

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“MÉTODO DE SEPARACIÓN DE CARGAS PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE  
LOS ARMÓNICOS”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
ALDO CAMARGO FERNÁNDEZ BACA**

**PROMOCIÓN  
1996-I  
LIMA-PERÚ  
2002**

A Dios por la vida y por todo lo que ha hecho por mi.  
A mis padres por su apoyo incondicional.  
A mis hermanos por su compañía y amistad.  
A mi enamorada por su comprensión y amor.  
A mis profesores por su enseñanza.

**“MÉTODO DE SEPARACIÓN DE CARGAS PARA  
LA DETERMINACIÓN DE LA  
DIRECCIONALIDAD DE LOS ARMÓNICOS”**

## SUMARIO

El desarrollo de la tecnología ha traído consigo el aumento de la productividad de muchas empresas y naciones en el mundo. Pero como este avance tecnológico se basa en la electrónica, siendo estas cargas no lineales, ha traído problemas que antes no se presentaban en los sistemas eléctricos. Estos problemas son las perturbaciones eléctricas: armónicos, flicker, sag, swell, transitorios, etc..

Una de las mayores preocupaciones de los investigadores e ingenieros que trabajan en este campo es la ubicación del origen del(as) perturbaciones.

La presente tesis presenta algunos de los métodos existentes para determinar la ubicación del origen de los problemas de armónicos y plantea un método que permite separar la corriente armónica en dos: corriente armónica conforme y corriente armónica no-conforme. El estudio de estas dos corrientes nos indica la responsabilidad del(as) cargas que originan los problemas de armónicos. El método tiene una desventaja que es que para ángulos pequeños puede que produzca conclusiones erróneas. Por tal motivo, la adquisición de la data para el análisis con el método propuesto debe hacerse con reductores de tensión y corriente de buena precisión.

## ÍNDICE

	Página
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>ARMÓNICOS</b>	4
1.1 Series de Fourier en Sistemas Eléctricos de Potencia	5
1.1.1 Series de Fourier	5
1.1.2 Definiciones Básicas y Algunos Índices de los Armónicos	10
1.2 Niveles de Tolerancia Normalizados	20
1.2.1 Comparación de la NTCSE con otras Normas Internacionales	24
1.3 Principales Fuentes de Armónicos	26
1.3.1 Dispositivos con Interruptores Electrónicos	27
1.3.2 Dispositivos con Relación No Lineal entre la Corriente y la Tensión	27
1.4 Modelamiento y Simulación de los Armónicos	28
1.4.1 Naturaleza y Modelamiento de las Fuentes de Armónicos	29
1.4.2 Modelamiento de Redes y Cargas	32
1.4.3. Simulación de los Armónicos	36
1.5 Distribución de las Corrientes Armónicas en las Redes Eléctricas	38
1.5.1 Respuesta de los Armónicos de los Sistemas de Potencia	38
1.5.2 Aplicación en los Sistemas Eléctricos	42

## VI

1.5.3 Métodos para el Flujo de Armónicos	44
1.6 Influencias de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia	45
1.6.1 Influencia de los Armónicos en los Sistema de Protección	45
1.6.2 Influencia de los Armónicos en los Equipos Eléctricos y Electrónicos	47
1.6.3 Influencia de los Armónicos en los Capacitores	47
1.6.4 Influencia de los Armónicos en los Transformadores	47
1.6.5 Influencia de los Armónicos en los Motores	49
1.7 Soluciones a los Problemas Originados por los Armónicos	49

## **CAPITULO II**

### **METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS ARMONICOS**

2.1 El problema General: Nivel de la Emisión de Voltaje y Corriente Armónica	51
2.2 Métodos para Determinar el Origen de los Armónicos	53
2.2.1 Desconectando la Carga a Analizar	53
2.2.2 Desconectando un Elemento Shunt Auxiliar	56
2.3 Determinación de la Direccionalidad sin Desconectar Cargas	60
2.3.1 Correlación de las Mediciones de Tensión y Corriente Armónica	60
2.3.2 Modelamiento de la Carga de una Red de Distribución Utilizando Susceptancias y Conductancias	62
2.3.3 Método Basado en la Técnica de Instrumentación Virtual (VI)	65
2.3.4 Método de Emanuel Basado en el Cálculo del ITHD y del VTHD	70

## VII

### **CAPITULO III**

#### **MÉTODO DE SEPARACIÓN DE LA CORRIENTE ARMÓNICA DE**

<b>LA CARGA</b>	<b>73</b>
3.1 Introducción	73
3.2 Corriente No-Conforme y Corriente Conforme	73
3.2.1 Descomposición de una Carga en una Carga No-Conforme y Conforme	75
3.3 Separación de la Parte No-Conforme	76
3.3.1 Flujo de Potencia de Armónicos	77
3.4 Ejemplos de Cálculo de la Corriente Conforme y No Conforme	79
3.4.1 Cálculo del Flujo de Potencia	80
3.5 Aplicación del Método a un Caso Práctico	83
3.5.1 Evaluación de Acuerdo al Método de Correlación entre la Corriente y la Tensión armónica	88
3.5.2 Evaluación de Acuerdo al Método del Cálculo del ITHD y VTHD	102
3.5.3 Evaluación de Acuerdo al Método de Separación de la Corriente Armónica en Corriente Armónica Conforme y No-conforme	105
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO 1:PROGRAMAS EN MATLAB</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO 2:ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RPM</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO 3:GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>140</b>

## INTRODUCCIÓN

Ante la proliferación de cargas no lineales en las instalaciones industriales y domiciliarias, los niveles de armónicos en los sistemas eléctricos se han incrementado, ocasionando problemas en todo el sistema eléctrico.

Para la solución de estos problemas se tienen dos enfoques: el primero es el establecimiento de umbrales de emisión de tensión y/o corriente armónica (Normas IEC 1000-4-7 y Std. IEEE-519 y otras). Algunas de estas se basan en la compatibilidad electromagnética y otros simplemente en el intento de controlar la emisión de los armónicos, este enfoque de control perjudica en mayor proporción a los clientes. Otro enfoque se basa en la identificación del cliente o de los clientes que están originando los armónicos mediante la aplicación de diversos métodos de direccionalidad de armónicos. El inconveniente que están encontrando la mayoría de estos métodos son las dificultades técnicas con que se encuentran al implementarlas.

Dentro del enfoque de la identificación del cliente o clientes perturbadores hay diversos métodos que se agrupan en dos grupos: Métodos desconectando la carga a analizar y métodos sin desconectar la carga a analizar [6]. Dentro del primer grupo se encuentran: Método para determinar la direccionalidad desconectando la carga a analizar y el método que consiste en desconectar el elemento shunt de la carga a analizar. En el segundo grupo se encuentran: El método de correlación entre la



mediante susceptancias y conductancias [6], el método de instrumentación virtual [8], el método propuesto por Emanuel [22] y el método de separación de la corriente armónica en corriente armónica conforme y no-conforme [7], que es el método que se plantea en esta tesis, la principal desventaja de este método es la dependencia en la toma de los valores de la tensión y de la corriente, es decir dependen de la precisión de los reductores de tensión y de corriente, ya que si estos no tienen márgenes de error adecuados [8] los valores que ellos miden no servirán para realizar el análisis de direccionalidad con el método. Todos estos métodos serán explicados en el desarrollo de la tesis.

El objetivo de esta tesis es plantear un método que permita determinar la dirección de los armónicos.

La presente tesis muestra en el capítulo 2 definiciones básicas sobre armónicos, la normatividad existente, el origen y las fuentes de armónicos, el modelamiento y simulación de los armónicos, la distribución de la corriente armónica en las redes eléctricas, la influencia de los armónicos y las soluciones a los problemas de los armónicos.

En el capítulo 3 se dan las bases para el desarrollo de los diversos métodos de direccionalidad de la corriente armónica luego se muestran los métodos más aplicados en la determinación del origen de los armónicos. Estos se dividen en dos grupos: el primer grupo esta formado por los métodos que se basan en la desconexión de la carga perturbadora y el segundo esta formado por los métodos que se basan en el análisis de la carga perturbadora sin desconectarla. Se menciona además la ventaja y la desventaja de cada método.

En el capítulo 4 se desarrolla el método propuesto por esta tesis que consiste en la separación de la corriente armónica en dos: corriente armónica conforme y no conforme. En este capítulo se explica el método y es aplicado a un caso real: análisis del alimentador P-06, que se hizo con mediciones hechas con el equipo Reliable Power Meters (RPM). El resultado se compara con otros dos métodos.

En el anexo 1 se muestra los programas en Matlab que han sido usados para el cálculo de las corrientes armónicas conforme y no-conformes y los datos de la tabla 3.3.

En el anexo 2 muestra las especificaciones técnicas del equipo RPM.

Finalmente, la tesis termina con unas conclusiones sobre el uso de este método, y de investigaciones que se vienen desarrollando sobre este tema que es muy amplio y complejo a la vez.

## CAPITULO I ARMÓNICOS

En este capítulo se tratarán definiciones previas para el estudio y entendimiento de los armónicos, basadas en el estándar IEEE-519 y otras referencias bibliográficas que se van detallando conforme se van dando las definiciones.

### Armónicos

Son los componentes enteros de la frecuencia fundamental que se presentan en la onda de tensión o corriente [18]. Para un mejor entendimiento veremos algunas definiciones adicionales.

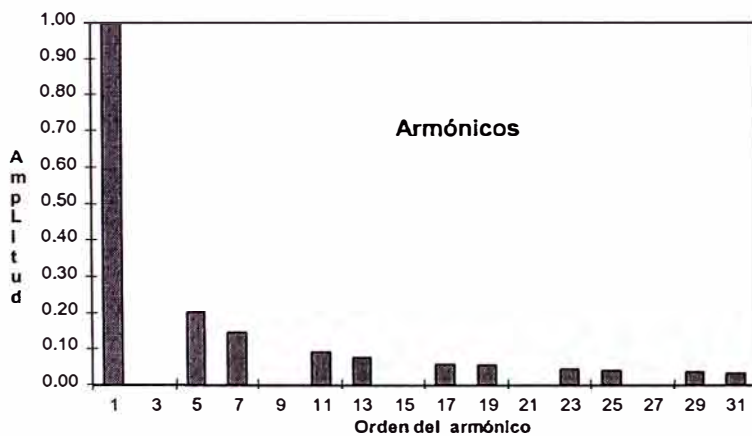


Fig 1.1: Espectro de armónicos.

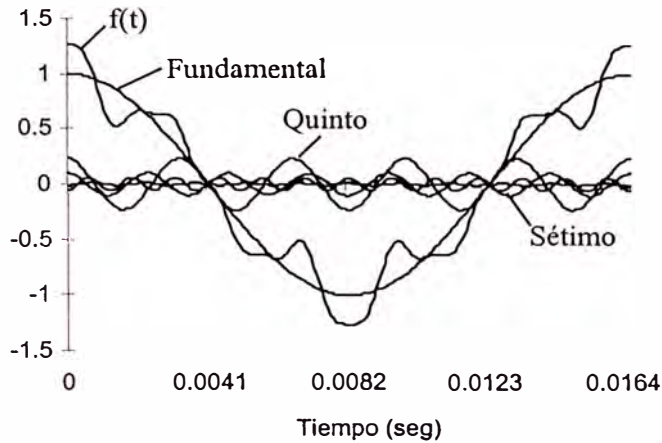


Fig. 1.2: Evolución en el tiempo de la armónica fundamental, quinta y séptima.

## 1.1 Series de Fourier y Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

### 1.1.1 Series de Fourier

La serie de Fourier para una función regular, integrable y periódica ( con periodo  $T$ )

$f(t)$  puede ser escrita como en (1.1)

$$f(t) = f(t + T) \quad (1.1)$$

$f = 1/T$  Hz, ó  $\omega = 2\pi f$  rad/s. Para todo  $t$ . La constante  $T$  que satisface (1.1) es llamada el período de la función. De (1.1) se puede obtener por iteración:

$$f(t) = f(t + hT), \quad h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2)$$

Como la función  $f(t)$  es periódica con periodo  $T$  puede ser representada por la serie trigonométrica:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (1.3)$$

Donde  $\omega_0 = 2\pi / T$ .

Una serie tal como (1.3) es llamada serie trigonométrica de Fourier, que puede ser reescrita como:

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (1.4)$$

Donde:  $c_0 = a_0 / 2$ ,  $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ , y  $\phi_h = \tan^{-1}(a_h / b_h)$ .

Observando (1.4), se ve que la expresión de la serie de Fourier de una función periódica representa una función periódica como una suma de componentes sinusoidales con frecuencias diferentes. La componente de  $h\omega_0$  es llamada componente de orden  $h$  de la función periódica.  $c_h$  y  $\phi_h$  son conocidas como la  $h$ -ava armónica de magnitud y ángulo respectivamente. La magnitud y ángulo de cada armónica determina la resultante de la forma de Onda de  $f(t)$ .

La ecuación (1.3) también puede ser representada por su complejo de la siguiente forma:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_h e^{jh\omega_0 t}, \quad (1.5)$$

Donde para  $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,

$$c_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt. \quad (1.6)$$

### 1.1.1.1 Funciones Ortogonales:

Una serie de funciones  $\{\varphi_h(t)\}$  es llamada ortogonal en un intervalo  $\alpha < t < \beta$  si de todo el grupo dos funciones  $\varphi_i(t)$  y  $\varphi_j(t)$  satisfacen:

$$\int_x^{\beta} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \gamma, & i = j \end{cases} \quad (1.7)$$

Donde  $\gamma$  es diferente de cero. Se puede demostrar que  $\{1, \cos \omega_0 t, \dots, \cosh \omega_0 t, \dots, \sin \omega_0 t, \dots, \sinh \omega_0 t, \dots\}$  es subconjunto ortogonal de la función Seno en el intervalo  $-T/2 < t < T/2$ . Usando las relaciones ortogonales, se puede demostrar que los coeficientes de la serie de Fourier  $a_0$ ,  $a_h$ , y  $b_h$  de (1.3) son

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt, \quad (1.8)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h\omega_0 t) dt, \text{ y} \quad (1.9)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt, \quad (1.10)$$

Donde  $h = 1, 2, \dots$ .

Para el subconjunto de complejos el valor de las funciones  $\{\varphi_h(t)\}$ , puede ser demostrado que (1.7) se cumple cuando  $\varphi_j(t)$  es el complejo conjugado de  $\varphi_i(t)$

### 1.1.1.2 Simetría de las Formas de Onda

Una función  $f(t)$  es llamada una función par si tiene la propiedad:

$$f(-t) = f(t), \quad (1.11)$$

y es llamada una función impar, si:

$$f(-t) = -f(t) \quad (1.12)$$

Una función par si es simétrica al eje  $y$ , una función es impar si es simétrica al origen.

Una función con un periodo  $T$  es simétrica media periodo si satisface la condición.

$$f(t) = -f(t \pm T/2). \quad (1.13)$$

### 1.1.1.3 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier de una función  $f(t)$  esta definida como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1.14)$$

$f(t)$  es llamada transformada inversa de Fourier de  $F(\omega)$  que es definida como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (1.15)$$

Las ecuaciones (1.14) y (1.15) son a menudo llamadas Transformadas de Fourier Par, y ellos son usados para mapear cualquier función en el intervalo de  $(-\infty, \infty)$  en el dominio del tiempo ó frecuencia en una función continua cuyo dominio es el de la función inversa. La idea de la transformada de Fourier es examinar una función o una forma de Onda desde la perspectiva de ambos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Una función dada puede tener dos modelos equivalentes de representaciones: Uno es en el dominio del tiempo  $f(t)$  y el otro es el dominio de la frecuencia  $F(\omega)$ . La ecuación (1.14) transforma la función en dominio del tiempo a un espectro de frecuencia, y (1.15) sintetiza el espectro de frecuencia para recuperar la función al dominio del tiempo.

#### 1.1.1.4 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Cuando el espectro en el dominio de la frecuencia y la función en el dominio del tiempo son ambas muestras periódicas con  $N$  muestras por periodo, (1.14) y (1.15) pueden ser representadas por lo siguiente:

$$F(k\Delta\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta T) e^{-j2\pi kn/N}, \quad (1.16)$$

y

$$f(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k\Delta\Omega) e^{j2\pi kn/N}, \quad (1.17)$$

Llamadas Transformada Discreta de Fourier. Donde  $k, n = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $\Delta\Omega = 2\pi / \Delta T$  y  $\Delta T = T / N$ . La DFT es a menudo usada en la medición de armónicos porque la medida de los datos es siempre disponible en la forma de una muestra de la función en el dominio del tiempo. Las muestras en el dominio del tiempo son representadas por series de tiempos de puntos de conocida magnitud separadas por un tiempo fijo en intervalos de duración limitada.

El análisis de Fourier puede ser hecha por DFTs. Las DFTs son a menudo calculadas por el uso del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier.



### 1.1.2 Definiciones Básicas y Algunos Índices de los Armónicos

Bajo los efectos de los armónicos las definiciones de algunos parámetros cambian, ya que estos están definidos para condiciones estables de la forma de onda y para la frecuencia fundamental.

Daremos a continuación las definiciones asociadas con la tensión, corriente, potencia aparente, potencia reactiva, y factor de potencia bajo condiciones no estables de la forma de onda.

#### 1.1.2.1 Sistema de Potencia Armónico

La definición de armónico puede darse como: Una componente sinusoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Es decir si la frecuencia fundamental es  $f_0$  entonces la frecuencia de la armónica  $h$  es  $nhf_0$ . Se puede reconstruir la forma de onda distorsionada por medio de la suma de diferentes amplitudes para cada armónico. Lo contrario también se cumple, es decir toda señal se puede descomponer en la suma de sus componentes a distintas frecuencias. A esta descomposición se le llama Análisis de Fourier. Mediante este análisis se puede analizar sistemáticamente los efectos de los armónicos en los sistemas de potencia.

La mayoría de elementos y cargas en los sistemas de potencia tienen la misma forma y magnitud, en valor absoluto, en ambos ciclos el positivo y el negativo. Es decir tienen simetría con respecto al eje  $x$  o también se les dice que tienen simetría de media onda. Por lo tanto, los armónicos de orden par no son característicos. También los armónicos múltiplos de 3 siempre pueden ser bloqueados usando transformadores con

conexión en estrella sin aterramiento o un sistema en delta en un sistema balanceado, porque los armónicos triples son enteramente de secuencia cero [17]. Por esta razón los armónicos pares y triples son ignorados en los análisis y generalmente se analiza hasta el armónicos 50°.

Uno de los mayores productores de armónicos en los sistemas de potencia es los convertidores estáticos de potencia. Bajo condiciones ideales de operación, los armónicos de corrientes generados por uno de p-pulsos de línea conmutada puede ser caracterizada por  $I_h = I_1 / h$  y  $h = pn \pm 1$  donde  $n = 1, 2, \dots$  y  $p$  es un múltiplo entero de seis [18] y [23].

Si :

1. Las tensiones de entrada están desbalanceados, o
2. Existen reactancias diferentes entre fases, ó
3. Diferente espacio de disparo en el puente del convertidor.

Entonces, el convertidor producirá armónicos no característicos son aquellos que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y usualmente se les llama interarmónicos. El mayor productor de interarmónicos es el cicloconvensor. Donde hay presencia de flicker también existe presencia de interarmónicos. Los productores de flicker son generalmente las fundidoras, soldadoras o cualquier carga que tenga variaciones grandes en su tensión y su potencia de cortocircuito no sea capaz de absorber estos cambios.

### 1.1.2.2 Parámetros Eléctricos bajo Condiciones No Sinuoidales

Bajo condiciones no estables la tensión y la corriente instantánea pueden ser representadas, de acuerdo a las series de Fourier, como sigue:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (1.18)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h), \quad (1.19)$$

Donde el término dc es generalmente ignorado por simplificación. La potencia instantánea estará dada por:

$$p(t) = v(t)i(t), \quad (1.20)$$

La potencia promedio en un periodo T de  $p(t)$  es definida como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (1.21)$$

Si reemplazamos (1.18), (1.19) en (1.20) y hacemos uso de las relaciones ortogonales dadas en (1.7), se puede demostrar que:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (1.22)$$

Que nos indica que cada armónico crea una contribución ya sea positiva o negativa a la potencia promedio. No hay contribuciones entre las potencias armónicas para cada frecuencia y también estas potencias son por lo general mucho menores que la potencia fundamental.

Aplicando relaciones ortogonales se demuestra que:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}, \quad (1.23)$$

y

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}, \quad (1.24)$$

Respectivamente.

La potencia aparente es dada por:

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (1.25)$$

Una definición amplia de la potencia aparente es dada por la siguiente ecuación:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (1.26)$$

Donde  $Q$  es la energía reactiva definida como:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h), \quad (1.27)$$

Donde  $D$  es definida como la distorsión en voltamperes que corresponden a los productos de tensión y corriente a diferentes componentes a distintas frecuencias en (1.18) y (1.19). Cuando los armónicos no están presentes en (1.25),  $S$  es igual a  $V_1 I_1$  que convencionalmente definido para la frecuencia fundamental. Además se cumple la relación:

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2, \quad (1.28)$$

Donde  $Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \delta_1)$  es la potencia reactiva fundamental.

La necesidad de conceptuar el factor de potencia es originada de la necesidad de cuantificar cuan eficiente es una carga utilizando la corriente que es absorbida de un sistema eléctrico. Para condiciones sinusoidales o no sinusoidales se tiene que:

$$pf = \frac{P}{S}, \quad (1.29)$$

Donde:

$P$  es la potencia promedio constituida por la potencia a frecuencia fundamental y de las demás frecuencias de las armónicas.

### 1.1.2.3 Factor de Potencia Distorsionada.

Cuando los voltajes y las corrientes contienen armónicos, pueden ser expresados como:

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \quad (1.30)$$

y

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2} \quad (1.31)$$

Reemplazando (1.23) y (1.24) en (1.29). El factor de potencia total es:

$$pf_{tot} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}}. \quad (1.32)$$

En la mayoría de casos, sólo una pequeña parte de la potencia promedio de P es contribuida por los armónicos y el THD<sub>v</sub> es menos que 10 %. Luego:

$$\begin{aligned} pf_{tot} &\approx \frac{P_1}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}} \\ &= \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot pf_{dist}. \end{aligned} \quad (1.33)$$

En (1.33), el primer término,  $\cos(\theta_1 - \delta_1)$  es conocido como el factor de desplazamiento de la potencia, y el segundo término,  $pf_{dist}$ , es definido como el factor de distorsión de potencia. Debido a que el factor de desplazamiento de la potencia es siempre menor que uno, tenemos:

$$pf_{tot} \leq pf_{dist}. \quad (1.34)$$

Es claro que para cargas no lineales con alta corriente de distorsión, el factor de potencia total es pobre. Inclusive si se quiere mejorar el factor de potencia por medio de un capacitor podría causar condiciones de resonancia. Una alternativa sería usar filtros pasivos y activos para cancelar los armónicos producidos por las cargas no lineales.

### 1.1.2.4 Secuencia de Fases de los Armónicos

Bajo un sistema trifásico balanceado, los armónicos de tensión y corriente pueden expresarse de la siguiente forma:

$$v_{ah}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h), \quad (1.35)$$

$$v_{bh}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t - 2h\pi/3 + \theta_h), \quad (1.36)$$

$$v_{ch}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + 2h\pi/3 + \theta_h). \quad (1.37)$$

Por lo tanto su secuencia de fases estará dada por la Tabla 1.1

Orden del Armónico	Secuencia
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
.	.

**Tabla 1.1: Secuencia en los armónicos.**

Para sistemas desbalanceados el análisis es más complejo.

### 1.1.2.5 Distorsión Armónica Total

Nos indica el contenido de armónicos de una forma de onda. Si la forma de onda no posee armónicos este parámetros es cero. Esta dada por la siguiente expresión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad \text{o} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}, \quad (1.38)$$

### 1.1.2.6 Distorsión Total de la Demanda

La distorsión total de la demanda está en función de la corriente máxima de la carga, y se define como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L}, \quad (1.39)$$

Donde  $I_L$  es la máxima corriente de la carga (Medidos en un intervalo de 15 o 30 minutos) a la frecuencia fundamental en el punto de acoplamiento común. (PAC), calculada como el promedio de la máxima corrientes por un tiempo de 12 meses.

### 1.1.2.7 Factor de Influencia Telefónica (TIF)

Es la medida usada para describir el ruido telefónico originado por las corrientes y/o tensiones armónicas en sistemas de potencia. El TIF es ajustado basado en la sensibilidad del sistema telefónico y del oído humano a diferentes frecuencias. Es definido como:



$$TIF_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h V_h)^2}}{V_{rms}} \quad \text{o} \quad TIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h I_h)^2}}{I_{rms}}, \quad (1.40)$$

Donde  $w_h$  es el peso para efectos de acoplamiento audio – inductivo a la frecuencia de orden  $h$ . Obviamente TIF es una variación del THD previamente definido, donde la suma de raíces cuadradas es pesada usando factores que reflejan la respuesta en la banda de voz.

### 1.1.2.8 Los Productos V-T e I-T

Es otro índice que mide las interferencias de los armónicos en circuitos de audio similar al TIF es el producto  $V \cdot T$  o  $I \cdot T$ , donde  $V$  es el voltaje *rms* en voltios,  $I$  es la corriente *rms* en amperios.  $T$  es el *TIF*.

$$V \cdot T = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h V_h)^2} \quad \text{o} \quad I \cdot T = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (w_h I_h)^2}, \quad (1.41)$$

Donde  $w_h$  es el mismo peso descrito.

De (1.35) y (1.36):

$$TIF_V \cdot V_{rms} = V \cdot T \quad \text{y} \quad TIF_I \cdot I_{rms} = I \cdot T. \quad (1.42)$$

### 1.1.2.9 Índice de Mensaje-C

Este índice es similar al *TIF* excepto que cada peso  $c_h$  es usado en lugar de  $w_h$ . El peso es derivado de pruebas para indicar la molestia relativa o el daño del sonido por

las señales de interferencia a la frecuencia  $f$  escuchado en unos 500 tipos de teléfonos. Este índice se define como:

$$C_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (c_h V_h)^2}}{V_{rms}} \quad \text{o} \quad C_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (c_h I_h)^2}}{I_{rms}}. \quad (1.43)$$

Su relación con el TIF esta dada por:

$$w_h = 5c_h f_h, \quad (1.44)$$

Donde  $f_h$  es la frecuencia del armónico de orden  $h$ .

### 1.1.2.10 El factor K de los Transformadores

Este factor es un índice usado para calcular la corrección de un transformador estándar cuando se presentan armónicos de frecuencia. Se define como:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h / I_1)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_1)^2}, \quad (1.45)$$

Que es calculado sobre la base de que las corrientes a través de los devanados producen pérdidas que son proporcionales al cuadrado de los orden de los armónicos y de sus respectivas componentes.

El factor K de los transformadores es construido para que el transformador soporte más distorsión armónica que los transformadores estándares. También nos indica el exceso de calor que puede ser disipado por el transformador. Es considerado en el diseño e instalación de carga no lineales y es usado para especificar de nuevas fuentes de potencia.

La tabla 1.2 muestra los factores K de los transformadores disponibles comercialmente.

Categoría
K-4
K-9
K-13
K-20
K-30
K-40

**Tabla 1.2: Factores k disponibles comercialmente.**

La tabla 1.3 nos muestra valores estimados para distintos tipos de transformadores que podría usarse por un diseñador ante un tipo de carga dado. [24].

### **1.2.-Niveles de tolerancia normalizados**

De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos [3], establece las siguientes consideraciones a tener en las mediciones y procesamiento de las mediciones de perturbaciones:

<b>Carga</b>	<b>Factor-K</b>
Lamparas Incandescentes (sin elementos de estado sólido en el dimmer)	K-1
Resistencias Eléctricas de Calentamiento (Sin elementos de estado sólido en los controladores de calor)	K-1
Motores (Sin controladores de estado sólido)	K-1
Transformadores de control / Dispositivos de control electromagnético	K-1
Motor- Generadores (sin controladores de estado sólido)	K-1
Descargadores Eléctricos	K-4
UPS opcional: con filtro en la entrada	K-4
Soldadoras	K-4
Equipos de calentamiento inductivo	K-4
PLCs y controladores electrónicos (variadores de velocidad)	K-4
Equipos de Telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro a la entrada	K-13
Tableros de Colegios/Hospitales u aquellos que tengan bastantes circuitos	K-13
Mainframe	K-20
Controladores de estado sólido de motores (dispositivos variadores de velocidades)	K-20
Tableros de oficinas, industrias, centros comerciales, laboratorios,	K-30
Computadoras Personales	K-30
Cargas que produzcan alta cantidad de armónicos (en especial de orden superior)	K-40

**Tabla 1.3 Selección del factor K para diversos tipos de cargas**

- La medición se hace en el PAC (Punto de Acoplamiento Común), [18] que es el punto límite eléctrico entre las instalaciones del cliente y la red. Además las mediciones se pueden hacer en otros puntos que la autoridad (OSINERG) estime conveniente.
- Las mediciones se hacen en clientes en MT y AT y en una muestra significativa de las subestaciones de distribución.
- Se controla hasta el armónico 40<sup>o</sup> , a partir del 2<sup>o</sup> armónico. Además se controla el THD (%) con referencia a la tensión nominal del PAC. La siguiente tabla muestra las tolerancias establecidas por la última modificación de la NTCSE. [4].

ORDEN DE LA ARMÓNICA O THD	TOLERANCIA  Vi'  ó  THD  Vi ( % Con respecto a la tensión Nominal del punto de Medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	$0.1+2.5/n$	$0.2+12.5/n$
Armónicas impares múltiplos de 3°		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

**Tabla 1.4: Tolerancia para los armónicos de tensión de acuerdo a la NTCSE.**

## **1.2.1 Comparación de la NTCSE con otras Normas Internacionales**

### **1.2.1.1 Comparación de la NTCSE con las Normas Colombianas**

La norma Colombiana se basa en el estándar IEEE-519 [18], esta establece una tolerancia más estricta en THD para niveles de tensión entre MT y BT ya que la NTCSE establece una tolerancia de 8 % y la Norma Colombiana establece un 5%. En tensiones superiores a 69 kV la Norma Colombiana es más estricta que la NTCSE ya que la establece una tolerancia de 2.5% ó 1.5 % dependiendo del nivel de tensión y NTCSE establece una tolerancia de 3 %. Pero en niveles de tensión comprendidos entre 30 kV y 69 kV la NTCSE es más estricta debido a que establece una tolerancia de 3 % y la Norma Colombiana 5%.

### **1.2.1.2 Comparación de la NTCSE con las Normas Chilenas**

- En primer lugar la NTCSE no establece el control de las corrientes armónicas como lo establece la Norma Chilena.
- La NTCSE sólo considera el análisis hasta la 40° armónica y la Norma Chilena considera hasta el armónico de orden 50°.
- Ambas normas se basan en el estándar IEC-1000-4-7, sin embargo un error en la magnitud de las armónicas impares no múltiplos de 3°, en la especificación de las armónicas mayores al orden 25°.
- El cálculo del THD la NTCSE lo hace sobre la base de la tensión nominal del PAC pero lo Norma Chilena lo hace sobre la base de la tensión a la frecuencia fundamental.

### **1.2.1.3 Comparación de la NTCSE con las Normas Argentinas**

- La NTCSE es muy similar en casi todos sus aspectos técnicos a la Norma Argentina.
- Ambas normas excluyen el control de los armónicos individuales de corriente y de la distorsión armónica total de estas corrientes armónicas.
- La Norma Argentina hace especial referencia a la medición en estado transitorio de las componentes armónicas de voltaje y su índice de Distorsión Armónica Total de tensión para lo cual establece un límite de 1.5 veces de las tolerancias para los casos de estado estable.

### **1.2.1.4 Comparación de la NTCSE con las Normas Holandesas**

- Tanto la NTCSE como la Norma Holandesa establece el intervalo de integración de 10 minutos.
- La Norma Holandesa no establece tolerancias para los armónicos de orden superior al 25°, por considerarlos despreciables y difíciles de predecir por sus efectos de resonancia, pero para la NTCSE estos armónicos tienen tolerancias que son expresadas en función del orden del armónico respectivo.
- Ambas normas controlan los mismos índices: THD y armónicos individuales.

### **1.2.1.5 Comparación de la NTCSE con la IEEE-519**

- La NTCSE sólo hace mención al control de las tensiones armónicas. La IEEE-519 establece rangos de tolerancias para las corrientes armónicas en relación con la tensión nominal de la medición y la corriente de cortocircuito en el PAC.



- La NTCSE no da la metodología para poder determinar la responsabilidad de la emisión de los problemas de armónicos. La IEEE-519 establece criterios para determinar si el punto de medición está o no cumpliendo con los requerimientos de emisión de corrientes armónicas.
- La intención de la NTCSE es la de establecer tolerancias de las tensiones armónicas que no deben excederse para que haya una buena calidad en lo referente a armónicos. La IEEE-519 tiene como intención establecer criterios para el diseño de sistemas eléctricos de con la inclusión de cargas no lineales y lineales. Establece también la forma de onda que la tensión y la corriente deben tener.
- La NTCSE está orientada a las empresas generadoras, transmisoras y distribuidoras de energía eléctrica, la IEEE-519 además está dirigida a los fabricantes de cargas no lineales y a empresas que hacen uso de cargas no lineales.

### **1.3 Principales Fuentes de Armónicos**

Las principales fuentes de armónicos en sistemas de potencia convencionales son los siguientes:

1. Convertidores.
2. Hornos de Arco.
3. Invertidores para Generación Dispersada.
4. Invertidores Monofásicos.
5. Invertidores Trifásicos.

6. Controladores Electrónicos de fase.
7. Cicloconvertidores Armónicos.
8. Interruptores.
9. Moduladores de Pulsos.

Es decir todos estos equipos se puede considerar dentro de estos dos grandes grupos de equipos:

### **1.3.1.- Dispositivos con Interruptores Electrónicos**

El proceso de interrupción es hecho por interruptores electrónicos. Estos interruptores están generalmente, pero no necesariamente, sincronizados con la tensión ac. En este grupo están los convertidores electrónicos de potencia, como por ejemplo los variadores de velocidad, compensadores estáticos de energía reactiva, convertidores de AC/DC o DC/AC, etc. Estos tipos de fuentes son menos sensibles a variaciones o distorsiones en la fuente de tensión. Estos dispositivos se representan como fuentes de corriente o tensión armónica.

### **1.3.2.-Dispositivos con Relación No Lineal entre la Corriente y la Tensión**

Tenemos en este grupo:

**1.3.2.1 Reactores con Núcleo de Acero** - reactores y cargas tipo hornos de arco son ejemplos típicos de esta clasificación. La generación de los armónicos se produce cuando estos equipos son excitados con un voltaje periódico y están trabajando en la curva no lineal v-i.

**1.3.2.2 Equipos de Arco.-** Los armónicos producidos por un horno eléctrico usados para la producción de acero son impredecibles porque la variación de ciclo a ciclo del

arco, particularmente cuando se está fundiendo un nuevo metal. La corriente de arco es no periódica y el análisis revela un espectro continuo de frecuencias armónicas de ambas enteras y no enteras. [18].

#### **1.4 Modelamiento y simulación de los armónicos**

La meta de los armónicos estudiados es para cuantificar la distorsión de la forma de onda en voltaje y corriente en varios puntos de un sistema de potencia. El resultado es muy usado para la evaluación correctiva de las mediciones y encontrar los problemas causados por los armónicos. El estudio de los armónicos puede también determinar la existencia de un posible daño por resonancia y verificar si los límites de cada armónicos cumplen son los rangos establecidos. La necesidad para un estudio de armónicos puede ser indicado por las mediciones excesivas de distorsión en sistemas existentes o por la instalación de un equipo generador de armónicos. Similar para otro estudio de un sistema de potencia los armónicos estudiados consisten de los siguientes pasos:

- Definición de los equipos que producen armónicos y determinación de los modelos para su representación.
- Determinación de los modelos a representar otros componentes en los sistemas incluyendo las redes externas.
- Simulación de los sistemas para varios escenarios.

Muchos modelos han sido propuestos para la representación de las fuentes de los armónicos tan bien como para componentes lineales.

### 1.4.1 Naturaleza y Modelamiento de las Fuentes de Armónicos

El modelo más común de fuentes de armónicos es modelar usando una fuente de corriente, especificada por su espectro de magnitud y ángulo. La fase es usualmente definida con respecto a la componente fundamental de la tensión. Los datos pueden ser obtenidos mediante un estudio previo del nivel de armónicos o mediante el uso de las mediciones. En muchos casos, las mediciones proveen una representación más real que el modelamiento teórico. Esto se cumple cuando el sistema es significativamente desbalanceado o si tiene interarmónicos. Cuando un sistema contiene una sola fuente de armónicos el espectro de fases no es importante. Por lo tanto, los ángulos de fase deben ser representados cuando existen múltiples fuentes de armónicos. Un método común para modificar el espectro de las fases de acuerdo al ángulo de fase de la tensión a frecuencia fundamental es por la carga.

Ignorando los ángulos de fase no siempre resulta el peor caso.

Modelos más detallados son necesarios si la distorsión de voltaje es significativa o si las tensiones son desbalanceados. Hay tres desarrollos básicos que pueden ser tomados para desarrollar modelos detallados:

- Desarrollar formulas analíticas para las series de Fourier como una función de la tensión (en los bornes terminales del equipo) y de los parámetros de operación para el dispositivo.
- Desarrollar analíticamente modelos para el dispositivo en operación y resolver para el dispositivo la forma de onda de la corriente por un accesible método iterativo.

- Resolver para el dispositivo una simulación usando el dominio del tiempo teniendo en cuenta una forma de onda constante.

Modelos avanzados requieren diseño de datos para el dispositivo. Por ejemplo, Para un mediano ASD es necesario especificar parámetros tales como datos del transformador, nivel dc y parámetros del motor. Para tener una mayor precisión para tener los modelos detallados es que el usuario pueda especificar condiciones de operación.

En el análisis de los sistemas de distribución uno puede observar que pueden existir muchas fuentes. Tales fuentes pueden ser modeladas por medio de sus mediciones. Es muy difícil desarrollar un modelo de fuente de corriente analíticamente basado en los datos de la composición de la carga.

**1.4.1.1 Fuentes No Lineales de Tensión y Corriente:** La más común fuente en esta categoría son los transformadores (dado a sus requerimientos no lineales para su magnetización), fluorescentes y otros tipos de luminarias que usen arrancadores, y dispositivos tales como hornos de arco. En todos los casos una relación no lineal entre la tensión y la corriente. Los armónicos de corriente generados por estos dispositivos pueden ser significativamente afectados por la forma de onda y valores pico de las fuentes. La representación de los dispositivos con su actual relación no lineal  $v-i$  es posible a pesar de que el voltaje es independiente de las fuentes de corriente.

**1.4.1.2 Convertidores Electrónicos de Potencia:** Ejemplos de este tipo de dispositivos son los variadores de velocidad, uniones HVDC, y compensadores reactivos estáticos. Estos tipos de dispositivos son menos sensitivos a las distorsiones

de la tensión, pero si son sensitivos a los desbalances en el sistema. Deben ser modelados adecuadamente para el análisis de armónicos tomando en cuenta más de una fuente. Para dispositivos grandes de este tipo, como los HVDC o los SVC es necesario un modelo detallado trifásico.

**1.4.1.3 Máquinas Rotativas:** Pueden ser representadas como fuentes de armónicas también. El mecanismo de generación de los armónicos es único en maquinas rotativas. No puede ser descrito usando la relación no lineal  $v-i$ . Sólo los polos salientes de máquinas sincronas operadas bajo condiciones de desbalance pueden generar armónicos. En este caso una corriente desbalanceada generada por un generador induce una segunda armónica de corriente en las bobinas de campo que a su vez inducen un tercer armónico de corriente en el estator. De manera similar el voltaje de un sistema distorsionado puede causar que las máquinas produzcan armónicos. Para los casos de saturación causada por la generación de armónicos de máquinas rotativas, el modelo no lineal puede ser usado.

**1.4.1.4 Fuentes de Altas Frecuencias:** Debido a los avances tecnológicos se han creado dispositivos con un alto rango de frecuencias de trabajo. El balasto electrónico de un fluorescente es un ejemplo. En general, estos dispositivos emplean interruptores de alta frecuencia para mejorar la flexibilidad de la conversión de la energía. La distorsión es creada a la frecuencia de switcheo, que es generalmente sobre lo 20 kHz. A esta frecuencia la distorsión de la corriente no penetra mucho en el sistema pero la posibilidad de una resonancia a la frecuencia de swicheo.

### **1.4.2 Modelamiento de Redes y Cargas**

Modelos de redes: La principal dificultad en la determinación del modelo es determinar cuanto de las redes se necesita modelar. Las siguientes observaciones pueden ser hechas:

- Para una carga industrial conectado a un sistema fuerte o a un sistema trifásico. Generalmente es suficiente modelar dos transformaciones desde el lado de la carga. Generalmente las impedancias de los transformadores de mayor potencia. Los ramales de los circuitos deberían ser modelados si pertenecen a parte de la red donde se encuentra instalado condensadores de corrección de factor de potencia o motores.
- En algunas empresas grandes existen dos puntos de alimentación, la de una Subestación de transmisión y de una subestación de distribución, en estos caso es necesario el modelamiento de una pequeña porción de la red AT/MT si la empresa tiene múltiples subestaciones de MT. Si sólo tiene una Subestación MT la impedancia se calcula más fácilmente.

Las observaciones dadas arriba no necesariamente se van a cumplir, pero son basadas en experiencias prácticas. Talvez, el mejor camino para determinar el mejor modelamiento es estudiar la sensibilidad de la performance del modelo estudiado. Por ejemplo Uno puede progresivamente expandir el modelamiento de las redes hasta que los resultados no cambien significativamente.

### 1.4.2.1 Líneas Aéreas y Cables Subterráneos

Son modelados por circuitos con fases múltiples acopladas. Para el análisis balanceado de los armónicos los modelos pueden ser simplificados en una sola fase, es decir circuitos  $\pi$  (pi) usando los datos de las secuencias positiva y cero. Lo más importante en el modelamiento de estos componentes son la dependencia por unidad de longitud de la frecuencia de los armónicos y los efectos de la longitud de la línea. Como resultado, el nivel de detalles de su modelamiento depende la longitud de la línea y del orden del armónico:

1. En sistemas industriales y de distribución donde las longitudes de las líneas son cortas se acostumbra usar secuencia de impedancias. La capacitancia es usualmente no es tomada en cuenta a menos que la línea sea gran longitud.
2. Un estimado de longitud que los modelos deberían usar es  $241.35/n$  por Km para líneas aéreas y  $144.81/n$  por Km para cables subterráneos, donde  $n$  es el orden del armónico.
3. La corrección por el efecto skin es importante en líneas de gran voltaje porque la resistencia es la principal fuente de control.

### 1.4.2.2 Transformadores

En la mayoría de aplicaciones, los transformadores son modelados como una serie de impedancias con resistencia ajustada para los efectos skin. Esto es porque los datos adecuados están usualmente no disponibles. La conexión en los transformadores trifásicos puede proveer un desfase de  $30^\circ$ . Otras conexiones tales como Zigzag son



usados para mitigar los armónicos. El desfase asociado con cada conexión del transformador debe ser tomado en cuenta para un sistema con múltiples fuentes.

Otras consideraciones incluyen las características no lineales de las pérdidas de la resistencia del núcleo, la capacitancia entre los devanados y la saturación del núcleo. Los efectos de los armónicos dado la resistencia no lineal son pequeñas comparadas con los efectos de la no linealidad de la inductancia. Los efectos de la capacitancia son solamente notorios a frecuencias superiores a los 4 KHz. Las características de saturación pueden ser representadas como una fuente de armónicos usando el modelo v-1 .

#### **1.4.2.3 Las Cargas Pasivas**

Tienen un significativo efecto en la respuesta en frecuencia principalmente cerca de los puntos de resonancia. En el análisis de redes de alta tensión la impedancia a frecuencia fundamental del transformador no influye. A las frecuencias de los armónicos la impedancia de los transformadores puede ser comparable a las de unos motores, porque los motores de inducción aparecen como impedancias de rotor bloqueado a esas frecuencias.

Un modelo general aparece en la figura 1.3. Para caracterizar el modelo apropiadamente es necesario conocer la composición típica de la carga. Datos que usualmente están a la mano. Los siguientes son los modelos sugeridos.

Modelo A: R, L en paralelo con  $R = V^2 / (P)$ ;  $L = V^2 / (2\pi fQ)$

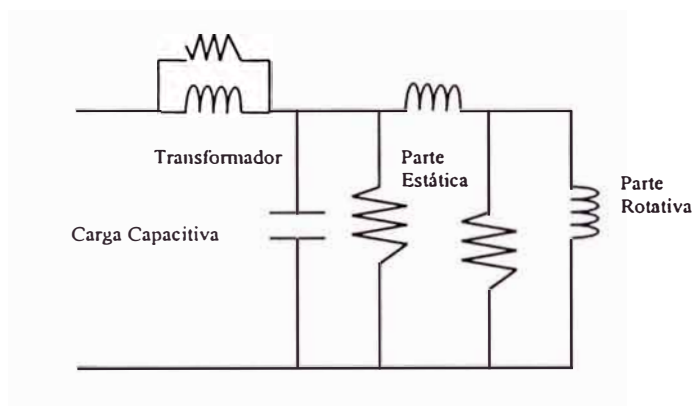
Este modelo asume que la carga reactiva total es asignada a la inductancia L, Porque la mayor parte de la energía reactiva corresponde a los motores de inducción, este modelo no es recomendado.

Modelo B: R, L en paralelo con  $L = V^2 / (2\pi f k * Q)$ ;  $k = .1h + .9$

Modelo C: R, L en serie con un transformador de inductancia  $L_s$ , donde

$R = V^2 / P$ ;  $L = n R / (2\pi f 6.7 * (Q/P) - .74)$ ;  $L_s = .073 h R$

Los coeficientes corresponden a uno estudios realizados, y que no pueden ser apropiados para todas las cargas



**Figura 1.3 Modelo básico de una carga.**

#### 1.4.2.4 Grandes Cargas Rotativas

En máquinas síncronas y de inducción el campo magnético rotativo creado por el estator, los armónicos giran a una velocidad significativamente diferente a la que gira el rotor. Por lo tanto los armónicos desarrollan impedancia de secuencia negativa. En el caso de máquinas síncronas la inductancia es usualmente tomado para ser impedancia de secuencia negativa o el promedio de las impedancias de cuadratura subtransitoria. Para máquinas de inducción la inductancia es tomada para ser la

inductancia de rotor bloqueado. En cada caso la dependencia de las frecuencias puede ser significativa. La resistencia normalmente crece en la forma  $n^a$  donde  $n$  es el orden del armónico y 'a' varía desde 0.5 a 1.5. La mayoría de los motores son de conexión delta y por lo tanto no proveen de un camino para los armónicos de secuencia cero.

### 1.4.3 Simulación de los Armónicos

Es apropiado notar que un gran número de los problemas de armónicos encontrados en la práctica son generalmente producidos por una sola fuente o en muchos casos el nivel de distorsión encontrado en un punto dado no es muy grande. En estos casos el cálculo no es tan complicado. Para sistemas grandes y complicados las cargas que producen armónicos necesitan ser analizados mediante flujos de armónicos.

Matemáticamente, el estudio de los armónicos envuelve la solución de la siguiente ecuación para cada armónico:

$$[\mathbf{I}_m] = [\mathbf{Y}_m][\mathbf{V}_m] \quad m=1, 2 \dots n \quad (1.46)$$

Donde  $[\mathbf{Y}_m]$  representa la matriz admitancia nodal,  $[\mathbf{I}_m]$  es el vector de la fuente de corriente y  $[\mathbf{V}_m]$  es el vector de la tensión para el armónico  $m$ .

#### 1.4.3.1 Muestreo de la Frecuencia

El muestreo de la frecuencia es usualmente el primer paso en el estudio de los armónicos. Una frecuencia o impedancia muestreada es un ploteo de la impedancia Thevenin del sistema de barras vs la frecuencia. La barra de interés es aquella donde la fuente de armónico existe. Para un sistema monofásico esta impedancia puede ser obtenida del diagrama de impedancia. Más formalmente, la impedancia Thevenin puede ser calculada por la inyección de una corriente de valor 1 por unidad a una

frecuencia apropiada en la barra de interés. Las otras corrientes son seteadas a cero y (1.46) es resuelta para la barra de voltaje. Los cálculos son repetidos sobre la frecuencia de los armónicos dentro del rango de interés. Normalmente se desarrolla este calculo para ambas secuencias la positiva y la negativa.

Si la fuente de armónicos es conectada a la barra de interés, el armónico de voltaje en esta barra resulta de la multiplicación de los armónicos de la corriente por los armónicos de la impedancia.. El muestreo de la frecuencia nos da una visión de los niveles de impedancia y de distorsión de la tensión..

#### 1.4.3.2 Cálculo de las Distorsiones Simples

En los armónicos más simples estudiados las fuentes son representados como una fuente de corriente especificado con su espectro de frecuencia. La Matriz de admitancia son construidas y los componentes de los armónicos de tensión son calculados de (1.46) los componentes de los armónicos de corriente tienen una magnitud determinada del espectro armónico típico y de la corriente de carga para los armónicos producidos por el dispositivo.

$$I_n = I_{rated} I_{n\text{-espectro}} / I_{1\text{-espectro}} \quad (1.47)$$

Donde:

n es el orden del armónico y subíndice 'espectro' indica el espectro típico del elemento.

Para el caso de múltiples fuentes de armónicos es importante también determinar el modelo de los ángulos de fase para cada armónico. Es necesario un flujo de potencia a

la frecuencia fundamental, porque los ángulos de fase son función de la frecuencia fundamental como se muestra a continuación:

$$\theta_n = \theta_{n\text{-espectro}} + n(\theta_1 - \theta_{1\text{-espectro}}) \quad (1.48)$$

Donde:

- $\theta_1$  es el ángulo de fase del armónico de la fuente a la frecuencia fundamental.
- $\theta_{n\text{-espectro}}$  es el ángulo de fase de la componente armónica de orden n del espectro de corriente.

Dependiendo de los ángulos de fase usados, los efectos de las fuentes múltiples de armónicos pueden ser añadidos o cancelados

## **1.5 Distribución de las Corrientes Armónicas en las Redes Eléctricas**

### **1.5.1 Respuesta a los Armónicos de los Sistemas de Potencia**

En comparación con la carga, el sistema de potencia es lo suficientemente fuerte como para que pueda contener armónicos de corriente sin causar daño alguno. Esto significa que el sistema de impedancias es pequeño comparado con la impedancia de la carga. Un sistema de potencia por si sólo no es una fuente de armónicos. Por lo tanto no llega a ser una fuente de problemas a menos que tenga cargas distorsionadoras.

Asumiendo que todas las cargas no lineales pueden ser representadas como una fuente de corriente, los armónicos de voltaje en la barra del sistema de potencia se puede obtener resolviendo la siguiente matriz de impedancia o las ecuaciones nodales de admitancia para todos los armónicos bajo las consideraciones siguientes:

$$\mathbf{V}_h = \mathbf{Z}_h \cdot \mathbf{I}_h \quad (1.49)$$

o

$$\mathbf{I}_h = \mathbf{Y}_h \cdot \mathbf{V}_h, \quad (1.50)$$

Donde  $\mathbf{V}_h$  es el vector que contiene los armónicos de tensión en cada barra que va a ser determinada.  $\mathbf{Z}_h$  es la matriz de impedancia,  $\mathbf{Y}_h$  es la matriz de admitancia, y  $\mathbf{I}_h$  es el vector de corrientes armónicas medidas, representando la generación de armónicos de corriente de las cargas conectadas en cada barra.

De la ecuación (1.49), se puede observar que el sistema de impedancia armónica juega un papel importante en el sistema de respuesta para los armónicos, especialmente cuando la resonancia ocurre en el sistema. La **resonancia** es definida como una amplificación de la respuesta del sistema de potencia a una excitación periódica a una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del sistema ó frecuencia natural del sistema.

En un sistema de potencia, la mayoría de los problemas de resonancia son por la instalación de condensadores usados para corregir el factor de potencia o mejorar el nivel de tensión. La frecuencia de resonancia entre la inductancia del sistema y la capacitancia del condensador generalmente ocurre entre 300 Hz ( 5°) y 420 Hz (7°). Se producen dos tipos de resonancia: resonancia serie, que es de baja impedancia al flujo de la corriente armónica y resonancia paralelo, que tiene una alta impedancia al flujo de la corriente armónica.

### 1.5.1.1 Resonancia Serie

En la figura 1.4, si el banco de condensadores esta serie con la reactancia inductiva del sistema y crea un camino de baja impedancia para los armónicos de corriente, es una condición para que pueda ocurrir una resonancia serie. La resonancia serie puede causar un alto voltaje en el circuito dado a los armónicos de corriente concentrados en la impedancia menor que sirvió como camino. La resonancia serie a menudo causan fallas en los capacitores o fusibles debido a la sobrecarga. En la resonancia serie se cumple:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad (1.51)$$

Donde  $h_r$  es el orden del armónico a la frecuencia resonante.

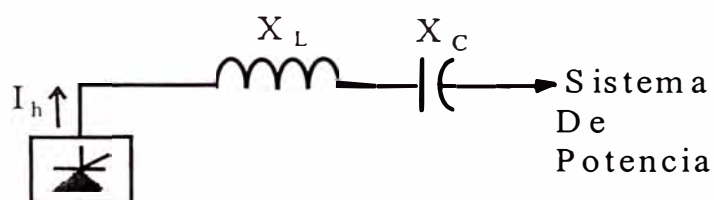


Figura 1.4 : Resonancia Serie

### 1.5.1.2 Resonancia Paralelo

La figura 1.5 el circuito mostrado muestra la topología de un circuito en donde una resonancia en paralelo puede ocurrir. La resonancia en paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del sistema son iguales a cierta frecuencia. Cuando existe resonancia paralelo en el sistema de potencia se produce una amplificación de la distorsión de voltaje y de corriente. La distorsión alta de voltaje puede producir corrientes distorsionadas circulando en circuitos adyacentes y la amplificación de la distorsión en la corriente puede ocasionar fallas de equipos.

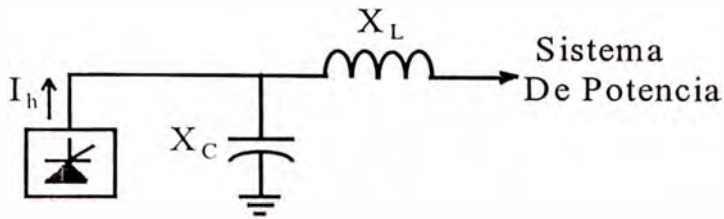


Figura 1.5 : Resonancia Paralelo.

En la resonancia en paralelo se cumple:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{CAP}}}, \quad (1.52)$$

Donde  $MVA_{SC}$  es la potencia en cortocircuito en MVA del sistema y  $MVAR_{CAP}$  es la potencia reactiva del capacitor. Esta aproximación sólo se cumple para sistemas con un alto X/R.

En la figura 1.6 se muestra otro esquema de una red de distribución en donde se puede producir resonancia paralelo, se podría decir que es un circuito en serie de una serie de circuito con resonancia paralelo, donde para cada circuito habrá una condición de resonancia que de hecho será menor que el caso de un condensador instalado en paralelo con la reactancia inductiva de la red.

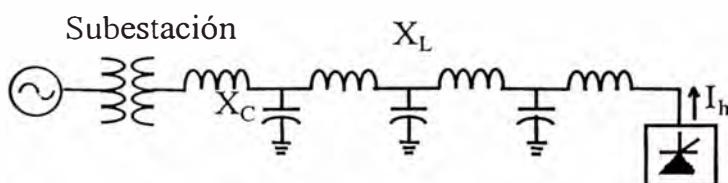


Figura 1.6 : Resonancia paralelo en un sistema eléctrico de distribución.



### 1.5.2 Aplicación en los sistemas eléctricos

En general uno puede pensar en dispositivos que producen distorsión como aquellos que no tienen una relación lineal entre el voltaje y la corriente. Esas relaciones pueden llevar a muchas formas de distorsión como:

- Una forma de onda periódica distorsionada que tiene una serie de Fourier con frecuencia fundamental igual a la frecuencia del sistema de potencia.
- Una forma de onda periódica distorsionada que tiene una serie de Fourier con frecuencia fundamental que es submúltiplo de la frecuencia fundamental del sistema.
- La forma de onda es aperiódica pero puede ser expresada como una serie trigonométrica. En este caso las componentes en la serie de Fourier que no son múltiplos enteros de la frecuencia son a veces llamados Interarmónicos.
- La forma de onda es aperiódica donde la serie de Fourier es una aproximación.

El primer caso es comúnmente encontrado y hay muchas ventajas para usar la descomposición en términos de armónicos. Desde el modelamiento de las redes como un sistema lineal, la propagación de cada armónico puede ser estudiado independientemente de los otros. El número de armónicos a ser considerado es usualmente pequeño, que simplifica su análisis. Las consecuencias como pérdidas pueden ser relacionados a componentes armónicos y mediciones de la calidad de la forma de la onda que puede ser desarrollado en términos de las amplitudes de las armónicas.

Ciertos tipos de pulsadores o moduladores crean formas de onda correspondientes a la segunda categoría. La tercera categoría puede ocurrir en ciertos sistemas con pulsadores modulados. Algunas situaciones prácticas como en transformadores o fundidores, las corrientes de inrush pueden corresponder al cuarto caso. El modelamiento de armónicos puede ayudarnos mucho en la solución de problemas en sistemas eléctricos de potencia pero estudios de transitorios son también importantes.

#### **1.5.2.1 Los Armónicos en Sistemas Trifásicos Balanceados y Desbalanceados**

En sistemas trifásicos balanceados bajo condiciones balanceadas de operación, los armónicos en cada fase tienen una específica relación. Por ejemplo, en caso del tercer armónico, la corriente en fase b debería retrasarse  $3 \times 120^\circ$  o  $360^\circ$ , y estos en la fase c deberían tener la misma magnitud. Esto, la tercera armónica no tiene desfaseamiento y aparece como componente de secuencia cero, el armónico 7mo es de secuencia positiva, etc. . El sistema de impedancias debe ser apropiadamente modelado basado en las secuencias.

Las magnitudes y ángulos de fase, en particular, de los voltajes de las tres fases y corrientes son sensitivas a la red o a cargas desbalanceadas. Aún para pequeñas desviaciones de condiciones balanceadas a la frecuencia fundamental, se ha observado que los armónicos desbalanceados pueden ser significantes. En el caso de corrientes de línea desbalanceadas y corrientes del neutro pueden contener todos los armónicos y contener componentes de todas las secuencias. Los convertidores trifásicos electrónicos pueden generar características no lineales bajo operación desbalanceada.

### 1.5.3 Métodos para el Flujo de Armónicos

El cálculo simple de distorsión calculado arriba es lo básico para la mayoría del software de estudios de armónicos. La principal desventaja del método es el uso de espectros ‘típicos’. Esto previene la operación bajo condiciones no típicas. Tales condiciones incluyen cargas parciales de los dispositivos que producen armónicos, una distorsión excesiva y desbalance. Para explorar tales condiciones el usuario debe desarrollar un espectro típico para cada condición cuando esta usando el método simplificado. Las desventajas han causado el desarrollo de métodos avanzados de análisis de armónicos. La meta es modelar aspectos físicos de la generación de armónicos del dispositivo como una función de las condiciones actuales del sistema. La idea general es crear un modelo para los armónicos producidos por el dispositivo en la forma:

$$F(V_1, V_2, \dots, V_n, I_1, I_2, \dots, I_n, C) = 0 \quad (1.53)$$

Aquí  $V_1, V_2, \dots, V_n$  son los componentes de los armónicos de voltaje, e  $I_1, I_2, \dots, I_n$  son los correspondientes componentes de los armónicos de corriente y  $C$  representa las múltiples operaciones y parámetros de diseño. La ecuación (1.53) permite el cálculo de los armónicos de corriente desde el conocimiento de los armónicos de tensión e incluye los límites del flujo de potencia. El procedimiento total es resolver simultáneamente (1.46) y (1.53).

### **1.5.3.1 Sistema de Potencia Armónica**

En un sistema de potencia con frecuencia fundamental  $f_0$ , las frecuencias armónicas de orden de  $h$  se representan de la siguiente forma  $h f_0$ . Los armónicos se asocian con las corrientes o tensiones de diferentes amplitudes y frecuencias.

## **1.6 Influencia de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia**

La influencia de los armónicos en general produce un calentamiento adicional y disminución de la vida útil de los componentes de un sistema eléctrico de potencia. Estos efectos producen un daño económico tanto en las instalaciones industriales como en las empresas de generación, transformación y distribución [1], cuyo valor estimado sólo es posible por medio del uso de probabilidades [1], [11].

Los armónicos también pueden ocasionar riesgos para el personal que trabaja en los sistemas eléctricos [21]

### **1.6.1 Influencia de los Armónicos en los Sistemas de Protección**

Los armónicos pueden afectar el funcionamiento de los relés de protección de redes, dependiendo de su diseño y principio de funcionamiento. La presencia de armónicos afecta, especialmente, a sistemas de protección digitales basados en muestreo de información y en los cruces por cero de las señales de tensión o corriente.

Por el momento no existen normativas con indicación de los niveles de armónicos que deben soportar los relés, fusibles y disyuntores; todos los ensayos se hacen a frecuencia nominal del sistema. Dos documentos recientes [19, 20] discuten el impacto que origina la distorsión en sistemas de potencia en el funcionamiento de los relés de protección. Sus principales consideraciones son:

Los relés, en general, no responden a un parámetro identificable tal como el valor eficaz de la señal o su componente fundamental.

El comportamiento del relé cuando se le somete a frecuencias individuales no da indicación alguna de su respuesta a una onda distorsionada conteniendo combinaciones de esas frecuencias.

El funcionamiento de relés de señales múltiples es menos previsible en presencia de armónicos que la de relés de una señal.

La respuesta de relés a señales distorsionadas varia, incluso, entre unidades de idénticas características nominales de distintos fabricantes o de distintos lotes de fabricación.

En general, los relés tienden a funcionar mas lentamente y con señales más elevadas.

Las características de los relés estáticos de protección a bajas frecuencias son muy sensibles a la presencia de armónicos.

Dependiendo del contenido armónico, los pares de funcionamiento de los relés pueden cambiar de sentido.

En general, los cambios ocasionados en las características de funcionamiento son pequeños para los niveles de distorsión que existen en condiciones de operación.

Factores de distorsión del 10% al 20% se consideran críticos para el funcionamiento de los relés.

### 1.6.2 Influencia de los armónicos en los equipos eléctricos y electrónicos

- Los armónicos de voltaje pueden perturbar controladores electrónicos. Por ejemplo: pueden afectar las condiciones del tiristor mediante el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje. [21].
- Los armónicos pueden causar errores adicionales en medidores con un disco de inducción. Por ejemplo: Un medidor de clase 2 de error, que quiere decir que tiene un error máximo de 2 %, puede incrementarse en 0.3 % ante la presencia de un 5% de nivel de armónico de tensión o corriente.

### 1.6.3 Influencia de los Armónicos en los Capacitores

Los capacitores son generalmente afectados por los armónicos de orden 5° y 7° . La distorsión de voltaje es de 4% para el armónico 5° y de 3% para el armónico 7°. De esta manera resulta en 20% para la corriente armónica de orden 5° y de 21% para la corriente armónica de orden 7° .

De acuerdo con la ANSI/IEEE 18-1980 especifica criterios que se deben tener en cuenta para el diseño o adquisición de un capacitor teniendo en cuenta el efecto de los armónicos.

### 1.6.4 Influencia de los Armónicos en los Transformadores

- Los armónicos producen en los transformadores calentamiento, este calentamiento puede dañar severamente al transformador. El efecto del calentamiento en el transformador trae consigo otras consecuencias como:
- El incremento de la **pérdida en los conductores**, si el transformador es sólo para requerimientos en kVA de la carga.

**1.6.4.1 Pérdidas por corrientes circulantes:** Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia.

**1.6.4.2 Pérdidas en el núcleo:** No son tan críticas como en los dos casos anteriores. Estas pérdidas se incrementan con el contenido de armónicos en la tensión.

Las pérdidas en los transformadores pueden ser estimadas mediante el conocimiento en p.u. del factor de pérdidas por corrientes circulantes que puede ser determinado por:

- Obtener el factor de los diseñadores.
- Probando al transformador y tomando los datos de acuerdo a la ANSI/IEEE Std C57.110.
- Tomando valores típicos de acuerdo al tipo y tamaño del transformador. Como se muestra en la siguiente tabla:

Tipo	MVA	Voltaje	% Pec
Dry	$\leq 1$		3-8
	$\geq 1.5$	5 kV	12-20
	$\leq 1.5$	15 kV	9-15
Tipo	MVA	Voltaje	% Pec
Oil-filled	$\leq 2.5$	480 V	1
	2.5 a 5	480 V	1-5
	$> 5$	480 V	9-15

**Tabla 1.5: Valores típicos de pérdidas circulantes de acuerdo al tipo y tamaño del transformador.**

Donde Pec son las pérdidas por corrientes circulantes.

### **1.6.5 Influencia de los Armónicos en los Motores**

Los armónicos que se presentan en los motores pueden producir que el motor gire en sentido contrario. Además incrementa las pérdidas, aumenta la vibración, el calentamiento y el ruido lo que produce una reducción de su eficiencia.

### **1.7 Solución a los Problemas Originados por los Armónicos**

Los filtros pasivos son efectivos para la mitigación de los problemas de armónicos. Estos filtros son diseñados generalmente para evacuar las corrientes armónicas en el sistema de potencia. Existen dos tipos de filtros: los filtros serie y los filtros shunt.

**1.7.1 Filtros Serie:** es caracterizado como un filtro para bloque de resonancia paralelo, este filtro tiene una alta impedancia a la frecuencia sintonizada.

**1.7.2 Filtro Shunt:** de características similares al filtro serie, pero con una baja frecuencia a la frecuencia sintonizada.

Debido a que la instalación de estos filtros crea la posibilidad de resonancia en la red, actualmente se están desarrollando nuevos dispositivos basados en la inteligencia artificial que ayudan a evitar y reducir estos problemas.

También es usado para evitar los problemas de resonancia en un sistema eléctrico el cambio de la respuesta en frecuencia de la impedancia del sistema [17]. Un caso de este tipo es cuando se quiere evitar la resonancia paralela en una red que tiene un condensador. En este caso se instala un inductor en serie con el condensador modificando el punto de resonancia del circuito a frecuencia que no existirán.

Los armónicos de corriente en los sistemas de potencia pueden también ser mitigados por medio de desfasadores angulares que son instalados en diferentes circuitos donde



se encuentran las cargas no lineales. Con estos métodos se produce la eliminación mutua de algunos armónicos.

Para eliminar los armónicos múltiplos de 3° se usan transformadores zigzag que proveen un camino de baja impedancia entre los arrollamientos en comparación con la impedancia de la fuente de armónicos.

La técnica de filtros activos ha sido desarrollada mucho en los últimos años. Estos filtros se usan para disminuir los voltajes o corrientes armónicas para esto: 1) Inyectan armónicos a 180° desfasados con la carga armónica ó 2) inyectan o absorben corrientes armónicas para mantener la forma de onda en niveles aceptables. Estos filtros eliminan algunos de los problemas de los filtros pasivos como el problema de resonancia.

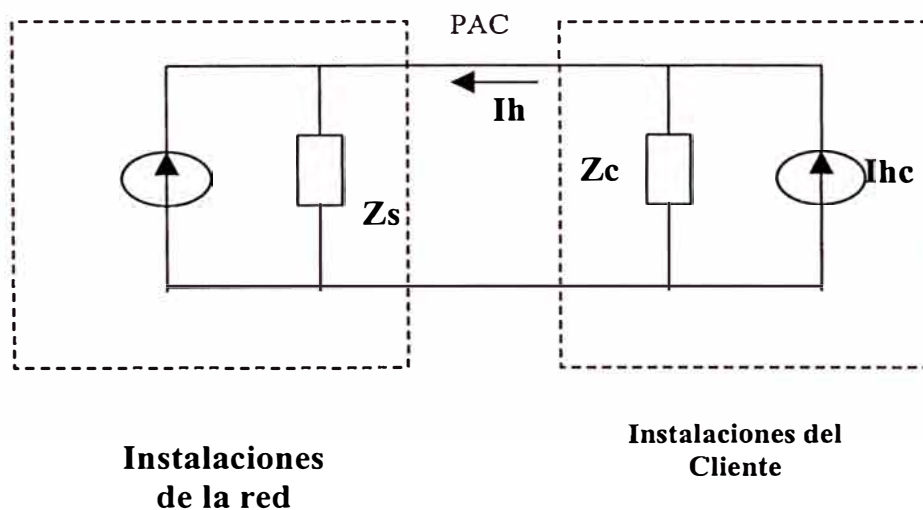
## CAPITULO II

### METODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS ARMÓNICOS

En este capítulo veremos diversos métodos que han sido desarrollados para determinar la direccionalidad de los armónicos. La mayoría de estos hacen su estudio en el PAC (Punto de Acoplamiento Común), que es el punto en el que el concesionario puede servir al cliente y a otros. [23].

#### 2.1 El Problema General: Nivel de la Emisión de Tensión y Corriente Armónica

Para cada armónica, el nivel de emisión de tensión armónica de una carga particular distorsionada es definida como los armónicos podrían ser causados por esta carga en el punto de acoplamiento común (PAC) si no existe otra carga presente no-conforme.



**Fig. 2.1** Circuito equivalente de una fuente y una carga.

En la Fig. 2.1 muestra el circuito equivalente que será usado para estudiar este punto.

Este circuito equivalente se basa en las siguiente premisas:

- El fenómeno es supuesto en un sistema trifásico balanceado.
- La red, es supuesta lineal. Es decir que puede representarse por impedancias constantes a cada frecuencia.

Para cada frecuencia de las armónicas, el sistema de potencia en el PAC y el cliente (incluyendo la parte no-conforme) pueden ser representadas por un sistema Norton equivalente en paralelo consistiendo de impedancias y una fuente ideal de corriente de armónicos. Los símbolos representan a:

- $I_{ho}$  es la fuente de corriente armónica equivalente de la alimentación (las barras de salida en el caso de un sistema de distribución, el generador en un sistema de distribución, representando a todos los armónicos contenidos en ella.
- $Z_s$  es la impedancia armónica de la alimentación vista desde el PAC
- $I_{hc}$  es la fuente de corriente armónica equivalente en las cargas del cliente, representando las cargas perturbadoras.
- $Z_c$  es la impedancia armónica de las cargas del cliente vista desde el PAC.
- $I_h$  es la corriente armónica que esta fluyendo desde el cliente al sistema de potencia, en el PAC

El nivel de emisión de tensión armónica es definido como:

$$V_{hc} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_{hc} \quad (2.1)$$

Aunque nuestra atención de acuerdo a las normas esta enfocada a la determinación de las emisiones de tensión armónica, las emisiones de corriente armónicas también pueden estudiarse con los criterios anteriores.

La corriente que es inyectada por una carga a cada frecuencia en el PAC, sin considerar otra carga no-conforme, es definida en la ecuación (2.2)

$$I_{h \text{ emiss}} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} I_{hc} = \frac{V_h + Z_c I_h}{Z_s + Z_c} = \frac{V_{hc}}{Z_s} \quad (2.2)$$

## 2.2 Métodos para Determinar el Origen de los Armónicos

### 2.2.1 Desconectando la Carga a Analizar

La idea básica de este método es tener dos mediciones, obtenidas con el interruptor en ON y OFF, para así de esta manera determinar el nivel de incidencia del cliente a la red.

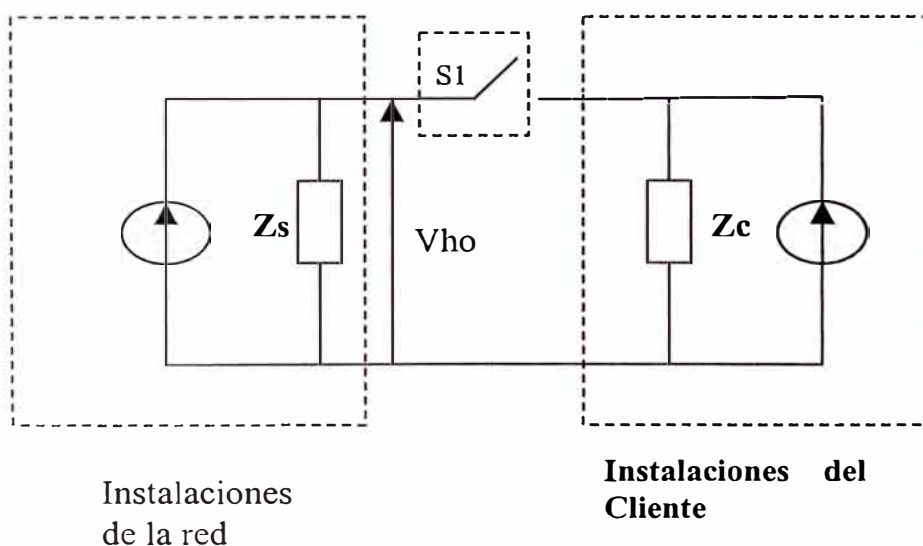


Fig. 2.2 a

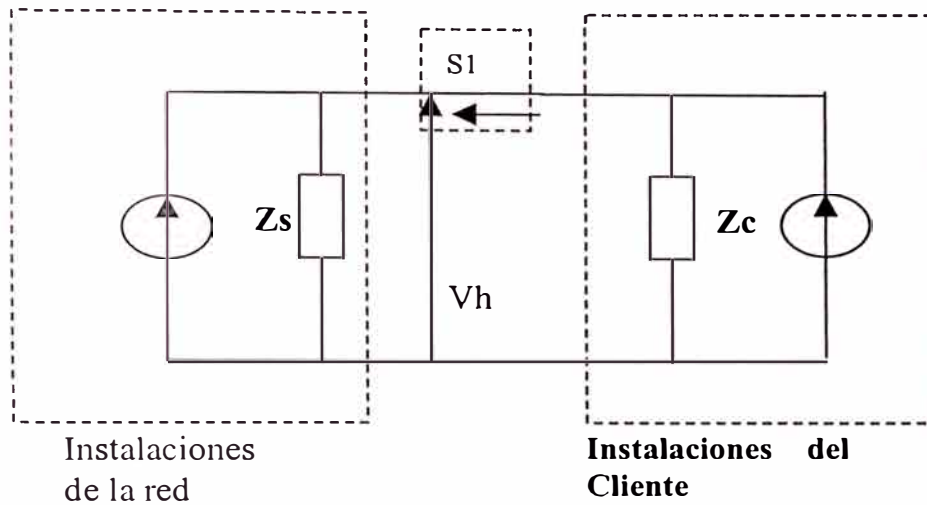


Fig. 2.2 b

**Fig. 2.2: Evaluación del nivel de emisión abriendo la carga considerada**

En la Fig. 2.2, el interruptor S1 es usado para conectar la carga con el sistema de potencia. Cuando el interruptor S1 está abierto, la medición en el PAC nos da  $V_{ho} = Z_s I_{ho}$ . Cuando el interruptor S1 es cerrado asumiendo que ambos la  $Z_s$  y  $I_{ho}$  están desbalanceados con respecto a la situación anterior:

$$\begin{aligned} V_h &= Z_s (I_h + I_{ho}) = Z_s I_h + V_{ho} \\ V_h &= Z_c (I_{hc} - I_h) \end{aligned} \quad (2.3)$$

De donde se obtiene:

$$I_{hc} = \frac{Z_s + Z_c}{Z_s Z_c} V_h - \frac{V_{ho}}{Z_s} \quad (2.4)$$

Finalmente, la emisión del cliente es calculada como:

$$V_{hc} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_{hc} = V_h - \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} V_{ho} \quad (2.5)$$

En casos simplificados donde  $|Z_s| \ll |Z_c|$ , esta ecuación se puede dar como:

$$V_h \cong V_h - V_{ho} \quad (2.6)$$

Esto se puede obtener usando los resultados de la medición de  $V_h$  y  $V_{ho}$ .

#### **2.2.1.1 Ventajas del Método:**

1. Permite determinar la emisión de armónicos de la carga y de la red a la carga.
2. Sólo es necesario el realizar dos mediciones para lograr este propósito.
3. Podría realizarse para la identificación individualizada de cargas perturbadoras.

Esto es posible en algunas plantas industriales.

#### **2.2.1.2 Desventajas del Método:**

1. El sólo hecho de interrumpir el circuito afectaría el servicio al cliente, sin tomar en cuenta el costo de la energía dejada de vender (en el caso de una empresa distribuidora) y en el caso de una planta industrial los costos involucrados de no usar la energía eléctrica.
2. Es necesario el conocimiento exacto de  $Z_s$  y  $Z_c$ , con excepción del caso simplificado.
3. Este método nos proporciona sólo un resultado momentáneo que puede variar con la variación de la carga.

### 2.2.2 Desconectando un elemento shunt auxiliar

Este método sólo se aplica cuando una impedancia shunt del cliente puede ser conectada separadamente del sistema. La impedancia de esta rama debe ser también conocida exactamente tan exactamente sea posible ( Ej.: Bancos de Capacitores, Filtros, etc).

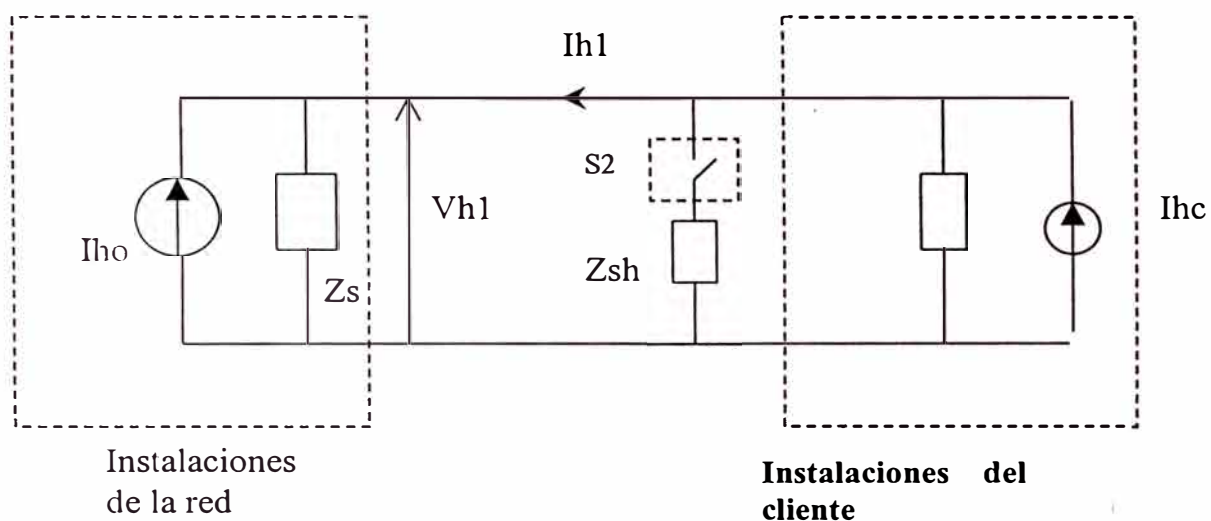


Figura 2.3 a

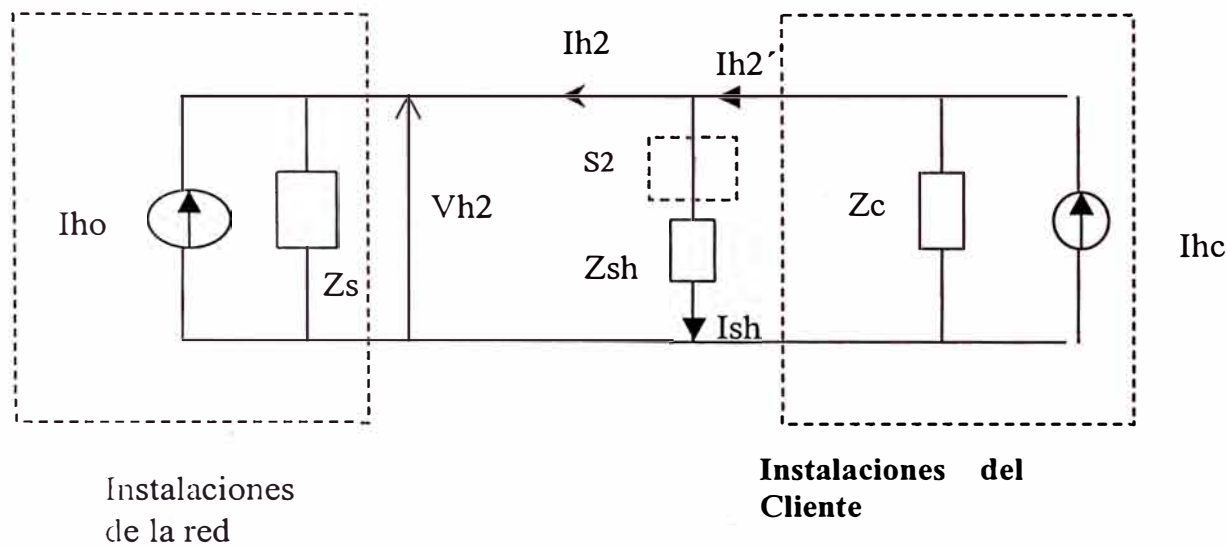


Figura 2.3 b

**Figura 2.3: Evaluación del nivel de emisión aperturando el elemento shunt auxiliar.**

Esta situación es mostrada en la Fig. 2.3 donde el interruptor S2 es usado para conectar el elemento shunt auxiliar  $Z_{th}$  a la red.

Cuando el interruptor S2 es abierto (situación 1), los armónicos de tensión en el PAC están dados por:

$$V_{h1} = Z_s(I_{h1} + I_{ho}) \quad (2.7)$$

$$V_{h1} = Z_c(I_{hc} - I_{h1}) \quad (2.8)$$

Cuando el interruptor S2 es conectado (situación 1), las ecuaciones serían:

$$V_{h2} = Z_s(I_{h2} + I_{ho}) \quad (2.9)$$

$$V_{h2} = Z_s(I_{h2} + I_{ho})$$

$$V_{h2} = \frac{Z_{sh} Z_c}{Z_{sh} + Z_c} (I_{hc} - I_{h2}) \quad (2.10)$$

$Z_{sh}$  es la impedancia del elemento shunt conectada.

Eliminando  $Z_c$  y  $Z_s$  podemos obtener la corriente armónica distorsionada del cliente  $I_{hc}$  y la impedancia equivalente vista desde el PAC, expresada únicamente en función de  $Z_{sh}$  y las medidas de las tensiones y corrientes armónicas.

$$I_{hc} = \frac{V_{h2} I_{h1} - V_{h1} I_{h2} - V_{h2} V_{h1} / Z_{sh}}{V_{h2} - V_{h1}} \quad (2.11)$$

$$Z_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{sh}} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_s}} = \frac{Z_{sh} (V_{h1} - V_{h2})}{V_{h1}} \quad (2.12)$$

Finalmente, el nivel de emisión de armónicos al considerar la carga distorsionada resulta:



$$V_{hc} = Z_{tot} I_{hc} = V_{h2} + Z_{sh} I_{h2} - Z_{sh} I_{h1} \frac{V_{h2}}{V_{h1}} \quad (2.13)$$

Como en el método anterior, la principal dificultad en aplicar esta fórmula es que  $V_{h1}$ ,  $I_{h1}$  y  $V_{h2}$ ,  $I_{h2}$ , son derivadas desde diferentes circuitos (no medidas de forma simultánea). Si la magnitud de los niveles de emisión de armónicos es investigada (como se hace usualmente) el problema resulta más simple.

En efecto los vectores  $V_{h1}$ ,  $I_{h1}$ ,  $V_{h2}$  y  $I_{h2}$  pueden ser escritos más explícitamente como:

$$\begin{aligned} V_{h1} &= V_{h1} \angle 0 \\ I_{h1} &= I_{h1} \angle \alpha_1 \\ V_{h2} &= V_{h2} \angle \theta_o \\ I_{h2} &= I_{h2} \angle (\alpha_2 + \theta_o) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde el ángulo de fase del factor  $V_{h1}$  es tomado como referencia.

El ángulo de fase de la impedancia  $Z_{sh}$  es  $\psi$ . Rescribiendo las ecuaciones de  $V_{hc}$  tenemos:

$$\begin{aligned} V_{hc} &= V_{h2} \angle \theta_o + Z_{sh} I_{h2} \angle (\theta_o + \alpha_2 + \psi) - \frac{Z_{sh} I_{h1} V_{h2} \angle (\theta_o + \alpha_1 + \psi)}{V_{h1}} \\ &= (V_{h2} \angle 0 + Z_{sh} I_{h2} \angle (\alpha_2 + \psi) - \frac{Z_{sh} I_{h1} V_{h2} \angle (\alpha_1 + \psi)}{V_{h1}}) (1 \angle \theta_o) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Y la magnitud de  $V_{hc}$  es:

$$|V_{hc}| = \left| V_{h2} \angle 0 + Z_{sh} I_{h2} \angle (\alpha_2 + \psi) - \frac{Z_{sh} I_{h1} V_{h2} \angle (\alpha_1 + \psi)}{V_{h1}} \right| \quad (2.16)$$

Esta fórmula es conveniente porque las magnitudes de  $V_{h1}$ ,  $I_{h1}$ ,  $V_{h2}$  y  $I_{h2}$  son tanto como las diferencias angulares  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son medidas mientras solamente la impedancia  $Z_{sh}$  es necesario conocerla.

Además, si la corriente esta fluyendo a través de la impedancia  $Z_{sh}$  puede ser también medida ( magnitud  $I_{sh}$ , ángulo de fase -  $\psi$  con respecto a  $V_{h2}$ ), la fórmula sería:

$$|V_{hc}| = \left| V_{h2} \angle 0 + \frac{V_{h2} I_{h2} \angle (\alpha_2 + \psi)}{I_{sh}} - \frac{V_{h2}^2 I_{h1} \angle (\alpha_1 + \psi)}{I_{sh} V_{h1}} \right| \quad (2.17)$$

Además, si la corriente  $I'_{h2} = I'_{h2} \angle (\theta_o + \alpha'_2)$  -2.18) . mostrada en la figura 2.3-puede ser medida, el nivel de emisión de armónicos será:

$$|V_{hc}| = \left| Z_{sh} I'_{h2} \angle \alpha'_2 - \frac{Z_{sh} I_{h1} V_{h2} \angle (\alpha_1 + \psi)}{V_{h1}} \right| \quad (2.18)$$

o

$$|V_{hc}| = \left| \frac{V_{h2} I'_{h2} \angle \alpha'_2}{I_{sh}} - \frac{I_{h1} V_{h2}^2 \angle (\alpha_1 + \psi)}{I_{sh} V_{h1}} \right| \quad (2.19)$$

En este caso, la precisión de la evaluación de la emisión del nivel de los armónicos será mas determinante que la precisión de los datos medidos.

Una de las formulas precedidas debería ser usada para determinar el nivel de emisión, dependiendo en las posibilidades de la medición y/o la precisión del conocimiento de la impedancia shunt  $Z_{sh}$ .

### 2.2.2.1 Ventajas del método:

- Los filtros o los bancos de condensadores tienen por lo general un interruptor.
- La influencia de la precisión del dato de la impedancia en los resultados será reducido comparado con el método basado en la desconexión de la carga considerada.

### 2.2.2.2 Desventajas:

- La presencia de un elemento shunt es necesaria.
- Este método provee resultados que son validos sólo para el momento de la prueba.

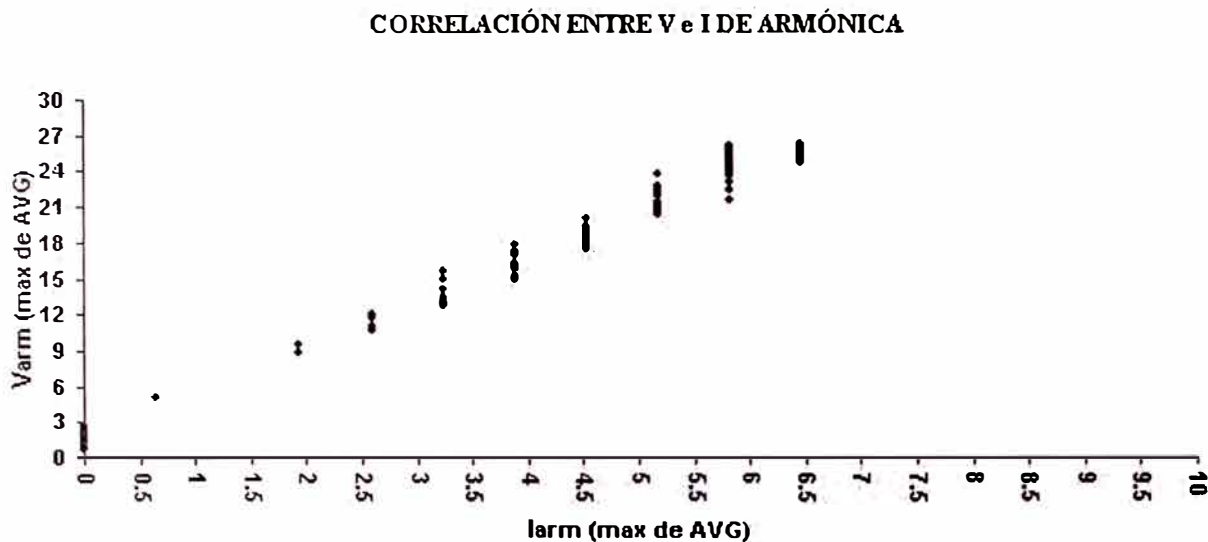
## 2.3 Determinación de la Direccionalidad sin Desconectar Cargas

### 2.3.1 Correlación de las Mediciones de Tensión y Corriente Armónica

La medición simultánea y la adquisición mediante el procesamiento en tiempo real FFT (Transformada Rápida de Fourier) de la tensión y la corriente armónica en el punto de acoplamiento común pueden ser usadas para modelar una distorsión armónica.

El análisis se hace para cada armónica y se utilizan los valores rms de la tensión y corriente. Cuando el nivel de distorsión de la red es estable se puede observar una buena correlación, como se muestra en la figura 2.4. Si aplicamos una regresión polinomial a los datos podemos obtener una representación analítica de la carga y también dar una estimación de la amplitud del nivel de armónico inicial de la red ( $V_{ho}$ ), que se obtiene mediante la extrapolación para  $I_h = 0$ ,

Por lo tanto, cuando el nivel de distorsión varía mucho (Ver fig.2.5), el nivel de correlación que se obtiene no es bueno.



**Fig. 2.4 - Ejemplo del ploteo de la correlación de la tensión vs corriente armónica 3° en un controlador electrónico de motor.**

Este método da una interesante información acerca del comportamiento de la carga no-conforme y el efecto de su incremento o decremento con el nivel de distorsión inicial de la red. Pero, puede no ser usado para la determinación de la contribución individual de la carga.

## CORRELACIÓN ENTRE V e I DE ARMÓNICA

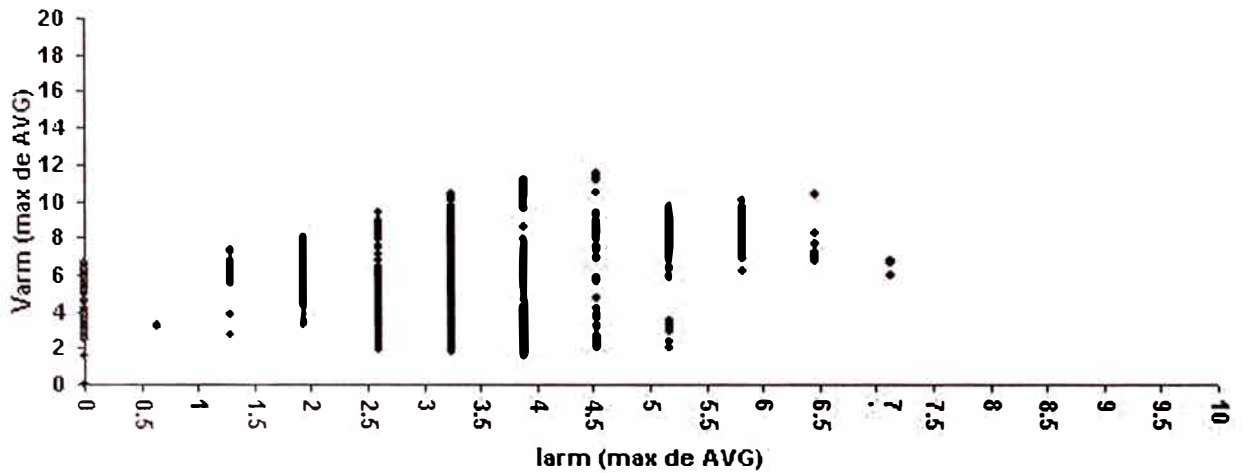


Fig. 2.5 Correlación entre la tensión y corriente armónica de orden 5° en un subestación de distribución MT/BT.

### 2.3.2 Modelamiento de la Carga de una Red de Distribución Utilizando Susceptancias y Conductancias

De la medición de las tensiones y corrientes en el lado secundario de un transformador de AT/MT, la admitancia equivalente de las cargas aguas abajo puede ser escrita:  $Y_1 = g_1 + j b_1$ . Si nosotros repetimos esto varias veces, es posible establecer una correlación entre la conductancia  $g_1$  y la susceptancia  $b_1$ . La relación entre estos dos parámetros es lineal que se expresa como:

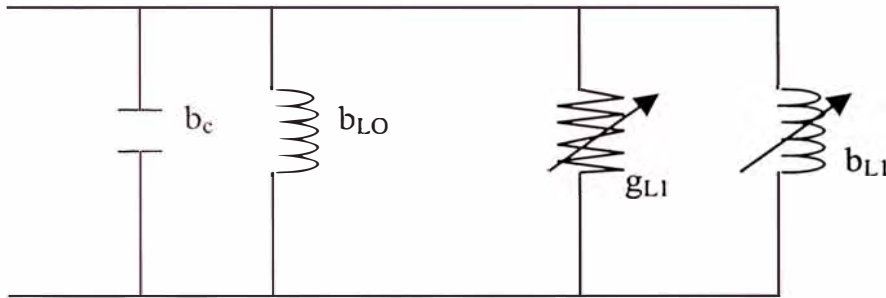
$$b_1 = \alpha_1 - \beta_1 g_1 \quad (2.20)$$

La admitancia total  $Y_1$  puede ser definida como. Ver Fig. ( 2.6)

Donde:

- $g_{L1}$  es la conductancia de la carga.
- $b_{L1}$  es la susceptancia inductiva de la carga.

- $b_{L0}$  es una susceptancia inductiva constante. (Ej. : fluctuaciones independientes de la carga como la magnetización de un transformador).
- $b_c$  es una capacitancia constante ( banco de capacitores para la corrección del factor de potencia, capacitancia de los cables).



**Fig. 2.6 Circuito equivalente de una red de distribución a la 5<sup>o</sup> armónica.**

Podemos escribir:

$$\alpha_1 = b_c - b_{L0} \cong b_c$$

$$\beta_1 = \frac{b_{L1}}{g_{L1}} \quad (2.21)$$

$$g_1 = g_{L1}$$

En la práctica se demuestra que, en la presencia de capacitores,  $b_c \gg b_{L0}$

La admitancia de una red de distribución a la 5<sup>o</sup> armónica y su circuito equivalente pueden ser estimadas en las siguientes particulares circunstancias:

- La red se comporta como si fuera carga; el nivel de corriente armónica generada por la carga es pequeña y la potencia activa que esta fluyendo a este subsistema es siempre positiva, es decir  $P_5 \geq 0$ .
- No hay condición de resonancia para el armónico 5<sup>o</sup>.

- No hay uso intermitente de un equipo especial y/o un gran capacitor, entonces se puede obtener una medición estable durante todo el periodo de medición.

Cuando estas condiciones son satisfechas, la medición de la conductancia  $g_5$  y susceptancia  $b_5$  presentan considerables fluctuaciones en el tiempo pero, estas fluctuaciones son correlacionadas con la evolución de  $g_1$  y susceptancia  $b_1$ .

Se observa también una relación lineal:

$$\begin{aligned} b_1 &= \alpha_1 - \beta_1 g_1 \\ b_5 &= \alpha_5 - \beta_5 g_5 \end{aligned} \quad (2.22)$$

En la figura 2.5 se muestra el circuito equivalente correspondiente al quinto armónico, donde las susceptancias y conductancias del armónico 5 pueden expresarse en función de la frecuencia fundamental como:

$$\begin{aligned} g_{L5} &= k_g g_{L1} \\ b_{L5} &= k_b \frac{b_{L1}}{5} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Luego los parámetros  $\alpha_5$  y  $\beta_5$  son expresados como sigue:

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= 5b_c - \frac{b_{L0}}{5} \\ \beta_5 &= \frac{b_{L5}}{g_{L5}} = \frac{k_b}{5k_g} \beta_1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

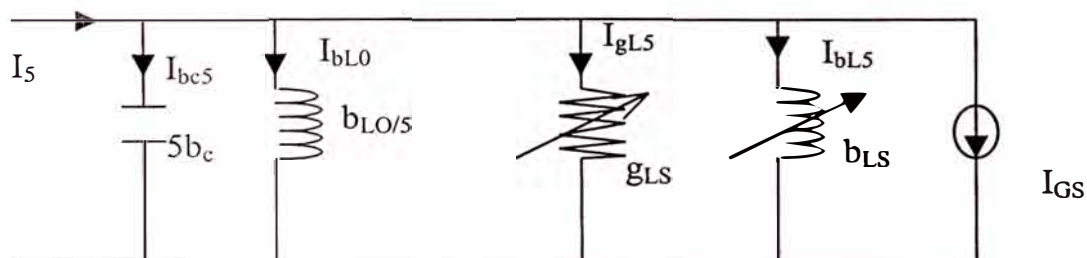


Fig. 2.7 muestra el circuito equivalente de una red de distribución a la quinta armónica.

- No hay uso intermitente de un equipo especial y/o un gran capacitor, entonces se puede obtener una medición estable durante todo el periodo de medición.

Cuando estas condiciones son satisfechas, la medición de la conductancia  $g_5$  y susceptancia  $b_5$  presentan considerables fluctuaciones en el tiempo pero, estas fluctuaciones son correlacionadas con la evolución de  $g_1$  y susceptancia  $b_1$ .

Se observa también una relación lineal:

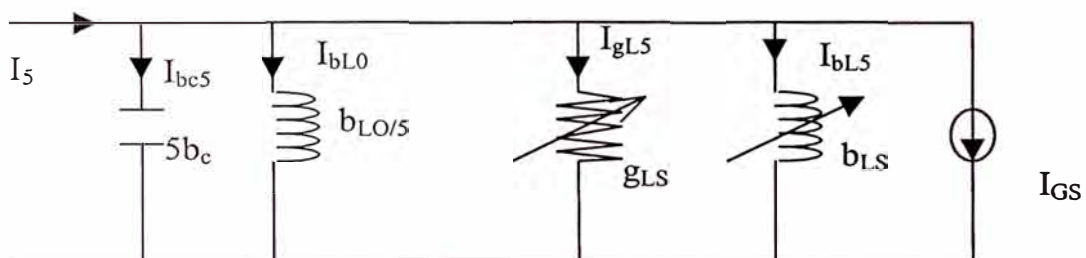
$$\begin{aligned} b_1 &= \alpha_1 - \beta_1 g_1 \\ b_5 &= \alpha_5 - \beta_5 g_5 \end{aligned} \quad (2.22)$$

En la figura 2.5 se muestra el circuito equivalente correspondiente al quinto armónico, donde las susceptancias y conductancias del armónico 5 pueden expresarse en función de la frecuencia fundamental como:

$$\begin{aligned} g_{L5} &= k_g g_{L1} \\ b_{L5} &= k_b \frac{b_{L1}}{5} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Luego los parámetros  $\alpha_5$  y  $\beta_5$  son expresados como sigue:

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= 5b_c - \frac{b_{L0}}{5} \\ \beta_5 &= \frac{b_{L5}}{g_{L5}} = \frac{k_b}{5k_g} \beta_1 \end{aligned} \quad (2.24)$$



**Fig. 2.7 muestra el circuito equivalente de una red de distribución a la quinta armónica.**



La quinta armónica de corriente generada por la carga es la suma vectorial de la corriente constante y de una fluctuante que acompaña las fluctuaciones de la carga. De el circuito equivalente de la Fig. 2.5 se puede calcular de la siguiente forma.

$$I_{G5} = I_5 - I_{bc5} - I_{bL0} - I_{gL5} - I_{bL5} \quad (2.25)$$

### Desventajas:

1. La corriente armónica generada puede solamente ser calculada si la admitancia puede ser obtenida mediante las relaciones arriba mencionadas.
2. Las consideraciones tomadas para los cálculos de estas admitancias no son fácilmente cumplidas en la practica.

### 2.3.3 Método Basado en la Técnica de Instrumentación Virtual (VI)

Debido al crecimiento de cargas que absorben corrientes no sinusoidales, la distorsión de la corriente y la tensión en los sistemas de distribución están incrementándose cada vez más. Los métodos de investigaciones actuales no pueden proporcionar información sobre la responsabilidad de la distorsión armónica en un punto de medición dado. Esto ha hecho que los investigadores desarrollen nuevas técnicas y metodología para lidiar con este problema. En esta parte veremos una técnica basada en la instrumentación virtual (VI Virtual Instrumentation) [8].

Toda señal se puede definir de la siguiente forma:

$$w(t) = \text{Re} \left[ \sqrt{2} \sum_{h=0}^{+\infty} W_h e^{j\phi_h} e^{jh\omega_1 t} \right] \quad (2.26)$$

Donde:

$\text{Re}[\ ]$ : denota la parte real de [ ].

$h$ : denota el orden del armónico.

$W_h$  : denota el valor rms de la componente armónica de orden  $h$  de la señal .

$\varphi$ : denota el ángulo de fase de la componente armónica de orden  $h$  de la señal.

$\omega_1$ : denota la frecuencia angular a frecuencia fundamental o industrial  $f_1$ .

La distorsión armónica puede ser caracterizada por medio del THD ( Total Harmonic Distortion).

$$THD_{\omega} = \sqrt{\sum_{h=2}^{N_w} \left(\frac{W_h}{W_1}\right)^2} \quad (2.27)$$

En la ecuación (2.27)  $N_w$  es la componente de armónica de mayor frecuencia con una amplitud significativa.

La  $\{ N_w \}$  para cada orden de armónico puede dividirse en dos:  $\{N_s\}$  y  $\{ N_l \}$ ;

$$\{N_s\} \cap \{N_l\} = \emptyset$$

El subconjunto  $\{N_s\}$  esta formado por los armónicos que cumplen la condición:  $Ph \geq 0$ ; Inclusive cuando  $h = 1$ .

Excepto para cargas como lámparas incandescentes u otros en donde  $Ph$  no esta relacionada con la conversión de la energía del proceso.

El subconjunto  $\{N_I\}$  esta formado por los armónicos que cumplen la condición:  $Ph < 0$ .

Se puede decir que  $N_s$  es relevante para ambos la fuente de energía y la fuente de distorsión armónica localizado al lado de la fuente de energía y  $N_I$  es relevante para la fuente de distorsión armónica al lado de la carga.

Por lo tanto la señal puede dividirse en dos componentes :

$$\omega(t) = \omega_s(t) + \omega_I(t) \quad (2.28)$$

Donde:

$$\omega_s(t) = \sum_{h \in \{N_s\}} \omega_h(t); \quad \omega_I(t) = \sum_{h \in \{N_I\}} \omega_h(t) \quad (2.29)$$

$$THD_{\omega_s} = \sqrt{\sum_{h \neq 1, h \in \{N_s\}} \left(\frac{W_h}{W_1}\right)^2} \quad (2.30)$$

De esta manera puede definirse dos diferentes THD, el primero de ellos referido a  $w_s$  y el segundo de ellos referido a  $w_t$  de la sgte forma:

$$THD_{\omega_s} = \sqrt{\sum_{h \neq 1, h \in \{N_s\}} \left(\frac{W_h}{W_1}\right)^2} \quad (2.31)$$

Caracteriza la distorsión de la señal que causa perdidas en la carga y es por lo tanto atribuida a la contaminación armónica existente en la fuente; y

$$THD_w = \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{N_w} \left(\frac{W_h}{W_1}\right)^2} \quad (2.32)$$

Mide la contribución a la distorsión armónica asociadas a las pérdidas en el lado de la fuente de energía y que es atribuida a la carga o operación del cliente.

Las ecuaciones (2.31) y (2.32) pueden ser definidas tanto para la tensión como para la corriente pero además cumplen la siguiente relación:

$$THD_{\omega} = \sqrt{(THD_{os})^2 + (THD_{\omega L})^2} \quad (2.33).$$

### 2.3.3.1 Índice de Corriente Armónica.

Se define de la siguiente forma:

$$HI = \frac{\sqrt{\sum_{h \in \{N_s\}} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h \in \{N_s\}} I_h^2}} \quad (2.34)$$

La presencia de un alto índice indica la gran responsabilidad de las distorsiones armónicas al cliente; un valor bajo de este índice, en la presencia del mismo THD de corriente indica la gran responsabilidad de la fuente para los armónicos que pasan por el punto de medición.

### 2.3.3.2 Corrientes Conformes y Corrientes No Conformes

La corriente  $i(t)$  con valor rms  $I$ , puede ser descompuesta en corrientes conformes  $i_c(t)$  y en corrientes no conformes  $i_{nc}(t)$ . La corriente  $i_c(t)$  es la porción de la corriente  $i(t)$  que retiene el mismo nivel de distorsión que la tensión  $v(t)$  y se calcula de la siguiente manera:

$$i_c(t) = \text{Re} \left[ \sqrt{2} \sum_{h=1}^{N_{\omega}} U_h Y_1 e^{j(\phi_h - h \cdot \varphi_1)} e^{jh\omega t} \right] \quad (2.35)$$

**Donde :**

$Y_1 e^{-j\phi_1}$  : es la admitancia compleja a frecuencia fundamental .

$U_h$ : es el valor rms de la armónica h.

El valor rms de  $I_c$  es por lo tanto  $I_c = Y_1 U$  donde U es el valor rms de la tensión. La corriente no conforme es

$$i_{nc}(t) = i(t) - i_c(t). \quad (2.36)$$

La corriente no conforme es generada por ambas, variadores de velocidad o cargas no lineales, cargas lineales que tienen parámetros que dependen de la frecuencia. La corriente conforme  $i_c$  es atribuible a la fuente de energía y  $i_{nc}$  es atribuible a la carga.

### 2.3.3.3 Problemas de Medición

El problema de medición que se pudieran presentar sería debido a la sensibilidad y precisión de las mediciones cuando instrumentos basados en DSP (Procesamiento Digital de Señales) son utilizados. Esto es debido a que cuando el DSP es usado en la medición de por ejemplo el THD se basa en la comparación entre combinaciones lineales de del mismo dato muestra, las contribuciones sistemáticas a la incertidumbre afectan cualquier valor mostrado Kw. o  $w(t)$  tendiendo a compensar cada uno.

La medición de las cantidades (2.31), (2.32) y (2.34) requieren del análisis del signo de la potencia para cada armónica, por lo tanto el efecto de la propagación retrazada de las señales de tensión y corriente deberían ser consideradas así como también la condición de los dispositivos. La estimación de cualquier potencia activa  $P_h$  es afectada por el llamado ángulo de error, denotado de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta P_h}{P_h} = \varepsilon_h Q_h \quad (2.37)$$

Donde  $\varepsilon_h$  y  $Q_h$  son el ángulo de error y el factor de calidad de la impedancia equivalente en la cual  $P_h$  es disipada, respectivamente. Así para determinar sin incertidumbre el signo de  $P_h$  es necesario satisfacer la siguiente condición:  $\varepsilon_h Q_h < 1$ .

Es posible determinar  $\varepsilon_h$  mediante procedimientos de calibración y luego corregir sus efectos, por lo tanto la condición arriba mencionada es fácilmente satisfecha.

### 2.3.4 Método de Emanuel Basado en el Cálculo del ITHD y del VTHD

La energía eléctrica es generada a una frecuencia fundamental y su forma de onda es casi perfectamente sinusoidal. Los equipos generalmente son diseñados para trabajar en condiciones de poco nivel de distorsión, pero cuando existe un nivel de tensión armónica estos equipos no trabajan adecuadamente ( Ver capítulo 1). Para situaciones prácticas, más que el 99 % de potencia activa suministrada a una carga es asumida como secuencia positiva a 60 Hz. Por lo tanto, es lógico separar la potencia a la frecuencia fundamental (60 Hz) con las que no lo son [22]. Esta separación es basada en el valor rms de la corriente y de la tensión fundamental,  $V_1$ ,  $I_1$ , y la componente total armónica  $V_H$ ,  $I_H$

La tensión y la corriente se pueden separar de los armónicos ( $n > 2$ ) :

$$I^2 = I_1^2 + I_h^2 \quad (2.38)$$

$$I_h^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2.39)$$

La potencia aparente está determinada por:

$$S = VI^* \quad (2.40)$$

$$S^2 = S_1^2 + S_h^2$$

$$V^2 = V_1^2 + V_h^2 \dots; \dots V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (2.41)$$

Tiene dos componentes  $S_1 = V_1 I_1$  ;  $S_1 = P_1 + jQ_1$  es la potencia aparente a la frecuencia fundamental, y :

$$S_N^2 = \sqrt{D_I^2 + D_V^2 + D_H^2} \quad (2.42)$$

Es la potencia aparente a una frecuencia diferente a la frecuencia fundamental.

$D_I = V_1 I_H =$  Potencia Distorsionada de Corriente.

$D_V = V_H I_1 =$  Potencia Distorsionada de la Tensión.

$S_H = V_H I_H =$  Potencia Aparente Armónica.

Ambos términos  $D_I$  y  $D_V$  son potencias no activas y representa los VA contribuidos por la interacción entre la tensión a la frecuencia fundamental (ó corriente) y las corrientes (tensiones) armónicas de frecuencia distinta a la frecuencia fundamental (60 Hz). El término  $S_H$  contiene la potencia armónica  $P_H$  y la potencia armónica no activa contribuida por las tensiones y las corrientes.

Reemplazando se tiene:

$$(S_N / S_1) = \sqrt{(V_I I_H / V_1 I_1)^2 + (V_H I_I / V_1 I_1)^2 + (V_H I_H / V_1 I_1)^2} \quad (2.43)$$

o:

$$(S_N / S_1) = \sqrt{(ITHD)^2 + (VTHD)^2 + (ITHD.VTHD)^2} \quad (2.44)$$

Esta ecuación muestra que  $S_N$  es una función de la distorsión de la corriente y tensión. Esta ecuación se puede aproximar a:

$S_N \approx (ITHD)S_1$  , cuando  $VTHD < 5\%$  y  $ITHD > 20\%$  el error de usar esta estimación es menos que 1 %. Esto cubre la mayoría de cargas no lineales. Cuando  $ITHD < 20\%$ :  $S_N \approx S_1 \sqrt{(ITHD)^2 + (VTHD)^2}$  da un error del 15 %.

Para todas las condiciones encontradas en la práctica, el término  $S_H$  contribuye de manera ínfima a la magnitud de  $S_N$ . Además, como  $P_N < S_H$  la contribución de  $P_H$  comparada con  $P_1$  es mínima.

De acuerdo a Emmanuel [22] cuando  $ITHD < 10\%$  o aún el 20 % en el PAC. El nivel de distorsión de la tensión es aceptable. Y además, la responsabilidad de la carga o de la red se determina por medio de la siguiente comparación:

Si:  $ITHD < VTHD$  El armónico no es producido por la carga.

Si:  $ITHD > VTHD$  El armónico es producido por la carga.

Si:  $ITHD \approx VTHD$  El armónico es producido por la carga y la red.



## **CAPITULO III**

### **MÉTODO DE SEPARACIÓN DE LA CORRIENTE ARMÓNICA DE LA CARGA**

#### **3.1. Introducción**

En los capítulos anteriores se habló sobre los diversos métodos que existen para determinar la direccionalidad de los armónicos, pero también se mostraron las diversas desventajas y ventajas que presenta cada método. El presente método separa la corriente en el PAC en dos tipos de corriente: 1) corriente conforme y corriente no conforme. Es similar al método que usa la técnica de instrumentación virtual pero con un enfoque diferente.

#### **3.2 Corriente No Conforme y Corriente Conforme**

Las cargas pueden dividirse de dos tipos:

1. **Carga Conforme:** es una carga que no causa variaciones en la forma de onda de la tensión.
2. **Carga No-Conforme:** es una carga que causa variaciones en la forma de onda de la tensión. Este tipo de cargas a su vez puede dividirse en tres tipos:
  - a. **Carga No-Conforme Deseable:** son cargas que ante la presencia de armónicos disminuyen su nivel de incidencia en la red.

b. **Carga No-Conforme No Deseable:** son cargas que ante la presencia de armónicos aumentan su nivel de incidencia en la red.

c. **Carga No-Conforme Generadora:** son cargas que absorben corrientes armónicas aún cuando la forma de onda de la tensión no posea armónicos. Como resultado de la corriente (demanda) armónica y la impedancia de la fuente, la tensión es distorsionada.

Asumiendo que la onda de la tensión es puramente sinusoidal antes de conectarle cualquier carga. Si conectamos una carga la corriente va a comenzar a fluir generando pérdidas en los cables o líneas de la red. Si la carga controla la corriente que absorbe de la red, de manera que la corriente y la tensión tienen la misma tendencia en todo los ciclos. A este tipo de carga se le llama carga conforme.

Desde el punto de vista de análisis de armónicos, una carga conforme es aquella que tiene la misma impedancia para todas las frecuencias.

Ahora si conectamos una fuente, que posee un 10 % de la tensión fundamental para la armónica de orden  $n$ , la corriente armónica de orden  $n$ , que pasa por la carga, tendrá también un 10 % de la fundamental. Esto es porque la impedancia es la misma para todas las frecuencias. La tensión en la carga tendrá también 10 % de la fundamental de la armónica de orden  $n$ , lo único que variaría sería la amplitud, que sería menor.

Una carga puramente resistiva es una carga conforme bajo todas las circunstancias. Las carga inductivas y capacitivas son lineales. Estas cargas ante la alimentación con una fuente sin ningún contenido de armónico no presentarán problemas de armónicos; pero si la fuente tiene un contenido de armónicos la carga será

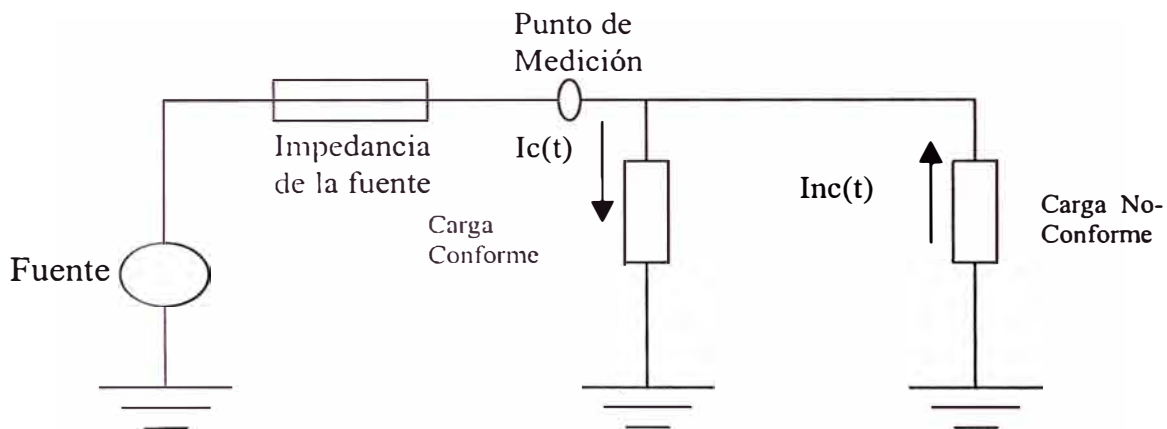
comportará como una carga no-conforme. La impedancia de este tipo de cargas depende de la frecuencia. Cuando una tensión distorsionada es suministrada a este tipo de cargas, la corriente no tendrá la misma forma de onda de la tensión suministrada para todas las frecuencias. La tensión será alterada en forma después de la inserción de este tipo de carga, a menos que la tensión original este no distorsionada.

La clasificación si una carga es no-conforme o conforme es independiente del comportamiento de la tensión.

### 3.2.1 Descomposición de una Carga en una Carga No-Conforme y Conforme

Una carga típica puede ser descompuesta en carga no-conforme y carga conforme.

Estas cargas se pueden modelar en forma paralela tal como se muestra en la fig. 3.1.



**Fig. 3.1: Modelo de un Sistema de Potencia**

La corriente total medida en el punto de medición será la suma de las corriente - conforme y corriente no-conforme. La corriente no-conforme es aquella que distorsiona la forma de onda de la tensión y la corriente conforme es aquella que no distorsiona la forma de onda de la tensión y hasta inclusive puede mejorarla.

En el dominio de la frecuencia, la porción de la corriente, que tiene una relación constante compleja con la tensión para todas las frecuencias es la parte conforme de la corriente. Esta es la demanda de corriente de la corriente conforme de la carga. El balance de la corriente es la parte no-conforme de la corriente.

### 3.3 Separación de la Parte No-Conforme

Dado una tensión  $v(t)$  y una corriente medida  $i(t)$  en el punto de medición de la carga. Dado una corriente conforme  $I_c(t)$  (conocido también como corriente no distorsionadora o corriente amigable [22]) que es parte de la corriente que fluye de la red al cliente. También, dado una corriente no-conforme  $I_{nc}(t)$  (conocido también como corriente distorsionadora ó corriente no amigable [22]) que es una parte de la corriente que fluye del cliente a la red.

Entonces, se cumple la siguiente relación:

$$I(t) = I_c(t) - I_{nc}(t) \quad (3.1)$$

Dado  $V(j\omega)$ ,  $I(j\omega)$ ,  $I_c(j\omega)$ ,  $I_{nc}(j\omega)$  las correspondientes transformaciones de Fourier.

Tenemos:

$$I(j\omega) = I_c(j\omega) - I_{nc}(j\omega) \quad (3.2)$$

La parte no-conforme de la corriente tiene una razón constante compleja  $Y$  al tensión para todas las frecuencias como se muestra en (3.3).

$$I_c(j\omega) = Y.V(j\omega) \quad (3.3)$$

Dado el hecho de que la carga no puede generar potencia a frecuencia fundamental, la corriente no-conforme a esta frecuencia será cero, como se muestra en (3.4).

$$I_{nc}(j\omega_1) = 0 \quad (3.4)$$

Donde  $\omega_1$  es la frecuencia fundamental.

Sumando (3.3) para la frecuencia  $\omega_1$  y (3.4), resulta (3.5).

$$I_c(j\omega_1) + I_{nc}(j\omega_1) = y.V(j\omega_1) \quad (3.5)$$

La constante desconocida  $Y$  se puede obtener usando (3.2) y (3.5).

$$Y = I(j\omega_1)/V(j\omega_1) \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.6) en (3.3), la parte conforme de la corriente esta dada por (3.7)

$$I_c(j\omega) = I(j\omega_1)/V(j\omega_1) \cdot V(j\omega) \quad \omega = \omega_1, \omega_2 \dots \omega_n \quad (3.7)$$

Del balance de la corriente se obtiene la parte no-conforme de la corriente, dada por (3.8).

$$I(j\omega) - I_c(j\omega) = I(j\omega) - I(j\omega_1)/V(j\omega_1) \cdot V(j\omega) \quad \omega = \omega_1, \omega_2 \dots \omega_n \quad (3.8)$$

La corriente no-conforme  $I_{nc}(j\omega)$  se obtiene cambiando de signo a (3.8).

$$I_{nc}(j\omega) = [I(j\omega_1)/V(j\omega_1) \cdot V(j\omega)] - I(j\omega) \quad \omega = \omega_2, \omega_3 \dots \omega_n \quad (3.9)$$

Se puede observar que la corriente conforme contiene corriente a la frecuencia fundamental y a otras frecuencias. La corriente no-conforme contiene corrientes a frecuencias distintas de la frecuencia fundamental.

### 3.3.1. Flujo de Potencia de Armónicos

Como se ha podido ver anteriormente los armónicos pueden fluir en ambas direcciones, que pueden ser separadas.

La potencia total que absorbe la carga esta dada por (3.10). El superíndice \* representa el complejo conjugado.  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  son las frecuencias.

$$P + jQ = \sum_{k=1}^n V(j\omega_k) \cdot I(j\omega_k)^* \quad (3.10)$$

La potencia total conforme  $P_c + jQ_c$  que fluye de la fuente a la carga esta dada por:

$$P_c + jQ_c = \sum_{k=1}^n V(j\omega_k) \cdot I_c(j\omega_k)^* \quad (3.11)$$

Donde k toma valores a partir de 2.

La Potencia no-conforme  $P_{nc} + jQ_{nc}$  esta dada por:

$$P_{nc} + jQ_{nc} = \sum_{k=2}^n V(j\omega_k) \cdot I_{nc}(j\omega_k)^* \quad (3.12)$$

Se puede podria notar que la potencia no conforme (activa y reactiva a todas las frecuencias) generadas por un cliente pueden ser negativas, si el cliente esta mejorando sus formas de onda.

Además se pueden escribir las siguientes ecuaciones en el dominio de tiempo:

$$V(t) = \sum_{k=1}^n V_k \text{sen}(k\omega t + \theta_k) \quad (3.13)$$

$$I(t) = \sum_{k=1}^n I_k \text{sen}(k\omega t + \phi_k) \quad (3.14)$$

$$I_c(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_1}{V_1} V_k \text{sen}(k\omega t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1)) \quad (3.15)$$

$$I_{nc}(t) = I(t) - I_c(t) \quad (3.16)$$

**Donde:**

**Inc:** Es la corriente no-conforme.

**Ic:** Es la corriente conforme.

### 3.4 Ejemplos de Cálculo de la Corriente Conforme y No Conforme

Mostraremos en este punto algunos ejemplos de la aplicación de este método para cargas simples [7].

Nos basaremos en los datos de esta tabla:

	<b>Fundamental</b>	<b>Armónico 3</b>	<b>Armónico 5</b>
<b>Porcentaje</b>	100.0000	5.0000	5.0000
<b>Amplitud</b>	0.9000	0.0450	0.0450
<b>Fase</b>	0.0000	-10.0000	20.0000

**Tabla 3.1 Tensión Distorsionado**

Los datos que se muestran en la tabla 3.2 se obtuvieron mediante los siguientes cálculos:

$$V_1 = 0.9\angle 0; V_3 = 0.045\angle -10; V_5 = 0.045\angle 20$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z} = 0.45\angle 0; I_3 = \frac{V_3}{Z} = 0.0225\angle -10; I_5 = \frac{V_5}{Z} = 0.0225\angle 20$$

Cálculo de las corrientes conformes (Ic.) Usando la ecuación (3.7):

$$I_c(j\omega_1) = \left[ \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \right] \cdot V(j\omega_1) = \left( \frac{0.45\angle 0}{0.90\angle 0} \right) \cdot 0.90\angle 0 = 0.45\angle 0$$

$$I_c(j\omega_3) = \left[ \frac{I(j\omega_3)}{V(j\omega_3)} \right] \cdot V(j\omega_3) = \left( \frac{0.0225\angle -10}{0.045\angle -10} \right) \cdot 0.045\angle -10 = 0.0225\angle -10$$

$$I_c(j\omega_5) = \left[ \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \right] V(j\omega_5) = \left( \frac{0.45\angle 0}{0.90\angle 0} \right) \cdot 0.045\angle 20 = 0.0225\angle 20$$

Cálculo de las corrientes no conformes (Inc). Usando la ecuación (3.9):

$$I_{nc}(j\omega_3) = I_c(j\omega_3) - I(j\omega_3) = 0.0225\angle -10 - 0.0225\angle -10 = 0\angle 0$$

$$I_{nc}(j\omega_5) = I_c(j\omega_5) - I(j\omega_5) = 0.0225\angle 20 - 0.0225\angle 20 = 0\angle 0$$

### 3.4.1 Cálculo del Flujo de potencia:

#### 3.4.1.1 Cálculo del Flujo de Potencia Conforme:

De la ecuación (3.11) se tiene:

$$P_c(j\omega) + jQ_c(j\omega) = \sum_{k=1}^n V(j\omega_k) \cdot I_c(j\omega_k)^*$$

$$P_c(j\omega) + jQ_c(j\omega) = \sum_{k=1}^{n=5} V(j\omega_k) \cdot I_c(j\omega_k)^*$$

$$= V(j\omega_1) \cdot I_c(j\omega_1)^* + V(j\omega_3) \cdot I_c(j\omega_3)^* + V(j\omega_5) \cdot I_c(j\omega_5)^*$$

$$= 0.9\angle 0^* \cdot 0.45\angle 0 + 0.045\angle -10^* \cdot 0.0225\angle -10 + 0.045\angle 20^* \cdot 0.0225\angle 20$$

$$= 0.4070\angle 0$$

#### 3.4.1.2 Cálculo del Flujo de Potencia No-Conforme:

De la ecuación (3.12) se tiene:

$$P_{nc}(j\omega) + jQ_{nc}(j\omega) = \sum_{k=2}^n V(j\omega_k) \cdot I_{nc}(j\omega_k)^*$$

$$P_{nc}(j\omega) + jQ_{nc}(j\omega) = \sum_{k=2}^{n=5} V(j\omega_k) \cdot I_{nc}(j\omega_k)^*$$



$$= 0 \angle 0$$

			Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Tensión	Porcentaje		100.0000	5.0000	5.0000
	Amplitud		0.9000	0.0450	0.0450
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
Corriente	Amplitud		0.4500	0.0225	0.0225
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
In s → c	Amplitud		0.4500	0.0225	0.0225
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
Id c → s	Amplitud		0.0000	0.0000	0.0000
	Fase		0.0000	0.0000	0.0000
Potencia		Total	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
s → c	Pn	0.4070	0.4050	0.0010	0.0010
	Qn	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
c → s	Pd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Qd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Tabla 3.2: Tensión Distorsionado en una carga resistiva**

**Donde:**

In s → c : Es la corriente conforme que fluye de la fuente a la carga.

Id c → s : Es la corriente no-conforme que fluye de la carga a la fuente.

P c → s : Es la potencia que fluye de la carga a la fuente.

P s → c : Es la potencia que fluye de la fuente a la carga.

Pn : Es la potencia activa conforme.

Qn : Es la potencia reactiva conforme.

Pd : Es la potencia activa no-conforme.

Qd : Es la potencia reactiva no-conforme.

En el Anexo N° 1 mostramos un programa en Matlab para el cálculo de Ic, Inc, Pc, Qc, Pnc y Qnc.

Usando este programa se hizo el cálculo de  $I_c$ ,  $I_{nc}$ ,  $P_c$ ,  $Q_c$ ,  $P_{nc}$  y  $Q_{nc}$  para una carga

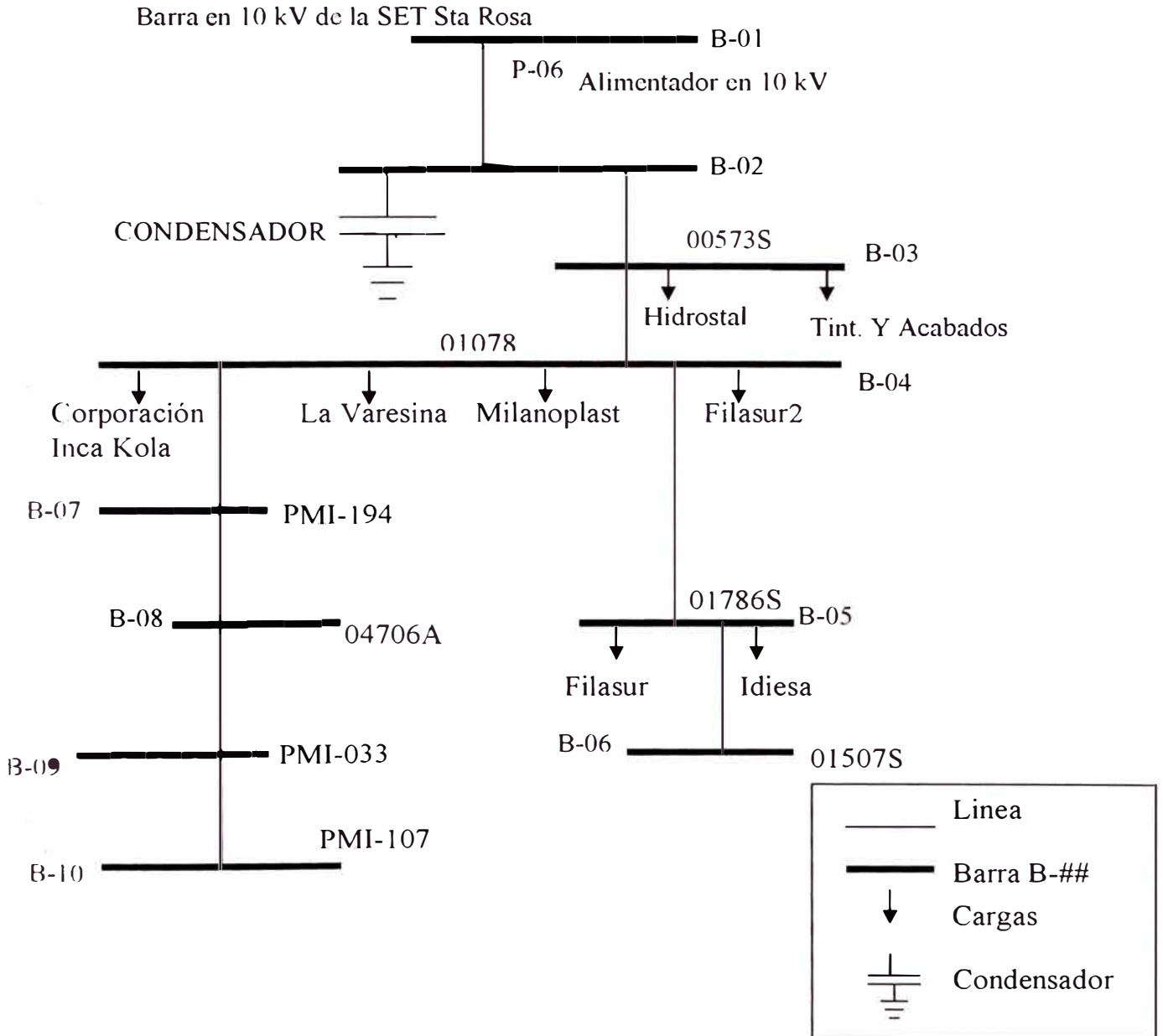
Los resultados se muestran en la tabla 3.3

			Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Tensión	Porcentaje		100.0000	5%	5%
	Amplitud		0.9000	0.0450	0.0450
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
Corriente	Amplitud		0.4500	0.0450	0.0450
	Fase		0.0000	170.0000	-160.0000
$I_{s \rightarrow c}$	Amplitud		0.4500	0.0225	0.0225
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
$I_{c \rightarrow s}$	Amplitud		0.0000	0.0675	0.0675
	Fase		0.0000	-10.0000	20.0000
Potencia		Total	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
$\overline{s \rightarrow c}$	$P_n$	0.4070	0.4050	0.0010	0.0010
	$Q_n$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\overline{c \rightarrow s}$	$P_d$	0.0061	0.0000	0.0030	0.0030
	$Q_d$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Tabla 3.3: Tensión Distorsionado en una carga conforme**

### 3.5.- Aplicación del Método en un Caso Práctico

Consideraremos el siguiente circuito para el análisis de direccionalidad:



**Fig. 3.2 Diagrama Unifilar en 10 kV del circuito en estudio**

En la figura 3.2 se muestra el circuito en estudio. Este circuito consta de 9 barras, todas ellas en 10 kV.

En la barra 00573S se encuentran los clientes en 10 kV: CL C y CL E, con una potencia contratada de 1000 kW y 720 kW respectivamente.

En la barra 01078S se encuentran los clientes en 10 kV: CL A, CL D, CL H y CL B con una potencia contratada de 550 kW, 600 kW, 250 kW y 450kW respectivamente.

En la barra 01786S se encuentran los clientes en 10 kV: CL G y CL F, con una potencia contratada de 650 kW y 1000 kW respectivamente.

En las barras de los clientes CL I, CL J, CL K y CL L no se ha podido obtener mediciones en el lado de 10 kV, por lo que no se están considerando para el análisis de la direccionalidad. Los clientes CL I, CL K y CL L, tienen una potencia contratada de 200 kW, 500 kW y 350 kW respectivamente. En la barra 04706A se tiene el cliente CL J que representa a todos los clientes que se alimentan de esta subestación de distribución (MT/BT).

A continuación comenzaremos a evaluar los clientes que se encuentran alimentados de las barras 01786S, 01078S y 00573S.

Estos clientes se muestran a continuación:

Para los análisis que se van a presentar a continuación se basan en las mediciones que se realizaron en este alimentador (P-06). Las mediciones no se realizaron de forma simultánea. Para poder realizar un mejor análisis, lo que se ha hecho es extraer intervalos comunes de las mediciones hechas. Esto sirve para los dos primeros análisis: análisis de correlación y análisis de análisis de Emanuel. Para el análisis propuesto en esta tesis se usaron las mediciones instantáneas disponibles.

Todas estas mediciones se realizaron usando el equipo analizador RPM serie 1650. Las mediciones instantáneas se obtuvieron de la opción Scope.

Las mediciones se hicieron en el PAC, es decir en el punto donde los clientes tienen instalados sus medidores de energía. La instalación de los equipos se hace siguiendo los siguientes pasos:

1. Abrir la Subestación.
2. Abrir la puerta de la caja del medidor.
3. Colocar el equipo en un lugar cercano al medidor, este punto no debe estar dentro de la caja del medidor.
4. Alimentar el equipo RPM con una tensión nominal de 220 voltios.
5. Encender la Laptop y establecer comunicación con el RPM usando el Software PAS. Esta comunicación se hace después de que el equipo RPM ha arrancado (encendido y apagado de todos sus leds).
6. Conectar las pinzas de corriente y los cables de tensión a las borneras correspondientes del medidor y conectarlas de manera inmediata a los respectivos canales de entrada del RPM.
7. Configurar el equipo con los datos del punto de medición: Nombre del punto, tipo de punto (En MT, BT o AT), configuración: Delta, Estrella, etc, intervalo de medición (5 min, 10 min, 15 min, etc), inicio de la medición, factores de los reductores de tensión y corriente.
8. Por último ver en la opción de fasores del PAS el diagrama fasorial de la tensión y la corriente. De esta manera se determina si el equipo esta bien instalado.

9. Desconectar la laptop con el RPM.
10. Cerrar la puerta de la subestación.

Para retirar el equipo se procede de la siguiente manera:

1. Abrir la puerta de la subestación.
2. Encender la LapTop y establecer comunicación con el RPM usando el Software PAS.
3. Bajar la información del equipo.
4. Ver si la medición corresponde al periodo instalado y que los valores sean los adecuados.
5. Desconectar la Laptop con el RPM.
6. Retirar las pinzas de corriente y los cables de tensión.
7. Cerrar la caja del medidor.
8. Cerrar la puerta de la subestación.

La mayoría de las mediciones tienen un periodo de medición mayor de 7 días y todas se hicieron de acuerdo a la NTCSE [3]. Es decir con intervalos de medición de 10 minutos.

Los clientes seleccionados para este análisis son clientes que resultaron penalizables por armónicos, específicamente en el armónico de orden 5<sup>o</sup>, además tienen su punto de medición (lugar donde se encuentra instalado su medidor de energía) dentro una subestación de distribución tipo convencional. Es decir que los valores de las

tensiones y corrientes son tomados de los reductores de medición que usa el medidor del cliente. Es necesario tomar las tres tensiones y las tres corrientes.

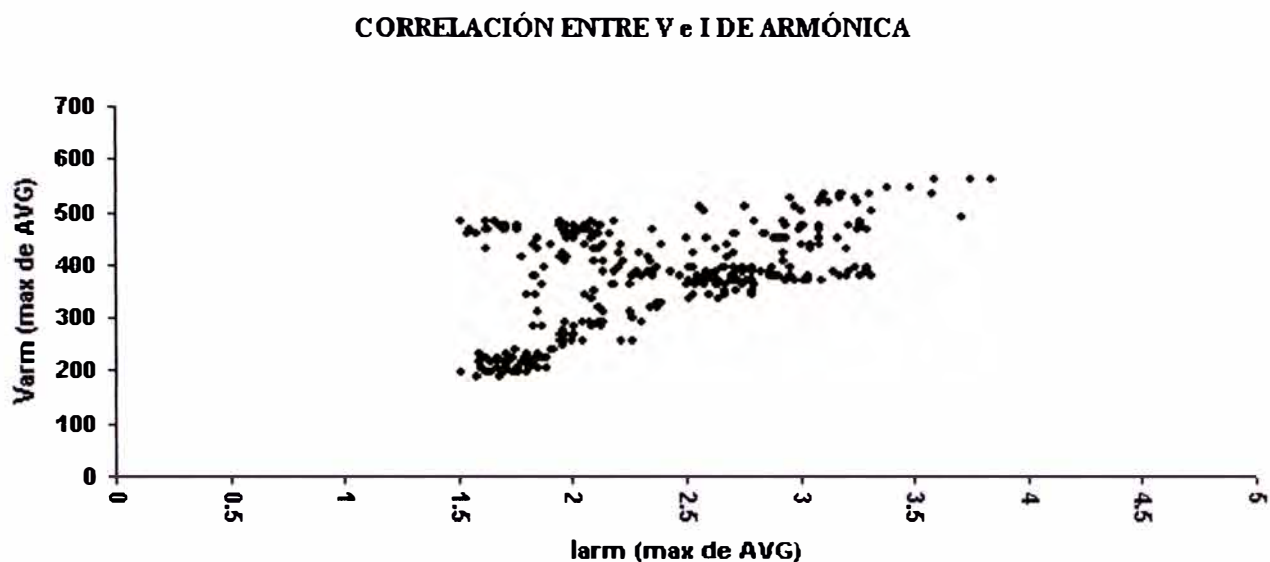
Punto de Medición	Orden del Armón.	CLIENTE	Potencia Máxima (kW)	SET	ALIMENTADOR	SED / PMI
FILASUR	5°	CL A	550	P	6	01786S
Corporación Inca Kola	5°	CL B	450	P	6	01078S
Hidrostal	5°	CL C	1000	P	6	00573S
Milanoplast y Portofino	5°	CL D	600	P	6	01078S
Tintorería y Acabados	5°	CL E	720	P	6	00573S
Idiesa	5°	CL F	1000	P	6	01786S
FILASUR2	5°	CL G	650	P	6	01078S
LA VARESINA	5°	CL H	250	P	6	01078S

**Tabla 3.4: Relación de clientes en 10 kV a analizar en el alimentador P-06**

Comenzaremos primero evaluando individualmente a cada cliente de acuerdo al método de correlación entre la corriente y tensión armónica, luego evaluaremos de acuerdo al método propuesto por Emanuel y por último evaluaremos de acuerdo al método propuesto en esta tesis.

### 3.5.1 Evaluación de acuerdo al método de correlación entre la corriente y tensión armónica

#### 1) Cliente: Filasur



**Fig 3.3** Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Filasur



**Fig 3.4** Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Filasur.



De las figuras 3.3 y 3.4 se puede observar que **existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5° es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en mayor y menor proporción respectivamente.

2) Cliente: Corporación IncaKola

CORRELACIÓN ENTRE V e I DE ARMÓNICA

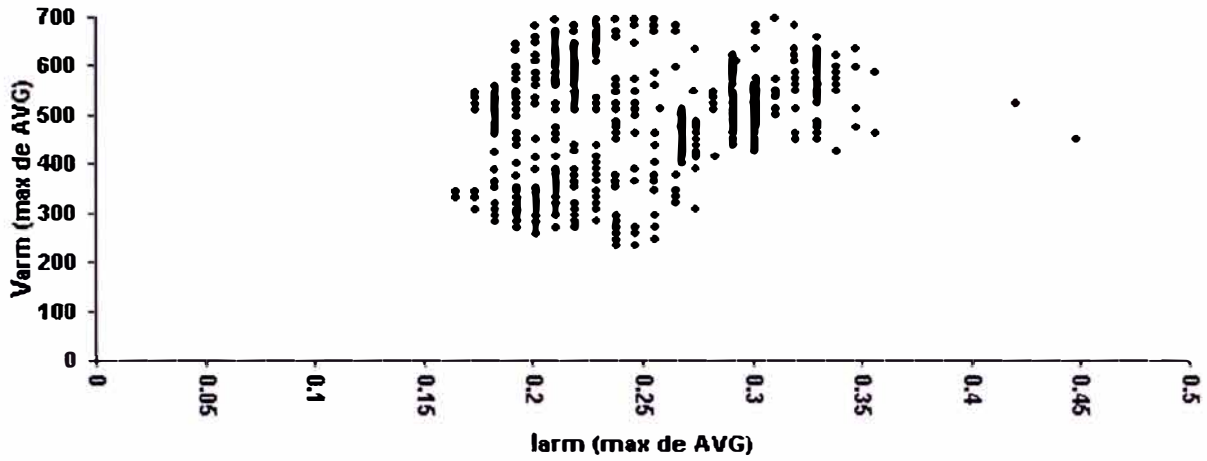


Fig 3.5 Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Corporación IncaKola.

COMPORTAMIENTO EVOLUTIVO Varm e Iarm

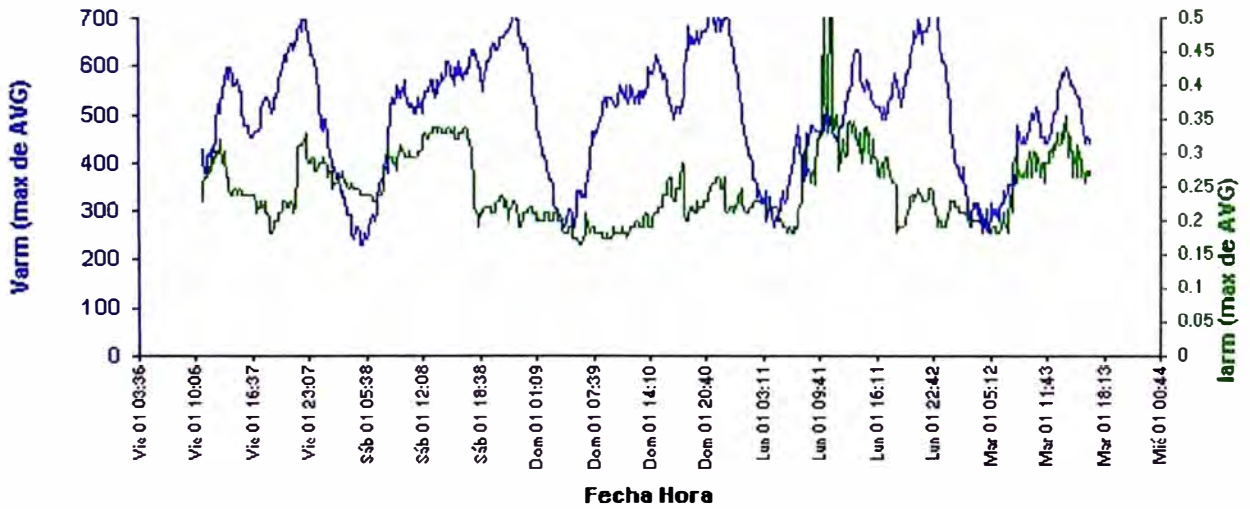


Fig 3.6 Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Corporación IncaKola.

De las figuras 3.5 y 3.6 se puede observar que **no existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5° es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, menor y mayor proporción respectivamente.

3) Cliente: Hidrostral

CORRELACIÓN ENTRE V e I DE ARMÓNICA

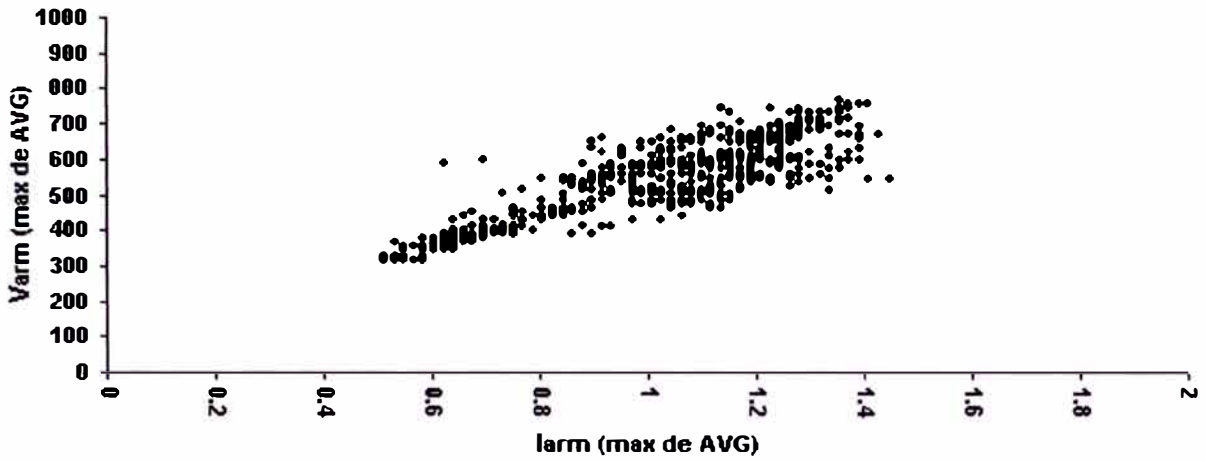


Fig 3.7 Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Hidrostral.

COMPORTAMIENTO EVOLUTIVO Varm e Iarm

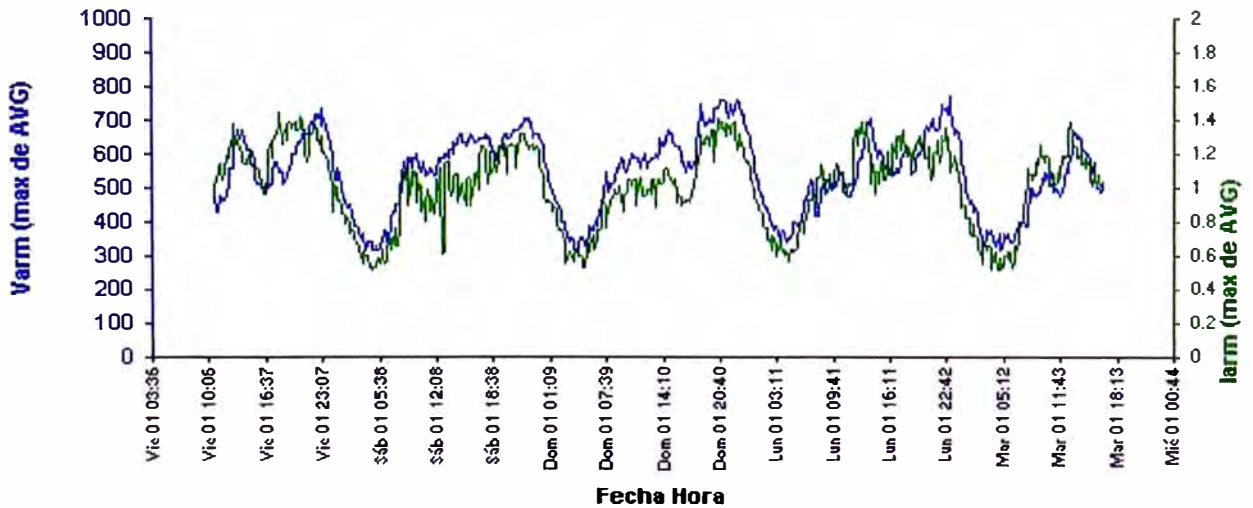


Fig 3.8 Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Hidrostral.

De las figuras 3.7 y 3.8 se puede observar que **existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5º es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en mayor y menor proporción respectivamente.

4) Cliente: Milanoplast y Portofino

CORRELACIÓN ENTRE V e I DE ARMÓNICA

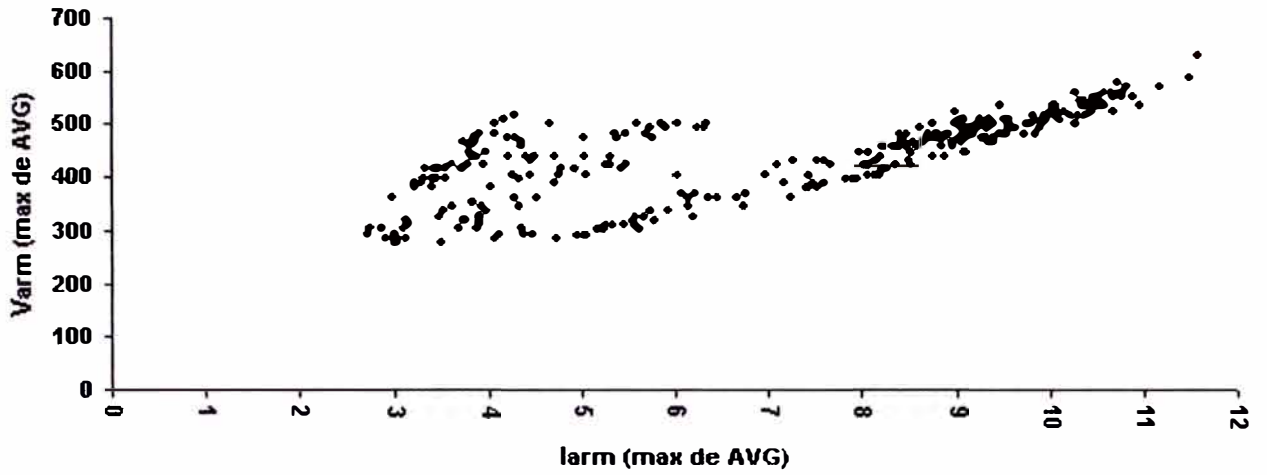


Fig 3.9 Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Milanoplast y Portofino.

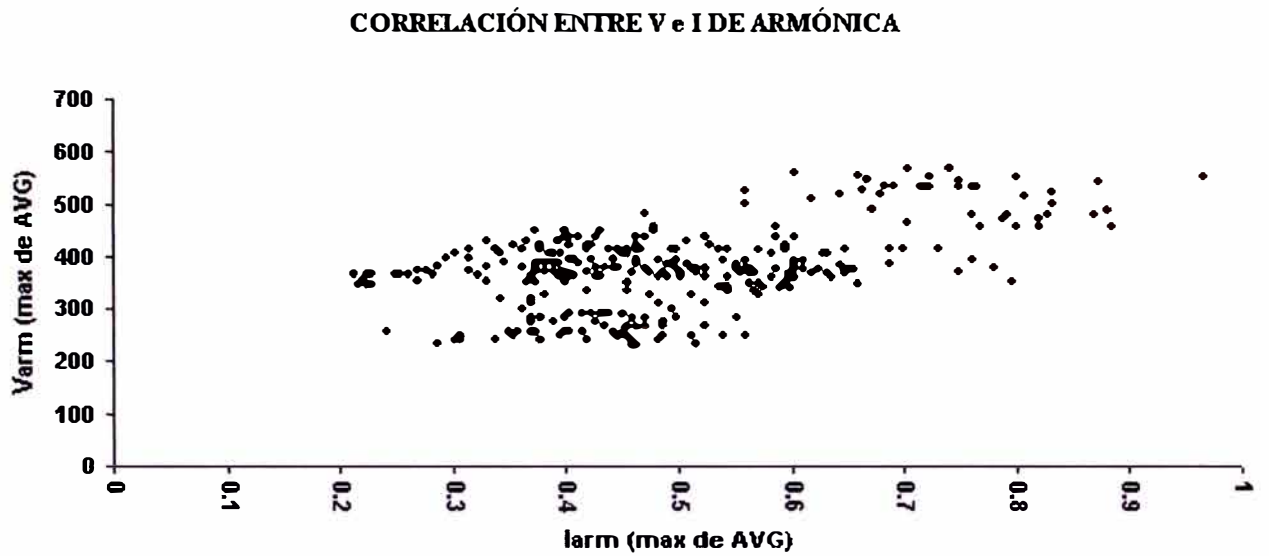
COMPORTAMIENTO EVOLUTIVO Varm e Iarm



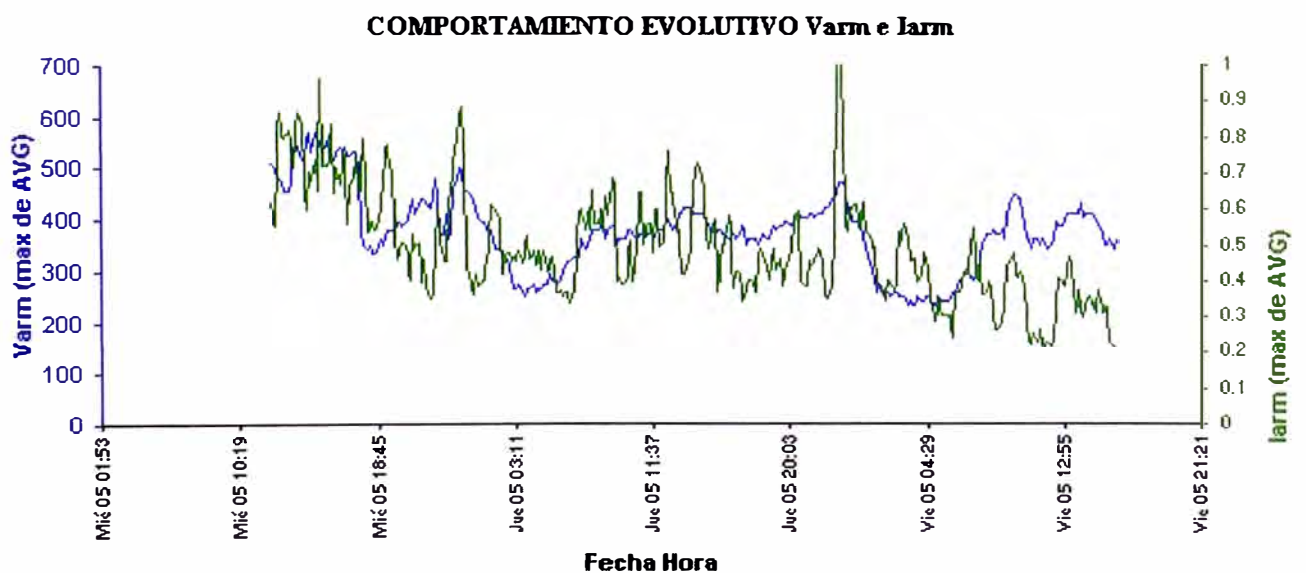
Fig 3.10 Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Milanoplast y Portofino.

De las figuras 3.9 y 3.10 se puede observar que **existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5° es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en mayor y menor proporción respectivamente.

### 5) Cliente: Tintorería y Acabados



**Fig 3.11** Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Tintorería y Acabados.



**Fig 3.12** Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Tintorería y Acabados.



De las figuras 3.11 y 3.12 se puede observar que **no existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5<sup>o</sup> es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en menor y mayor proporción respectivamente.

6) Cliente: Filasur2

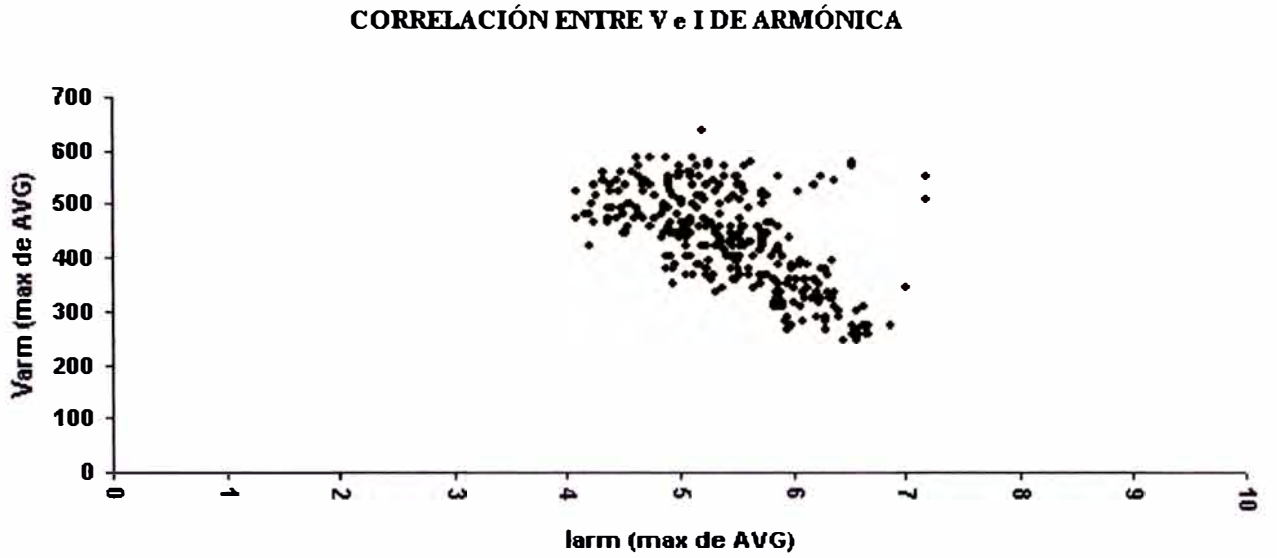


Fig 3.13 Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para Filasur2.

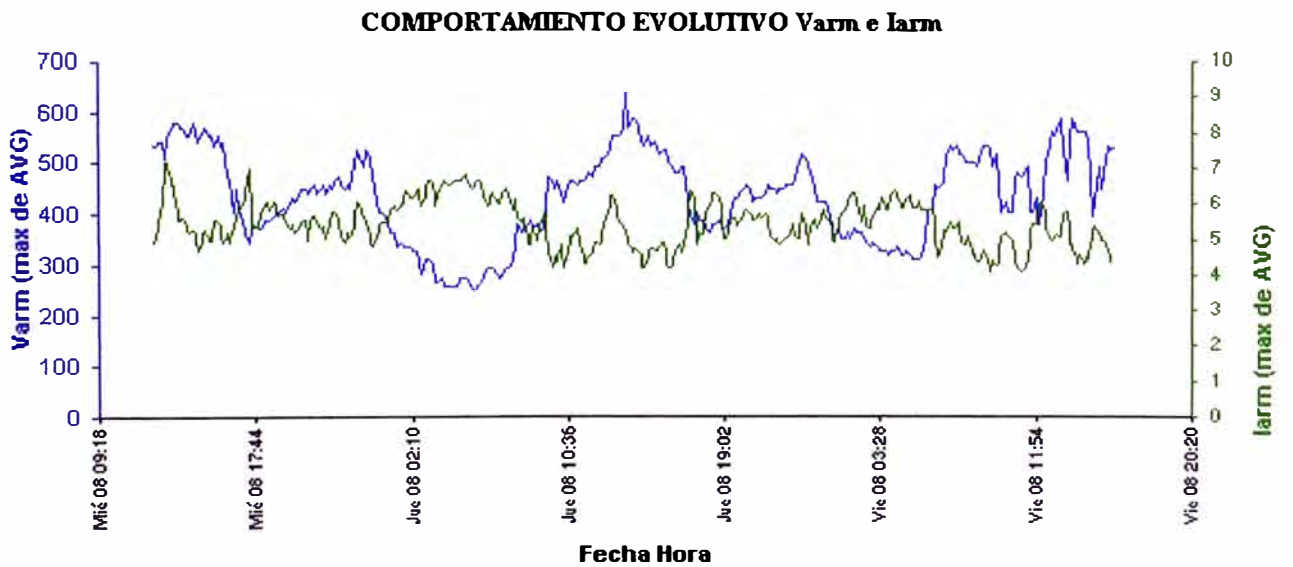


Fig 3.14 Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para Filasur2.

De las figuras 3.13 y 3.14 se puede observar que **no existe** correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5° es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en menor y mayor proporción respectivamente.

7) Cliente: La Varesina

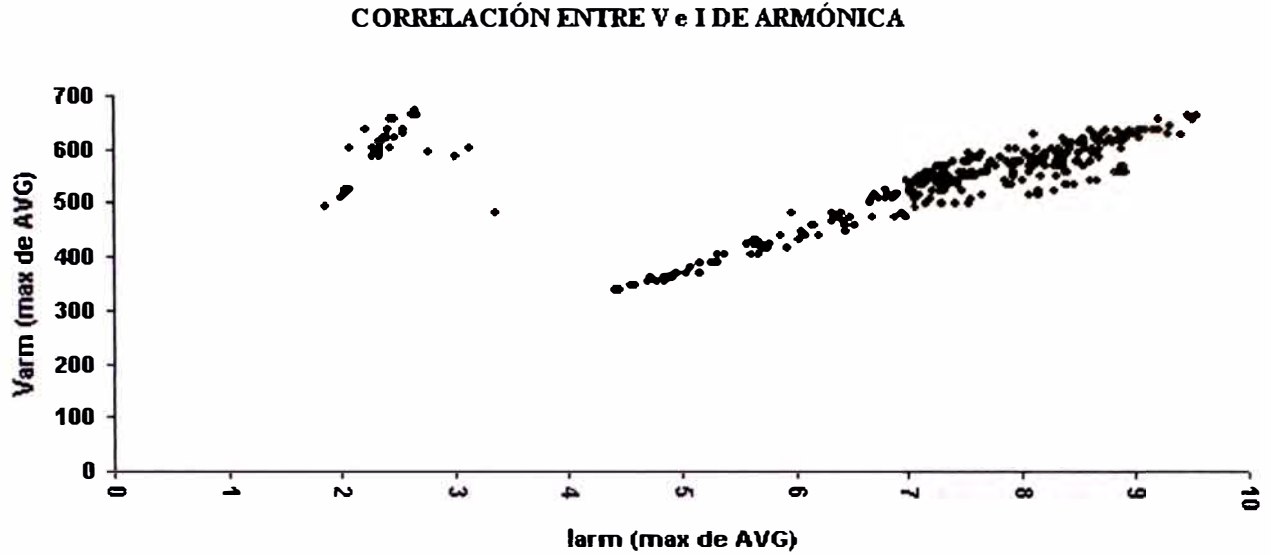


Fig 3.15 Correlación entre la corriente y tensión armónica de orden 5° para La Varesina.



Fig 3.16 Evolución de la corriente y la tensión armónica de orden 5° para La Varesina.

De las figuras 3.15 y 3.16 se puede observar que existe correlación para la mayor parte de los intervalos. Por lo tanto el armónico 5° es producido por el cliente y por otras fuentes que provienen de la red del P-06, en mayor y menor proporción respectivamente.

De las figuras 3.3 a 3.16 se puede observar que la mayoría de clientes tiene influencia sobre el contenido del armónico 5° en la red. Pero los clientes “Milanoplast y Portofino” y “La Varesina” son los que más influyen.

### 3.5.2 Evaluación de Acuerdo al Método del Cálculo del ITHD y VTHD

#### 1) Cliente: Filasur

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.08	0.05	0.00	457.09	47.04

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red. Pero, como  $ITHD/VTHD \approx 1$ , la responsabilidad es compartida entre el cliente y la red.

#### 2) Cliente: Corporación IncaKola

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.21	0.05	0.01	15.13	2.75

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red.

#### 3) Cliente: Hidrostral

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.82	0.05	0.04	585.76	108.68

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red.

**4) Cliente: Milanoplast y Portofino**

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.65	0.05	0.04	176.92	110.18

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red.

**5) Cliente: Tintorería y Acabados**

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.04	0.06	0.00	256.42	16.15

Como se puede observar  $ITHD < VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° no es producida por el cliente si no por el contrario que viene de la red. Pero, como  $ITHD/VTHD \approx 1$ , la responsabilidad es compartida entre el cliente y la red.

**6) Cliente: Filasur2**

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
0.13	0.06	0.01	507.16	74.43

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red.

**7) Cliente: La Varesina**

<b>ITHD</b>	<b>VTHD</b>	<b>ITHD.VTHD</b>	<b>S1(KVA)</b>	<b>SN(KVA)</b>
<b>0.92</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>129.19</b>	<b>94.20</b>

Como se puede observar  $ITHD > VTHD$  entonces de acuerdo a. [22] la corriente armónica 5° esta siendo inyectada por el cliente hacia la red.

De los resultados de este método los clientes: Hidrostral, Milanoplast y Portofino y La Varesina son los que tienen una mayor incidencia de corriente armónica de orden 5° hacia la red.



### 3.5.3 Evaluación de acuerdo al método de separación de la corriente armónica en corriente armónica conforme y no conforme.

Usando los datos de la medición y las ecuaciones (3.13, 3.14, 3.15 y 3.16) se obtienen las siguientes figuras:

#### 1) Cliente: Filasur

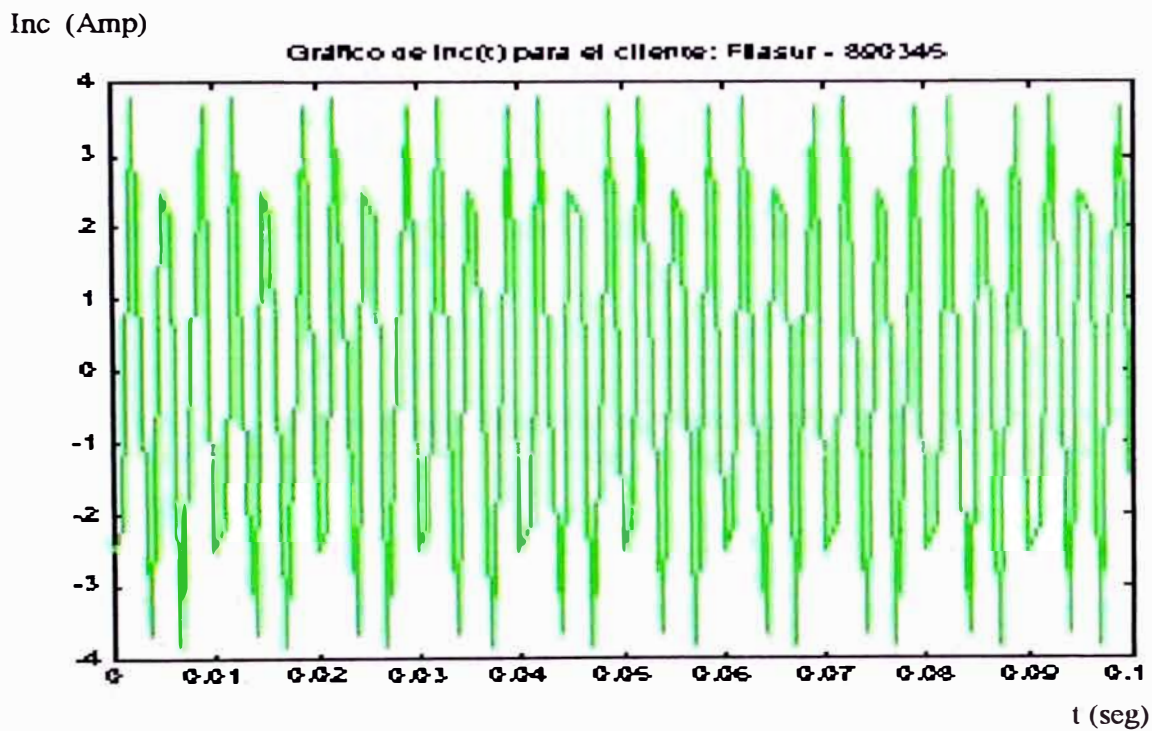
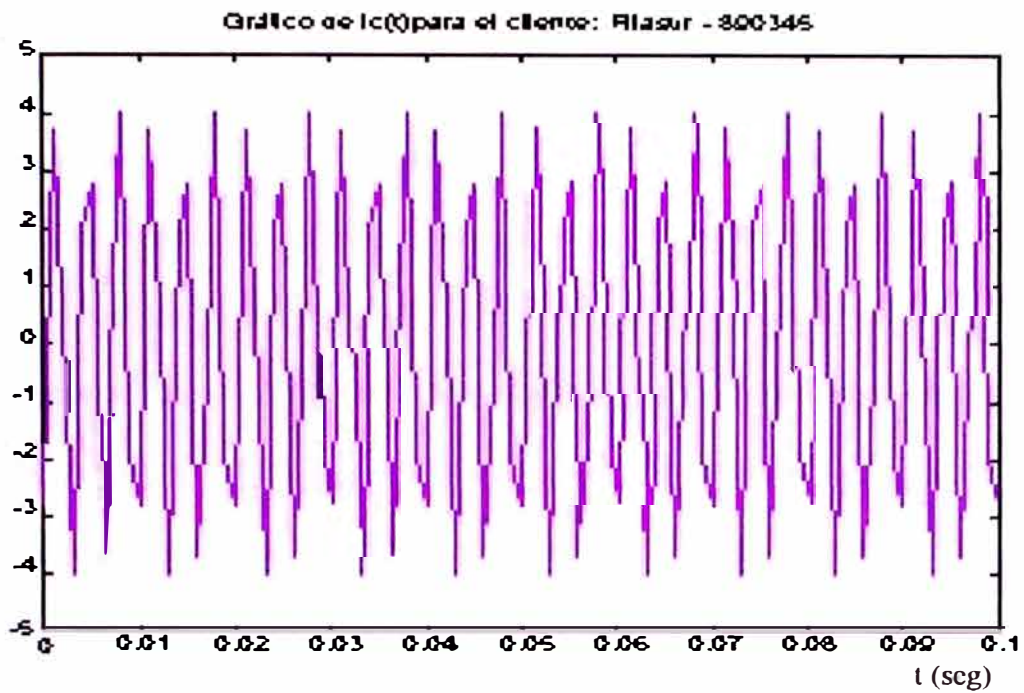
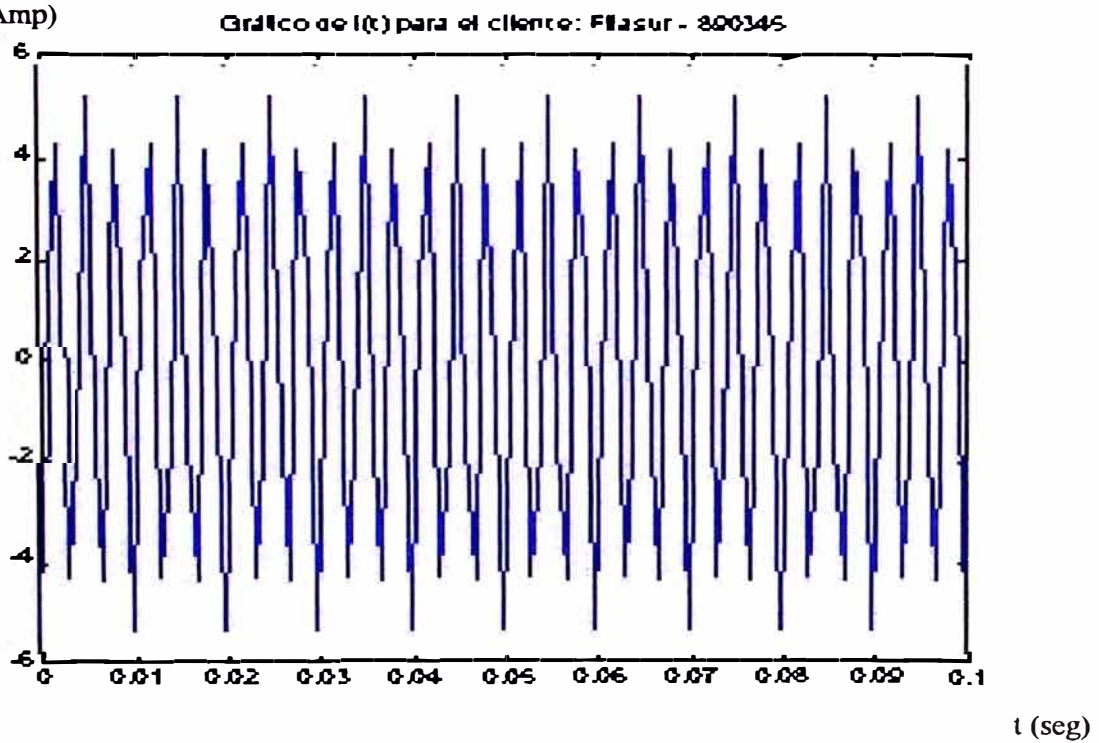


Fig. 3.17 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente Filasur.

Ic (Amp)

**Fig. 3.17 b: Gráfico de  $i_c(t)$  para el cliente Filasur.**

I (Amp)

**Fig. 3.17 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente Filasur.**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente esta inyectando corriente armónica 5° que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez esta recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $Ic/Inc = 5/10 = 1/2$  Es decir, la corriente armónica no conforme de orden 5° es mayor que la corriente armónica de orden 5° conforme, lo que significa que este cliente esta **distorsionando** la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

## 2) Cliente: Corporación IncaKola

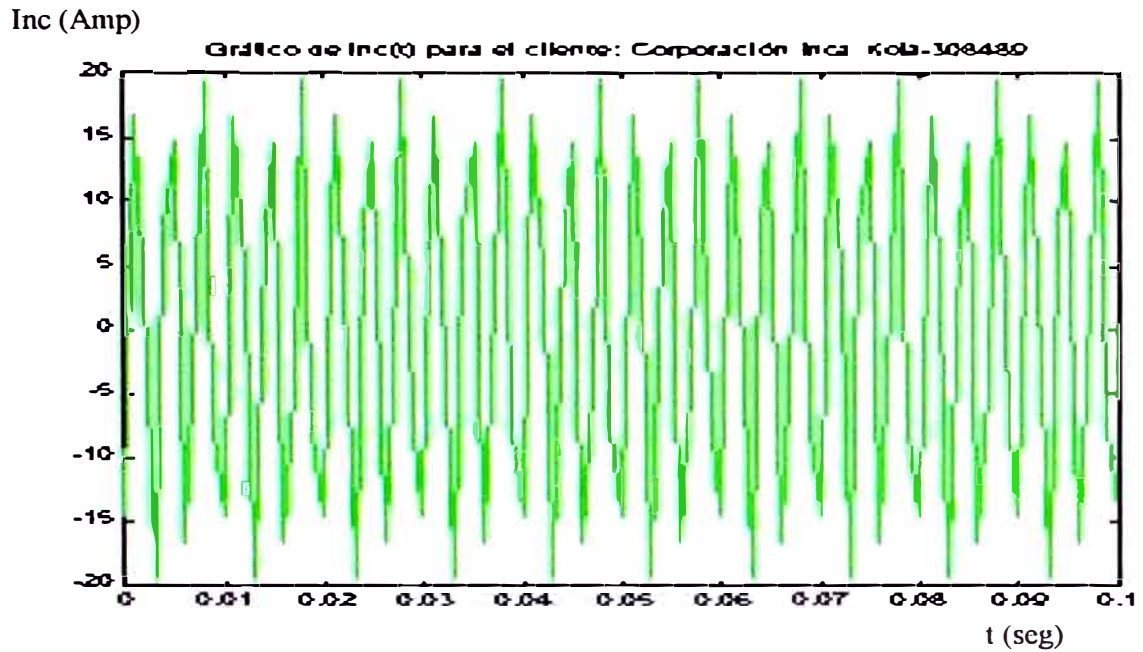


Fig. 3.18 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente IncaKola.

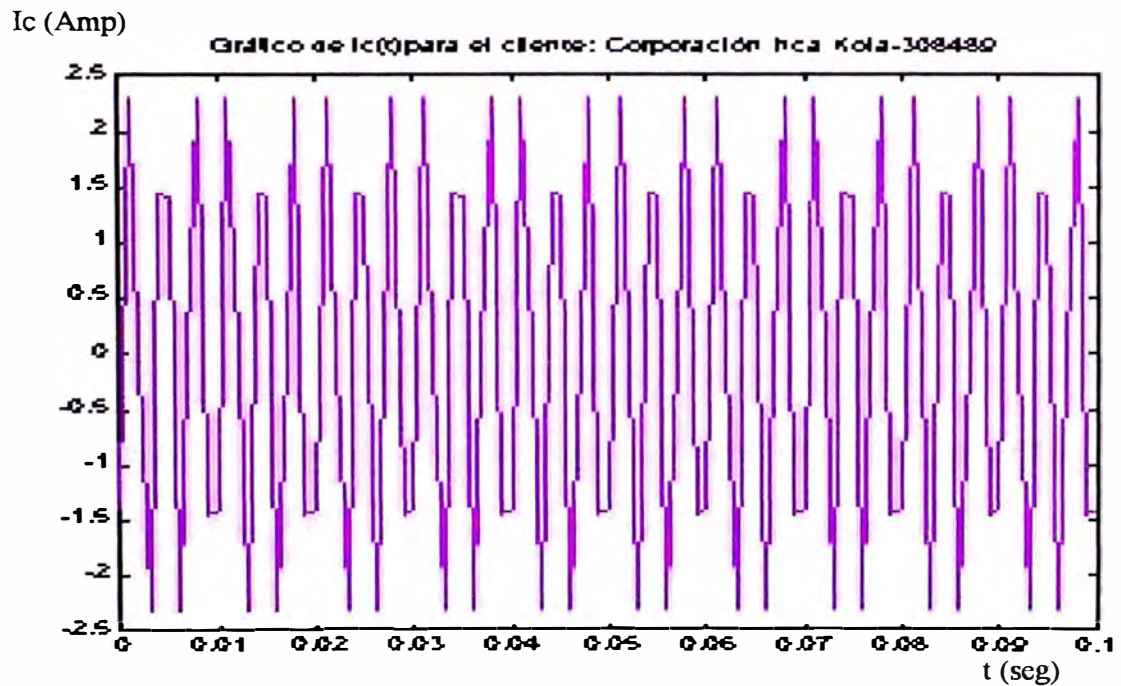
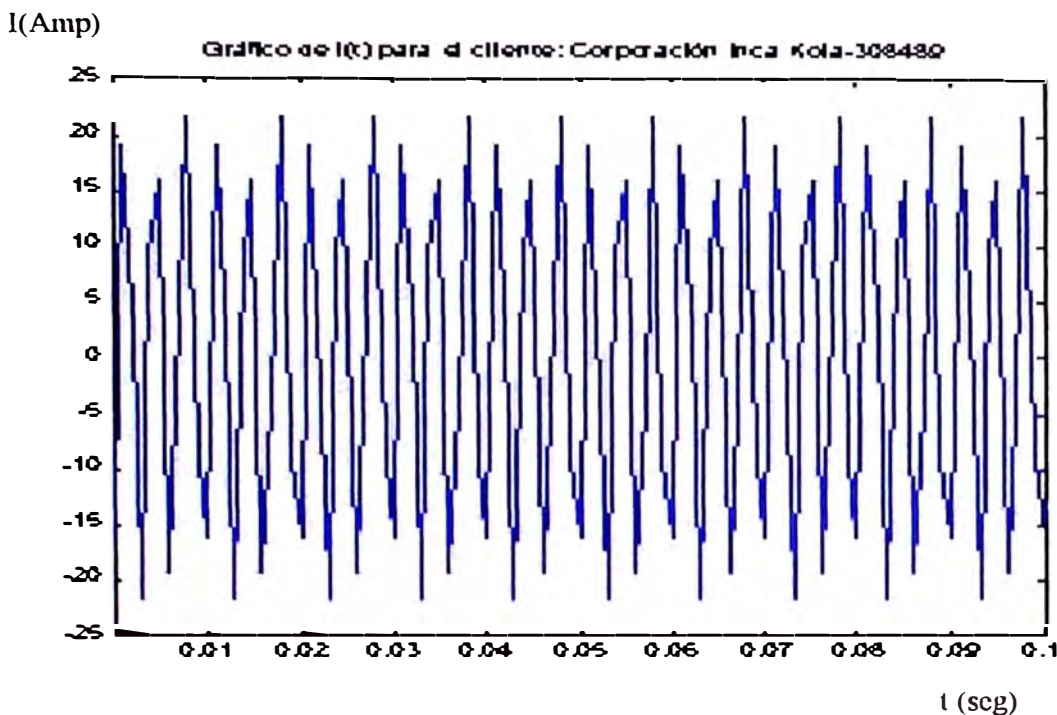


Fig. 3.18 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente IncaKola.



**Fig. 3.18 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente IncaKola.**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica 5° que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 3/15 = 1/5$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden 5° es **mayor** que la corriente armónica de orden 5° conforme, lo que significa que este cliente está **distorsionando** la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

### 3) Cliente: Hidrostral

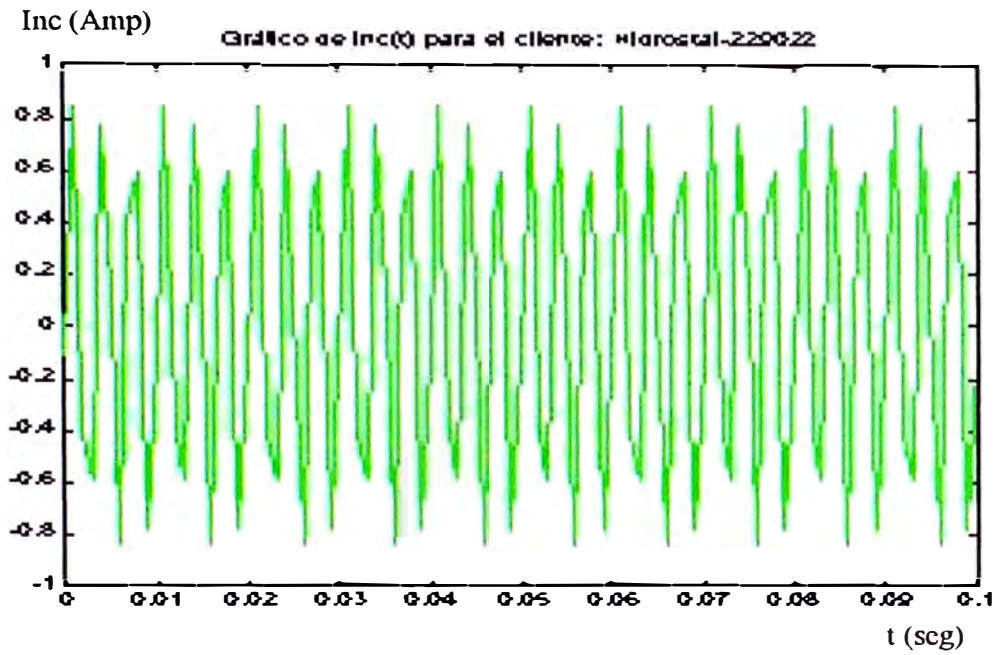


Fig. 3.19 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente Hidrostral.

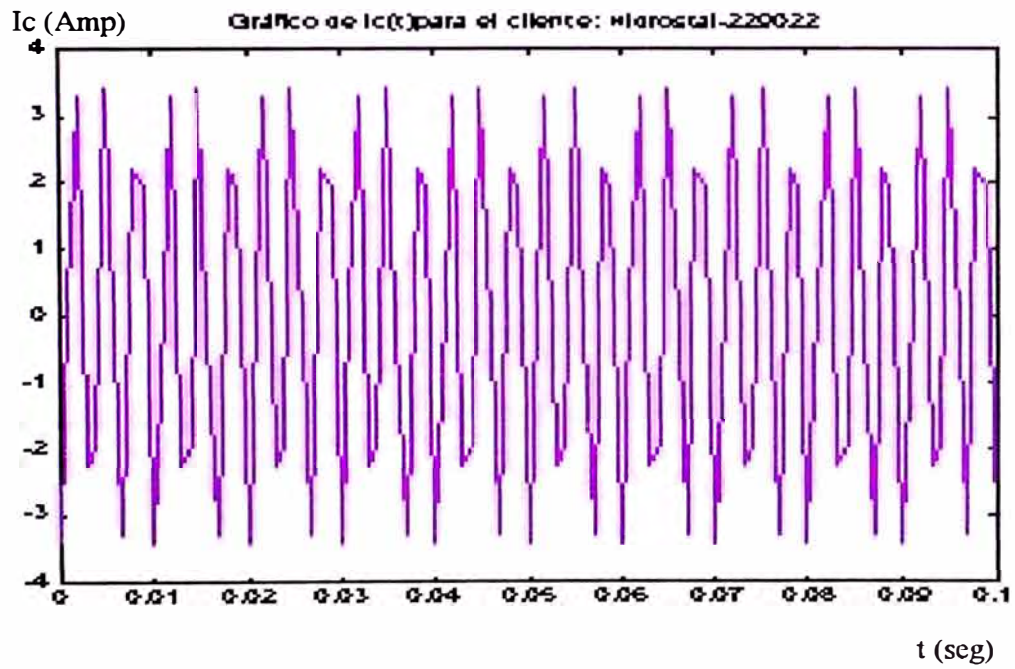
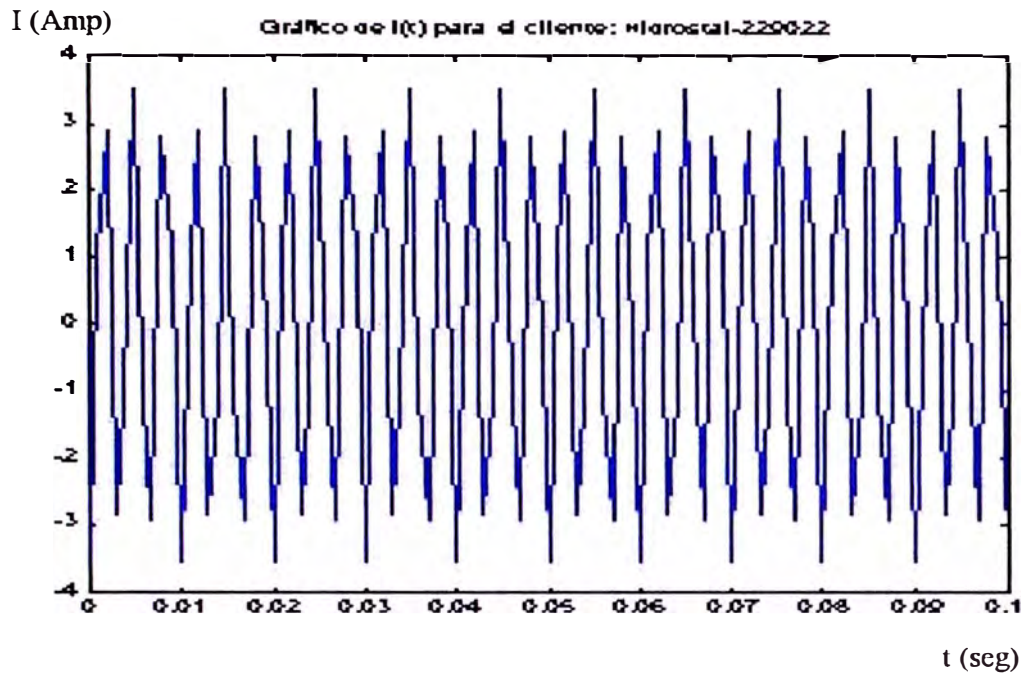


Fig. 3.19 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente Hidrostral.



**Fig. 3.19 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente Hidrostral.**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica  $5^\circ$  que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 3/1 = 3$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden  $5^\circ$  es menor que la corriente armónica de orden  $5^\circ$  conforme, lo que significa que este cliente está mejorando la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

#### 4) Cliente: Milanoplast y Portofino

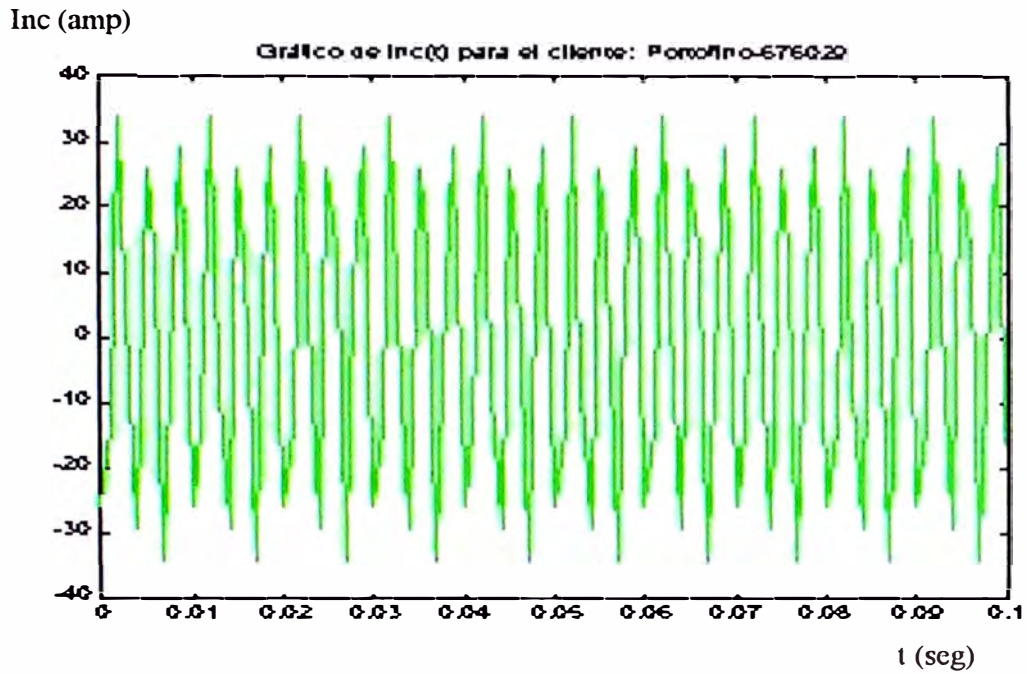


Fig. 3.20 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente Milanoplast y Portofino.

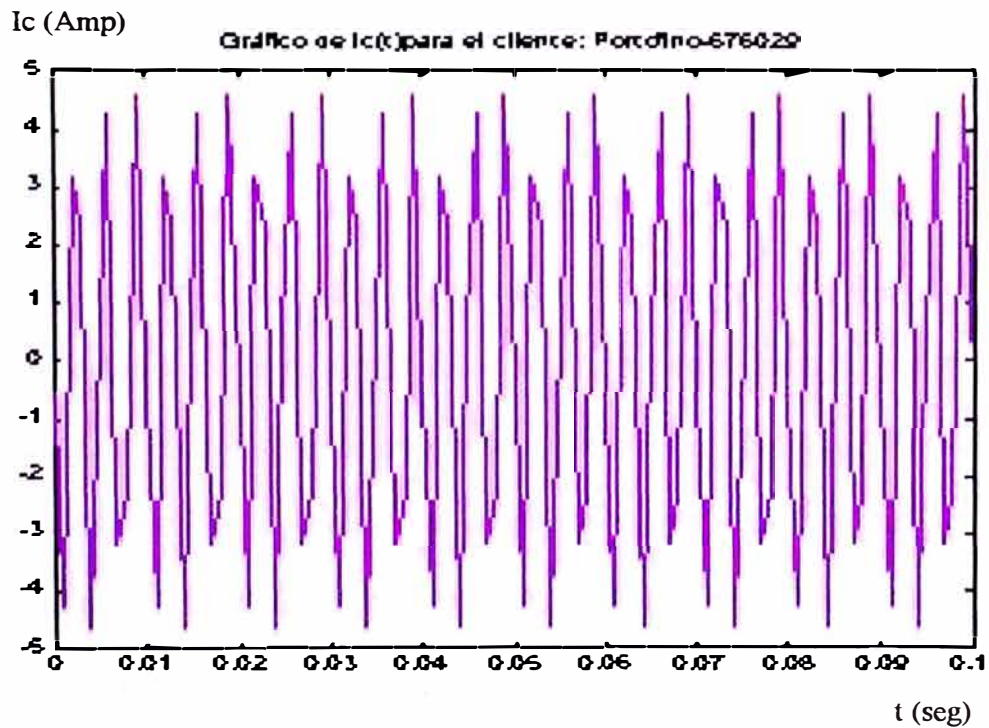
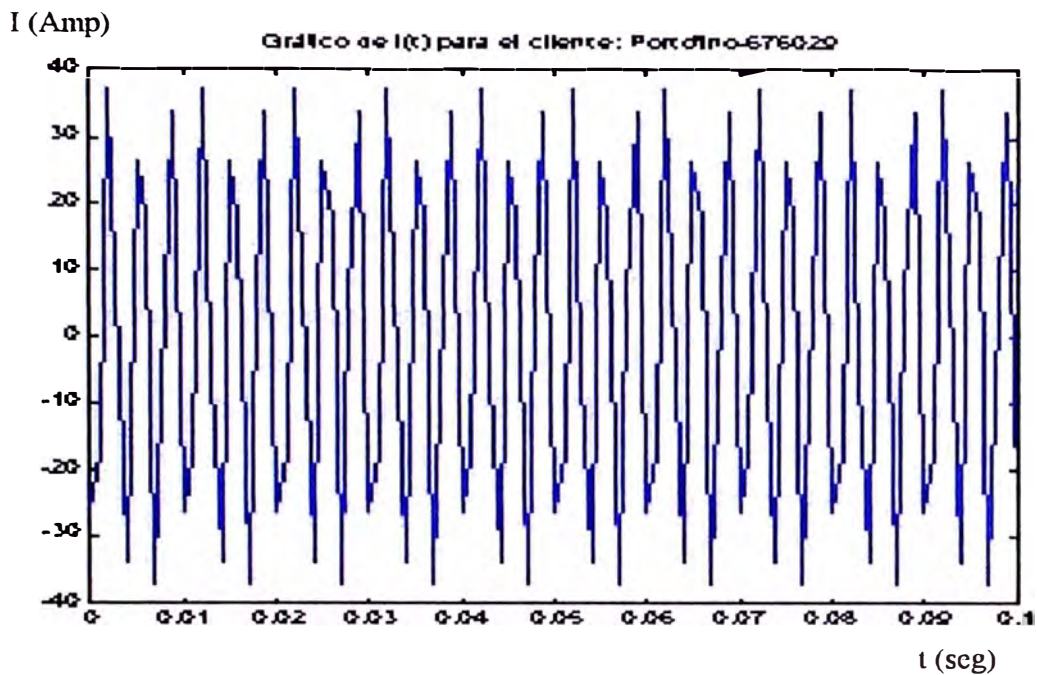


Fig. 3.20 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente Milanoplast y Portofino.





**Fig. 3.20 c: Gráfico de  $i_c(t)$  para el cliente Milanoplast y Portofino.**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $i_{nc}(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $i_c(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica 5<sup>o</sup> que se ve representada por  $i_{nc}(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $i_c(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 3/30 = 1/10$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden 5<sup>o</sup> es mayor que la corriente armónica de orden 5<sup>o</sup> conforme, lo que significa que este cliente está distorsionando la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

### 5) Cliente: Tintorería y Acabados

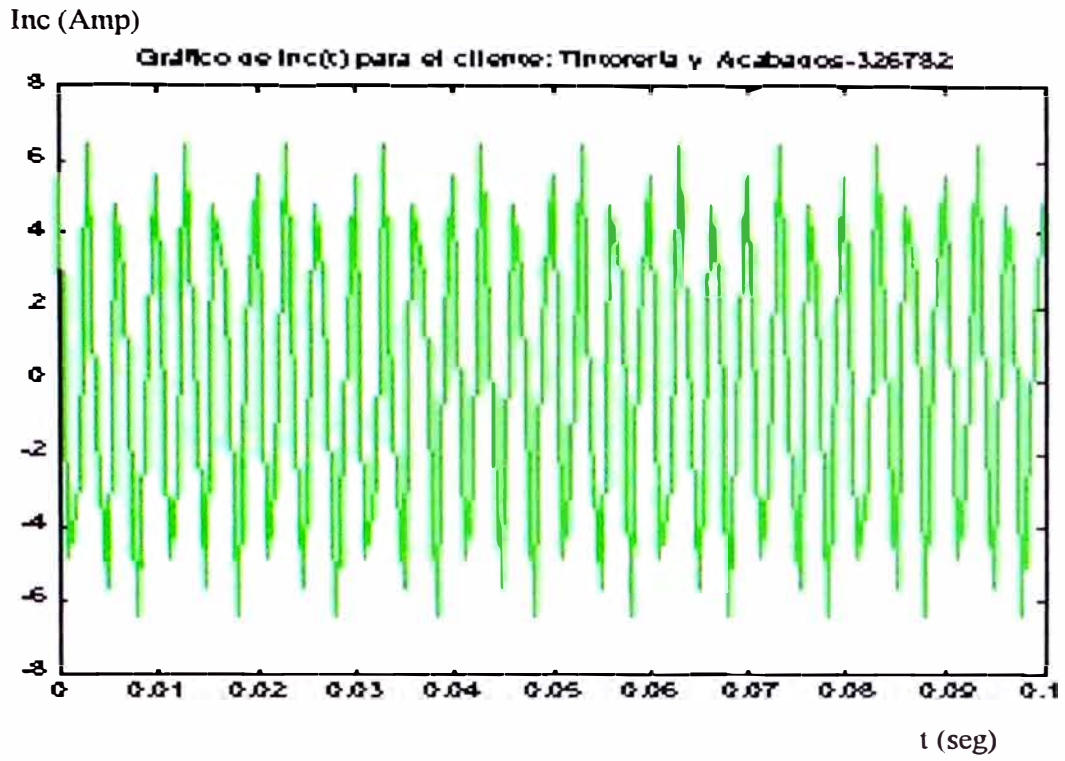


Fig. 3.21 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente Tintorería y Acabados

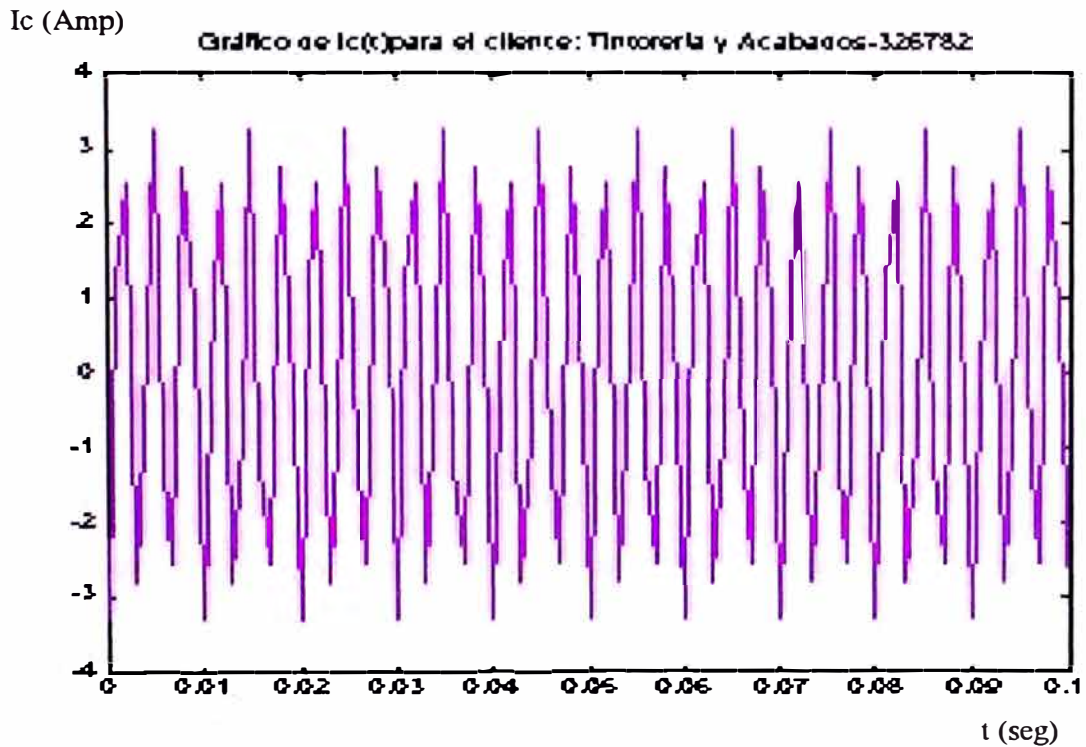
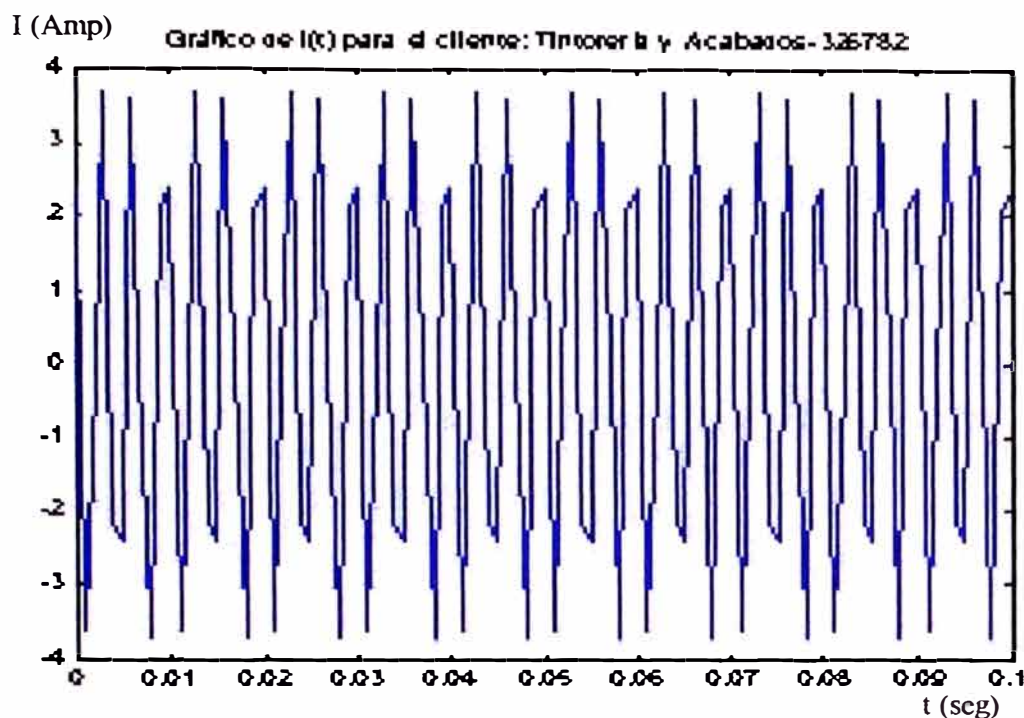
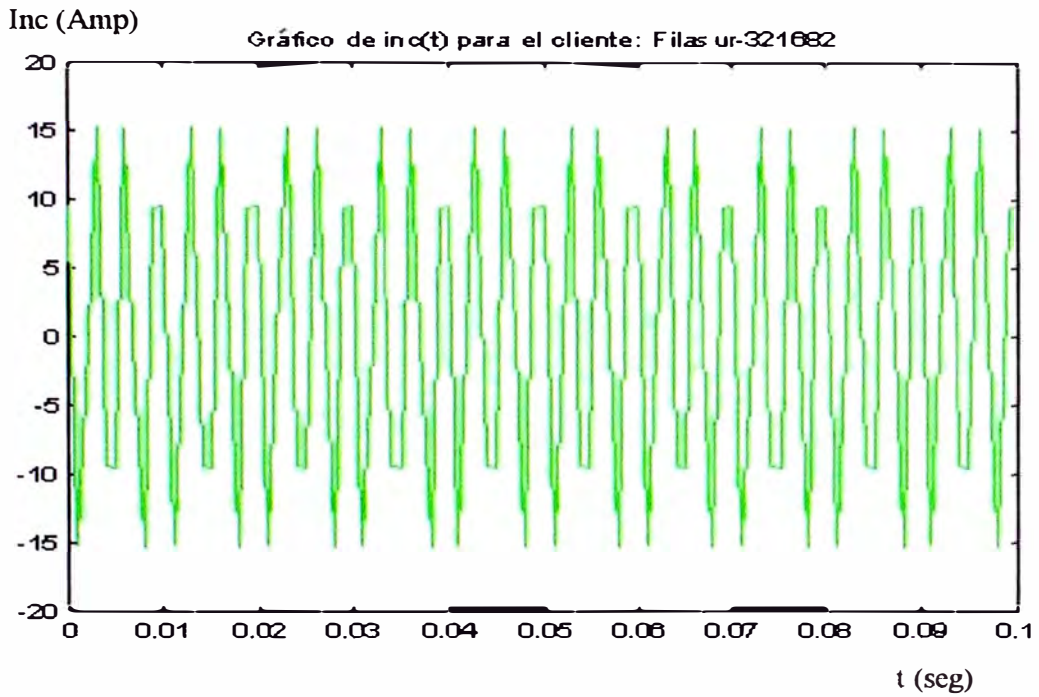
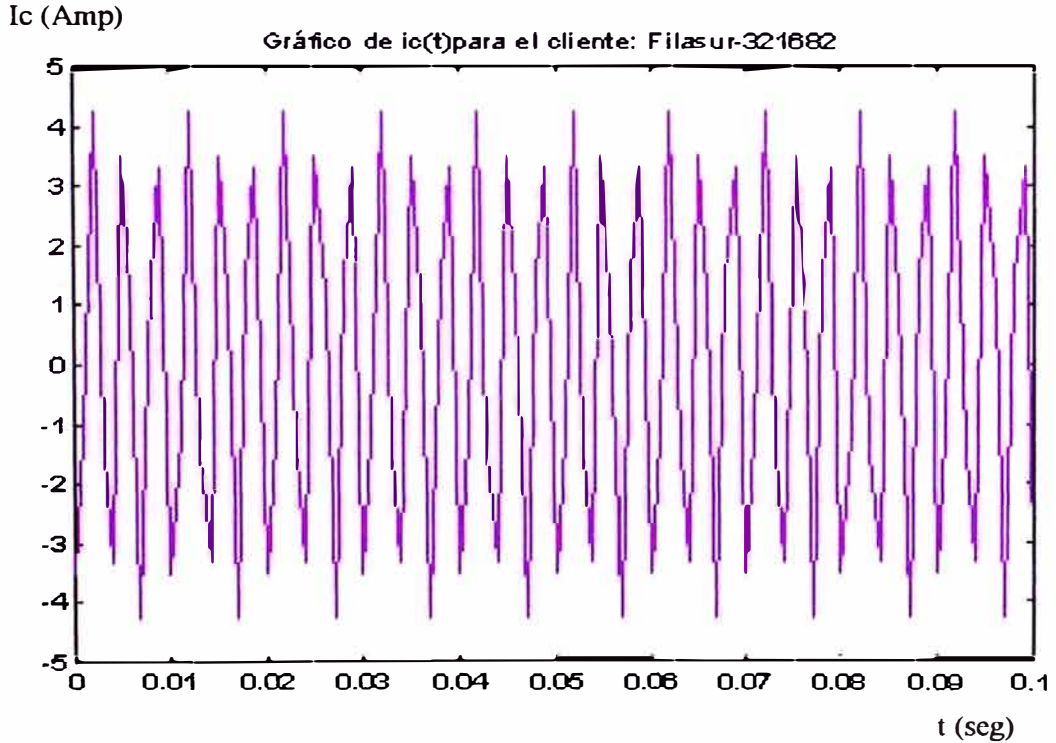


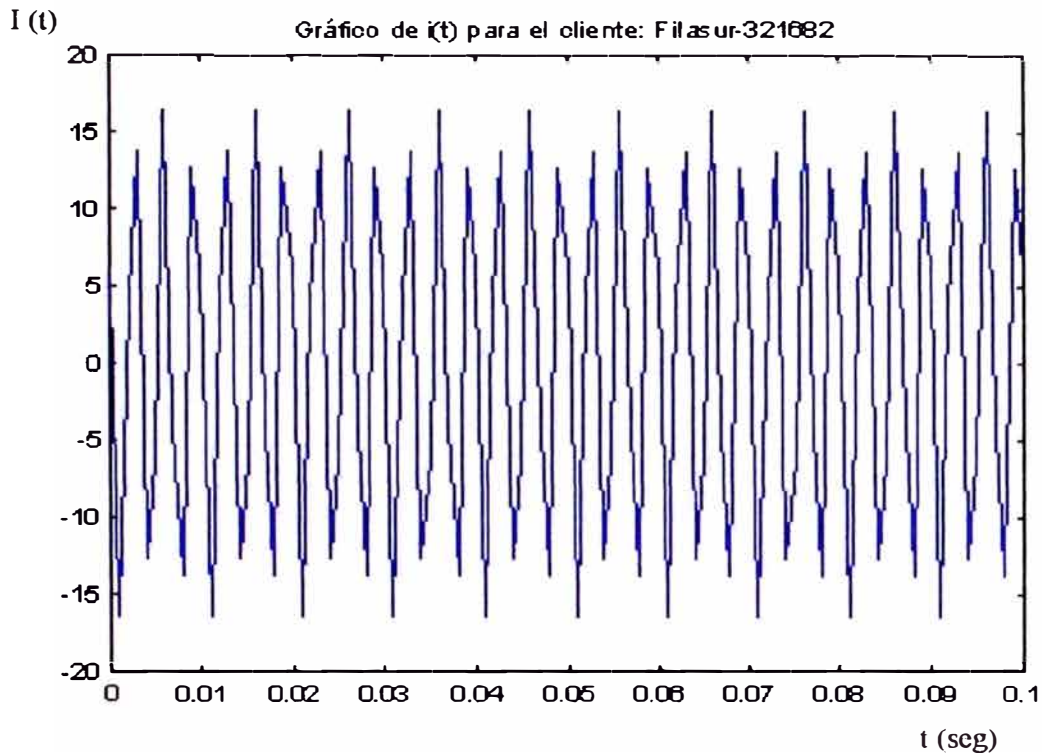
Fig. 3.21 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente Tintorería y Acabados



**Fig. 3.21 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente Tintorería y Acabados**

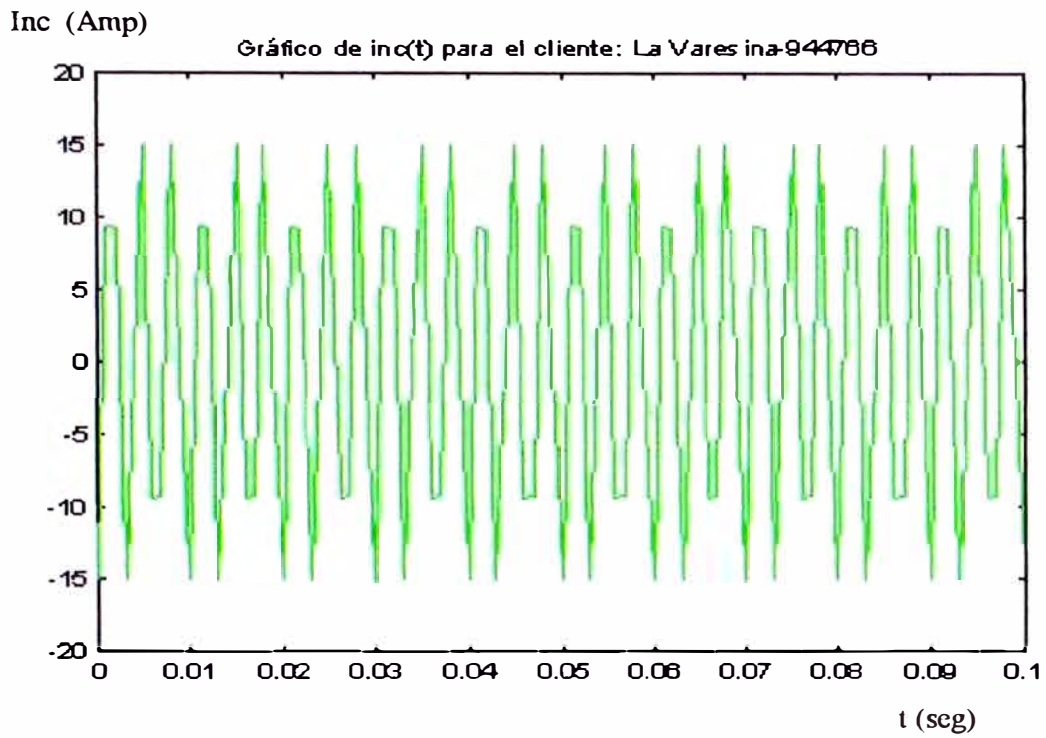
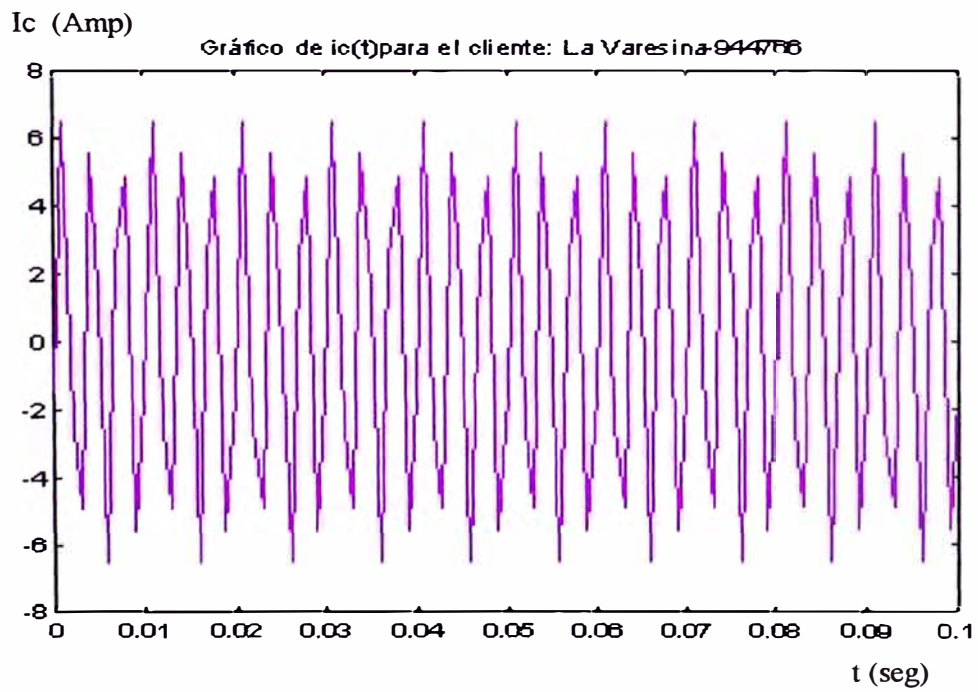
La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica  $5^\circ$  que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 3/3.5 = 0.86$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden  $5^\circ$  es mayor que la corriente armónica de orden  $5^\circ$  conforme, lo que significa que este cliente está distorsionando la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

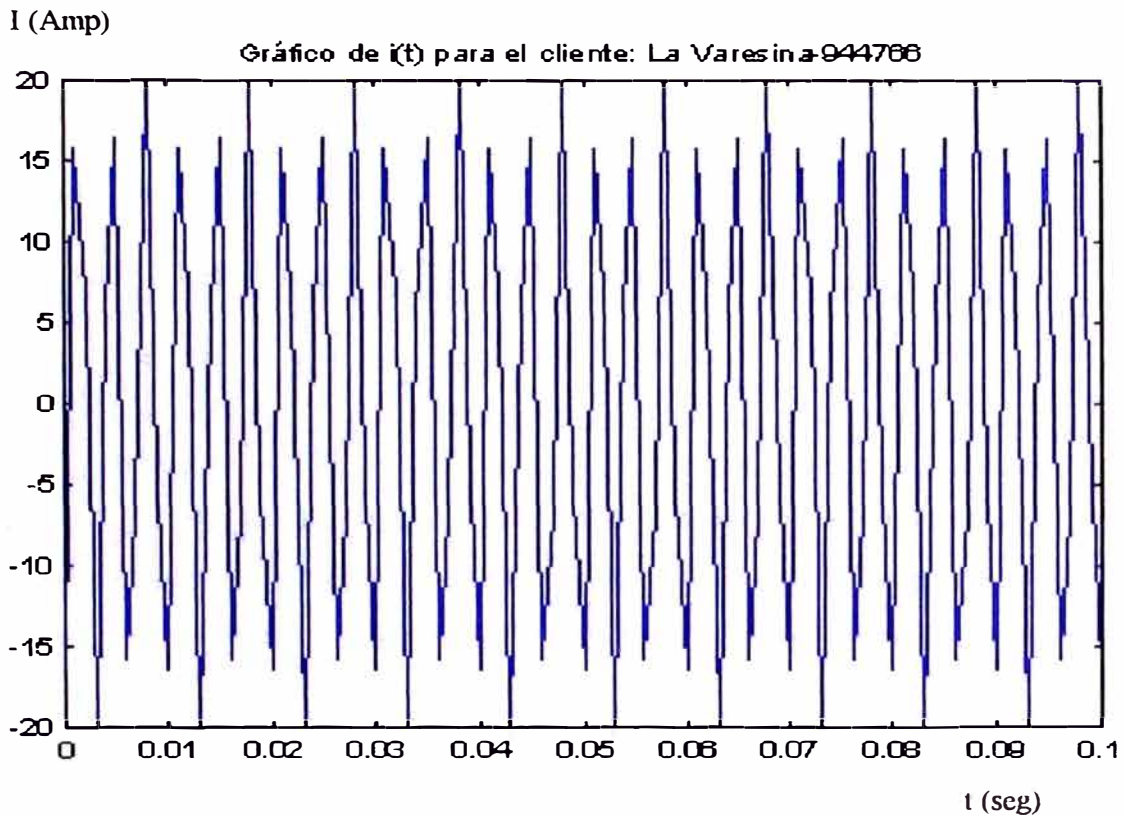
**6) Cliente: Filasur2****Fig. 3.22 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente Filasur2****Fig. 3.22 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente Filasur2**



**Fig. 3.22 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente Filasur2**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica  $5^\circ$  que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 3/15 = 1/5$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden  $5^\circ$  es mayor que la corriente armónica de orden  $5^\circ$  conforme, lo que significa que este cliente está distorsionando la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

**7) Cliente: La Varesina****Fig. 3.23 a: Gráfico de  $inc(t)$  para el cliente La Varesina****Fig. 3.23 b: Gráfico de  $ic(t)$  para el cliente La Varesina**



**Fig. 3.23 c: Gráfico de  $i(t)$  para el cliente La Varesina**

La gráfica de color azul pertenece a  $i(t)$ : la corriente total absorbida por el cliente, la de color verde es la corriente no conforme  $inc(t)$  y la gráfica de color rosada es la corriente conforme  $ic(t)$ . De estas tres gráficas se observa que el cliente está inyectando corriente armónica 5° que se ve representada por  $inc(t)$  y pero a su vez está recibiendo de la red que se ve representada por  $ic(t)$ . También se observa que la amplitud de la corriente no conforme es casi la totalidad de la amplitud de la corriente. La relación entre las amplitudes de estas es de aproximadamente:  $I_c/I_{nc} = 5/15 = 1/3$ . Es decir, la corriente armónica no conforme de orden 5° es mayor que la

corriente armónica de orden 5° conforme, lo que significa que este cliente esta distorsionando la forma de onda de la tensión armónica [7] y [8].

A continuación mostramos un cuadro resumen de los resultados del análisis con el método propuesto.

CLIENTE	Ic (Amp)	Inc (Amp)	Ic/Inc
Filasur	5.0	10.0	0.50
Corp Inca Kola	3.0	15.0	0.20
Hidrostral	3.0	1.0	3.00
Milanoplast y Portofino	3.0	30.0	0.10
Tintorería y Acabados	3.0	3.5	0.86
Filasur2	3.0	15.0	0.20
La Varesina	5.0	15.0	0.33

**Tabla N 3.5: Resumen de los resultados con el método propuesto.**

De los resultados de este método los clientes: Hidrostral, Filasur2, Milanoplast y Portofino y La Varesina son los que tienen corriente armónica de orden 5° que esta influyendo en la distorsión armónica de la tensión. Es decir, estos clientes están inyectando corrientes armónicas no conformes a la red en mayor proporción de la corriente armónica conforme absorbida por sus cargas respectivas. Los tres últimos inyectan en gran proporción corrientes armónicas no conformes que deterioran la forma de onda de tensión e Hidrostral está inyectando en gran proporción corriente armónica conforme que mejora la forma de onda de la tensión.

Además la relación entre las corrientes armónicas conformes y no conformes,  $I_c/I_{nc}$ , de los clientes Hidrostral y La Varesina son inversos, lo que quiere decir que el cliente Hidrostral esta mejorando la onda de tensión en la misma proporción que el cliente La Varesina la distorsiona.

Como sólo el cliente Hidrostral es el único que está mejorando la forma de onda, de manera importante, la corriente armónica de orden 5° presente en este alimentador



seguirá circulando perjudicando la forma de onda de la tensión en todas las barras de este alimentador y también probablemente influenciando sobre otros.

Este método es mejor que los dos anteriores, porque permite separar la corriente armónica presente en una carga en dos: una corriente que mejora el nivel de distorsión armónica ( corriente armónica conforme) y otro que lo empeora (corriente armónica no conforme). Esta ventaja nos da la facilidad de saber que proporción de la corriente armónica que se mide en una determinada carga es de responsabilidad de la red y que otra es de responsabilidad de él mismo. Además este método, como se ha podido demostrar en la aplicación mostrada, puede indicar el (los) cliente(s), que son alimentados de un mismo PAC, distorsionan la forma de onda de la tensión.

Por otro lado, este método depende mucho de la precisión de los transformadores de medida de tensión y corriente ya que para pequeños errores de ángulos e inclusive de tensión y corriente pueden ocasionar conclusiones erróneas. Inclusive si los valores están cercanos a sus márgenes de tolerancia pueden ocasionar errores en el análisis.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Es importante saber que las corrientes armónicas no conformes y las conformes tienen un alto impacto en la distorsión de voltaje de una carga. En muchos casos cuando se realiza las mediciones en el lado de alta tensión de un punto, puede darse el caso que no se encuentren problemas en la distorsión de voltaje, pero si nosotros hacemos una medición en el lado de baja tensión, encontramos distorsiones armónicas en la tensión. Esto se debe fundamentalmente al efecto de las corrientes armónicas conformes que están cancelándose con las corrientes armónicas no-conformes.
2. En el punto 3.5 donde se ve el análisis para el circuito P-06, se demuestra que el método propuesto en esta tesis funciona y además se llega a mejores y más precisas conclusiones que si se usa ambos métodos: el de la correlación de la tensión y corriente armónica y el método de Emanuel. Además este método puede proporcionar la proporción de la corriente armónica que es inyectada por el cliente a la red y además la que la red inyecta al cliente. La corriente conforme mostrada es la que hace que la corriente armónica total ( $i(t)$ ) disminuya reduciendo sus efectos y además mejorando la forma de onda de la tensión.
3. Si bien es cierto este método puede determinar la direccionalidad de una corriente armónica por medio de su separación en dos corrientes: corriente armónica no conforme y la corriente armónica conforme, este método no

funcionaría para casos como el de resonancia, variación de la impedancia de la red y/o de la carga y otros donde el ángulo armónico varia. Además para que se obtenga valores aceptables los transformadores de tensión y corriente de la medición tienen que tener un error de ángulo menor que el de la IEC-1000-4-7 Este error deberá ser tal que cumpla con (2.5.12).

4. Actualmente se están desarrollando métodos que cumplan con todas las posibles condiciones que se puedan dar en un sistema eléctrico. Estas podrían ser: resonancia serie ó paralela, aumento de carga del cliente, instalación de un condensador en el cliente y/o en la red, traslado de carga de la empresa distribuidora, etc.. Es decir, hablar de direccionalidad es muy complejo, pero los métodos presentados y en especial el tema de mi tesis demuestra el esfuerzo que se viene haciendo para superar todos estos inconvenientes.
5. El estudio de la direccionalidad de las corrientes armónicas es muy complejo por lo que muchos trabajos se vienen desarrollando. Es por demás decir de la capacidad que tienen los alumnos de la UNI, que podría aprovecharse para resolver este y muchos otros problemas. Espero que este tema de tesis sirva de ayuda para muchos otros que vengan relacionados a los armónicos y su direccionalidad. Inclusive para el desarrollo de un equipo analizador que permita resolver este problema.

## **ANEXO 1: PROGRAMAS EN MATLAB**

**PROGRAMA EN MATLAB QUE SEPARA Y GRAFICA LA CORRIENTE  
ARMÓNICA EN LA CORRIENTE ARMÓNICA CONFORME Y LA  
CORRIENTE ARMÓNICA NO CONFORME**

```
function I_Confor(n,paso,tf)
n=5;
paso=0.001;
tf=0.1;
%n Es el orden del armónico de máximo orden
% paso Es el intervalo de tiempo para la gráfica y tf es el tiempo final para la gráfica

I=zeros(n);
% Datos de la corriente%
%Corporación La Varesina-944766
I(1)=100;
I(5)=19.95;
%*****
phi(1)=358;
phi(5)=251;
%*****
V=zeros(n);
% Datos de la tensión %
V(1)=100;
V(5)=6.50;
%*****
teta(1)=29;
teta(5)=329;
%%%% Gráfico %%%

hold off;
for i=1:n
    t=0:paso:tf;
    i_t=I(i)*sin(i*2*pi*60*t+phi(i)*180/pi);
    ic_t=((I(1)*V(i))/V(1))*(sin(i*2*pi*60*t+teta(i)+i*(180/pi)*(phi(1)-teta(1))));
    inc_t=i_t-ic_t;

    %plot(t,i_t,'b-');
    %title('Gráfico de i(t) para el cliente: La Varesina-944766');

    %plot(t,ic_t,'m-');
    %title('Gráfico de ic(t)para el cliente: La Varesina-944766');

    plot(t,inc_t,'g-');
```

```
title('Gráfico de inc(t) para el cliente: La Varesina-944766');  
end
```

## PROGRAMA EN MATLAB QUE CALCULA LOS VALORES DE LA TABLA 3.3

```
function Conforme
V=[0.9 0 0.0450*exp((-10*pi/180)*i) 0 0.0450*exp((20*pi/180)*i)];
Y(1)=0.5*exp((30*pi/180)*i);
Y(3)=real(Y(1))+3*imag(Y(1))*i;
Y(5)=real(Y(1))+5*imag(Y(1))*i;
I(1)=V(1)*Y(1);
I(3)=V(3)*Y(3);
I(5)=V(5)*Y(5);
In(1)=(I(1)/V(1))*V(1);
In(3)=(I(1)/V(1))*V(3);
In(5)=(I(1)/V(1))*V(5);
Id(3)=In(3)-I(3);
Id(5)=In(5)-I(5);

n=1;
for q=1:2:5

while n<=q
    if q==1
        S_n(n)=V(1)*conj(In(1));
        S_d(n+2)=V(n+2)*conj(Id(n+2));
        end
    else
        S_n(n)=V(n)*conj(In(n))+S_n(n-2);
        S_d(n+2)=V(n+2)*conj(Id(n+2))+S_d(n);
        n=n+2;
    end
end

V_mod=abs(V)
V_angle=angle(V)*180/pi
I_mod=abs(I)
I_angle=angle(I)*180/pi
In_mod=abs(In)
In_angle=angle(In)*180/pi
Id_mod=abs(Id)
Id_angle=angle(Id)*180/pi
P_n=real(S_n)
Q_n=imag(S_n)
P_d=real(S_d)
Q_d=imag(S_d)
End
```

## **ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RPM**



Lima, 19 de Mayo de 1999

Señores :

**EDELNOR S.A.A.**

Maranga

Lima - PERU

Att: Ing. Percy Cueva

Dpto. Calidad de producto

## Ref: Equipos Analizadores de Perturbaciones.

En referencia a su requerimiento a los requisitos mínimos que deberán cumplir los Equipos Analizadores de Perturbaciones según lo especificado en la "Base Metodológica para la aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos "(17/11/1998) y la "Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (11/10/1997) les hacemos alcance de nuestras respuestas:

- El equipo debe adecuarse a la normas de seguridad tanto para instalación interior como para instalación exterior. **SI certificaciones CE, IEC 1010**
- Los equipos deberán ser de fácil traslado, y permitir el almacenamiento de la información en memoria no volátil por un lapso de 15 días como mínimo, sin descargas intermedias. **SI HD >540 MB**
- El equipo deberá contar con un sistema que asegure la inviolabilidad de los datos de programación y/o archivos de registros de la medición. **SI formato propio en disco duro**
- El equipo deberá especificar en forma indeleble su número de serie. **SI en dico duro y externo**
- La medición del equipo debe ser permanente y con seguimiento de la tensión a través de una constante de tiempo de muestreo apropiada para el registro de cada parámetro. **SI ciclo por ciclo, sin vacíos!**
- El Equipo deberá estar provisto de una interface ( óptica, serial o paralela) que permita transferir la información en formato ASCII hacia una computadora personal. **SI a través de Ethernet (opcionalmente paralelo)**
- Los intervalos de medición deberán poder ser programadas y obtenidas por software. **SI todos los parametros de 0,5/1/5/10/15/30/60Min. (excepto estan fijados el Flicker Pst en 10 Min. y el Plt en 2hrs)**
- Si el equipo requiere de transformadores o transductores de tensión o de corriente estos deberán ser compatibles con el equipo y con el medidor, a fin de que la exactitud de la medición de energía / potencia del equipo incluyendo

## Reliable Power Meters

transformadores y/o pinzas, sea por lo menos correspondiente a la clase de precisión del sistema de medición empleada para la facturación comercial **SI pinzas amperimétricas especialmente adecuado al equipo**

- Las condiciones ambientales a las que debe trabajar el equipo de medición y registro será las siguientes:

1. Rango de temperatura de operación: 0°C a + 55°C, para la costa y selva. - 20°C a +45°C, para la sierra. **SI: 0°C a + 55°C sin limitación, -20°C a +45°C con dispositivo adicional (o analizador prendido)**

2. Rango de humedad de operación : 45 a 98 %. **SI hasta 100%**

3. Rango de presiones barométricas: 0.76 a 1.08 Bar, para la costa y selva. 0.45 a 0.76 Bar, para la sierra. **SI sin limitación**

- Todos los equipos deberán pasar por ensayos en laboratorios de prestigio, los ensayos mínimos serán:

1. Ensayos de aislamiento. **SI**

2. Ensayos de Compatibilidad electromagnética. **SI**

3. Ensayos climáticos. **SI**

4. Ensayos mecánicos. **SI**

5. Ensayos de Calidad de Precisión. **SI**

### **Ver certificado de laboratorio adjunto**

- La licencia de los software de los equipos deberá permitir su uso por parte de OSINERG. **SI autorizado**

- Previo a la instalación de los equipos registradores, se realizarán sobre cada uno de ellos los ensayos de contraste y funcionamiento que indique el fabricante y/o OSINERG, los cuales deberán repetirse anualmente, o a solicitud del OSINERG. **De Acuerdo**

- Deberá notificarse al OSINERG fehacientemente con 5 (cinco) días de anticipación: el lugar, fecha y hora de realización de estos ensayos a fin de asistir a los mismo. En caso de no asistencia del representante del OSINERG, los ensayos se realizarán igualmente levantando el acta correspondiente. **De Acuerdo**

- Cada equipo deberá incluir un procedimiento de ensayos de contraste y funcionamiento. **De Acuerdo a instrucciones de RPM (localmente posible)**

- Los equipos de medición de tensión deberán tener una precisión igual o mejor de la clase 0.5 según normas IEC. **SI <0,2 (Resolución 14 Bit!)**

- Los equipos registradores de tensión deben estar equipados para realizar de manera simultánea mediciones de monitoreo de presencia de flicker y el THD de los voltajes armónicos por lo menos hasta el del orden 15°.

### **SI todos los parametros simultaneo hasta la 63 ava.**

- Los equipos registradores de frecuencia deben contar con un reloj interno síncrono controlado por satélite, tal que la precisión de la hora solar tomada como referencia, sea del orden hasta de los 10<sup>-7</sup>.segundos. **POWER RECORDER / MULTI POINT: El puerto ETHERNET (protocolo TCP/IP) permite sincronizar reloj interno con hora solar disponible en Internet!**

## Reliable Power Meters

- Los equipos de medición del flicker deberán seguir las recomendaciones dadas por la norma IEC-868. Además el equipo debe medir el flicker en cada fase e identificar de alguna manera la fuente de origen de esta perturbación **SI IEC-1000-4-15 (antes IEC-868)**
- Los equipos de medición de tensiones armónicas deberán seguir las recomendaciones dadas por la norma IEC 1000-4-7. Además el equipo debe medir las tensiones armónicas individuales por fase hasta del orden 40° inclusive y determinar la dirección de cada una de ellas.

**En USA se siguen tradicionalmente la norma IEEE-519 que supera las recomendaciones de IEC en precisión y alcance. Por lo tanto, también cumple con las recomendaciones de IEC 1000-4-7 lo que se refiere a Armónicas. En cambio, la norma IEC 1000-4-7 permite mecanismos internos para mediciones paralelas de Interarmónicas y Telecomandos que en sus valores e importancia son menores. Estas mediciones sin embargo requieren de los equipos recursos a costo de la precisión interna. No son requerimiento en USA y tampoco en el Perú.**

**Cada armónica individual es evaluado de acuerdo a su impedancia correspondiente con consideración de su polaridad (por medio del ángulo eléctrico en cuatro cuadrantes). Este método permite indicar el sentido de flujo para cada armónica individual desde 1ra...63va.**

**Adicionalmente a las impedancias de carga es posible medir simultáneamente las impedancias de fuente de 1ra...63va. Lo cual puede dar conclusiones sobre el grado de carga de una Subestación.**

Sin otro particular nos reiteramos de Uds.

Atentamente,

**Rolf Stroessner**  
**RELIABLE POWER METERS**

# Appendix I. Power Recorder (PR) Specifications, Models 1000/1500

## Measurement Parameters

### Voltage

#### Five (5) Channels:

##### Channels 1 - 3 ( generally used for phase conductor measurements)

Input: 100 millivolts to 1000 Volts peak (707 volts RMS max.)  
Accuracy:  $\pm 1\%$  of full scale. (typically 0.5%)  
Impulses: 100 volts peak to 6400 Volts peak  $\pm 2\%$  of full scale.  
Impedance: 2 megohms to ground  
Capacitance:  $< 30$  pf  
Frequency: 60/50 Hz  $\pm 0.1$  Hz

##### Channel 4 (for neutral conductor measurements)

Input: 10 millivolts to 100 Volts peak (70 volts RMS max.)  
Accuracy:  $\pm 1\%$  of full scale.  
Impulses: 10 volts peak to 640 Volts peak  $\pm 2\%$  of full scale.  
Impedance: 200 kohms to ground  
Capacitance:  $< 30$  pf

##### Channel 5 (To be enabled using additional voltage pod)

## Current

### Five (5) Channels

Channels 6 - 10 (for current measurements with current clamp)

Input:	Current Clamp Dependent	
Standard Configurations:		0.01 - 5.0 Amps RMS 0.10 - 40 Amps RMS 1.00 - 1000 Amps RMS 10.0 - 3000 Amps RMS
CT Accuracy:		<b>5 Amp Clamp - 10mA to</b>
5A:	2% ± 1 mA	
	40 Amp Clamp -	10 mA to 40 A: 1.5% ± 2mA
	1000 Amp Clamp -	1 A: 10% of Reading 50 A: 0.7% of Reading 200 A: 0.6% of Reading 1000 A: 0.5% of Reading
	3000 Amp Clamp	150A: 1.5% of Reading 600A: 0.75% of Reading 3000A: 0.5% of Reading
Accuracy:	± 0.1% of full scale (plus CT accuracy)	

## Sampling

Voltage and current wave-forms are sampled with a 14 bit analog to digital converter at a rate providing 128 sampled points per cycle at 50 and 60 Hz. Impulses are sampled using a 10 bit analog to digital converter at a software selected rate of 4 and 2 million times per second.

## Power Requirements

85 - 264 Vrms, 47 - 440 Hz  
10 - 15 VDC with optional DC power cable  
47 VA Max.

## Dimensions

Size: 8.5" x 11" x 3.5"  
Weight: 13.5 pounds

## Environmental Requirements

Operating: 0° C to 50° C  
Humidity: Weatherproof

Storage: -20° C to 60° C

## Measurement Characteristics

1. The monitor has a minimum of nine simultaneous measurement channels, with a minimum of five channels to measure current.
2. Voltage measurements are covered in a single range.
3. Voltage and current wave-forms are sampled with a 14 bit analog to digital converter at a rate providing 128 sampled points per cycle at 50 and 60 Hz. Impulses are sampled using a 10 bit analog to digital converter at a software selected rate of 4 and 2 million times per second.
4. Harmonic measurements on all channels are to the 63rd harmonic to include amplitude and phase angle for each harmonic, % of fundamental, and individual harmonic RMS volts and currents.
5. RMS and harmonic measurements are made continuously on each cycle. The minimum RMS measurement time is one cycle.
6. The following power measurements are made every cycle: Watts, VA, VAR, true power factor, and displacement power factor.
7. The Power Recorder SYSTEM provides vector addition and subtraction tools add or subtract voltage or current wave-forms on an IBM compatible PC.

## Calibration

The Power Recorder is a microprocessor based instrument utilizing advanced solid state IC's and A/D converters that are inherently stable with respect to repeatability and time. If your company has a recommended calibration schedule, the Power Recorder can be checked for accuracy. Should the instrument not meet the accuracy specifications ( +/- 0.25% FS for voltage and +/- 0.1% FS plus CT inaccuracies for current ), the Power Recorder may need to be returned to Reliable Power Meters for testing and/or repair. Contact RPM Customer Support.

## Batteries

The Power Recorder utilizes two batteries on board. The clock oscillator uses a lithium battery with a life span of ten years. The second battery is a nicad battery which is used to power the instrument in the event of a power failure.

This battery will power the instrument for five minutes before the instrument will perform an orderly shutdown and is charged when power is applied to the Power Recorder. If the battery fails to charge, return the instrument to RPM for repair.

## Resolution Vs Recording Time

The PR has a user selectable recording period. Based on the period selected, the PR will provide a predetermined resolution of RMS, power, and harmonic data as follows:

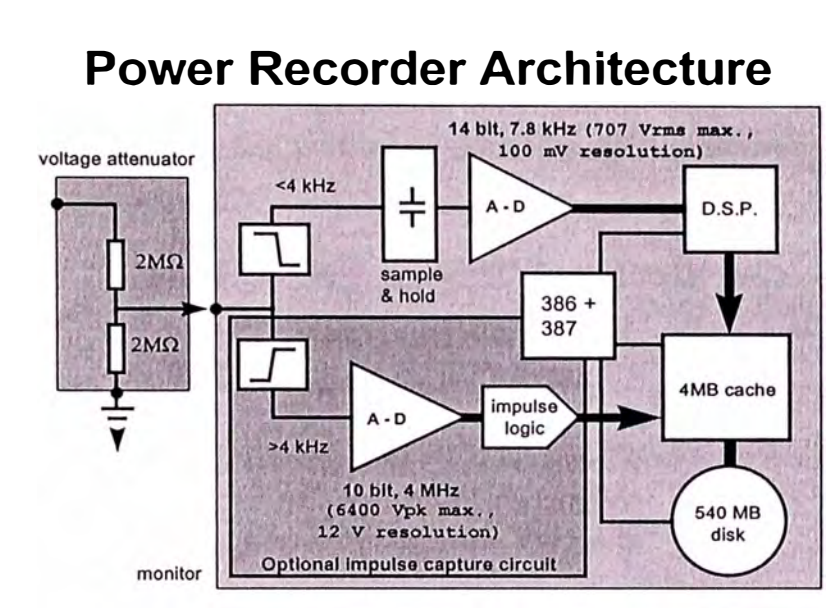
Recording Period	Resolution
15 Minute	15 cycle
30 Minute	0.5 second
1 hour	1 second
3 hours	3 seconds
6 hours	6 seconds
12 hours	12 seconds
24 hours	30 seconds
48 hours	1 minute
5 days	3 minutes
1 week	5 minutes
1 month	15 minutes
1 year	4 hours

All recordings are performed via the digital signal processing chip and are done on a cycle by cycle basis. Regardless of the recording period or the resolution the minimum and maximum values have a one cycle response.

If you should have any further questions please call the factory at (408) 358-5100 for assistance.

# Appendix J. Theory of Operation

## Calculations Utilized by the Power Recorder



## Architecture

1000:1 attenuation allows direct connection to 707 Vrms. Voltage and current wave-forms are sampled with a 14 bit analog-to-digital converter at an approximate rate of 8 kHz, phase locked, providing 128 sampled points per cycle at 50 and 60 Hz. Sampled data is passed to the digital signal processor (DSP) that performs a Fast Fourier Transform to the 63<sup>rd</sup> harmonic (FFT) in less than 10  $\mu$ sec on each cycle of voltage and current. Impulses are sampled using a 10 bit analog-to-digital converter at a software selected rate of 4 or 2 million times per second. Internal control is via 386/387 and 4 MB cache memory.

## Computations

### 1. True RMS measurements

The Power Recorder computes the RMS voltage and current over each cycle (128 data points) as follows:



$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{128} V_n^2}{128}} \qquad I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{128} I_n^2}{128}}$$

where  $V_{rms}$  and  $I_{rms}$  are sampled voltage and current values

## 2. Imbalance

Imbalance of voltage and current are calculated in accordance with the IEEE definition of the maximum difference in magnitude between phases divided by the average of the three phases expressed as a percentage.

$$V_{Imbalance} = \frac{V_{max}}{V_{Avg}} \times 100\%$$

## 3. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) is calculated on a cycle-by-cycle basis for both voltage and current as follows (where  $V_n$  and  $A_n$  are the respective rms harmonic voltage and current):

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_0^{63} V_n^2 / 63}}{V_{rms}} \times 100\%$$

## 4. Apparent Power (VA)

AC power in Volt-Amps is calculated as follows where  $V_{rms}$   $I_{rms}$  are True RMS values and  $V_F$  and  $I_F$  are the Fundamental RMS value:

$$\text{True VA} = VA_{True} = V_{rms} \times I_{rms}$$

$$\text{Fundamental VA} = VA_F = V_F \times I_F$$

## 5. Watts

Watts are calculated from each sampled voltage point times its corresponding sampled current point, on a cycle-by-cycle basis. This results in true power calculations including any harmonic distortion:

$$W_{True} = \frac{\sum_{n=1}^{128} V_n \times I_n}{128}$$

Fundamental Watts are calculated as shown:

$$W_F = V_F \times I_F \cos(\theta)$$

## 6. Power Factor

True Power Factor is the ratio of true power to apparent power and is calculated as follows:

$$PF_{True} = \frac{W_{True}}{VA_{True}}$$

Fundamental Power Factor is the angle between fundamental Voltage and fundamental Current (Displacement Power Factor)

$$PF_F = \cos(\theta)$$

where  $\theta$  is the angle between fundamental Voltage and fundamental Current (Displacement Power Factor).

## 7. Reactive Power (VAR)

Fundamental VAR is calculated as the product of the fundamental voltage times the fundamental frequency times the Sine of the displacement power factor.

$$VAR_F = VA_F \sin \theta$$

True VAR is calculated as follows:

$$VAR_{True} = \sqrt{VA_{True}^2 - W_{True}^2}$$

## 8. Distortion Power D (Watts)

Distortion Power is the non-fundamental power and is calculated as follows:

$$D = WATTS_{True} - WATTS_F$$

## **ANEXO 3: GLOSARIO DE TÉRMINOS**

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS:**

**PAC:** Es el punto de acoplamiento común. Se define como el punto en el cual la empresa distribuidora puede suministrar energía a un cliente y a otros.

**RPM:** Reliable Power Meters. Es una marca de equipos de medición.

**NTCSE:** Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos. Norma peruana para el control y supervisión de la calidad de tensión, perturbaciones: armónicos y flicker, frecuencia, alumbrado público, calidad de servicio: interrupciones,

**BM:** Es la Base Metodológica para la aplicación de la NTCSE.

**OSINERG:** Organismo Supervisor de la Inversión en la Energía Eléctrica.

**SED:** Subestación de Distribución MT/BT.

**SET:** Subestación de Transformación de AT a MT.

**PMI:** Puesto de Medición a Intemperie.

**AT:** Alta tensión.  $> 30$  kV y menor o igual a 100 kV.

**MT:** Media Tensión. Mayor que 1 kV y menor a 30 kV.

**BT:** Menor a 1 kV.

**FFT:** Transformada Rápida de Fourier.

**DSP:** Procesador Digital de Señales. Es un dispositivo que es usado para manipular las señales de tensión y/o corriente para poder calcular otros parámetros eléctricos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Carpinelli, PROBABILISTIC EVALUATION OF THE ECONOMICAL DAMAGE DUE TO HARMONIC LOSSES IN INDUSTRIAL ENERGY SYSTEM. IEEE Transaction on Power Delivery 1993.
- [2] T.Q. Tran, Larry E. Conrad, Brian K. Stallman. ELECTRIC SHOCK AND ELEVATED EMF LEVELS DUE TO TRIPLEN HARMONICS. IEEE Transaction on Power Delivery 1993.
- [3] Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, D.S. 020-97-EM.
- [4] Suspensión de la NTCSE, D.S. 009-99-EM.
- [5] Base Metodológica, OSINERG N° 295-1999-OS/CD
- [6] CIGRE 36.05, REVIEW OF METHODS FOR MEASUREMENT AND EVALUATION OF THE HARMONIC EMISSION LEVEL FROM AN INDIVIDUAL DISTORTING LOAD. CIRED 2 Joint WG CC02 (Voltage Quality) 1998.
- [7] Krishnaswamy Srinivasan, ON SEPARATING CUSTOMER AND SUPPLY SIDE HARMONICS CONTRIBUTIONS, IEEE Transactions on Power Delivery 1996.

- [8] Renato Sasdelli, A VI- BASED MEASUREMENT SYSTEMS FOR SHARING THE CUSTOMER AND SUPPLY RESPONSABILITY FOR HARMONIC DISTORTION, IEEE Transaction on Instrumentation an Measurement 1998.
- [9] Haili Ma, Adly A. Girgis, IDENTIFICATION AND TRACKING OF HARMONIC SOURCES IN A POWER SYSTEM USING A KALMAN FILTER. IEEE Transaction on Power Delivery 1996.
- [10] A. P. Sakis Meliopoulos, TRANSMISSION LEVEL INSTRUMENT TRANSFORMERS AND TRANSIENT EVENT RECORDERS CHARACTERIZATION FOR HARMONIC MEASUREMENT. IEEE Transaction on Power Delivery 1993.
- [11] J. Martinon, A NEW STATISTICAL APROACH OF HARMONIC PROPAGATION IN TRANSMISSION SYSTEMS. IEEE Transaction on Power Delivery 1996.
- [12] Zbigniew Wolanski, CONCEPTUAL STUDY OF A SHUNT POWER QUALITY COMPENSATOR. IEEE Transaction on Power Delivery 1996.
- [13] Hong, Ying-Yi, DETERMINATION OF LOCATIONS AND SIZES FOR ACTIVE POWER LINE CONDITIONERS TO REDUCE HARMONICS IN POWER SYSTEMS. IEEE Transaction on Power Delivery 1996.
- [14] IEEE Std 1100-1992. IEEE Recomend Practice for POWERING AND GROUNDING SENSITIVE ELECTRONIC EQUIPMENT.
- [15] Hagler Bailly, ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE NORMA DE CALIDAD REFERENTE A PERTURBACIONES EN LA INDUSTRIA.

- [16] Jos Arrillaga, Bruce C. Smith, Neville R. Watson, Alan R. Wood. POWER SYSTEM HARMONIC ANALYSIS. Editorial John Wiley & Sons 1997.
- [17] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, ELECTRICAL POWER SYSTEMS QUALITY. Editorial McGraw-Hill.
- [18] IEEE Standard 519-1992.
- [19] Power System Relay Committee of the PES report, “Sine Wave Distortions on Power Systems and the Impact on Protective Relaying”, Draft 5, November 1982.
- [20] Jost F.A., Menzies D.F., and Sachdev M.S., “Effect of System Harmonics on Power System Relays”, CEA, System Planning and Operation Section, Power System Protection Committee, Spring Meeting, March 1974.
- [21] T. Q. Tran, Larry E. Conrad, Brian K. Satllman, “ Electric Shock Elevated EMF Levels due Triplen Harmonics”.
- [22] Alexander Eigeles Emanuel On the Assessment of Harmonic Pollution. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 10 N°3 July 1995.
- [23] Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems. 1994.  
Mark Waller’s. Harmonics. PROMPT Publications 1994.