{-4} de la fundamental pueden ser citados para $\tan(\delta)$ [1,2]. El calor producido puede conducir a un rompimiento dieléctrico.

Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores

Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor.

En los transformadores existen pérdidas suplementarias debido al efecto piel, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o Foucault (en el circuito magnético).

Calentamiento de cables y equipos

Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes armónicas, lo que incrementa la temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto piel.
- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos eléctricos sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1.3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto piel en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:

1. Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 50 ó 60Hz, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
2. Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 50 ó 60Hz, pero no responden bien a cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.
3. Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.
4. La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el equipo de control; por lo que su presencia no se nota. Por ejemplo los medidores residenciales monofásicos no detectan frecuencias mucho más arriba de 60Hz. Frecuentemente la primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando causan problemas de operación o fallas del equipo.

La tabla 3, extraída de [4] muestra también algunos efectos dañinos que ocasionan los armónicos sobre los elementos eléctricos y sistemas de poca corriente:

- El mal funcionamiento de ciertos aparatos que utilizan la tensión como referencia para el control de los semiconductores o como base de tiempos para la sincronización de ciertos equipos.
- Perturbaciones porque se crean campos electromagnéticos. Así, cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, pueden, por inducción, ser receptores de corrientes que pueden provocar fallos en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos,
- Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión en el conductor, así, si el sistema de puesta a tierra del neutro es el TN-C, las masas de los diversos equipos no quedan a la misma tensión, lo que por su propia naturaleza provoca perturbaciones en los intercambios de información entre receptores inteligentes. Además, hay circulación de corrientes por las estructuras metálicas de los edificios y, por tanto, creación de campos electromagnéticos perturbadores.

Tabla 3. Efectos de los armónicos en dispositivos eléctricos.

efectos de los armónicos	causa	consecuencia
sobre los conductores	<ul style="list-style-type: none"> ■ las intensidades armónicas provocan el aumento de la IRMS, ■ el efecto pelicular (efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ disparos intempestivos de protecciones, ■ sobrecalentamiento
sobre el conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none"> ■ cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ cierre de los armónicos sobre el neutro que genera calentamientos y sobrecargas
sobre los transformadores	<ul style="list-style-type: none"> ■ aumento de la IRMS, ■ las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ aumento de los calientes Joule en los devanados ■ aumento de las pérdidas
sobre los motores	<ul style="list-style-type: none"> ■ análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ análogas a las de los transformadores y más pérdidas de reactivas
sobre los condensadores	<ul style="list-style-type: none"> ■ disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ envejecimiento prematuro de los armónicos existentes

Motores y generadores

Un gran efecto de voltajes de armónicos y corrientes en maquinaria rotatoria es un incremento en el calor debido a las pérdidas de hierro y cobre en las frecuencias de los armónicos. Los componentes de los armónicos afectan entonces la eficiencia de la máquina y pueden también afectar el torque desarrollado.

La corriente de los armónicos en los motores puede generar una mayor emisión de ruidos audibles, que se pueden comparar con una excitación sinusoidal. Los armónicos también producen una distribución de flujo en el espacio del aire y eso puede causar o incrementar los fenómenos que causan que el motor no pueda arrancar o que se inicie lentamente.

Los Pares Armónicos*, tales como el quinto y el séptimo, tiene el potencial para crear oscilaciones mecánicas en un generador-turbina o en un sistema carga-motor. La oscilación mecánica resulta cuando los torques oscilantes, a causa de la interacción entre la corriente de los armónicos y el campo magnético de la frecuencia fundamental, excitan una frecuencia resonante mecánica.

La tabla 4 define el orden característico de los armónicos descrita por un convertidor de seis-pulsos e implica el efecto cuando se aplica a los terminales de una maquina rotatoria.

Tabla 4. Frecuencia de Armónicos y estados por rotación

Armónicos	Frecuencia	Secuencia	Estado	Armónicos	Rotor
Orden	Red	Armónicos	Armónicos	Rotación	Armónicos
1	60	+	1	Adelante	---
5	300	-	5	Atrás	6
7	420	+	7	Adelante	6
11	660	-	11	Atrás	12
13	780	+	13	Adelante	12
17	1020	-	17	Atrás	18
19	1140	+	19	Adelante	18
23	1380	-	23	Atrás	24
25	1500	+	25	Adelante	24

* Pares Armónicos, debido a su simetría.

Transformadores

Con la excepción que los armónicos aplicados a los transformadores pueden resultar un incremento de ruido, los efectos sobre estos componentes usualmente son aquellos que resultan de la calefacción parásita.

El efecto de los armónicos en los transformadores puede tener las siguientes características: la corriente de los armónicos puede causar un incremento en la pérdida de cobre y en la pérdida de flujo y el voltaje de los armónicos puede causar un incremento en la pérdida del acero. El efecto resultante es un incremento en el calentamiento del transformador, que se puede comparar con el de una operación (fundamental) sinusoidal.

El IEEE C57.12.00-1987 propone un límite en los armónicos de la corriente en los transformadores. Sobre este límite se puede considerar que si tiene carga puede tener un factor de distorsión de 5% y si no tiene carga puede tener un factor de distorsión de 10%. La corriente de los armónicos en el voltaje aplicado no debe resultar en un voltaje *rms* total que exceda estos rangos.

Equipos Electrónicos

La potencia en los equipos electrónicos es susceptible a la mala operación causada por distorsión armónica. Estos equipos dependerán de una determinación exacta del voltaje cero o del voltaje de onda de la superficie. La distorsión armónica puede resultar en cambios de los cruces del voltaje cero o en el punto en el cual fase a fase del voltaje se vuelve mayor que la otra fase a fase de voltaje. En esos dos puntos se puede producir un aumento en el voltaje que pueda dañar el equipo electrónico ya que estos dos son puntos críticos para el funcionamiento de estos equipos.

Otros tipos de equipos electrónicos pueden verse afectados por la transmisión de Corriente Alterna a través de la fuente de poder de los equipos o por acoplamiento magnético de los armónicos en los componentes del equipo. Los computadores y equipos tales como controles programables con frecuencia requieren un factor de distorsión no mayor a 5% distorsión armónica de voltaje y con el más grande mono armónico siendo no mayor a 3% del voltaje fundamental. Altos niveles de armónicos pueden resultar en un mal funcionamiento y en algunos casos pueden tener serias consecuencias.

3.4. ¿CÓMO Y EN QUÉ CASOS SE DEBE MEDIR EL THD?

El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas (la mayoría argumentarían para mejorar) pero ha venido cambiando también la característica de carga de las instalaciones modernas. Las cargas electrónicas han ganado el nombre de “Carga no lineal”; para describir la forma de la potencia. Los casos más significativos en los cuales se debe medir la distorsión armónica total, es en la que existen efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una compañía de electricidad y son:

- La distorsión de voltaje dentro de instalaciones
- Las corrientes excedentes por el neutro
- Los altos niveles voltaje de neutro a tierra
- Los recalentamiento en transformadores
- Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores
- La reducción en la capacidad de distribución
- Penalización por bajo factor de potencia
- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Actuación indebida de fusibles.
- Aumento de las pérdidas, y mal aprovechamiento de la instalación.
- Sobrecalentamiento de motores y transformadores.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Fallas en el aislamiento.

Para medir estos efectos en estas cargas lineales se debe contar con un medidor de THD, el cual se describirá en la sección posterior o por alguno de los siguientes métodos analíticos que determinan los armónicos para después utilizar la fórmula del factor de distorsión armónica total.

Métodos para analizar los armónicos.

Existe una gran variedad de métodos analíticos usados para estudiar los armónicos y evaluar las soluciones de su problemática. Todos los métodos de análisis de armónicos emplean aproximaciones, linealizaciones de uno u otro tipo, presentando ventajas y desventajas los diferentes métodos, ninguno de ellos es el mejor en todas las situaciones. Ocasionalmente, dos o más métodos nos darán ligeras diferencias en los resultados cuando se usan para estudiar el mismo problema, en muy raras ocasiones pueden tenerse recomendaciones contradictorias de cómo reducir los armónicos. En general, estos métodos pueden agruparse en cuatro principales categorías.

Método de frecuencia.

El estudio del comportamiento de los armónicos de un circuito, un aparato eléctrico o de una parte del sistema ante una serie de pasos de frecuencias discretas, en cada paso se usa un modelo apropiado dependiente de la frecuencia para la parte que se analiza. En este análisis se pueden escoger los armónicos de frecuencia 60, 120, 180, 240, 300 etc., ciclos/seg. Este método es el más apropiado para análisis de condiciones posibles de resonancia y para análisis de diseño de filtros.

El análisis con diferentes frecuencias puede ser hecho junto con los estudios de flujo de carga, con análisis para la frecuencia de 60, 120, 180 y 240Hz, usando los valores de impedancias para las frecuencias mencionadas anteriormente y representando como generadores de armónicos a sus fuentes. Esta aproximación tiene la ventaja de que los programas de flujo de carga normales pueden ser usados para los flujos armónicos, identificando de esta manera los flujos de armónicos a través del sistema.

Desafortunadamente el método de las frecuencias, con frecuencia falla en el diagnóstico de los problemas de los armónicos, por diferentes razones, entre ellas tenemos: El flujo armónico y el flujo de frecuencia fundamental son aditivos, esta superposición puede causar saturación y otros problemas con cargas no lineales. El método de la frecuencia parece ser el mejor para identificar los armónicos que pueden causar problemas en circuitos y diferentes sistemas y donde pueden existir problemas de resonancia.

Análisis linealizados.

Usualmente se aplican las técnicas de inyección de corriente, se utilizan para estudiar fuentes armónicas compuestas de varias ondas cuadradas, los equipos y circuitos deben ser representados como conjuntos de elementos lineales conectados en serie y en paralelo, o al menos lineales con cada rango de frecuencia.

Las ventajas de este método son su relativa simplicidad, su buena representación de por qué y cómo los armónicos son creados y como se propagan. Modelos de este tipo son frecuentemente construidos, después de que la naturaleza general de los armónicos en un sitio en particular son conocidos, como un modelo para estudio del comportamiento y propagación de los armónicos de una manera más detallada.

Análisis no lineal en el dominio del tiempo.

Directamente se aplica a cargas no lineales simulando modelos en el dominio del tiempo. En programas tales como el EMTP o como mejor se conoce actualmente ATP, así como lo que se ha llamado simulación armónica en el tiempo con modelos para el flujo de potencia, los cuales calculan el aspecto de flujos de potencia usando modelos de cargas no lineales y modelos en líneas de equipos eléctricos representando sus impedancia a través del espectro de frecuencias.

El ATP es la mejor herramienta para hacer análisis de problemas severos, su aproximación es muy buena y presenta una buena habilidad para realizar interacciones complejas de energía y equipo. Es el método preferido para evaluar los transitorios originados por armónicos como los causados por las corrientes de *inrush* originados por los transformadores.

Método Wavelet.

Utiliza técnicas analíticas basadas en la teoría *wavelet* como análisis en el dominio de la frecuencia. Esta teoría utiliza análisis tanto en el dominio de la frecuencia como en el tiempo.

Se recomienda aplicar dos (2) o los tres (3) métodos discutidos anteriormente para evaluar los problemas de armónicos, tal vez los resultados serán diferentes, pero esto identifica los límites del conocimiento acerca del problema que se analiza y que se tiene un rango amplio de posibles soluciones que deben ser exploradas.

4. MEDICIÓN DEL THD

4.1. ¿QUÉ ES UN MEDIDOR DE THD?

Un medidor de THD es un equipo utilizado para determinar el porcentaje de distorsión armónica total en la red eléctrica. Este dispositivo debe realizar un conjunto de procesos para poder determinar el estado en que se encuentra la infraestructura eléctrica.



Medición

Lo primero que hay que hacer es obtener una muestra de la señal de la red eléctrica. A partir de estas se hace una Transformada Rápida de Fourier (hay otros equipos de medición que utilizan filtros digitales que toman las muestras de la frecuencia por medio del desempeño de los filtros.) Luego se analizan los valores absolutos de esta señal para así determinar el factor de distorsión total. La medición del THD es de vital importancia, pues con ella se facilita el análisis y control de la distorsión armónica. En la actualidad existe gran cantidad de equipo de medición de THD, equipo que en su mayoría, tiene interfase a la computadora con el propósito de almacenamiento y procesamiento de información.

4.2 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS DEBE CUMPLIR UN MEDIDOR DE THD?

Exactitud

El instrumento debe desempeñar la medición constante del componente armónico con un error compatible con los límites permisibles. Esta es la razón para usar un instrumento con una incertidumbre no mayor que 5% del valor límite permisible.

Selectividad

La selectividad del instrumento es una indicación de su habilidad para separar los diferentes componentes armónicos de la frecuencia. En la práctica una buena manera de tener una buena selectividad es definir los requerimientos mínimos de atenuación de una frecuencia inyectada, mientras el instrumento esta sintonizando a una frecuencia de 60Hz. La siguiente tabla nos da los requerimientos mínimos de atenuación

Tabla 5. Requerimientos mínimos de atenuación (dB)

Frecuencia Inyectada	Instrumento de	Instrumento de
Dominio-Frecuencia	Tiempo-Dominio	Dominio-Frecuencia
60	0	0
30	50	60
120-720	30	50
720-1200	20	40
1200-2400	15	35

En muchas aplicaciones, la corriente fundamental puede ser más grande en comparación con la corriente de los armónicos. La corriente de los armónicos puede ser suficiente grande para causar disturbios, como es el caso de la interferencia telefónica. En algunas situaciones, el rango dinámico requerido en los dispositivos puede encontrarse en 60dB (0.01% de la fundamental) mínimo. El costo extra en los instrumentos puede bajar hasta 90dB (0.00316 %).

Promedio

Si la medida armónica varia en el tiempo, es necesario para "Smooth out" fluctuar rápidamente los componentes sobre un periodo de tiempo. Dos factores son importantes en este caso: respuesta dinámica y ancho de banda.

Respuesta dinámica. Si, por ejemplo, una promedio sobre un periodo de 3s es "disirable", entonces la respuesta de la salida de la medición debería ser idéntica a la primer orden del filtro de pasa bajos con una constante de tiempo de $1.5 \pm 0.15s$.

Ancho de Banda. El ancho de banda del instrumento afectará fuertemente la lectura especialmente cuando los armónicos estén fluctuando. Es recomendado que los instrumentos con un ancho de banda constante para un rango entero de frecuencias sea el utilizado. El ancho de banda debería estar $3 \pm 0.5Hz$ entre los -

3dB puntos con un mínimo de atenuación de 40dB y en una frecuencia de 15Hz. En situación en las cuales los interarmonicos y los transitorios están presentes, un ancho de banda grande puede causar un error extremadamente grande.

Equipo de medición

El equipo de medición de THD debe contar con las siguientes características:

- Medir como mínimo la armónica 25 (1500 Hz)

4.3. PUNTOS DE MEDICIÓN

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 de ser en:

- Mediciones de las corrientes de fase y neutro (en nuestro caso este será el utilizado)
- Mediciones de los voltajes de fase.

El lugar de las mediciones deberá de hacerse de acuerdo al sistema, como se muestra a continuación.

Sistemas de distribución

Para los sistemas de distribución es importante hacer las mediciones en:

- Las subestaciones
- Los alimentadores

La importancia de la medición es hacerlas primeramente en el secundario del transformador principal, de tal manera que si se tiene un contenido apreciable de armónicas, se prosigue a identificar la procedencia mediante la medición y discriminación de alimentadores.

Sistemas industriales

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

- Punto de conexión con los sistemas
- Nodos internos de la planta
- Cargas no lineales

- Bancos de capacitores

Es de vital importancia saber identificar a las cargas que generan armónicas, pues en las mayorías de los casos estas mediciones son utilizadas por el software de propagación de armónicas para realizar una serie de estudios.

La medición de la corriente en los bancos de capacitores da un indicativo claro de problemas de resonancia.

Es importante hacer mención de que una vez que se han observado problemas de resonancia mediante la medición en los bancos de capacitores. Es necesario hacer una vez más una serie de mediciones en la planta, pero ahora teniendo todos los bancos de capacitores fuera de operación, esto se hace con el fin de conocer la trayectoria natural de las armónicas en un sistema puramente inductivo. Claro esta que en ciertos casos resulta inadmisibile sacar los bancos de capacitores de operación, pero es lo recomendable. También es importante hacer la medición a diferentes periodos del día, pues en muchos de los casos las plantas presentan una operación muy distinta durante el día.

5. PROTOTIPO DE MEDIDOR DE THD

Para implementar el medidor de THD fue necesario cubrir varias etapas, en las cuales se pretendía definir cuales eran los valores que se debían esperar a la hora de implementar el algoritmo en un DSP.

Lo primero que se hizo, fue tomar datos de tensión de la red eléctrica y analizar su espectro en Matlab. Se calculó el factor de calidad a partir de las componentes de frecuencia. El siguiente paso fue la implementación de un voltímetro en el DSP y la última etapa fue la implementación del algoritmo de FFT y de THD en el DSP.

5.1. TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS DE LA RED ELÉCTRICA.

En esta etapa con ayuda de la tarjeta adquisición de datos PCI-6123 de *National Instruments* y el análisis se realizó en Matlab.

El proceso de toma de muestras consistió en conectar un transformador reductor a la red de 110V y adecuar los niveles de tensión a los permitidos en la tarjeta de adquisición. Como resultado de esto se logró obtener tensiones entre -10V y +10V.

Se configuro la toma de muestras con las siguientes características, 10.000 muestras a 10kHz. El conjunto de valores obtenidos se almacenos en una variables de Matlab [*armone.mat*], con la cual se realizaron las pruebas preliminares.

Ya con los datos almacenados, el proceso consistió en el cálculo de la FFT y la implementación del algoritmo para determinar el THD. La función empleada se llama [*THD.mat*] el cual se encuentra en la sección de anexos. A partir de los resultados encontrados se pudo determinar el número de muestras necesarias para obtener el factor de calidad. Los resultados fueron los siguientes:

Número de Muestras	Valor THD
10.000	3,89%
1.000	3,90%
100	3,92%
16	4,86%

Considerando el valor de THD obtenido con la totalidad de las muestras, el porcentaje de error al tomar menos muestras es el siguiente:

Número de Muestras	% de error
10.000	-
1.000	0,26%
100	0,77%
16	25,7%

Los resultados son contundentes, si se toma un número de muestras submúltiplo del número de muestras, el porcentaje de error permanece por de abajo del 1%, lo cual es aceptable para los cálculos. El error se torna grande, 25% cuando no se toma un número de muestras diferente a un submúltiplo.

5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE THD EN EL DSP.

De acuerdo con los resultado obtenidos del análisis realizado con Matlab y en concordancia con los objetivos del proyecto que se definieron las características que debe cumplir el algoritmo para el determinación del THD, el cual debe calcular hasta el 31° armónico de la señal de voltaje de la red eléctrica.

Debe tomar las muestras a una frecuencia de 3,84kHz. El valor se justifica a partir del valor frecuencia que se desea tener en cuenta, que en este caso es el armónico 32, el cual es el armónico potencia de dos más próximo.

$$f_{\text{muestreo}} = 2 \cdot N_{\text{armónico}} \cdot f_{\text{fundamental}}$$

$$f_{\text{muestreo}} = 2 \cdot 32 \cdot 60 = 3.840$$

De calcular la FFT con 64 muestras. Con ello podemos obtener el valor de energía de la fundamental hasta el del 31avo armónico.

Lo primero que se realizó fue la toma de los valores, luego el calculo de FFT, seguido por el calculo del THD y finaliza con el despliegue de los resultados en un LCD.

En la primera etapa se utilizaron dos módulo del DSP, el conversor Análogo / Digital y Temporizador Programable. El conversor se configuró para que tomara muestras continuas del canal 0 del puerto ADA a la máxima velocidad, la cual es de 1,7useg. Por otro lado, se uso el TIMER1 para que a una frecuencia de

3.840Hz almacenara la última muestra tomada del conversor en un buffer de 356 posiciones.

El siguiente paso fue configurar el cálculo de la FFT y del THD, esto se logró gracias al uso de la librería < DFR1.c >, primero se inicializa la función de FFT, luego se le entregan los datos para que realice los cálculos de las componentes de frecuencia, luego se calculan las magnitudes y por último se aplica la formula para el cálculo del THD.

```
dfr16RFFFTInit(pRFFFT, 64, options);  
res = dfr16RFFFT (pRFFFT, (Frac16 *) &AdcBuffer[AdcReadIndex], (dfr16_sInplaceCRFFT *) &FFFTInplaceBuf[0]);
```

Por último se despliega el valor usando una pantalla de cristal líquido, el módulo GPIOB y el TIMER2 del DSP. El valor desplegado es un valor promediado, en donde se calculan cinco valores, el cual se despliega cada segundo.

6. PLAN DE NEGOCIOS

6.1. RESUMEN EJECUTIVO

En el 2007 seremos reconocidos empresarialmente como un ente económico, con una alta confiabilidad y capacidad en la parte social y económica, con lazos muy fuertes con los sectores internacionales y promoviendo un desarrollo innovador en el mundo.

Nos proyectaremos como una empresa líder, actuando en los diversos procesos de nuestro entorno como la cultura ciudadana.

Analizaremos detalladamente el entorno para determinar el control de calidad en los campos de creación, diseño y además cuidaremos los riesgos urbanos y no urbanos, para apoyar la responsabilidad social que nos corresponde como empresarios.

Construiremos un desarrollo empresarial en los campos investigativos e importantes para nuestra sociedad con el fin de motivar la educación y el crecimiento de Colombia.

Consolidaremos una alianza con los sectores públicos y privados con el fin de generar un aprendizaje significativo contribuyendo a observar nuestras ventajas competitivas.

Nuestra idea de negocio genera la posibilidad de crear una empresa de siete a diez empleados lo cual generará un ahorro en los costes entre un 10% y 14% y un coste interno de 5% a 9%. Los diversos esquemas estadísticos nos han brindado la posibilidad de poder conocer el margen potencial de inversión que se encuentra en un rango de un 20% a 25%.

Nuestro canal de publicidad se hará a través de medios de comunicación como revistas especializadas y los e-bussines, por medio los cuales pretendemos dar a conocer una idea objetiva y concreta del negocio. Su distribución se hará de forma directa, sin intermediarios y en una producción corta con el fin de reducir costos.

Para dar una idea más clara acerca de los costos de inversión, sacamos un análisis por medio de procedimientos matemáticos como modulación y automatización, para finalmente concluir que los gastos son los siguientes:

- Adquisición de Equipos: US \$ 900
- Desarrollo de Producto: US \$ 600
- Control de Calidad: US \$ 30

- Mejoramiento:

	US \$	100
TOTAL	US \$	1630

6.2. LA IDEA DEL NEGOCIO

La energía eléctrica corresponde a una de las necesidades mas importantes de los seres humanos.

Nuestro producto será un Medidor de Distorsión total que resolverá los inconvenientes de eficiencia y calidad de la red eléctrica, ya que estas son las principales causas del deterioro o daño de aparatos eléctricos.

El mercado de este producto corresponde a los clientes de las centrales eléctricas más exactamente a los del sector industrial que son los que necesitan comprobar en que estado se encuentra su red eléctrica y en que estado la están devolviendo para no ahorrar en los costes de producción.

La forma de recuperar la inversión se dará de tres maneras:

- Venta del producto
- Mantenimiento del producto
- Soporte técnico

6.3. BIEN QUE SE VA A PRODUCIR

Se diseñará un sistema autónomo (Redes neuronales) capaz de medir la distorsión armónica total que consta de:

- Tarjeta de adquisición de datos
- Digital Signal Processor (56F807)

6.4. FACTORES FUNDAMENTALES DE DIFERENCIACION

Este es un producto innovador por lo que no existe competencia directa en el mercado, entre sus ventajas podemos mencionar que el cliente podrá determinar en que estado se encuentra la red eléctrica.

Como Empresa generadora de energía le permitirá la reducción del personal y le facilitara la optimización de la energía eléctrica y la comprobación del estado actual de ella, por medio de lo cual aumentará la producción por los factores antes mencionados y disminuirá los costes de éste.

6.5. EQUIPO Y ORGANIZACIÓN

El equipo es tan importante como la idea y por eso va a estar conformado por personas que se complementen, que provengan de diferentes disciplinas.

Por otra parte el equipo debe conocer el negocio y estar comprometido con él, además de estar dispuesto a aceptar asesorías que permitan corregir sus debilidades. El personal estará conformado por:

- Inversor
- Ingeniero de Sistemas (Encargado de la programación del DSP)
- Ingeniero Electrónico (Determinará la utilización de los chips que se utilizarán)
- Ingeniero Industrial (Analizará las relaciones entre inversión y costes de producción de la empresa)
- Ingeniero Mecatrónico (Será el encargado del proyecto, porque conoce todos los campos relacionados con la tecnología del producto)
- Secretaría Especializada (Ayudará con la correspondencia y otras labores como recepcionista entre otros.)
- Contador (Se encargará de registrar todos los procesos contables)
- Economista (Seleccionará los diferentes mercados para la distribución del producto)
- Comunicadora Social (Manejará los medios de comunicación para lograr una buena publicidad y el posicionamiento en el mercado)

El capital de la empresa será representado por diez mil acciones, las cuales serán distribuidas de la siguiente manera:

- Inversor: Tres mil acciones
- Ingeniero Mecatrónico: Mil quinientas acciones
- Ingeniero de Sistemas: Mil acciones
- Ingeniero Electrónico: Mil acciones
- Ingeniero Industrial: Mil quinientas acciones
- Contador: Quinientas acciones
- Secretaría Especializada: Quinientas acciones
- Economista: Quinientas acciones
- Comunicadora Social: Quinientas acciones

Todas las actividades las realizará la empresa y en caso de aliarse se hará con la aceptación de todos los socios, exceptuando:

- Servicio de correspondencia
- Puertos
- Empresas de marketing

Porque estas reducirán los costes de la empresa y ayudarán a la expansión de esta y como ventaja para ellos se haría exclusividad de servicio.

6.6. ANALISIS DEL MERCADO

Poseemos un mercado alentador porque el producto es innovador (único) y los clientes y proveedores querrán reducir costes, aumentar y mejorar los procesos productivos.

El mercado alimenticio crece muy rápido y como vemos en el mercado no tenemos competencia para este producto, lo cual nos revela una oportunidad.

Los clientes potenciales son los accionistas, propietarios o en su defecto administradores de centrales eléctricas o consumidores de energía.

Los proveedores que se utilizaran para la fabricación del producto es Motorota.

6.7. PLAN DE MERCADEO

Poseemos un mercado alentador por que el producto es innovador (único) y los accionistas de las centrales eléctricas o consumidores de energía querrán reducir costes para aumentar producción.

1. EVALUACION DEL MERCADO OBJETIVO

1.1. OPORTUNIDADES

- Carencia de productos mecatronicos integrales en el mercado .
- Compradores buscando reducción en costes y mayor producción.
- Consumidores buscando servicios de consumo rápido, práctico, eficiente y eficaz y de gran calidad.
- Reemplazo de empleados convencionales (Cuadrillas de control de calidad) por Medidores internos de THD.
- La estructura de la compañía está bien consolidada, esto hace que tengan buenos proveedores y buenos canales de distribución, lo que les da la ventaja de darse a conocer con mayor facilidad, sin complicaciones y seguros de que alcanzaran el éxito propuesto.

1.2. SEGMENTACION DEL MERCADO

El mercado en general está constituido por todos aquellos empresas de alta categoría que buscan una alternativa de sistematización de su negocio, facilitándole y agilizando el servicio al cliente o al proveedor.

- GEOGRAFICOS: Ciudades capitales, y principales centros urbanos del país.

Pero inicialmente en Cartagena

- **SICOGRAFICO:** exclusivos y de alta calidad,
Rompen esquemas, personas de mente abierta o abiertas al cambio
Lideran procesos
- **CONDUCTAL:** Beneficio Percibido: Buen servicio y satisfacción del cliente.

2.3. CARACTERISTICAS DEL CONSUMIDOR

- Le gusta comprar productos de calidad
- Son exigentes con los productos y asocian la marca como un producto que debe cumplir con sus expectativas por lo que muchas veces son inestables respecto a la lealtad de marca.

6.7. PLAN COMERCIAL

Debido al crecimiento a gran escala que ha tenido la industria, esta generara igualmente gran demanda de nuestro producto, además no podemos ignorar que seremos los únicos productores de esta clase de producto.

Medios de publicidad:

1. Eventos Electrónicos
2. Congresos
3. Revistas especializadas
4. Pagina Web
5. Rueda de negocios

Herramientas o piezas:

Pendones
Tarjeta de presentación
Catálogo o broshure
Montaje del producto funcionando para demostración
Vendedores técnicos

Imagen corporativa:

Este logo es vertical, representa y expresa : solidez, desarrollo y movimiento.

Los colores negro y azul resaltan poder, rigidez y mejoramiento continuo

Plan tecnológico

Se va a crear un proceso de modelación y optimización que permita la creación, desarrollo y funcionamiento de nuestro producto.

Este producto se realiza a partir de un software de programación, MetroWerks que es un sistema el cual permite una ejecución del funcionamiento del producto y por ultimo la Creación de un programa que haga muestreo la distorsión armónica total de producción para finalmente crear un sistema integral digital de fácil manejo para todo tipo de cliente o proveedor.

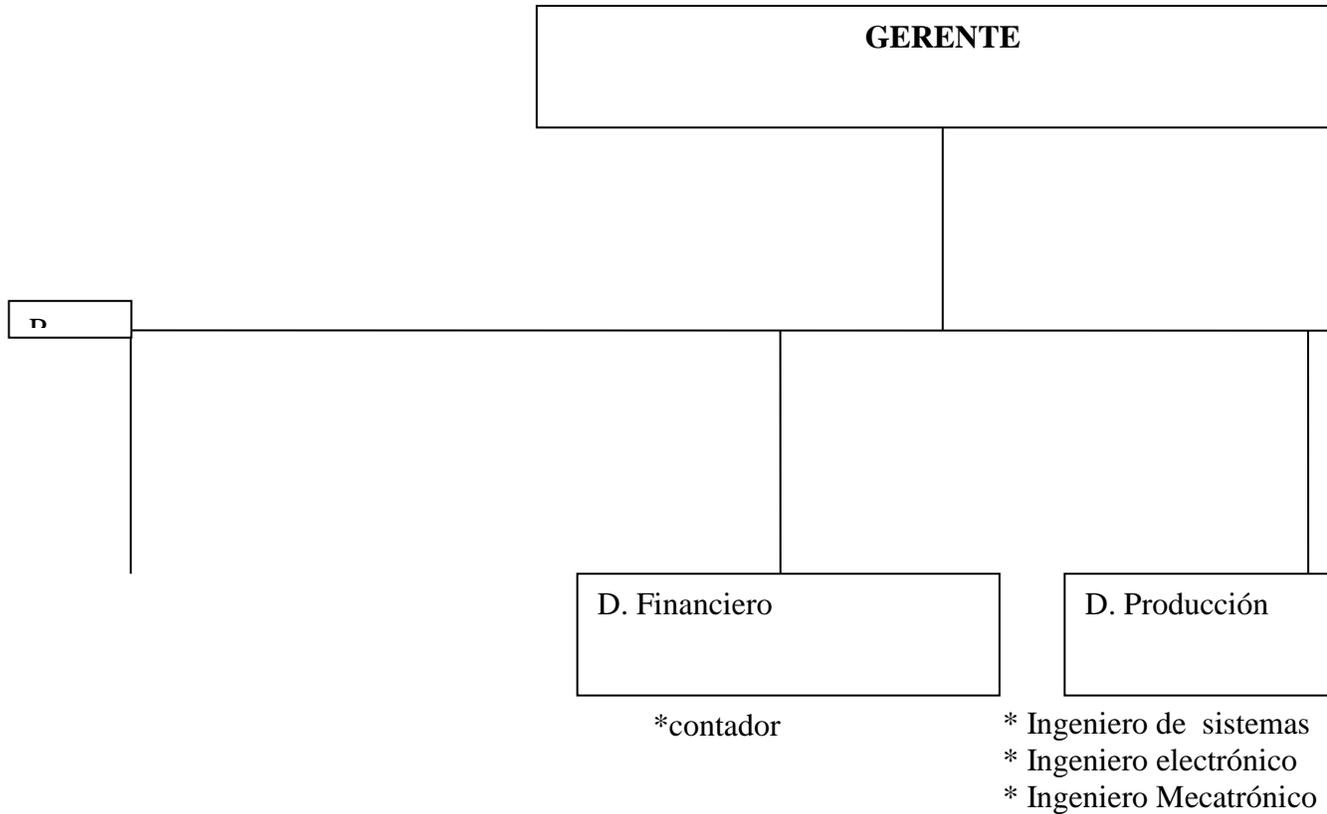
6.8. PLAN DE PRODUCCIÓN

Proveedores y subcontratistas:
Motorola y Micro Chip,
Papeleria Jonan, Toro

Cronograma de producción.

Idea	Fase1	Fase2	Fase3	Fase4
DSP	Creación de un sistema	Tes. de rendimiento	Diseño de instrucciones	Mejoramiento del programa
Obtención	Cables integrados	Desarrollo	Prueba	Automatización
Programación	Tarjeta de video	Compilación	Mejoramiento	utilización

ORGANIGRAMA



Perfiles y posibles salarios

1. Ingeniero de Sistemas2000 dólares
2. Ingeniero Electrónico.....1500 dólares
3. Secretaria Especializada.....500 dólares
4. Contador.....1000 dólares
5. Ingeniero Industrial.....1000 dólares
6. Economista.....1500 dólares
7. Ingeniero Mecatrónico.....2000 dólares
8. Comunicadora Social.....1000 dólares

6.9. PLAN DE INVERSION.

Modelo económico.

Nuestra empresa maneja su departamento financiero, a través de un contador quien organizara la información contable que la empresa necesita para controlar el proceso de la misma. Utilizando para este proceso, la elaboración de balances, estados de resultados y estados de tesorería.

Debido a que nuestra empresa no cuenta con cifras históricas trabajaremos bajo proyecciones.

Análisis Económico

Adquisición de Equipos	Desarrollo de producto	Control de Calidad	Mejoramiento	Total
US \$ 900	US \$ 600	US \$ 30	US \$ 100	US \$ 1530

➤ Política de Cartera Cliente

Circuitos Digitales S.A., adoptara como política de cartera que una vez sus clientes tomen la decisión de acceder al producto, cancelen el valor del mismo de contado o en su defecto en los siete días el los que se este entregado el producto.

➤ Política de cartera de proveedores

Ya que los clientes de Circuitos Digitales S.A. pagaran el producto de contado, la empresa también adoptara esta política para sus proveedores la cual permitirá acceder a descuentos que disminuyan costos en la elaboración del producto.

➤ Fijación del precio(dólares)

Costos por unidad	VALOR
Mano de Obra	330
Insumos	120
Proveedores	330
Gastos Administrativos	210
Subtotal	990
Margen de Utilidad (30%)	297

Distribucion	145
Costo de Venta	1432
Comisión distribuidor (19.9%)	286
Precio de Venta	1718

6.10. DIAGRAMAS DE RIESGO.

Artículo I. Artículo II. RIESGO	FASE 1 SUCESO/	Creación del producto	Desarrollo Empresarial
Fallo de instrumentos de diseño		P = BAJA I = ALTA	P = BAJA I = ALTA
Retroceso de estructuración administrativa		P = BAJA I = MEDIO	P = BAJO I = ALTO

Artículo III. Artículo IV. RIESGO	FASE 2 SUCESO/	Venta del producto	Mantenimiento del producto
Fallo de marketing		P = MEDIO I = ALTA	P = BAJA I = ALTA
Desorden de planeación de mantenimiento		P = BAJA I = ALTO	P = BAJO I = ALTO

Artículo V. Artículo VI. RIESGO	FASE 3 SUCESO/	Producción de la carta electrónica	Soporte técnico
Fallo Diseño		P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = ALTA
Caída en el control de calidad		P = BAJA I = BAJO	P = BAJO I = ALTO

Artículo VII. Artículo VIII.	FASE 4 SUCESO/ RIESGO	Innovación de producto	Mercado volátil
Interés de compra		P = ALTA I = BAJO	P = BAJA I = MEDIO
Gastos de funcionamiento		P = MEDIO I = BAJO	P = MEDIO I = ALTO

Artículo IX. Artículo X.	FASE 5 SUCESO/ RIESGO	Personal calificado	Gastos de sostenimiento
Escasez de mano de obra		P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = BAJO
Incremento del dólar		P = BAJA I = BAJO	P = BAJO I = ALTO

Artículo XI. Artículo XII.	FASE 6 SUCESO/ RIESGO	Mercado	Solución Calidad de vida
Competencia en el mercado		P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = MEDIO
Interés en el mercado		P = ALTO I = BAJO	P = MEDIO I = ALTO

Artículo XIII. Artículo XIV.	FASE 7 SUCESO/ RIESGO	Oportunidades globales	Organización de los planes de mercadeo
Desestabilización internacional		P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = BAJO
Deficiencia en la ejecución de planes		P = BAJO I = BAJO	P = MEDIO I = ALTO

Artículo XV. Artículo XVI.	FASE 8 SUCESO/ RIESGO	Medios de prensa	Dirección Clientes potenciales
Mala publicidad	P = BAJO I = ALTA	P = BAJA I = MEDIO	
Desgaste de los proveedores	P = ALTO I = BAJO	P = BAJO I = ALTO	

Artículo XVII. Artículo XVIII.	FASE 9 SUCESO/ RIESGO	Representación del logo	Factores diferenciales
Incompetencia de diseño	P = MEDIO I = ALTA	P = BAJA I = MEDIO	
Escasez de factores diferenciales	P = BAJO I = BAJO	P = BAJO I = ALTO	

Artículo XIX. Artículo XX.	FASE 10 SUCESO/ RIESGO	Desarrollo de cronograma de producciones	Utilización estructural
Incremento de gasto	P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = MEDIA	
Perdida en su utilidad	P = BAJO I = BAJO	P = BAJO I = ALTO	

Artículo XXI. Artículo XXII.	FASE 11 SUCESO/ RIESGO	Capitalización de inversión	Ejecución de inversiones
Incremento en recolección de información	P = ALTA I = ALTA	P = BAJA I = MEDIO	
Determinación de posibles perdidas	P = BAJO I = BAJO	P = BAJO I = ALTO	

7. CONCLUSIONES

7.1. RESULTADOS

El primer resultado obtenido se deduce a partir de los datos obtenidos del análisis realizado con ayuda de Matlab, en el cual “a mayor número de muestras menor es el porcentaje de error de THD”. Si no se tiene cuidado con la selección de la frecuencia de muestreo y el número de muestras a analizar, el error crece.

Las medidas realizadas a señales provenientes de un generador de señales muestran valores de THD² del orden de 0,0 y 0,1 sin señal. Para señales senoidales, el THD² varía entre 2,0 y 4,0, lo que equivale a 1,41% y 2,00%, lo que es normal para señales obtenidas a partir de un generador, principalmente debido a que la señal es conformada a partir de circuitos digitales. Para señales triangulares las medidas se asemejan a los valores obtenidos con señales senoidales. Para señales cuadradas los valores son mayores al 25%, que son los valores esperados.

7.2. CONCLUSIONES

La hipótesis inicial fue demostrada, si es posible implementar un medidor de THD monofásico que se ajuste al estándar IEEE 519 de 1992 usando un DSP56F807 de Motorola.

Los criterios de calidad indican que la red no puede tener niveles de THD mayores del 5%, ya que a partir de ese valor los efectos negativos de los armónicos afectan tanto los equipos de transmisión de energía, como los equipos de los usuarios. El

tener un medidor portátil, nos permitirá tener un control de la calidad de la energía en nuestros sitios de trabajo.

La implementación de la FFT en el DSP se facilitó enormemente gracias al uso de una librería propia del sistema de desarrollo de Code Warrior, el Processor Expert. La librería se trabaja en formato Fraccional, y requiere un número potencia de dos muestras para su cálculo, y él entrega los valores (real e imaginario) de las componentes en frecuencia.

Para el cálculo del factor de calidad, THD, solo se hace necesario calcular la magnitud al cuadrado de las componentes de frecuencia a partir de sus valores complejos y realizar la suma de los armónicos y dividirlo por la magnitud de la fundamental.

8. RECOMENDACIONES

Para el diseño de un medidor de THD se puede tener en cuenta algunas recomendaciones:

1. Homologar el instrumento ante la Comisión Nacional de Energía con el objeto de poder usarlo y a partir de las tomadas tomar acciones al respecto.
2. Tener la opción de calcular la medida del THD a partir de la corriente, pues el modelo usado lo hace usando la tensión.
3. Construir con prototipo basado en un DSP más pequeño, como el DSP565F801, pues los resultados en cuanto al tamaño de código y los módulos empleados en el DSP56F507 permiten hacer esa afirmación.
4. En cuanto a la presentación de los datos, se pueden enviar los datos, vía serial, de las componentes de frecuencia, con el objeto de poder tener más información acerca de los armónicos presentes.

9. REFERENCIAS

I. BIBLIOGRAFIA

- [1] CAHIERS TECHNIQUES, N°152, HARMONIC IN INDUSTRIAL NETWORKS. MERLIN GERIN. GROUPE SCHNEIDER.
- [2] CUADERNO TÉCNICO N° 152, LOS ARMÓNICOS EN LAS REDES PERTURBADAS Y SU TRATAMIENTO. SCHNEIDER ELECTRIC.
- [3] CUADERNO TÉCNICO N° 183, ARMÓNICOS: RECTIFICADORES Y COMPENSADORES ACTIVOS. SCHNEIDER ELECTRIC.
- [4] INFORMACIÓN TÉCNICA, GENERALIDADES SOBRE ARMÓNICOS, CD SCHNEIDER ELECTRIC, 1998.
- [5] HARMONIC CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS (IEEE STD. 519 1992), TECHNICAL DOCUMENT, ROBICON.
- [6] ENERGÍA ELECTRICA, UN PRODUCTO CON CALIDAD, CEL. HORACIO TORRES. ICONTEC.
- [7] COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS CONTAMINADOS CON ARMÓNICOS, TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA. UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS. SANTA CLARA. 1998. ING. JOSÉ ÁNGEL GONZÁLEZ QUINTERO.
- [8] FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA, SOPORTE CIENTÍFICO TÉCNICO, BOLETÍN NO. 4, AÑO I/99 BY AWD. FARAGAUSS.
- [9] IEEE Recommended practices and requirements for harmonic controls in electrical power system Standard 519 revised in 1992.
- [10] IEEE STD 518-1982(REAFF A992), IEEE Guide for the installation of Electrical Equipment to Minimize Noise Inputs to Controllers from External Sources (ANSI).
- [11] J. Driesen, G. Deconinck, J. Van Den Keybus, K. De Brabandere, K. Vanthournout, R. Belmans. Development of a Measurement System for Power Quantities in Electrical Energy Distribution Systems. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage, AK, USA, 21 – 23 de Mayo de 2002.
- [12] Ball, W. C. and Poarch, C. K. "Telephone Influence Factor and Its Measurement," AIEE Transactions on Communication and Electronics, vol. 79, Jan 1961, pp 659-664

II. ENLACE

a. PORTAL

www.eps-az.com/

www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/ef5.html

www.accusine.com/

www.onsemi.com/site/apps/taxonomy/0,4459,510,00.html

b. INVESTIGADORES

www.diyaudio.com/forums/showthread/t-54840.html

www.planetee.com/Forums/categories.cfm?catid=2

www.forums.di.fm/showthread.php?t=84254

www.freescale.com

10_ANEXOS

ANEXO 1. FUNCIÓN DE MATLAB PARA EL CÁLCULO DEL THD

```
clear all;
close all;
clc;
load armone; % 10000 muestras a

DATOS=abs(fft(datos));
DATOSLOG10=log10(DATOS);
figure, stem(DATOSLOG10)

m=1;
for k=601:600:length(DATOS)/2
    valor(m)=DATOS(k);
    m=m+1;
end

tdh= sqrt(sum(valor(:,2:end).^2)/valor(1).^2)*100;

% con menos datos /10
datos = datos(1:1000,:); % Primeras 1200 muestras
DATOS=abs(fft(datos));
DATOSLOG10=log10(DATOS);
figure, stem(DATOSLOG10)

m=1;
```

```

for k=61:60:length(DATOS)/2
    valor(m)=DATOS(k);
    m=m+1;
end

tdh= sqrt(sum(valor(:,2:end).^2)/valor(1).^2)*100;

% con menos datos /1000
datos = datos(1:100,:); % Primeras 120 muestras
DATOS=abs(fft(datos));
DATOSLOG10=log10(DATOS);
figure, stem(DATOSLOG10)

m=1;
for k=7:6:length(DATOS)/2
    valor(m)=DATOS(k);
    m=m+1;
end

tdh= sqrt(sum(valor(:,2:end).^2)/valor(1).^2)*100;

% con menos datos /6000
datos = datos(1:100/6,:); % Primeras 20 muestras
DATOS=abs(fft(datos));
DATOSLOG10=log10(DATOS);
figure, stem(DATOSLOG10)

m=1;
for k=2:1:length(DATOS)/2

```

```
valor(m)=DATOS(k);  
m=m+1;  
end  
  
tdh= sqrt(sum(valor(:,2:end).^2)/valor(1).^2)*100;
```

ANEXO 2. ARCHIVOS [thd.c] y [events.c]

```
/* Archivo thd.c */
```

```
#include "Cpu.h"  
#include "Events.h"  
#include "AD1.h"  
#include "TI1.h"  
#include "TI2.h"  
#include "DFR1.h"  
#include "MEM1.h"  
#include "PE_Types.h"  
#include "PE_Error.h"  
#include "PE_Const.h"  
#include "IO_Map.h"  
#include <stdio.h>
```

```
/* Archivos */
```

```
#include "lcd.h"
```

```
/* Variables */
```

```
#define MAX_RFFT_LEN 64  
#define ADC_MAX_BUFFER_SIZE MAX_RFFT_LEN*4  
UWord16 AdcBuffer[ADC_MAX_BUFFER_SIZE];  
int AdcWriteIndex = 0;  
int AdcReadIndex = 0;  
CFrac16 FFTInplaceBuf[MAX_RFFT_LEN/2];  
float Valor;
```

```
/* Funciones */
```

```
void retardo(void);
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    dfr16_tRFFTStruct RFFT;
```

```
    dfr16_tRFFTStruct *pRFFT = &RFFT;
```

```
    unsigned int options = FFT_SCALE_RESULTS_BY_N;
```

```
    int res;
```

```
    unsigned int PerformFFT = false;
```

```
    unsigned int i;
```

```
    unsigned long Temp1,Temp3;
```

```
    unsigned long Temp2[MAX_RFFT_LEN/2];
```

```
    float Valor5;
```

```
    float THD;
```

```
    lcd_inicializacion();
```

```
    lcd_print1("Uni.Tec. Bolivar");
```

```
    lcd_print2("Ing. Mecatronica");
```

```
    retardo();
```

```
    lcd_print1(" MEDIDOR DE THD ");
```

```
    lcd_print2(" Prototipo 2005 ");
```

```
    retardo();
```

```
    lcd_print1("Autor:      ");
```

```
    lcd_print2("Orlando Bayter F");
```

```
    retardo();
```

```

lcd_print1("Director:   ");
lcd_print2("Juan Martinez S.");
retardo();

lcd_clear();
PE_low_level_init();

AD1_Start();
dfr16RFFTInit(pRFFT, 64, options);

for(;;)
{
    if (AdcReadIndex > AdcWriteIndex)
    {
        PerformFFT = true;
    }
    else if (AdcReadIndex <= (int) (AdcWriteIndex-MAX_RFFT_LEN))
    {
        PerformFFT = true;
    }
    if (PerformFFT == true)
    {
        res = dfr16RFFT (pRFFT, (Frac16 *)
&AdcBuffer[AdcReadIndex], (dfr16_slplaceCRFFT *) &FFTInplaceBuf[0]);

        if (res == FAIL)
        {
            printf("ERROR EN LA FFT");
            while(1)

```

```

        {

        }
    }

for(i=0; i<=(MAX_RFFT_LEN/2)-1; i++)
{
    Temp1 = abs_s(FFTInplaceBuf[i].real);
    Temp1 = Temp1*Temp1;
    Temp2[i] = abs_s(FFTInplaceBuf[i].imag);
    Temp2[i] = (Temp2[i]*Temp2[i]) + Temp1;
}

Temp3=0;
for(i=1; i<(MAX_RFFT_LEN/2)-1; i=i+2)
{
    Temp3=Temp2[i]+Temp3;
}

Valor5 = (float)Temp3;
Valor5 = Valor5/Temp2[0];
THD = Valor5*10000;
Valor = THD;

AdcReadIndex = AdcReadIndex + MAX_RFFT_LEN;

if (AdcReadIndex >= ADC_MAX_BUFFER_SIZE)
{
    AdcReadIndex = 0;
}

```

```

        }

        PerformFFT = false;
    }
}

/* END thd.c */

void print_valor(float medida)
{
    char dest[20];

    sprintf(dest, "THD^2 es: %5.1f \n", medida);
    lcd_print1(dest);
}

void retardo(void)
{
    unsigned int i,j,k;
    for(i=0;i<255;i++)
    {
        for(j=0;j<255;j++)
        {
            for(k=0;k<255;k++)
            {

```

```
    }  
  }  
}
```

```
/* Archivo events.c */
```

```
#include "Cpu.h"  
#include "Events.h"  
#include "AD1.h"  
#include "lcd.h"
```

```
#define MAX_RFFT_LEN 64  
#define ADC_MAX_BUFFER_SIZE MAX_RFFT_LEN*4  
extern UWord16 AdcBuffer[ADC_MAX_BUFFER_SIZE];  
extern int AdcWriteIndex;  
extern float Valor;  
float prom=0;  
int i;
```

```
#pragma interrupt called  
void TI1_OnInterrupt(void)  
{  
    byte err;  
    word medida;  
    int indice=0;
```

```

UWord16 BUFFER[ADC_MAX_BUFFER_SIZE];

err = AD1_GetValue16(&medida);
indice = AdcWriteIndex;
BUFFER[indice] = medida;
AdcBuffer[AdcWriteIndex] = medida;
AdcWriteIndex++;

if (AdcWriteIndex >= ADC_MAX_BUFFER_SIZE)
{
    AdcWriteIndex = 0;
}
}

#pragma interrupt called
void TI2_OnInterrupt(void)
{
    if(i == 5)
    {
        prom = prom/5;
        print_valor(prom);
        prom = 0;
        i = 0;
    }
    prom = Valor + prom;
    i++;
}

```

ANEXO 3. RECOMENDACIONES PARA DISMINUIR EL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS.

Usualmente la solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que nos queda es reducir los síntomas ya sea incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado.

Un aspecto que con frecuencia es mal evaluado, es que los armónicos han sido un problema reciente debido al efecto de adición y multiplicación de los mismos, la presencia de estos efectos es lo que causa problemas, individualmente ninguno es problemático por sí mismo. Por ejemplo, la distorsión armónica causada por un motor de inducción, que se usa para hacer circular aire para uso agrícola, puede haber sido tolerado por muchos años, pero inesperadamente causa problemas de *flicker* porque el conductor neutro se abrió. Es común en el caso de severos problemas de armónicas, que se ligen dos o más factores que contribuyan a agravar el problema, particularmente cuando se adiciona equipo nuevo o que existen cambios de equipo, siendo la sospecha del problema los nuevos equipos. Cuando se presentan causas simultáneas que generan altos niveles de armónicas, usualmente sólo una es la mayor causa del problema, contribuyendo las otras causas a crear resonancia o a ayudar en su propagación.

El primer paso que se recomienda en cualquier investigación sobre el problema de armónicas es inspeccionar el equipo y el circuito eléctrico. Estos problemas son causados o empeorados por cargas desbalanceadas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor neutro, por problemas con equipo o por uso inapropiado. Esto puede ser identificado con una inspección cuidadosa con equipo apropiado.

Desde el punto de vista de sobretensiones transitorias y armónicas, disminuyendo la impedancia a tierra e incrementando la impedancia del neutro con frecuencia se resuelven problemas de calidad de la potencia (incluyendo armónicas). Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% de los problemas relacionados con la calidad de energía [9].

En [9] se hace referencias a algunos aspectos importantes relacionados con la utilización de los filtros. Los filtros se utilizan para bloquear o atrapar la energía de

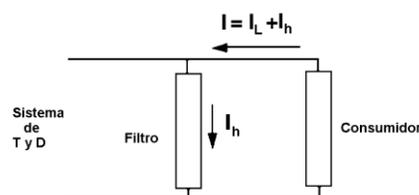
los armónicos de tal manera que no fluya por los equipos o que no entre al sistema, son las dos soluciones más usadas para el problema de las armónicas.

Los filtros son elementos cuya impedancia varía con la frecuencia. También tienen el potencial de crear y amplificar el problema de las armónicas, a menos que cuidadosamente sean localizados y diseñados, en algunos casos un diagnóstico y diseño pobres, origina que el remedio sea peor que la enfermedad.

Los filtros pasivos son los más simples, más económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicos. Son elementos puramente pasivos, usados por las empresas como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con problemas de generación de armónicas, evitando de esta manera que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicas, evitando de esta manera que circulen en la propia instalación eléctrica del usuario.

El comportamiento de los filtros pasivos es ser sensitivos a la impedancia del sistema para los cuales ellos fueron ajustados. La impedancia del sistema puede cambiar a lo largo del tiempo, como el equipo altera su comportamiento de voltios/VAR, siendo difícil estimar su exactitud si no se tienen mediciones. Los filtros pasivos con frecuencia no proporcionan un comportamiento satisfactorio, bajo ciertas circunstancias pueden causar problemas de resonancia sobre el sistema donde están conectados.

Filtros activos, son elementos de potencia, los cuales trabajan usando un convertidor de potencia conectado en paralelo para producir corrientes armónicas iguales a las que se encuentran en la corriente de carga, asegurando que su trayectoria sea la de sacar las corrientes armónicas fuera de la trayectoria del sistema de distribución (figura 7). La reducción de las armónicas depende sólo de la medición armónica correcta que se está generando en la carga y no es función de la impedancia del sistema. Estos filtros han tenido una mayor aplicación, teniendo la desventaja de ser más caros y de que consumen potencia en cantidades significativas, creando además niveles altos de interferencia



electromagnética.

Figura 7 [9] - Los filtros son usualmente aplicados como un camino en paralelo con el usuario o con el equipo que crea armónicas, como se indica en la figura. Ambos filtros el activo y el pasivo desvían las corrientes armónicas I_h por una

trayectoria para desviarles del sistema, con esto se deja que solo la corriente de carga fluya al sistema; los filtros pasivos proporcionan una impedancia muy baja en la trayectoria en paralelo, los filtros activos originan que la corriente armónica fluya con una corriente que ellos mismos generan, esencialmente forzándola por su trayectoria.

Los filtros híbridos que usan filtros activos y pasivos son colocados en serie y en paralelo en la carga de los usuarios, se combina en este caso un comportamiento mejor con un menor costo y menor consumo de potencia.

El Código Nacional Eléctrico Americano (NEC) de 1993 y “Underwriting’s Laboratory” (UL), demandan que sean especificados transformadores de factor k para la alimentación de cargas no lineales.

En [7] se hace referencia a la utilización de transformadores tipo k para la alimentación de cargas no lineales.

Los transformadores de factor k son probados, etiquetados y listados por UL para la operación en ambiente no sinusoidal. Especificados e instalados para servir cargas no lineales de acuerdo a los requerimientos de listado y etiquetado, los transformadores de factor k satisfacen los requerimientos de seguridad del NEC. Los transformadores k son diseñados para operar con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Las modificaciones de diseño de factor k incluyen el alargamiento del devanado primario para soportar la inherente circulación de corrientes de armónicos triples; el duplicado del conductor neutro secundario para llevar corrientes de armónicos triples; el diseño del núcleo magnético con una menor densidad normal de flujo mediante el empleo de grados de aceros más altos; y el empleo de conductores secundarios aislados más pequeños, enrollados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento del efecto pelicular de la resistencia CA asociada.

Especificar los transformadores de factor k requiere de un método para calcular el valor nominal k de la corriente de carga, lo mismo desde un análisis armónico de carga real, o desde estimaciones del contenido de corrientes de armónicos. La ecuación de cálculo del factor k recomendada en [7] es:

$$k = \sum_{h=1}^{\infty} (Ih(pu))^2 \cdot h$$

Donde $Ih(pu)$ es la corriente armónica esperada en por unidad, y h es el número del armónico.

Debido a la característica inherente de que las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa balanceadas se cancelan en cualquier punto común de

conexión, estos cálculos necesitan solamente considerar las corrientes armónicas triples de secuencia cero con la magnitud de la corriente fundamental como el peor caso de factor de calentamiento no sinusoidal dentro del transformador. Cualquier magnitud de secuencia positiva y negativa resultante de los devanados de fase será recortada por la impedancia del transformador, y viajará a través del transformador sobre los conductores de fase hacia la fuente. Esta estimación aproximada del factor k basada en el entendimiento de la relación entre las componentes simétricas y las corrientes armónicas resultan en un valor nominal k del transformador más real.

La determinación de un valor k real es importante porque la especificación de un factor k más grande que el que es necesario introduce problemas de armónicos similares a la práctica del sobredimensionamiento de transformadores. Similarmente a los transformadores sobredimensionados, transformadores de factor k mayores que lo necesario para la carga tienen menores impedancias, incrementando esto la corriente de neutro a tierra e incrementando la caída de voltaje de neutro a tierra en la carga. Además, una menor impedancia del transformador resulta en una mayor permisibilidad de paso de corriente de falla a medida que una mayor corriente de la fuente de cortocircuito está en capacidad de viajar a través del transformador hacia el equipamiento de utilización. Para proteger el equipamiento corriente abajo, deben ser realizados cálculos de cortocircuito para las corrientes de falla disponibles de transformadores de valor nominal k , y los valores nominales de interrupción de las protecciones deben ser dimensionados acordeamente.

Otras consideraciones de los transformadores de factor k incluyen la especificación de la clase de aislamiento de 220°C con la restricción de rampas de temperatura de 80°C a 115°C. La menor rampa de temperatura provee de numerosos beneficios incluyendo capacidad adicional para emergencia o sobrecargas de corrientes armónicas, consumo de energía reducido con menores costos de operación y una expectativa de vida del transformador mayor, independientemente de la carga.

En [2] se recomienda utilizar inductancias antiarmónicas para proteger baterías de condensadores contra las sobrecargas armónicas. Además, entre los filtros que se recomienda en esta bibliografía se encuentran:

- El shunt resonante.
- Los filtros amortiguadores.
- Los filtros activos (se utilizan frecuentemente como complemento de los pasivos, formando así un filtro híbrido).