

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN  
TRANSFORMADORES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTADO POR:

**MARCO ANTONIO MORENO OSCANO**

PROMOCIÓN

2009 - II

LIMA – PERÚ

2013

# **INFLUENCIA DE CARGAS NO LINEALES EN TRANSFORMADORES**

**DEDICADO:**

A mis queridos padres Alejandro y Nelly por su infinita confianza en mí y por enseñarme el camino de Dios.

A mis hermanas Rocío y Marleny, de quienes recibí el apoyo más incondicional.

A mi hermano Juan, quién fue el apoyo clave y el aliento constante.

A mis adorados sobrinos, Piero y Mariana por ser fuente de inspiración y alegría.

## SUMARIO

En los últimos años se ha mostrado una tendencia hacia el uso, cada vez más intenso de equipos electrónicos, ya sea en los hogares a través de los equipos electrodomésticos de consumo o en las plantas industriales con el propósito de mejorar los procesos de producción. Pero el uso de la electrónica de potencia no solo ha traído mejoras para el proceso productivo, también ha traído consigo otros problemas de orden técnico que inevitablemente devienen en problemas económicos. Las cargas electrónicas generan ondas distorsionadas a pesar de estar excitadas por voltajes sinusoidales, estas ondas contienen componentes armónicos cuya frecuencia es múltiplo impar de la fundamental, por consiguiente estas corrientes de frecuencia elevada tienen un impacto significativo en los transformadores. Los componentes armónicos de corriente al ser de frecuencia elevada generan pérdidas adicionales por corrientes parásitas principalmente en los devanados. Este trabajo pone en práctica dos metodologías para calcular la potencia a la cuál debe degradarse el transformador que opera con una determinada carga no lineal para que este no incremente las pérdidas más allá de las nominales. El primer método puesto en práctica es el que recomienda el estándar IEEE C57.110-1986 [1] y el segundo el método de desclasificación a través del Factor K. Los dos métodos toman como referencia el cálculo de la máxima corriente de carga a la cual el transformador opera en el límite de sus condiciones nominales, por consiguiente la corriente hallada es menor a la corriente nominal para la cual fue diseñado el transformador.

## ÍNDICE

<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	3
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.1.1 Problemas Técnicos	3
1.1.2 Problemas Económicos	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Método de Trabajo	5
<b>CAPÍTULO II</b>	6
<b>FUNDAMENTO TEORICO</b>	6
2.1 Introducción	6
2.1.1 Representación de los armónicos	6
2.1.2 Características de los armónicos en los Sistemas de Potencia	7
2.1.3 Medida de la Distorsión Armónica	8
2.2 Principales cargas no lineales	10
2.2.1 Clasificación	10
2.2.2 Transformadores	11
2.2.3 Máquinas Rotativas	11
2.2.4 Hornos de Arco	11
2.2.5 Lámparas de descarga	12
2.2.6 Los convertidores	13
2.3 Efectos de la Distorsión Armónica en los Sistemas Eléctricos	13
2.3.1 Efectos sobre los transformadores	13
2.3.2 Efectos sobre otros equipos	13
2.4 Límites permisibles de distorsión armónica establecidos por normas	15
2.4.1 Límites de distorsión de armónicos de tensión	15
2.4.2 Límites de distorsión de armónicos de corriente	16
<b>CAPÍTULO III</b>	17
<b>METODOLOGIA PARA ELIMINAR LOS ARMÓNICOS</b>	17
3.1 Conexión de los transformadores para eliminar armónicos	17
3.1.1 Conexión Delta-Estrella	17

3.1.2	Conexión particular	17
3.1.3	Transformadores con el secundario en zig-zag	20
3.2	Colocación de sistema de filtros	20
3.2.1	Filtros Pasivos	20
3.2.2	Filtros Activos	22
3.2.3	Filtros Híbridos	23
	<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>24</b>
	<b>METODOLOGIA PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LOS ARMONICOS EN TRANSFORMADORES</b>	<b>24</b>
4.1	Efectos de los armónicos de tensión	24
4.2	Efectos de los armónicos de corriente	25
4.2.1	Pérdidas convencionales	25
4.2.2	Pérdidas adicionales	26
4.3	Método para reducir la potencia de un transformador que opera bajo cargas no lineales	29
4.3.1	Consideraciones generales	30
4.3.2	Cálculo de la capacidad equivalente del transformador	30
4.3.3	Cálculo del valor de $K'$	31
4.3.4	Cálculo de las pérdidas por corriente eddy	32
4.4	Transformadores K-factor	32
4.4.1	Alcances de la UL	35
4.4.2	Cálculo del K-factor de acuerdo a la UL	36
4.5	Consideraciones sobre el diseño de un transformador con K-factor	38
4.5.1	Cambios estructurales de un transformador con K-factor con respecto a un transformador convencional	38
4.6	Método de desclasificación del transformador con el Factor K	40
4.6.1	Cálculo del Factor K	40
4.7	Pérdida de Vida del transformador bajo cargas no lineales	42
	<b>CAPÍTULO V</b>	<b>44</b>
	<b>CASO DE ESTUDIO</b>	<b>44</b>
5.1	Descripción	44
5.2	Objetivo	44
5.3	Transformador usado en el ensayo	44
5.4	Equipos de laboratorio	45
5.5	Esquema de conexiones general	46
5.6	Metodología de ensayo	46

5.6.1	Medición de la Resistencia de los devanados	46
5.6.2	Determinación de las pérdidas en el núcleo	46
5.6.3	Determinación de las pérdidas en carga	47
5.6.4	Ensayo con cargas no lineales	47
5.7	Desarrollo del ensayo y valores obtenidos	47
5.7.1	Condiciones del Ensayo	48
5.7.2	Resistencia de devanados	48
5.7.3	Pérdidas en el núcleo	49
5.7.4	Pérdidas en carga	49
5.7.5	Medición de parámetros con cargas no lineales	50
5.8	Evaluación de la capacidad de carga del transformador de acuerdo a la carga no lineal instalada	56
5.8.1	Cálculo según la metodología del estándar C.57.110-1986	56
5.8.2	Cálculo según la metodología de desclasificación del Factor K	58
	<b>CONCLUSIONES</b>	61
	<b>ANEXOS</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	

## PROLOGO

En el presente informe se estudia mediante ensayo el caso de un transformador conectado a una carga no lineal y se ponen en práctica dos metodologías para mitigar los efectos de los componentes armónicos generados por esta carga no lineal. Por un lado se pone en práctica la metodología que recomienda la norma IEEE C57.110-1986 [1] para hallar la máxima corriente de carga que genere la misma cantidad de pérdidas que la corriente de carga nominal del transformador y por consiguiente el porcentaje al cual deberá reducirse la potencia del transformador. Por otro lado se pone en práctica la metodología de desclasificación del transformador a través del Factor-K, el cual proporciona el valor por el cual será dividida la corriente de carga nominal del transformador para hallar el valor máximo de la corriente de carga no senoidal.

Se ensayó un transformador conectándolo a tres cargas no lineales de manera alternada, el propósito fue encontrar los parámetros del transformador y el espectro armónico de cada carga en estudio para luego mediante la aplicación de las dos metodologías mencionadas líneas arriba encontrar el porcentaje al cual deberá reducirse la potencia nominal del transformador para que opere sin exceder las pérdidas de diseño, mientras está sujeto a cargas no lineales con el mismo Factor K de las cargas ensayadas. Finalmente hacer una comparación de los resultados obtenidos con ambas metodologías. El ensayo se desarrolló gracias a las facilidades brindadas por las autoridades y personal del Laboratorio de Ciencias e Ingeniería de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería. A ellos un especial agradecimiento. El informe consta de cuatro Capítulos, el Capítulo I corresponde a la introducción, donde se plantea el problema desde el punto de vista técnico y económico, seguidamente se indican los objetivos y finalmente se explica el método de trabajo para la realización del informe. En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico precedente donde se enfatizan las principales cargas no lineales y sus efectos en los equipos, finalmente se mencionan los límites de distorsión armónica establecida por las principales normas. En el Capítulo III se presentan las metodologías para eliminar los componentes armónicos, las que podrían ser una alternativa para proteger al transformador de los efectos negativos de las cargas no lineales; se estudian dos metodologías, una involucra el conexionado del transformador o el conexionado entre dos transformadores para eliminar naturalmente los componentes armónicos y la otra es la instalación de filtros para eliminar componentes



armónicos específicos. En el capítulo IV se presentan los dos métodos más comunes para mitigar los efectos de los armónicos en los transformadores, por un lado el recomendado por la norma IEEE C57.110-1986 [1], y por otro lado el método de desclasificación que usa el Factor K, cuyo valor nos da una referencia del porcentaje de desclasificación a la que debe ser sometido el transformador para que no exceda los límites de operación en presencia de cargas no lineales. En el Capítulo V se presentan los valores obtenidos en el ensayo, se analizan los resultados y se pone en práctica las metodologías comentadas al inicio.

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

Con el desarrollo de la tecnología, la necesidad del ahorro de energía y otros factores relacionados con la optimización de recursos en la industria, se ha venido incrementando significativamente las cargas no lineales, dicho de otro modo, aquellas cargas que generan corrientes no sinusoidales a pesar de que están alimentadas con tensión sinusoidal. Sobre todo las corrientes pueden comprometer seriamente los transformadores hasta destruirlos.

La principal consecuencia de las corrientes armónicas en los transformadores son las pérdidas, sobre todo en los arrollamientos que trae consigo un aumento de la temperatura y por consiguiente un deterioro del aislamiento, hechos que acortan la vida útil del transformador. Para reducir estos efectos se proponen algunas soluciones entre las cuales está el de usar transformadores con grupos de conexión especiales, redimensionar el transformador en su concepción y finalmente desclasificar el transformador, práctica que consiste en reducir la carga máxima del transformador.

Un transformador estándar no está diseñado para altas corrientes armónicas producidas por cargas no lineales y se recalientará y fallará antes de tiempo cuando se halle conectado a este tipo de cargas. Bajo las perspectivas señaladas, este trabajo se enfoca en las metodologías para reducir la potencia de un transformador existente que se encuentra sujeto a cargas que generan ondas distorsionadas de tensión y corriente. Los transformadores son diseñados y clasificados asumiendo que van a operar en condiciones de ondas senoidales, es decir tensiones y corrientes a 60Hz, pero la realidad indica que las redes están polucionadas de corrientes y tensiones con componentes armónicos que son múltiplo de la frecuencia fundamental, por lo tanto es necesario desclasificar los transformadores a condiciones en que las ondas no senoidales no tengan un efecto destructivo en el equipo.

### **1.1 Planteamiento del problema**

A continuación se hará una breve descripción de los problemas técnicos y económicos que se derivan de la influencia de las cargas no lineales en los transformadores. Si bien es cierto, estos problemas pueden tener una clasificación más amplia, en este apartado se analizan los más importantes.

#### **1.1.1 Problemas Técnicos**

El uso de cargas no lineales en sistemas eléctricos, tanto de origen electrónico y otros como los hornos de arco eléctrico, producen distorsión en las formas de onda de las corrientes y los voltajes. El efecto negativo más importante que estas ondas distorsionadas producen al transformador, es el incremento de las pérdidas por corrientes parásitas, principalmente en los devanados. Esto conlleva a un incremento de la temperatura por el exceso de calor que tiene que ser disipado y por consiguiente a una reducción de la vida útil del aislamiento del transformador. En algunos casos la vida del transformador puede verse reducida hasta en un 50% de su vida estimada a condiciones normales de funcionamiento.

Es aquí donde los ingenieros de mantenimiento se enfrentan a una disyuntiva. Reducir la carga del transformador o adquirir un transformador diseñado específicamente para manejar cargas con un contenido armónico.

Desde el punto de vista técnico existen dos métodos específicos para las dos soluciones planteadas líneas arriba.

La reducción de la carga del transformador se puede llevar a cabo por dos métodos, el primero lo propone la norma IEEE C57.110-1986 [1] el cual considera las pérdidas parásitas por corrientes eddy y la distribución armónica para evaluar la reducción de la corriente máxima que puede suministrar el transformador ante determinadas cargas no lineales, el segundo es el método estandarizado en Europa que propone un Factor K por el cual se debe dividir la corriente nominal del transformador para hallar la máxima corriente distorsionada que puede manejar. Este Factor K refleja el exceso de pérdidas experimentado en el bobinado de un transformador tradicional.

Por otro lado se pueden recurrir a transformadores especiales llamados "Transformadores K-factor", estos utilizan diseños constructivos alternativos que permiten al transformador manejar sin problemas cargas no lineales. El dimensionamiento de este tipo de transformadores se realizará en base un K-factor que es derivado de la corriente de carga, el cuál puede ser obtenido por medición directa.

### **1.1.2 Problemas Económicos**

Los problemas económicos derivan de los efectos negativos de las cargas no lineales en los transformadores, podríamos decir que el principal efecto de los armónicos de corriente son las pérdidas adicionales que se producen en los devanados lo que conlleva a un aumento de la temperatura de los mismos, y si se trata de un transformador inmerso en aceite, el aumento de las pérdidas en las partes metálicas del transformador repercutirá en un degradamiento del aceite, todos estos efectos combinados pueden hacer que la vida útil del transformador se reduzca, trayendo consigo un problema económico pues un transformador cuya vida útil estaba estimada en 20 años, este

reducirá su vida útil hasta en 10 años, al cabo de los cuales habrá que invertir en un nuevo transformador, probablemente de mayor potencia que el anterior o uno especial de acuerdo a las características de carga de la instalación.

El coste económico también se ve afectado al tener que reducir la potencia nominal de un transformador que maneja cargas no lineales. En este caso hay que adquirir un nuevo transformador para derivar la carga excedente, coste que no estaba previsto en muchos casos.

Otros costos derivados de los efectos de los armónicos de corriente son las pérdidas de distribución, pérdidas de potencia y energía, ampliación de instalaciones, paradas de procesos productivos.

Finalmente los costes visibles están en el mayor consumo eléctrico, puntas de consumo eléctrico, recargo o pago de energía reactiva.

## **1.2 Objetivos**

Los objetivos del presente informe son:

- Recomendar el porcentaje que deberá reducirse la potencia del transformador para que opere con determinadas cargas no lineales, sin exceder sus pérdidas nominales. Para este fin se usaran dos metodologías; la primera recomendada por la norma IEEE C57.110-1986 [1], el cual consiste en hallar el porcentaje de degradación del transformador a través de la distribución armónica de la carga y las pérdidas por corrientes Eddy. La segunda metodología de desclasificación inicialmente desarrollada por la norma europea BS 7821 Part. 4 [2], el cual consiste en hallar el Factor K por el cual deberá dividirse la corriente nominal para obtener la máxima corriente distorsionada que puede manejar el transformador.
- Hacer una comparación de los resultados hallados con las dos metodologías.

## **1.3 Método de Trabajo**

Para el cumplimiento de los objetivos del informe se recurrirá al método de ensayo, el cual estará apoyado en el marco teórico consultado en textos especializados en armónicos, transformadores y máquinas eléctricas en general. Se revisarán papers donde se traten temas específicos y donde se describan experiencias de simulación de casos de estudio particulares. Se hará una revisión especial de las normas relacionadas con el presente trabajo. Finalmente se buscare información en páginas especializadas en internet, se hará una crítica cuidadosa de la información encontrada a través de este medio.

## CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEORICO

### 2.1 Introducción

Los armónicos han existido por mucho tiempo, pero es en los últimos años que ha cobrado importancia su influencia en los sistemas eléctricos. El incremento de cargas no lineales, tales como hornos de arco, lámparas de descarga, ferromagnéticas y principalmente de tipo electrónico ha puesto sobre el tapete la necesidad de controlar los efectos nocivos que estos tienen sobre los equipos.

Las cargas no lineales distorsionan las ondas de tensión y corriente. Estas corrientes o tensiones distorsionadas tienen efectos diversos sobre los equipos; pueden causar errores en los equipos de medición, accionamiento de los equipos de protección, ruido acústico, incremento de temperatura en los cables de energía, incremento de temperatura en los transformadores e interferencia en los circuitos de comunicaciones.

Los problemas de armónicos se resuelven principalmente por medio del uso de filtros activos o pasivos, usando transformadores de aislamiento, mejorando las instalaciones eléctricas, sobredimensionando los conductores, usando transformadores especiales o desclasificando los transformadores existentes.

Un armónico se puede definir como el contenido de la función cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental del sistema de potencia. En la Fig. 2.1 se puede apreciar una onda sinusoidal la cual tiene componentes armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental.

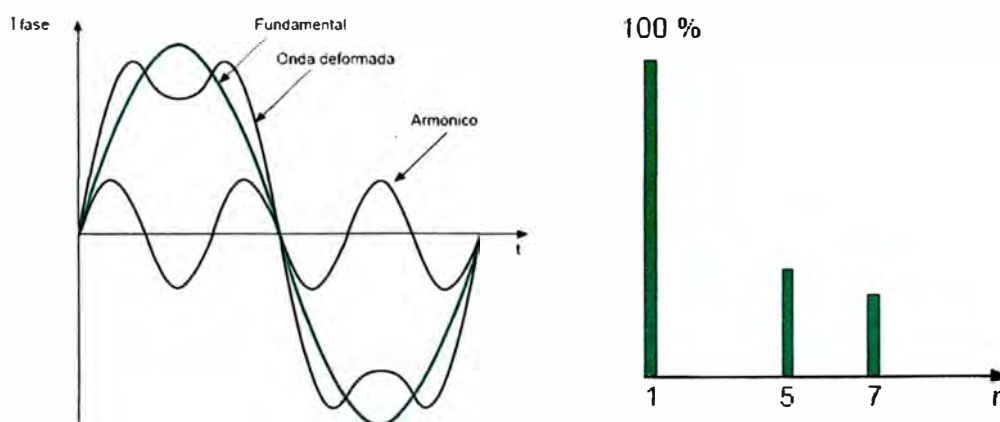


Fig. 2.1 Imagen de una onda deformada y su correspondiente espectro armónico [3]

#### 2.1.1 Representación de los armónicos

Una señal periódica no sinusoidal se puede representar como una combinación de una

serie de señales sinusoidales, llamadas "armónicos", aplicando el teorema de Fourier.

El proceso de calcular la magnitud y la fase de una onda, periódica fundamental y sus armónicas en un periodo T se denomina análisis de armónicas.

La Serie de Fourier representa una manera efectiva de estudiar y analizar la distorsión armónica. El teorema declara que: "Toda oscilación periódica compleja se puede representar en forma de una suma de oscilaciones armónicas simples con frecuencias cíclicas múltiples de la frecuencia cíclica fundamental [4]

Las formas de onda no sinusoidal periódicas pueden ser representadas en términos de la Serie de Fourier como.

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2.1)$$

ó

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \text{sen}(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.2)$$

Cada término de la Serie de Fourier es la componente armónica de la onda distorsionada, donde

$f(t)$  es la función periódica de frecuencia

$f_0$  es la frecuencia angular  $\omega_0 = 2\pi f_0$  y período  $T = 1/f_0 = 2\pi/\omega_0$

$C_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1)$  representa la componente fundamental

$C_h \text{sen}(h\omega_0 t + \phi_h)$  representa la  $h^{\text{th}}$  armónica de amplitud  $C_h$

Los coeficientes de la Serie de Fourier están dados por

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.3)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt \quad (2.4)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(h\omega_0 t) dt \quad (2.5)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (2.6)$$

## 2.1.2 Características de los armónicos en los Sistemas de Potencia

### a) Simetría

- Las funciones con simetría impar se caracterizan por  $f(-t) = -f(t)$  lo que resulta que los términos coseno se anulen en el desarrollo de la Serie de Fourier, quedando solo los términos seno [4]

- Las funciones con simetría par se caracterizan por  $f(-t) = f(t)$  lo que resulta que los términos seno se anulen en el desarrollo de la Serie de Fourier, quedando solo términos coseno. [4]
- Las funciones con simetría de media onda se caracterizan por,  $f(t \pm T/2) = -f(t)$  lo que resulta que los armónicos de orden (2, 4, 6, ...) se anulen en el desarrollo de la Serie de Fourier. [4]

### b) Secuencia de fase

En un sistema trifásico balanceado, Las componentes armónicas son de secuencia positiva, negativa o cero y pueden ser analizadas a través de la Serie de Fourier.

El Voltaje total de fase RMS es

$$V_{ph_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2} \quad (2.7)$$

El voltaje de Línea RMS es

$$V_{ll_{rms}} = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{3 \sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}}^2}, \quad h \neq 3n \quad (2.8)$$

Examinando las dos últimas ecuaciones, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- La fundamental como también la cuarta, séptima, armónico tienen secuencia positiva.
- La segunda, quinta, octava, armónica tienen secuencia negativa
- La tercera, sexta, novena armónica tienen secuencia cero.
- Si existen armónicos en el sistema, corrientes de secuencia cero y secuencia negativa estarán presentes, siempre que el sistema sea balanceado.
- Los armónicos múltiplos de 3 desaparecen en conexiones delta o en ausencia de conexión a tierra.

### c) Independencia

La propiedad de un sistema balanceado es que su respuesta ante distintos armónicos son independientes unos de otros. Esto es, construir el circuito equivalente para cada armónico (en el dominio de la frecuencia) y resolver para corrientes y voltajes.

#### 2.1.3 Medida de la distorsión armónica

La forma de onda de una corriente o voltaje distorsionada puede desarrollarse con la Serie de Fourier y expresarse como:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.9)$$

Siendo  $i(t)$  la corriente distorsionada

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.10)$$

Siendo  $i(t)$  la corriente distorsionada

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.10)$$

Siendo  $v(t)$  la tensión distorsionada

Donde

$I_h$  es el  $h^{\text{th}}$  pico de corriente armónico

$V_h$  es el  $h^{\text{th}}$  pico de voltaje armónico

$\phi_h$  es el  $h^{\text{th}}$  corriente de fase armónico

$\theta_h$  es el  $h^{\text{th}}$  voltaje de fase armónico

$\omega_0$  es la frecuencia angular fundamental,  $\omega_0 = 2\pi f_0$

$f_0$  es la frecuencia fundamental

### a) Voltaje y Corriente RMS

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h_{rms}}^2} \quad (2.11)$$

y

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h_{rms}}^2} \quad (2.12)$$

### b) Factor de Distorsión de Corriente y Voltaje

El factor de distorsión de voltaje, también conocido como Distorsión Armónica Total, está definido como.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{1rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.13)$$

De forma análoga, el factor de distorsión de corriente armónica, más conocido como Distorsión de corriente armónica total, es definido como:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{1rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.14)$$

Donde  $V_1$ ,  $I_1$  representan el voltaje y corriente pico respectivamente.

### c) Potencia Activa y Reactiva

La potencia activa es:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_{h_{rms}} I_{h_{rms}} \cos(\theta_h - \phi_h) \quad (2.15)$$



**d) Potencia Aparente**

La potencia aparente es

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.17)$$

**e) Distorsión de Potencia**

La distorsión de potencia es definido como

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (2.18)$$

**f) Factor de Potencia**

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{1+THD_i^2}} = fp_{disp} \cdot fp_{dist} \quad (2.19)$$

$$fp_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (2.20)$$

$$fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{1+THD_i^2}} = \frac{V_{1rms}}{V_{rms}} \cdot \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (2.21)$$

Donde

$fp_{disp}$  es el desplazamiento del factor de potencia

$fp_{dist}$  es la distorsión del factor de potencia

Por lo expuesto no deberíamos confundirnos con un dato de placa del factor de potencia igual a 1, esto solo es posible cuando con señales puramente sinusoidales. En la actualidad el factor de potencia cuando el sistema está afectado por armónicos es

$$fp_h = \min \left( \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \right) < fp_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (2.22)$$

**2.2 Principales cargas no lineales**

Desde principios de siglo han existido las fuentes de armónicos, pero su influencia dentro del sistema eléctrico ha pasado casi desapercibida. Podemos mencionar a los clásicos generadores de armónicos como son los transformadores, las máquinas rotativas y los hornos de arco.

Con el uso cada vez más intensivo de la electrónica de potencia han ido apareciendo otras cargas no lineales que generan corrientes y voltajes distorsionados que polucionan las redes eléctricas.

**2.2.1 Clasificación**

La norma IEEE 519-1992 [5], relativa a "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia clasifica a las fuentes de armónicos de la siguiente manera:

generadores de armónicos como son los transformadores, las máquinas rotativas y los hornos de arco.

Con el uso cada vez más intensivo de la electrónica de potencia han ido apareciendo otras cargas no lineales que generan corrientes y voltajes distorsionados que polucionan las redes eléctricas.

### **2.2.1 Clasificación**

La norma IEEE 519-1992, relativa a "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia"<sup>[4]</sup> clasifica a las fuentes de armónicos de la siguiente manera:

- Dispositivos ferromagnéticos, dentro de esta categoría están los transformadores y máquinas rotativas
- Dispositivos del tipo de arco, dentro de esta categoría están los hornos de arco, luces fluorescentes.
- Dispositivos del tipo de electrónica de potencia, dentro de esta categoría están los ciclo convertidores, rectificadores, inversores, static VAR compensadores, HVDC.

### **2.2.2 Transformadores**

Los transformadores son fuentes de armónicos debido a que su núcleo está construido con material ferromagnético, y este opera mayormente muy cerca de la región no lineal. Por consiguiente la corriente de magnetización resulta siendo no sinusoidal y contiene armónicas, principalmente la tercera, siempre que el voltaje aplicado sea sinusoidal.

Para mantener una tensión sinusoidal es necesario es necesario proporcionar una trayectoria para las armónicas triplens, esto se logra conectando los devanados en delta en transformadores trifásicos.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se incrementan cuando la carga conectada al transformador es baja y por ende el voltaje se incrementa, esto se da usualmente en horas de la madrugada.

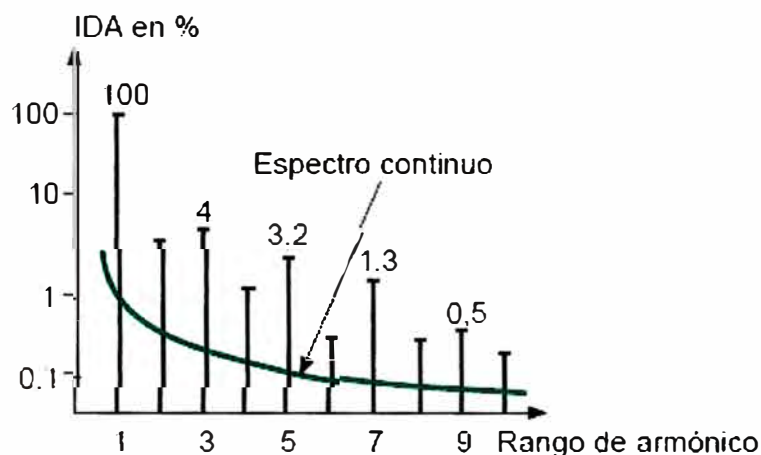
### **2.2.3 Máquinas Rotativas**

Las máquinas rotativas son fuente de armónicos porque sus devanados están incrustados en ranura los cuales nunca podrán ser exactamente sinusoidalmente distribuidos, por tanto su fuerza magneto motriz es distorsionada. Estos armónicos llamados comúnmente de ranura son de rango elevado pero su amplitud es casi despreciable. Sin embargo las máquinas síncronas más pequeñas son generadoras de armónicos de 3er orden, los cuales pueden causar los siguientes efectos:

- El calentamiento permanente de las resistencias de puesta a tierra de los alternadores
- El disparo de los relés contra las deficiencias de aislamiento.

de un horno de arco usado en la producción de acero se pueden encontrar en el análisis un espectro continuo que revelan armónicas e interarmónicas.

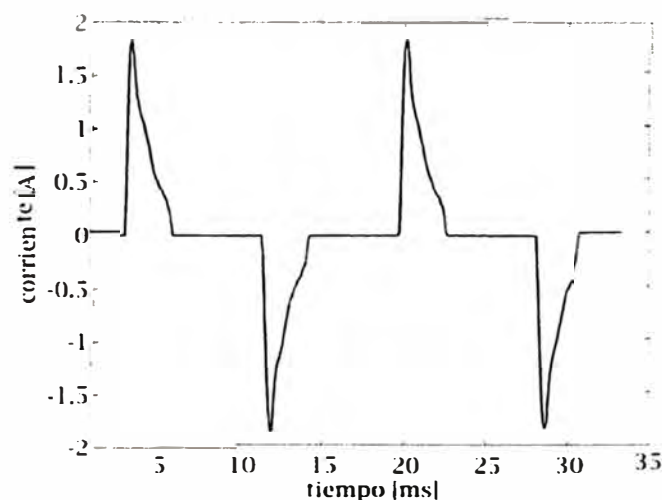
En el caso que el horno sea usado en el refinamiento del material, las interarmónicas y armónicas pares desaparecerán y solo se encontrarán armónicas impares, debido a que la onda se torna simétrica. En la Fig. 2.2 se puede apreciar el espectro armónico de corriente de un horno de arco en corriente alterna.



**Fig. 2.2** Espectro de corriente de un horno en corriente alterna [3]

### 2.2.5 Lámparas de descarga

Dentro de esta categoría podemos encontrar a los balastos magnéticos con tubos fluorescentes y los balastos electrónicos con lámparas fluorescentes compactas (CFL) como las cargas más conocidas de este tipo. Se debe poner especial atención a algunas lámparas ahorradoras modernas, puesto que son capaces de generar armónicos de tercer orden cuyo THD individual puede llegar hasta el 100%. Por consiguiente hay que poner especial cuidado en seleccionar el conductor del neutro puesto que es por donde se transporta la suma de las corrientes armónicas de 3er orden de las tres fases. En la Fig. 2.3 se puede observar la forma de onda de la corriente que genera una lámpara CFL.



**Fig. 2.3** Forma de onda de corriente de una lámpara CFL [6]

En el caso de los balastos magnéticos la distorsión no es tan severa, la forma de onda de la corriente es ligeramente puntiaguda donde predominan armónicas de 3er orden.

### **2.2.6. Los convertidores**

Los diodos y los tiristores son convertidores estáticos generadores de corrientes armónicas. Dependiendo de la configuración del puente rectificador la forma de onda de la corriente armónica podría variar, pero en cualquier caso las componentes armónicas características serán las mismas.

Para rectificadores del tipo puente de Graetz, puente hexafásico, puente dodecafásico los armónicos presentes serán de orden 5, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25.

Se puede constatar que los armónicos de orden 5 y 7 tienen una amplitud bastante grande y pueden ser suprimidas utilizando un puente dodecafásico.

Los puentes mixtos de diodos más tiristores generan armónicos pares de orden 2 por lo que su uso se limita a pequeñas potencias.

Otros convertidores de potencias como los reguladores, cicloconvertidores, graduadores generan múltiples armónicos. Estos convertidores se están sustituyendo por convertidores que producen menor cantidad de armónicos como los PWM (Pulse Width Modulation)

## **2.3 Efectos de la Distorsión Armónica en los Sistemas Eléctricos**

Los efectos que pueden causar los armónicos en el sistema eléctricos son variados y cada efecto tiene una solución particular. Estos efectos pueden ser instantáneos sobre los equipos, tal es el caso de los dispositivos de regulación que pueden ser perturbados por las tensiones armónicas. Uno de los efectos retardados más importantes es el calentamiento del equipo, lo que puede causar su deterioro a corto plazo.

A continuación se listan una serie de efectos de los armónicos sobre los sistemas de potencia y luego se detallan los más importantes.

### **2.3.1 Efectos sobre los transformadores**

El efecto más importante de la distorsión armónica sobre los transformadores son las pérdidas adicionales en los devanados, lo que genera sobrecalentamiento, deterioro del aislamiento y por ende reducción de la vida útil del transformador. Este tema se analizará en amplitud en el Capítulo IV.

### **2.3.2 Efectos sobre otros equipos**

#### **a) Efectos sobre la Red Eléctrica**

La barra del neutro puede llegar a sobrecargarse debido a que es el punto donde se cancelan las corrientes (fundamental y armónica) llevadas por los neutros de las cargas monofásicas, siempre que las cargas sean balanceadas. Las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero (armónicas

por las tensiones armónicas. Uno de los efectos retardados más importantes es el calentamiento del equipo, lo que puede causar su deterioro a corto plazo.

A continuación se listan una serie de efectos de los armónicos sobre los sistemas de potencia y luego se detallan los más importantes.

### **2.3.1 Efectos sobre los transformadores**

El efecto más importante de la distorsión armónica sobre los transformadores son las pérdidas adicionales en los devanados, lo que genera sobrecalentamiento, deterioro del aislamiento y por ende reducción de la vida útil del transformador. Este tema se analizará en amplitud en el Capítulo IV.

### **2.3.2 Efectos sobre otros equipos**

#### **a) Efectos sobre la Red Eléctrica**

La barra del neutro puede llegar a sobrecargarse debido a que es el punto donde se cancelan las corrientes (fundamental y armónica) llevadas por los neutros de las cargas monofásicas, siempre que las cargas sean balanceadas. Las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero (armónicas triplens) por lo que, dado el caso de que estas trabajen con cargas no lineales, en el diseño se debe considerar que estas sean dimensionadas para transportar el doble de la corriente de fase.

#### **b) Efectos sobre los Bancos Capacitores**

Los capacitores son sobrecargados por las corrientes armónicas. El hecho que su reactancia disminuya con la frecuencia los hace sensibles a los armónicos. También los armónicos de voltaje pueden provocar que los bancos se dañen hasta el punto de quedar inservibles.

Los armónicos tienden a incrementar las pérdidas en el dieléctrico. El incremento de temperatura y la reducción de la vida útil son las principales consecuencias.

La distorsión armónica trae consigo un aumento de frecuencia lo cual hace que la reactancia inductiva del sistema también aumente, en contraposición la reactancia capacitiva del condensador disminuye. Estas condiciones hacen que para una frecuencia determinada se produzca resonancia, ya sea en paralelo o en serie como se ve en la Fig. 2.4.

#### **c) Efectos sobre las máquinas rotativas**

El efecto más importante de los armónicos sobre las máquinas rotativas es sin duda las pérdidas por sobrecalentamiento del núcleo y de los devanados. Las corrientes con contenido armónico generan pérdidas adicionales en el devanado tanto del rotor como

Esta interacción de campos genera oscilaciones torsionales en el eje del motor, lo cual produce vibración en las máquinas.

#### d) Efectos sobre los conductores

Si aplicáramos una corriente directa, es decir de frecuencia cero, esta se desplazaría por toda la sección del conductor, al aumentar la frecuencia de la corriente esta se hace más densa en las periferias del conductor por consiguiente el área por donde circula la corriente se reduce. Los conductores se fabrican tomando en consideración una frecuencia de 60Hz, pero la distorsión armónica introduce corrientes de frecuencia más elevada por lo que se generan mayores pérdidas por efecto Joule en los conductores.

#### f) Efectos sobre las instalaciones de telecomunicaciones

Los armónicos también pueden causar perturbaciones sobre las instalaciones de telecomunicaciones, si las líneas de señal están instaladas paralelamente a los cables de energía eléctrica con corrientes y tensiones no sinusoidales.

#### g) Efectos sobre los equipos de protección

Las señales de armónicos pueden tener valores de picos muy elevados, que provocan el salto intempestivo de las protecciones termo magnética y diferencial.

### 2.4 Límites permisibles de distorsión armónica establecidos por normas

La presencia de armónicos en las instalaciones está sujeta a diferentes normativas y reglamentos, a continuación se presenta los límites establecidos en función del voltaje y la corriente.

#### 2.4.1 Límites de distorsión de armónicos de tensión

##### a) Límites establecidos por la IEEE

Los límites permisibles de distorsión de voltaje establecidos por IEEE 519-1992 [5] están descritos en la Tabla N° 2.1

**Tabla N° 2.1** Límites de Distorsión de voltaje IEEE 519-1992 [5]

Voltaje PCC	$V_h$ (%)	$THD_v$ (%)
$V < 69kV$	3	5
$69 \leq V \leq 161kV$	1.5	2.5
$V \geq 161kV$	1	1.5

##### b) Límites establecidos por la IEC

De acuerdo a lo especificado en la norma IEC 61000-2-4, los límites de distorsión de voltaje son [4]:

- $THD_v \leq 8\%$  para Clase 2
- $THD_v \leq 10\%$  para Clase 3
- Clase 2 aplica para PCC's y IPC's en ambientes industriales en general
- Clase 3 aplica para solo para IPC's en ambientes industriales

- PCC es el punto de acople común
- IPC es el punto de acoplamiento en la planta
- $V_h$  es el voltaje del componente armónico de orden  $h$

## 2.4.2 Límites de distorsión de armónicos de corriente

### a) Límites establecidos por la IEEE

La Tabla N° 2.2 proporciona los límites de distorsión de corriente establecidos por la norma IEEE-519-1992 [5] para sistemas de distribución

**Tabla N° 2.2** Límites de distorsión de corriente IEEE 519-1992 – Distribución [5]

$I_{sc}/I_L$	$I_{sc}/I_L$ % Sistemas de Distribución (120V – 69kV)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 – 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 – 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 – 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

La Tabla N° 2.3 proporciona los límites de distorsión de corriente establecidos por la norma IEEE-519-1992 [5] para sistemas de subtransmisión.

**Tabla N° 2.3** Límites de distorsión de corriente IEEE 519-1992 – Subtransmisión [5]

$I_{sc}/I_L$	$I_{sc}/I_L$ % Sistemas de Subtransmisión (69 – 161kV)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
Los límites son la mitad de los de sistemas de distribución						

La Tabla N° 2.4 proporciona los límites de distorsión de corriente establecidos por la norma IEEE-519-1992 [5] para sistemas de transmisión.

**Tabla N° 2.4** Límites de distorsión de corriente IEEE 519-1992 – Transmisión [5]

$I_{sc}/I_L$	$I_{sc}/I_L$ % Sistemas de Transmisión (> 161kV)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
< 50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

## CAPITULO III METODOLOGIA PARA ELIMINAR LOS ARMONICOS

Dos de los métodos que existen para eliminar los componentes armónicos en los sistemas de potencia son el conexionado de los transformadores que puede llegar a eliminar componentes armónicos de orden 3, 5, 7 y 11 y la instalación de filtros.

### 3.1 Conexión de transformadores para eliminar armónicos

Las conexiones más comunes del transformador son las delta – estrella, estrella – estrella, estrella – delta y delta – delta.

#### 3.1.1 Conexión Delta – Estrella

Dado que no es muy frecuente que se presenten en las redes componentes armónicos pares, salvo algunos casos en que cargas no lineales como los hornos de arco y semiconvertidores generan este tipo de componentes, se puede asumir el caso de una red en la que solo se presenten armónicas impares. Bajo este escenario se puede considerar que los armónicos de tercer orden y los múltiplos de estas se comportan como un componente de secuencia cero, por ende están destinados a quedar atrapados por las conexiones delta en el primario o a eliminarse al no estar aterrizados los neutros de las conexiones estrella en el secundario [7]. Lo expuesto se puede apreciar en las siguientes ecuaciones.

$$i_{a_3} = I_3 \text{sen}(3\omega t) \quad (3.1)$$

$$i_{b_3} = I_3 \sin(3\omega t - 3 \cdot 120^\circ) = I_3 \sin(3\omega t - 360^\circ) = I_3 \sin(3\omega t) \quad (3.2)$$

$$i_{c_3} = I_3 \sin(3\omega t - 3 \cdot 240^\circ) = I_3 \sin(3\omega t - 720^\circ) = I_3 \sin(3\omega t) \quad (3.3)$$

Por lo tanto

$$i_{a_3} = i_{b_3} = i_{c_3} \quad (3.4)$$

#### 3.1.2 Conexión particular

De manera similar como las componentes de secuencia cero son equivalentes a los armónicos de tercer orden y sus múltiplos, las componentes de secuencia positiva y negativa guardan una equivalencia con los armónicos de 7mo y 5to orden respectivamente.

Los quintos armónicos se comportan como componentes de secuencia negativa.

$$i_{a_5} = I_5 \text{sen}(5\omega t) \quad (3.5)$$



$$i_{b_5} = I_5 \sin(5\omega t - 5 \cdot 120^\circ) = I_5 \sin(5\omega t - 600^\circ) = I_5 \sin(5\omega t + 120^\circ) \quad (3.6)$$

$$i_{c_5} = I_5 \sin(5\omega t - 5 \cdot 240^\circ) = I_5 \sin(5\omega t - 1200^\circ) = I_5 \sin(5\omega t - 120^\circ) \quad (3.7)$$

Los armónicos de orden 7 tienen un comportamiento similar a los componentes de secuencia positiva según las siguientes ecuaciones

$$i_{a_7} = I_7 \sin(7\omega t) \quad (3.8)$$

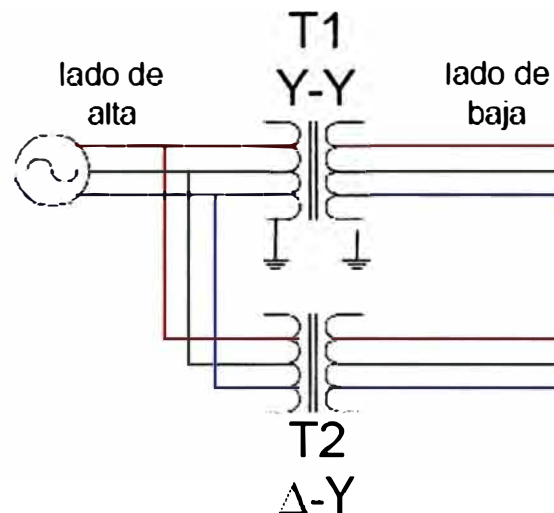
$$i_{b_7} = I_7 \sin(7\omega t - 7 \cdot 120^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 840^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 120^\circ) \quad (3.9)$$

$$i_{c_7} = I_7 \sin(7\omega t - 7 \cdot 240^\circ) = I_7 \sin(7\omega t - 1680^\circ) = I_7 \sin(7\omega t + 120^\circ) \quad (3.10)$$

Los armónicos de orden 11 y los de orden 13 obedecen al mismo análisis que los de orden 5 y 7 respectivamente, por consiguiente los armónicos de orden 11 seguirá un comportamiento similar a las componentes de secuencia negativa y los armónicos de orden 13 tendrán el mismo comportamiento de los componentes de secuencia positiva.

El análisis previo servirá para presentar de qué manera el conexionado entre dos transformadores, que se puede apreciar en la Fig. 3.1, sirve para eliminar armónicos de orden 5 y 7.

$T1$  y  $T2$  son dos transformadores cuyos primarios están en paralelo estando  $T1$  conectado en (estrella – estrella) y  $T2$  conectado en (delta – estrella). Asumiendo que solo existe distorsión de corriente y armónicos impares [7].



**Fig. 3.1** Conexión en paralelo de dos transformadores para eliminar armónicos

Al estar el transformador  $T2$  conectado en estrella en el lado del primario y no tener conexión a tierra del neutro en el lado del secundario y por lo expuesto en el punto 6.1.1, se puede tener la certeza que los armónicos de orden 3 serán eliminados.

#### a) Cancelación de los armónicos de orden 5

El transformador  $T2$  introduce un desfase de  $-30^\circ$ , por lo tanto las corrientes armónicas de orden 5 en el secundario estarán desfasadas en  $-150^\circ$  respecto al

transformador  $T1$ .

Al tener los armónicos de orden 5 el mismo comportamiento de los componentes de secuencia negativa, estos estarán desfasados  $-30^\circ$ , por consiguiente se puede calcular el desfase de las corrientes en el primario del transformador  $T2$  de la siguiente manera:

$$-150^\circ - 30^\circ = -180^\circ = 180^\circ \quad (3.11)$$

Si se da la condición de que las magnitudes de corriente en los primarios de  $T1$  y  $T2$  son iguales, como se muestra en la Fig. 3.2, entonces las corrientes armónicas de orden 5 de ambos transformadores se cancelaran.

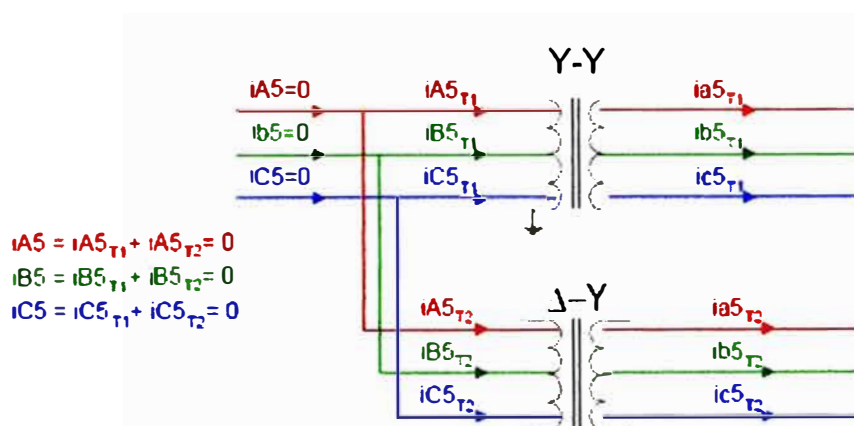


Fig. 3.2 Eliminación de los armónicos de orden 5

### b) Cancelación de los armónicos de orden 7

Las armónicas de orden 7 están desfasadas  $150^\circ$  debido al desfase de  $-30^\circ$  que introduce el transformador  $T2$  con respecto al transformador  $T1$ .

Por otro lado las armónicas de orden 7 tienen un desfase de  $30^\circ$  gracias que se comportan igual que las componentes de secuencia negativa, por consiguiente las corrientes en el primario del transformador  $T2$  están desfasadas  $180^\circ$  con respecto a las del transformador  $T1$ .

Del análisis anterior se puede concluir que si las magnitudes de las corrientes en los primarios de ambos transformadores tienen la misma magnitud, los armónicos de orden 7 se cancelan evitando de esta manera que lleguen a la fuente. En la Fig. 3.3, se observa con mayor detalle lo explicado.

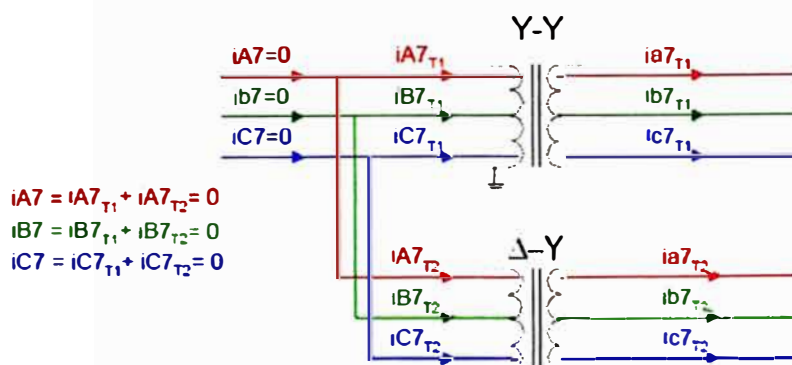
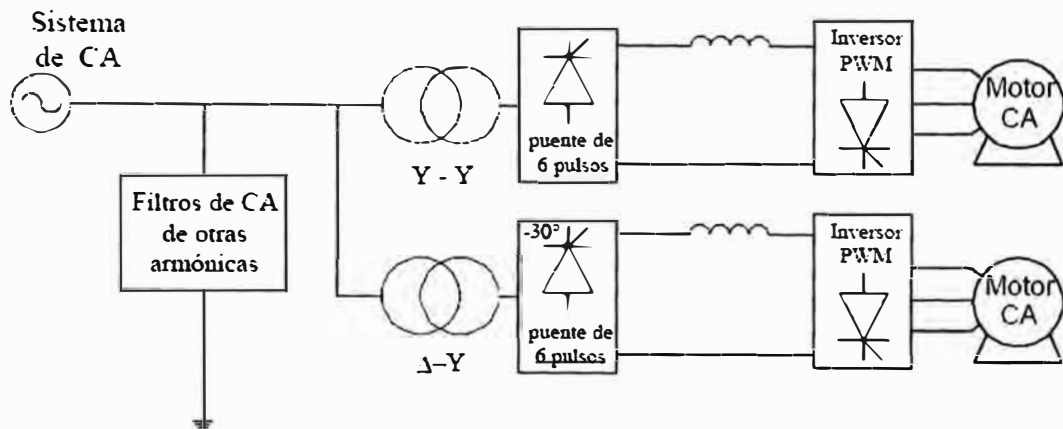


Fig. 3.3 Cancelación de armónicos de orden 7

Una aplicación práctica de lo expuesto sería lo mostrado en la Fig. 3.4 donde se tienen dos transformadores cuyos primarios están conectados en paralelo y los cuales alimentan independientemente dos cargas similares.



**Fig. 3.4** Sistema de alimentación para variadores de velocidad de AC

### 3.1.3 Transformadores con secundario en zig-zag

Estos transformadores están contruidos con dos devanados por fase, lo cual hace que tengo en total 6 devanados. Esta configuración hace posible que se desvíen los triplens del neutro hacia los conductores de fase, evitando de esta manera recargar el neutro.

### 3.2 Colocación de sistema de filtros

Cuando se tienen en la instalación equipos conformados por electrónica de potencia se debe poner atención a los huecos de tensión generados gracias a que en un tiempo muy breve dos fases de la red se encuentran en cortocircuito debido a la conmutación. Los huecos de tensión a su vez producen armónicos de tensión, los cuales pueden comprometer seriamente el material aislante del transformador. Huecos de tensión por conmutación con frecuencias de oscilación de 10kHz pueden comprometer seriamente la integridad del transformador, reduciendo su tiempo de vida considerablemente, además puede ser causante de resonancia entre los devanados del transformador cuando sus frecuencias son iguales a los de los huecos de tensión [8].

La instalación de filtros debe evaluarse en función de la eficacia de otras acciones correctivas previamente practicadas.

Existen tres alternativas que pueden aplicarse a instalaciones comprometidas con perturbaciones, y que pueden aplicarse en función a la aplicación de la fuente de armónicos.

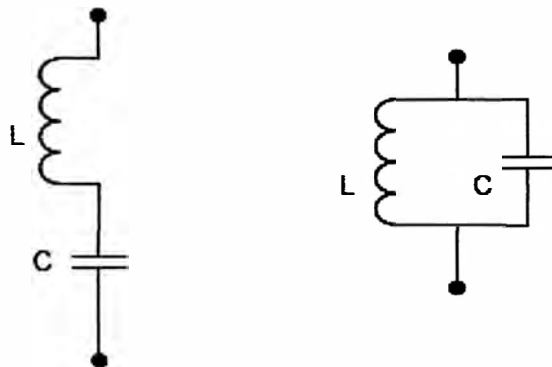
#### 3.2.1 Filtros Pasivos

Los filtros pasivos deben su nombre a que su base constructiva está hecha a base de elementos pasivos como las inductancias y las capacitancias, se pueden encontrar muchos arreglos construidos en base de estos dos elementos con propósitos diferentes como se puede apreciar en la Fig. 3.5.

Los filtros pasivos pueden tener dos propósitos diferentes, frenar la perturbación desde las cargas no lineales hacia la fuente o no permitir la circulación de distorsión desde la fuente hacia la carga.

Entre las aplicaciones de los filtros pasivos están:

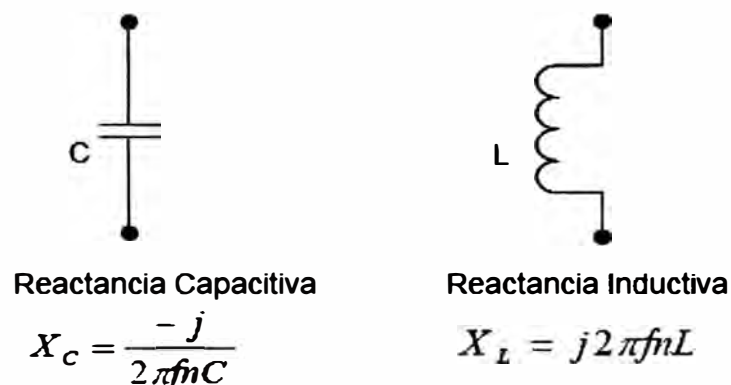
- Instalaciones industriales con una serie de generadores de armónicos que superen los 200kV de potencia total, tales como los variadores, los rectificadores y SAIS.
- Instalaciones con compensación de energía reactiva.
- Instalaciones donde se cuente con equipos sensibles y sea necesario reducir la tasa de distorsión armónica a un valor específico [3].



**Fig. 3.5** Arreglos de los filtros pasivos

En la Fig. 3.6 se muestra dos arreglos diferentes de filtros pasivos, es necesario mencionar que cada arreglo puede contener más de una rama, ya que cada rama se sintoniza para eliminar la distorsión de un armónico en particular.

Los filtros pasivos basan su funcionamiento en que su impedancia depende de la frecuencia de la señal alterna tal como se muestra en la Fig. 3.6.



**Fig. 3.6** Relación entre la reactancia y la frecuencia de la onda

Se pueden encontrar dos tipos de filtros pasivos y su aplicación dependerá de la distorsión armónica que se pretenda eliminar.

#### a) Desventajas de los filtros pasivos

La impedancia de los filtros pasivos se ven afectadas en ocasiones por la impedancia del

sistema, cambiando la frecuencia de sintonización del filtro.

La frecuencia de sintonización del filtro pasivo es fija, por lo que no podría adaptarse en cambios de comportamiento de la distorsión armónica que puede variar la frecuencia de sus componentes.

### 3.2.2 Filtros Activos

Los filtros activos usan la electrónica de potencia para sus propósitos, su uso es cada vez más extendido en instalaciones donde se requiere fiabilidad y respuesta variable ante los cambios de comportamiento de perturbaciones.

El filtro activo está compuesto por un generador de señales y un controlador electrónico que indica al generador el tipo de señal que debe emitir.

Estos filtros se pueden aplicar en instalaciones terciarias con generadores de armónicos cuya potencia no sea mayor a 220kVA.

En la Fig. 3.7 se muestra un generador de armónicos inyectando una corriente armónica  $I_{har}$  a la red, la cual es monitoreada a través del controlador electrónico el cual envía señales con las características de  $I_{har}$  al generador de señales del filtro activo para que este reinyecte una corriente armónica en fase opuesta y de igual magnitud  $I_{act}$  lo que hace que la onda resultante en la red sea completamente sinusoidal.

Al igual que los filtros pasivos, los filtros activos se subdividen en filtros activos serie y filtros activos paralelo, de acuerdo a la forma como se instalan en la red.

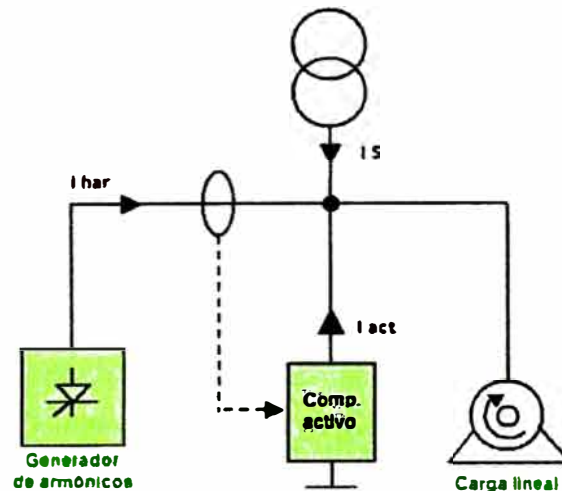


Fig. 3.7 Ejemplo de filtro activo compensando el armónico de corriente

#### a) Filtros activos serie

Se aplica en situaciones en que el voltaje de la red contiene alta distorsión.

#### b) Filtros activos paralelo

Se aplica en situaciones en que las cargas no lineales generan corrientes cuya forma de onda es distorsionada.

En realidad un filtro activo paralelo puede ser simulado como una fuente de corriente

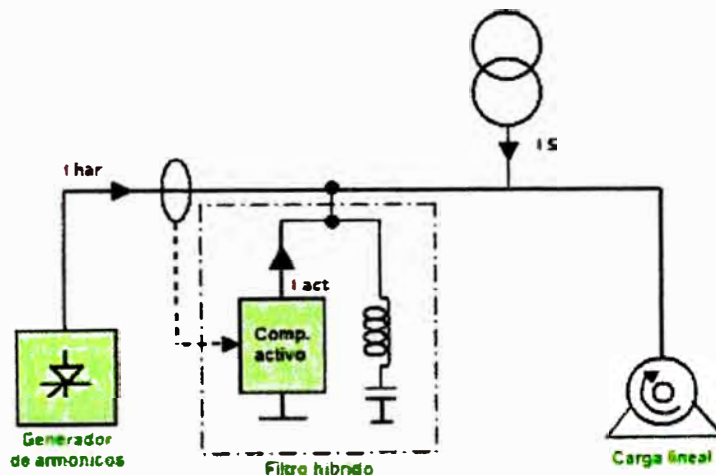
controlada que genera una corriente de compensación en paralelo con la carga.

### 3.2.3 Filtros Híbridos

Los filtros híbridos son una combinación de los filtros pasivos y los filtros activos dispuestos conjuntamente como lo ejemplifica la Fig. 3.8.

Sus aplicaciones frecuentes son:

- Instalaciones industriales que tengan cargas no lineales de electrónica de potencia mayor a 200kVA.
- Instalaciones con compensación de energía reactiva
- Regulación de la tensión
- Reducción del Flicker y microcortes de tensión
- Reducción de los armónicos de corriente
- Compensación de factor de potencia
- Reducción de la corriente por el neutro
- Estos filtros permiten cubrir un abanico más amplio de potencias y posibilidades.



**Fig. 3.8** Esquema de conexión del filtro híbrido

Al igual que los filtros pasivos y activos podemos clasificar los filtros híbridos de acuerdo a su ubicación en la red. Estos pueden estar ubicados en serie o en paralelo con la carga no lineal, deviniendo su denominación de este hecho.

## CAPÍTULO IV METODOLOGIA PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LOS ARMONICOS EN TRANSFORMADORES

En este capítulo se estudiará dos metodologías para evaluar la capacidad del transformador cuando este atiende cargas no lineales. Por un lado se estudiará la metodología que recomienda la norma IEEE C57.110-1986 [1] el cual toma en consideración la corriente eficaz, el espectro armónico de la carga y las pérdidas parásitas en los devanados. Por otro lado se estudiará la metodología desarrollada inicialmente por la norma BS 7821-4 [2], el cual propone el cálculo de un Factor K por el cual se debe dividir la corriente nominal del transformador para obtener la máxima corriente distorsionada que puede manejar este sin exceder las pérdidas nominales. Además este estándar también considera las pérdidas parásitas y a diferencia de la norma IEEE C57.110-1986 [1] añade un parámetro  $q$  que depende del tipo de devanado. Previamente se debe hacer un repaso de las pérdidas a las que esta afecto el transformador mientras esta en operación y cómo se ven afectadas estas ante la presencia de ondas distorsionadas de voltaje y corriente. Esto es importante puesto que las dos metodologías a estudiar basan su análisis sobre todo en las pérdidas por corrientes parásitas producidas en los devanados.

### 4.1 Efectos de los armónicos de tensión

De acuerdo a la Ley de Faraday el voltaje determina el nivel de flujo como sigue

$$N_1 \frac{d\phi}{dt} = u_1(t) \quad (4.1)$$

Transfiriendo esta ecuación dentro del dominio de la frecuencia se muestra la relación entre los armónicos de voltaje y los componentes del flujo

$$N_1 \cdot j(hw) \cdot \phi = U_h \quad h = 1, 3, \dots \quad (4.2)$$

Esta ecuación muestra que el flujo es proporcional al voltaje armónico e inversamente proporcional al orden el armónico. Por lo anterior, el  $THD_v$  de voltaje de muchos sistemas eléctricos está por debajo del 5% y las magnitudes de los componentes armónicos de voltaje son pequeños comparados a la componente fundamental, raramente exceden el 2 a 3%. Esto es determinado por la pequeña impedancia interna de la mayoría de equipos que son fuente de armónicos. Por lo tanto los efectos del voltaje armónico en comparación con los efectos de los armónicos de corriente son insignificantes.

## 4.2 Efectos de los armónicos de corriente

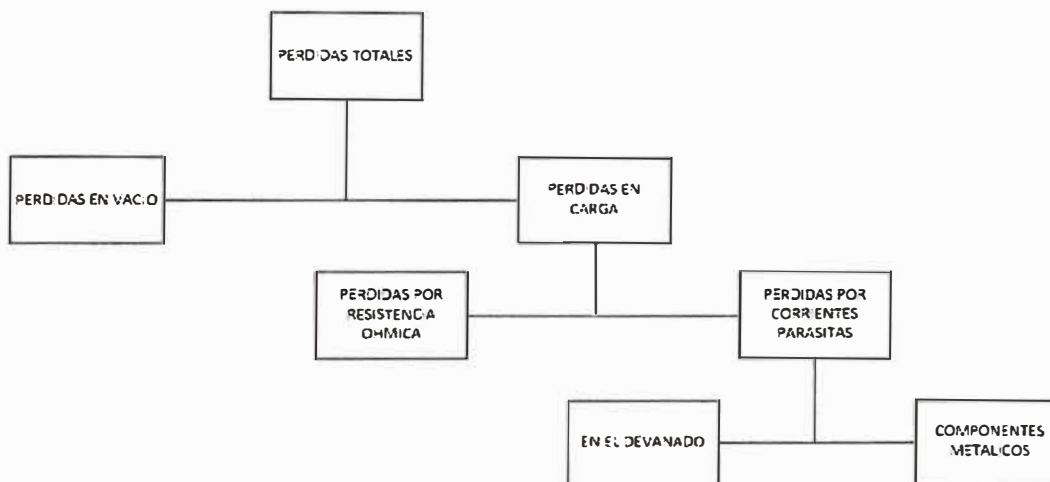
La presencia de corrientes armónicas en las redes eléctricas genera un incremento de temperatura en el transformador. Cuando la temperatura es elevada dentro de la estructura del transformador se presentan burbujas en el aceite, lo cual puede acelerar el envejecimiento del aislamiento si la temperatura supera los valores nominales.

La energía consumida por unidad de tiempo representa el daño térmico en todos los equipos. Esta energía establece el límite térmico para el cuál fue fabricado el equipo. En el caso de los transformadores de distribución este límite térmico se establece en función de las pérdidas que se presentan dentro de su estructura.

El principal efecto de los armónicos de corriente sobre el transformador es un incremento de pérdidas en los devanados y en otras partes estructurales.

### 4.2.1 Pérdidas convencionales

A pesar de que los transformadores de distribución trabajen bajo condiciones nominales, las pérdidas siempre estarán presentes. Las pérdidas totales representan la suma de las pérdidas en carga más las pérdidas en vacío como se muestra en la Fig. 4.1



**Fig. 4.1** Clasificación de las pérdidas en el transformador

Las pérdidas totales se pueden expresar como

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (4.3)$$

Donde

$P_T$  : pérdidas totales

$P_C$  : pérdidas en el núcleo

$P_{LL}$  : pérdidas en carga

Las pérdidas  $P_C$  se dan debido al voltaje de excitación del núcleo. La corriente de magnetización incluye armónicos pero la norma IEEE C57.110-1986 [1] considera despreciables sus efectos.

A su vez las pérdidas en carga se dividen en pérdidas óhmicas que se producen por el



efecto Joule en los devanados, pérdidas por corrientes Eddy en los conductores y las pérdidas adicionales que se producen en las paredes del tanque, abrazaderas, pernos, etc. Las pérdidas  $P_{DC}$  se obtienen midiendo la resistencia de los devanados en corriente continua multiplicada por el cuadrado de la corriente de carga.

$$P_{DC} = I^2 R_{DC} \quad (4.4)$$

Las pérdidas por corrientes parásitas pueden ser divididas en pérdidas en el devanado por corrientes Eddy y otras pérdidas que se producen en las paredes del tanque, abrazaderas, pernos, etc.; esto puede ser expresado como:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (4.5)$$

$P_{DC}$  son las pérdidas debidas a la corriente de carga y la resistencia dc en los devanados

$P_{EC}$  son las pérdidas por corriente Eddy en los devanados

$P_{OSL}$  son las pérdidas adicionales producidas en las paredes del tanque, abrazaderas, pernos, etc.

Las pérdidas  $P_{DC}$  se producen al circular la corriente fundamental por los conductores que forman los bobinados del transformador (Efecto Joule). Estas pérdidas están en relación proporcional al cuadrado de la corriente de carga que incluyen los armónicos de corriente, pero son independientes de la frecuencia. Estas pérdidas se determinan haciendo circular una corriente DC por los devanados para el cálculo de su resistencia, con lo cual se podrá calcular luego las pérdidas por efecto Joule.

No existe un método de ensayo que permita calcular por separado  $P_{EC}$  y  $P_{OSL}$ , lo que se hace es calcular la suma de ambas pérdidas restando de las pérdidas totales las pérdidas por efecto Joule, esto se refleja en la siguiente ecuación.

$$P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - P_{DC} \quad (4.6)$$

#### 4.2.2 Pérdidas adicionales

Las pérdidas adicionales son las que se producen en los devanados por efecto de los componentes armónicos de corriente. Para una mejor comprensión de estos efectos es conveniente considerar la densidad de pérdidas en los devanados en por unidad.

La corriente base sería la nominal, luego la corriente de carga vendría a ser:

$$I(\text{pu}) = \frac{I}{I_R}(\text{pu}) \quad (4.7)$$

El valor eficaz del componente armónico de la corriente de carga de orden  $h$  sería

$$I_h(\text{pu}) = \frac{I_h}{I_R}(\text{pu}) \quad (4.8)$$

La densidad de pérdidas base vendría a ser el  $I^2 R$  a la corriente nominal. En

consecuencia podemos reescribir la ecuación (4.5) en valores pu.

$$P_{LL} = 1 + P_{EC}(\text{pu}) + P_{OSL}(\text{pu}) \quad (4.9)$$

**a) Pérdidas adicionales en el devanado por Efecto Joule ( $P_{DC}$ )**

Si el valor rms de la corriente de carga es incrementado debido a los componentes armónicos, luego las pérdidas  $P_{DC}$  se incrementan en forma proporcional con el cuadrado de la corriente de carga.

**b) Pérdidas adicionales en el devanado por corrientes Eddy ( $P_{EC}$ )**

Se asume convencionalmente que las pérdidas por corrientes eddy generadas por el flujo electromagnético  $P_{EC}$  varían con el producto del cuadrado del valor eficaz de la corriente y el cuadrado de la frecuencia, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_{EC} = P_{EC,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (4.10)$$

donde

$P_{EC}$  pérdidas por corriente de Eddy debido a corrientes no sinusoidales

$P_{EC,R}$  pérdidas por corriente de Eddy a corriente y frecuencia nominales.

$h$  orden del armónico

$h_{\max}$  máximo orden del armónico a ser considerado

$I_h$  valor eficaz del armónico de corriente de orden  $h$

$I_R$  corriente eficaz nominal a frecuencia fundamental

La ecuación (4.10) se puede expresar en por unidad si consideramos lo expresado en la ecuación (4.8). Por lo tanto:

$$P_{EC}(\text{pu}) = P_{EC,R}(\text{pu}) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h(\text{pu})]^2 h^2(\text{pu}) \quad (4.11)$$

El incremento de corrientes de Eddy producidas por corrientes de carga no sinusoidal puede causar excesivas pérdidas en los devanados y por consiguiente incrementar la temperatura considerablemente. Por tal razón la influencia de los armónicos de corriente es más importante, no solo porque se asume que están en el orden del cuadrado del orden del armónico si no porque están presentes a lo largo de los sistemas eléctricos de potencia.

**c) Pérdidas adicionales en otras pérdidas por corrientes parasitas**

Las otras pérdidas se deben a flujo parásitos, los cuales introducen pérdidas en el núcleo, grampas de conexión, superficie del tanque y otras partes metálicas. Cuando el transformador está sujeto a cargas no lineales estas pérdidas también se incrementan.

Estas pérdidas por corrientes parásitas pueden elevar la temperatura de la parte metálica. Para transformadores sumergidos en aceite, estas pérdidas incrementan la temperatura del aceite y por consiguiente la temperatura del punto más caliente.

De la misma manera se asume que las otras pérdidas adicionales  $P_{OSL}$  son proporcionales al cuadrado del valor eficaz de la corriente y el orden del armónico elevado a la 0.8, tal como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$P_{OSL} = P_{OSL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^{0.8} \quad (4.12)$$

donde,

$P_{OSL}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en partes estructurales en presencia de corrientes no sinusoidales

$P_{OSL,R}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en partes metálicas bajo condiciones nominales de corriente y frecuencia fundamental

El exponente 0.8 en la ecuación (4.12) ha sido verificado en estudios realizados por fabricantes, y es aceptado por normas.

La expresión (4.12) se puede expresar en por unidad tomando en consideración la ecuación (4.8), entonces:

$$P_{OSL}(\text{pu}) = P_{OSL,R}(\text{pu}) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h(\text{pu})]^2 h^{0.8}(\text{pu}) \quad (4.13)$$

#### d) Valor eficaz de la corriente total

Para cargas con corrientes no sinusoidales el valor eficaz de la corriente está dado por:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2} \quad (4.14)$$

La expresión (4.14) se puede expresar en valor por unidad tomando en consideración la ecuación (4.8), luego:

$$I(\text{pu}) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(\text{pu}))^2} \quad (4.15)$$

#### e) Pérdidas para corrientes distintas a la nominal

En situaciones reales el transformador no siempre opera a corriente nominal, en la mayoría de los casos está sobrecargado y otros pocos casos está por debajo de su carga nominal.

Para analizar las pérdidas a cualquier corriente que no sea la nominal, se puede reescribir la ecuación (4.10) como sigue:

$$P_{EC} = P_{EC,O} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h^2}{I} \right) h^2 \quad (W) \quad (4.16)$$

Siendo  $I$  el valor de corriente de carga en amperios. Dado que  $I$  es una constante se puede extraer de la sumatoria, quedando la ecuación (4.16) de la siguiente manera.

$$P_{EC} = P_{EC,O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{I^2} \quad (W) \quad (4.17)$$

Reemplazando la ecuación (4.14) en (4.17)

$$P_{EC} = P_{EC,O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} \quad (W) \quad (4.18)$$

#### f) Factor armónico de pérdidas en los devanados por corrientes Eddy

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (4.19)$$

El factor armónico de pérdidas es un indicador de cuanto incrementa las pérdidas en el devanado por corrientes Eddy por efecto de los componentes armónicos de corriente.

#### g) Factor armónico de pérdidas por otros tipos de pérdidas

Este factor de pérdidas aplica para transformadores inmersos en aceite y consideran las pérdidas en la cuba del transformador, pernos, conexiones, etc.

Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia elevada a la 0.8.

$$F_{HL} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL,R}} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^{0.8} \quad (4.20)$$

### 4.3 Método para reducir la potencia de un transformador que opera bajo cargas no lineales

El impacto de las cargas no lineales en transformadores de distribución depende en gran parte de la naturaleza y del espectro armónico de la carga no lineal, el cual no es considerado por los fabricantes de transformadores. La norma IEEE C57.110-1986 [1] introduce una metodología para calcular la capacidad equivalente del transformador, cuando este opera bajo cargas que generan ondas distorsionadas. Esta es una técnica alternativa para derratear el transformador tomando en consideración las características de la carga y las pérdidas por corriente eddy.

La norma IEEE C57.110-1986 [1] propone dos métodos, el primero requiere conocer los parámetros de antemano, tales como las pérdidas en carga a condiciones nominales, las pérdidas por corrientes eddy, y la distribución de armónicos de la corriente de carga. El segundo método es aplicado en casos en que no se tiene información de los parámetros del transformador y se recurre a las pruebas de campo para determinarlos. En este informe nos ocuparemos del segundo método.

#### 4.3.1 Consideraciones generales

- a) La aplicación de esta metodología está limitada a transformadores de hasta 50MVA cuando están sujetos a corrientes no senoidales.
- b) Se asume que todas las pérdidas por corrientes parásitas son debidas a las corrientes eddy.
- c) Se asume que las pérdidas  $I^2R$  están uniformemente distribuidas en cada devanado.
- d) Se asume que la división de las pérdidas por corrientes eddy entre los devanados es como sigue:
  - 60% en el devanado interior y 40% en el devanado exterior para todos los transformadores que tengan una corriente nominal menor o igual a 1000A.
  - 60% en el devanado interior y 40% en el devanado exterior para todos los devanados que tengan una relación de transformación de 4:1 o menos.
  - 70% en el devanado interior y 30 en el devanado exterior para todos los transformadores que tengan una relación de transformación mayor 4.1 y que además tengan una corriente nominal mayor que 1000A.
- e) Se asume que la distribución de pérdidas por corrientes eddy dentro de cada devanado no es uniforme. Se asume que la máxima densidad de pérdidas por corrientes eddy se da en la región de más alta temperatura y que es un 400% del promedio de la densidad de pérdidas por corrientes eddy para ese devanado [1].

#### 4.3.2 Cálculo de la capacidad equivalente del transformador

Las pérdidas debidas a corrientes eddy en la región de más alta densidad de pérdidas en operación a frecuencia nominal, pueden ser determinadas en términos de la ecuación (4.21) con  $P_{OSL}$  (pu) igual a cero, ya que por definición, no hay otras pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.

$$P_{LL} = 1 + P_{EC}(\text{pu}) + P_{OSL}(\text{pu}) \quad (4.21)$$

La densidad de pérdidas por unidad en la región de más alta densidad de pérdidas por corrientes eddy puede ser redefinido combinando las ecuaciones (4.21), (4.10) y (4.15).

$$P_{LL}(\text{pu}) = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(\text{pu}) + P_{EC-R}(\text{pu}) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(\text{pu})^2 h^2 \quad (4.22)$$

El valor en por unidad de la corriente no senoidal que al reemplazar en la ecuación (4.22) dé el mismo valor de las pérdidas de diseño a 60Hz, en la región de más alta densidad de pérdidas está dada por la ecuación (4.23).

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2}} P_{EC-R}(\text{pu})} \quad (\text{pu}) \quad (4.23)$$

donde:

$$f_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (4.24)$$

definimos:

$$K' = \left( \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_h^2} \right) \quad (4.25)$$

reemplazando (4.25) en (4.23)

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + K' \cdot P_{EC-R}(\text{pu})}} \quad (\text{pu}) \quad (4.26)$$

### 4.3.3 Cálculo del valor de K'

Tabla N° 4.1 Ejemplo de cálculo del valor de K'

h	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	$h^2$	$(I_h/I_1)^2 \cdot h^2$
1	1.00000	1.0000000	1	1.00000
3	0.76000	0.5776000	9	5.19840
5	0.47000	0.2209000	25	5.52250
7	0.30000	0.0900000	49	4.41000
9	0.28000	0.0784000	81	6.35040
11	0.22000	0.0484000	121	5.85640
13	0.16000	0.0256000	169	4.32640
15	0.18000	0.0324000	225	7.29000
17	0.19000	0.0361000	289	10.43290
19	0.10000	0.0100000	361	3.61000
21	0.08000	0.0064000	441	2.82240
23	0.07000	0.0049000	529	2.59210
25	0.05000	0.0025000	625	1.56250
27	0.00000	0.0000000	729	0.00000
29	0.00000	0.0000000	841	0.00000
$\Sigma$		2.1332000		60.97400

El valor de  $K'$  se puede hallar de acuerdo a lo especificado en la norma IEEE C57.110-1986 [1] a través de la Tabla N° 4.1,  $I_h$  representa los valores eficaces de los componentes armónicos de la corriente de carga en la cual se muestra un ejemplo de cálculo.

Luego el valor de  $K'$  sería:

$$K' = \frac{60.974}{2.1332} = 28.5833$$

Los valores de las dos primeras columnas son datos hallados en forma teórica o mediante ensayo.

#### 4.3.4 Cálculo de las pérdidas por corrientes eddy

Los componentes de las pérdidas parásitas pueden calcularse restando las pérdidas en los devanados en dc, de las pérdidas en carga [1], las cuales pueden ser medidas y de acuerdo a lo asumido en 4.3.1 todas las pérdidas parásitas serán debidas a las corrientes eddy, por consiguiente

$$P_{EC-R} = P_{LL-R} - K(I_{1-R}^2 R_1 + I_{2-R}^2 R_2) \quad (4.27)$$

donde:

$K=1$  para transformadores monofásicos

$K=1.5$  para transformadores trifásicos [1]

El valor máximo para las pérdidas por corrientes eddy puede ser calculado a través de la siguiente ecuación:

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{2.4 P_{EC-R}}{K(I_{2-R})^2 R_2}(\text{pu}) \quad (4.28)$$

o

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{2.8 P_{EC-R}}{K(I_{2-R})^2 R_2}(\text{pu}) \quad (4.29)$$

La ecuación (4.28) es válida para transformadores con corriente de carga menor o igual a 1000A y la relación de transformación igual a 4:1 o menor. [1]

La ecuación (4.29) es válida para transformadores con corrientes de carga mayor a 1000A y la relación de transformación es mayor a 4:1. [1]

#### 4.4 Transformadores K-factor

La Underwriter Laboratories desarrollo un método para seleccionar la capacidad de los transformadores de acuerdo al perfil de cargas no lineales que tenga que manejar este. El método está descrito en la norma UL-1561. K-factor es el factor de ajuste de los armónicos de corriente de acuerdo a sus efectos en el calentamiento del transformador. Un K-1 indica una carga lineal, es decir sin componentes armónicos. [9]

Las clasificaciones del K-factor se extienden entre K-1 y K-50. Cuanto más alto es el K-factor, mayor es el calentamiento por corrientes armónicas que es capaz de controlar el transformador. Un transformador estándar que está diseñado para cargas lineales, tiene un K-1, mientras que un transformador con un K-50 está diseñado para el ambiente armónico de corriente más distorsionado posible. Los transformadores con los K-40 y K-50 son sumamente raros, muy caros y generalmente no se utilizan.

La selección correcta del K-factor es sumamente importante porque esto afecta al coste y la seguridad.

Los cálculos de contenido armónico producen un valor exacto de K-factor, pero el valor de las cargas de potencia varía constantemente, por lo que la interpretación del valor exigido es cuestionable. La construcción de nuevas instalaciones no ofrece ningún dato para ayudar en la selección de la posición del K-factor apropiado. En estos casos, datos empíricos nos permiten usar prácticas experimentadas para obtener la posición de K-factor correcta. La Tabla N° 4.2 muestra que posición de K-factor usar cuando el equipo electrónico representa un cierto porcentaje de corriente no lineal. Esta tabla está basada en prácticas experimentales.

**Tabla N° 4.2** Selección del K-factor en función del porcentaje de armónicos en la carga [9]

<b>Cargas no lineales</b>	<b>K-factor</b>
Las cargas electrónicas representan <5%	K-1
Los armónicos producidos por las cargas representan <35%	K-4
Los armónicos producidos por las cargas representan <50%	K-7
Los armónicos producidos por las cargas representan <75%	K-13
Los armónicos producidos por las cargas representan <100%	K-20

El K-factor es el factor de incremento de las pérdidas debidas a corrientes parásitas causadas por los armónicos de corriente.

El K-factor es usado por fabricantes de transformadores para ajustar la clasificación del transformador en función de los armónicos generados por las cargas no lineales que este debe alimentar.

Generalmente, solo subestaciones transformadoras en industrias especifican el K-factor para atender cargas no lineales

Un transformador clasificado y marcado como un K-Factor en concordancia con las indicaciones dadas por la Underwriters Laboratories, está habilitado para operar con cargas no lineales manteniendo su temperatura interior dentro de los límites establecidos.

De acuerdo a IEEE C57.110-1986 [1] un transformador puede ser clasificado con valores de K-Factor: K-1, K-4, K-9, K-13, K-20, K-30, K-40. Hay que acotar que teóricamente se pueden obtener otras clasificaciones que estén dentro de estos límites o incluso más altas. A continuación las características de cada clasificación K-Factor:



K-1: Esta es la clasificación para cualquier transformador convencional que ha sido diseñado para manejar solo las sobrecargas por corriente Eddy y otras pérdidas adicionales resultantes de corrientes sinusoidales a frecuencia fundamental.

K-4: Los transformadores con esta clasificación han sido diseñados para alimentar un rango de potencia sin sobrecalentamiento. Un transformador con esta clasificación está preparado para soportar una carga no lineal cuyas onda distorsionada contiene el espectro mostrado en la Tabla N° 4.3.

**Tabla N° 4.3** Espectro armónico para una clasificación K-4

Orden del componente armónico	% de la Fundamental
3	16.7
5	10
7	7.1
9	5.6
25	Pequeños porcentajes

K-9: Un transformador con esta clasificación puede manejar cargas con componentes armónicos de 163% de la clasificación K-4.

K-13: Un transformador con esta clasificación puede manejar cargas con componentes armónicos de 200% de la clasificación K-4, el espectro para esta clasificación se detalla en la Tabla N° 4.4.

**Tabla N° 4.4** Espectro armónico para una clasificación K-13

Orden del componente armónico	% de la Fundamental
3	33.3
5	20
7	14.3
9	11.1

K-20, K-30, K-40: Un transformador con estas altas clasificaciones están preparados para manejar grandes cantidades de cargas con contenido armónico sin sobrecalentamiento, el espectro para un factor K-40 es mostrado en la Tabla N° 4.5.

**Tabla N° 4.5** Espectro armónico para una clasificación K-20

Orden del componente armónico	% de la Fundamental
3	41.7
5	25
7	17.9
9	13.9

El espectro armónico para un factor K-30 es mostrado en la Tabla N° 4.6

**Tabla N° 4.6** Espectro armónico para una clasificación K-30

Orden del componente armónico	% de la Fundamental
3	50
5	30
7	21.4
9	16.7

La corriente RMS total se calcula de la siguiente manera:

$$I_{RMS_{Total}} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \quad (4.30)$$

#### 4.4.1 Alcances de la UL

Uno de los enfoques que se utiliza a la hora de calcular las pérdidas para la correcta selección del transformador es la que considera la Underwriters Laboratories conjuntamente con los fabricantes de transformadores de Estados Unidos y que consiste en calcular el factor de incremento de las pérdidas por corrientes de *Eddy* solo en los conductores y especificar un transformador que se capaz de manejar esas pérdidas. Para tal efecto la UL da a conocer algunos alcances a través de las normas Underwriters laboratory UL 1561 Dry-Type General Purpose and Power Transformers y UL 1562 Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts y las cuales se resumen a continuación:

- Los transformadores designados para su uso con cargas no lineales deberán ser marcados de la siguiente manera "Apto para cargas no sinusoidales con K-x". Los valores de x podrán ser. (x=4, 9, 13, 20, 30, 40 o 50).
- Las fórmulas para determinar las pérdidas por corriente Eddy para las pérdidas con carga son determinadas como sigue:

$$P_{LL} = P_{DC} (1 + KP_{EC}) \quad (4.31)$$

dónde:

$P_{IX}$  =Pérdidas Totales en el devanado por ley de Joule

$K$  =El K-factor de clasificación en el transformador

$P_{EC}$  =Pérdidas asumidas por corrientes Eddy

Las corrientes armónicas pueden contener componentes en corriente continua. La componente continua incrementará ligeramente las pérdidas en el núcleo del transformador, y puede incrementar la corriente de magnetización y un aumento del ruido acústico.

Los armónicos de corriente triplens son aquellas corrientes de fase que fluyen hacia el neutro del transformador y cuya frecuencia es 3, 6, 9, ... veces la frecuencia fundamental. Dado que los triplens que circulan por cada una de las fases están en fase uno con el

otro, al fluir por el neutro se comportan como si fueran corrientes de secuencia cero y alcanzan una magnitud de 3 veces la corriente RMS de fase. Por tal motivo la UL recomienda dimensionar con un factor 2 el conductor del neutro

#### 4.4.2 Cálculo del K-Factor de acuerdo a la UL

La tarea de asignar un K-Factor a cualquier carga o categoría de cargas puede apoyarse en la Tabla N° 4.7.

Para calcular el K-Factor de un sistema en particular seguir el siguiente procedimiento.

- Listar el valor de la potencia (KVA) para cada tipo de carga que es alimentada por el transformador. Luego, asignar un valor de  $I_{LK}$  que corresponda al nivel de armónicos para cada tipo de carga. Vea la Tabla N° 4.8
- Multiplicar el valor de KVA de cada carga por el valor de  $I_{LK}$  que corresponda a cada tipo de carga. Este resultado se registra como:  $KVA - I_{LK}$
- Tabular el total de cargas para todas las categorías que serán alimentadas por el transformador y los  $KVA - I_{LK}$  correspondientes.
- Sumar los resultados parciales de los  $KVA - I_{LK}$
- Dividir el resultado total de sumar los resultados parciales de  $KVA - I_{LK}$  entre el total de KVA a ser alimentados.

$$I_{LKmedia} = \frac{\sum KVA - I_{LK}}{\sum KVA} \quad (4.32)$$

- De la Tabla N° 4.7, se selecciona el K-Factor de clasificación para el cual es igual  $I_{LKmedia}$  o cercano al que figura en la tabla. Este K-factor será el requerido para alimentar el conjunto de cargas no lineales.

El K-factor calculado no podrá ser especificado en la placa de datos si es que el modelo del transformador no ha sido identificado en el programa de pruebas UL K-factor.

La clasificación K-factor no asegura que el transformador esté totalmente seguro de sufrir daños a causa de los armónicos, por ejemplo, ni el K-factor más grande puede proteger al transformador en caso de resonancia. Se tiene que dotar de protecciones adicionales al sistema.

Un transformador K-factor no asegura un adecuado nivel de desempeño bajo cargas no sinusoidales, por el contrario un transformador con una impedancia demasiado alta puede introducir distorsión al sistema. Si el núcleo del transformador se satura podría producir una severa distorsión armónica comparada de una dimensión comparada con su K-factor de clasificación.

**Tabla N° 4.7 K-Factor e  $I_{Lx}$  asignado a cada tipo de carga**

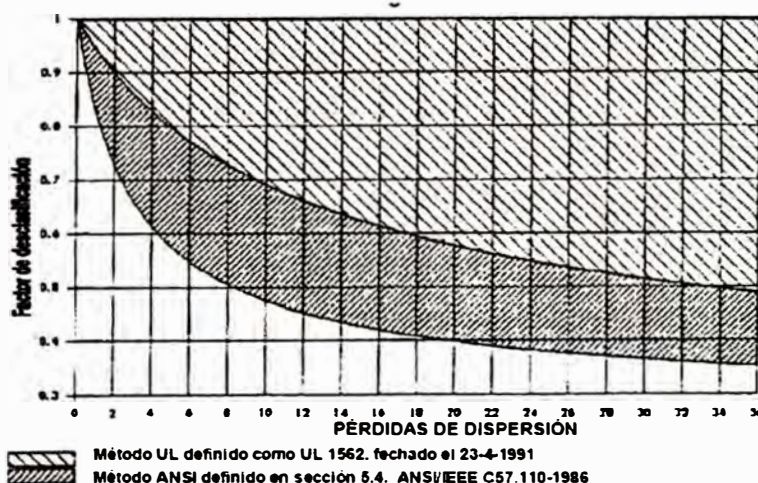
Load	K-Factor	$I_{Lx}$
Incandescent Lighting	K-1	0.00
Electric Resistance Heating	K-1	0.00
Motors (without solid state drives)	K-1	0.00
Control Transformers/Electromagnetic Control Devices	K-1	0.00
Motor-Generators (without solid state drives)	K-1	0.00
Distribution Transformers	K-1	0.00
Electric-Discharge Lighting	K-4	25.82
UPS w/Optional Input Filter	K-4	25.82
Welders	K-4	25.82
Induction Heating Equipment	K-4	25.82
PLCs and Solid State Controls	K-4	25.82
Telecommunications Equipment (e.g. PBX)	K-13	57.74
Ups without Input Filtering	K-13	57.74
Multiwire Receptacle Circuits in General Care Areas of Health Care Facilities, Classrooms of Schools, etc	K-13	57.74
Multiwire Receptacle Circuits Supplying Inspection or Testing Equipment on an Assembly or Production Line	K-13	57.74
Main-Frame Computer Loads	K-20	80.94
Solid State Motor Drives (variable speed drives)	K-20	80.94
Multiwire Receptacle Circuits in Critical Care, Operating and Recovery Room Areas in Hospitals	K-20	80.94
Multiwire Receptacle Circuits in Industrial, Medical and Educational Laboratories	K-30	123.54
Multiwire Receptacle Circuits in Commercial Office Spaces	K-30	123.54
Small Main Frames (mini and micro)	K-30	123.54
Other Loads Identified as Producing Very High Amounts of Harmonics	K-40	208.17

De acuerdo a la asunción de la Norma IEEE C57.110-1986 [1] para el cálculo del K-factor se considerará armónicos hasta de orden 25, en consideración que armónicos de orden superior no aportan significativamente en los efectos considerados en el cálculo del K-factor.

**Tabla N° 4.8 Lista de asignación de carga para cada K-factor**

K-factor	K-1	K-4	K-9	K-13	K-20	K-30	K-40
$I_{L,K}$	0.0	25.82	44.72	57.74	80.94	123.54	208.17

A continuación se presenta en la Fig. 4.2 las curvas de factor de desclasificación versus pérdidas de dispersión para las metodologías propuestas por las dos normas que se mencionan en la leyenda.

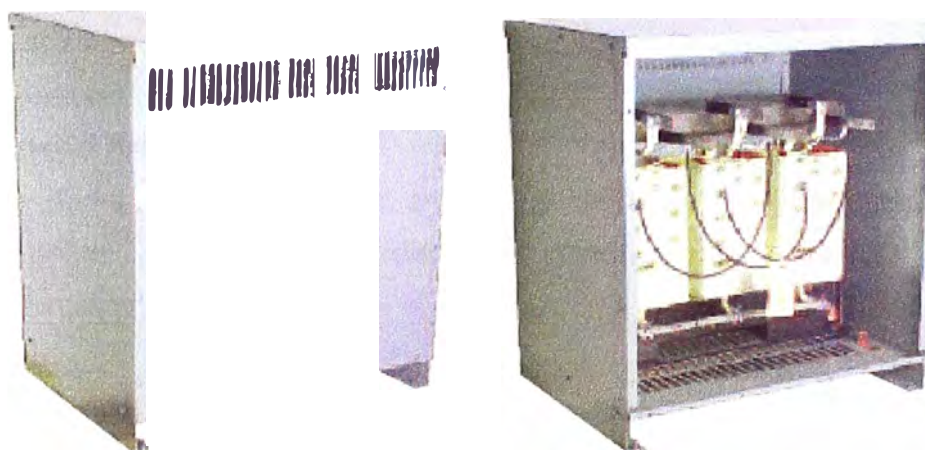


**Fig. 4.2 Factor de desclasificación de transformadores: K = 13**

#### 4.5 Consideraciones sobre el diseño de un transformador con K-factor

Los transformadores K-Factor están diseñados para mitigar los efectos de calentamiento producidos por los componentes armónicos de corriente generados por cargas no lineales. El K-factor es un indicador de la capacidad del transformador de manejar cargas con contenido armónico mientras se mantiene operando sin exceder los límites de temperatura. El proceso de diseño implica un análisis de la distribución de las pérdidas en los devanados y el cálculo de la temperatura máxima de funcionamiento. En la Fig. 4.3 se muestra el aspecto constructivo de un transformador diseñado con K-factor.

Las propiedades magnéticas y resistivas de un transformador son mejoradas cuando está diseñado expresamente para cargas no lineales. Un transformador estándar no toma estos factores en consideración y puede fallar incluso cuando se sobredimensiona para alimentar cargas no lineales.



**Fig. 4.3** Transformador diseñado con K-factor

Básicamente los transformadores K-factor presentan algunas diferencias constructivas respecto a los transformadores convencionales, estos están diseñados para las cargas no lineales que los transformadores estándar no pueden alimentar sin el riesgo de dañarse. Están fabricados con los devanados de cobre sobredimensionados, neutro de doble sección y tienen mejores características magnéticas y propiedades resistivas que un transformador estándar lo que les permite controlar el calor generado por las corrientes armónicas. La utilización de un transformador estándar no asegura el funcionamiento óptimo bajo cargas no lineales y los devanados de aluminio en los transformadores son propensos a fallos prematuros.

##### 4.5.1 Cambios estructurales de un transformador con K-factor con respecto a un transformador convencional

Los transformadores K-factor tienen una capacidad térmica adicional para tolerar los efectos de calentamiento adicional producidos por los armónicos de corriente. Un buen diseño reducirá las pérdidas en los devanados por corrientes Eddy usando conductores

paralelos u otras técnicas. El K-factor indica la cantidad de pérdidas por corrientes Eddy que son generadas por armónicos de corriente que el transformador puede disipar.

Existen áreas críticas en el transformador donde el diseño debe cambiar respecto a un transformador convencional para adaptarse a los efectos de los armónicos de corriente.

#### a) Devanados Secundarios

Las pérdidas adicionales en los devanados se ven incrementadas por efecto de las ondas no sinusoidales que contienen armónicos de corriente con frecuencias mayores que la fundamental, este incremento de pérdidas se puede reducir colocando múltiples conductores en paralelo aislados entre si y transpuestos para evitar las corrientes de circulación. En la Fig. 4.4 se muestra conductores continuamente transpuestos.

#### b) Neutro

Los armónicos de corriente triplens de los conductores de fase se suman en el conductor neutro, transportando hasta tres veces la corriente para la que fue diseñado, para compensar esta situación se dimensiona el conductor neutro dos veces el valor calculado en el diseño.

#### c) Devanado Primario

El devanado primario tiene algunos armónicos de orden inferior circulando por las conexiones delta, produciendo pérdidas y calentamiento. Esto es compensado sobredimensionando los conductores.

#### d) Núcleo

Se diseña el núcleo para una menor densidad de flujo, por lo tanto se emplea menor cantidad de material, pero de mejor calidad como el acero magnético M6. Generalmente los transformadores de distribución son fabricados con diferentes tipos de acero. El grado del acero depende fundamentalmente de la estimación de las pérdidas que va a manejar el transformador.

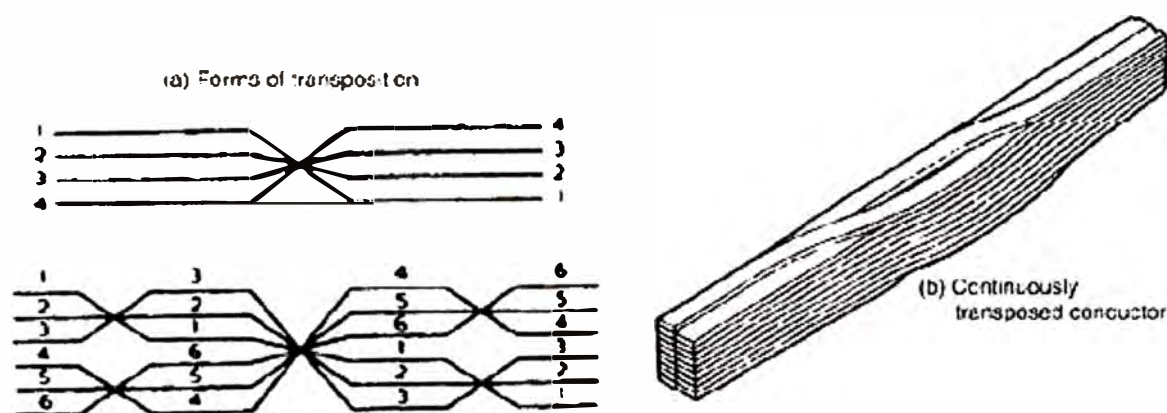


Fig. 4.4 Conductores continuamente transpuestos [10]

#### e) Blindaje Electrostático

Un blindaje electrostático no es otra cosa que una capa o malla de algún metal conductor

que permite mantener la carga estática y los campos eléctricos alejados de alguna cosa que puede ser afectada por dichas cargas

En los transformadores, existe una capacidad entre los bobinados; las señales de alta frecuencia pueden llegar al bobinado secundario.

Para el caso de transformadores el blindaje electrostático consta de una lámina de cobre colocado entre los devanados de alta y baja tensión el cual está conectado a tierra tal como se aprecia en la Fig. 4.5. La lámina provee de un camino de alta impedancia hacia tierra para las señales de alta frecuencia contenidas en la fuente de voltaje.

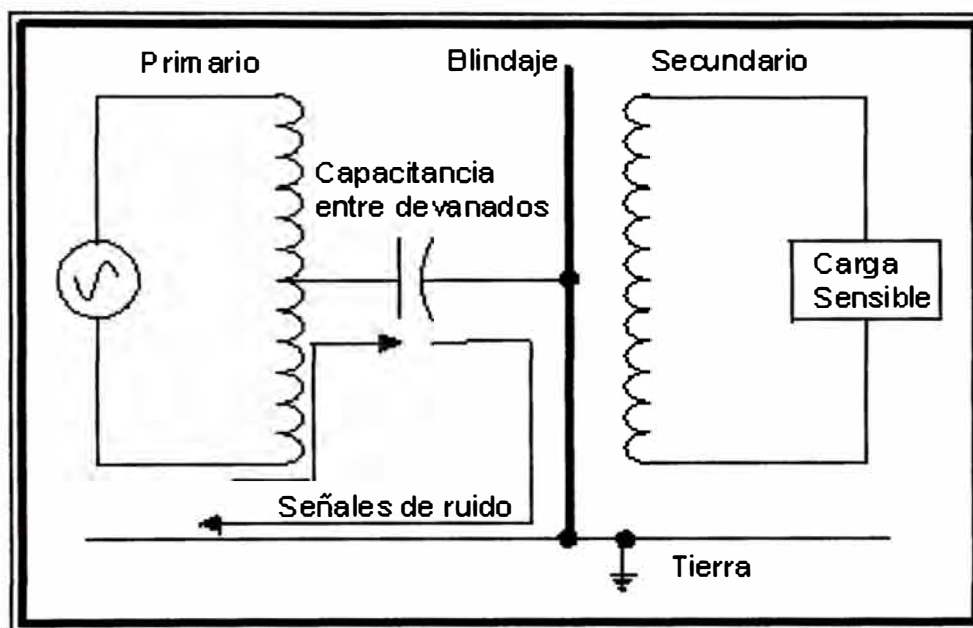


Fig. 4.5 Blindaje electrostático entre los devanados del transformador

#### 4.6 Método de desclasificación del transformador con el Factor K

Este método consiste en calcular cuánto debe desclasificarse un transformador para que las pérdidas totales debido a la corriente de carga con componentes armónicos no excedan las pérdidas a frecuencia fundamental para el cual fue diseñado. Este método fue originalmente estandarizado en Inglaterra bajo la norma BS 7821-4:1995 [2] y [6].

##### 4.6.1 Cálculo del Factor K

El Factor K es un factor por el cual se debe dividir la corriente nominal del transformador para obtener la máxima corriente distorsionada que puede manejar éste sin exceder las pérdidas máximas tolerables a corriente y frecuencia nominales, luego:

$$\text{Factor } K = \frac{I_R}{I} \quad (4.33)$$

Se define:

$$e = \frac{P_{EC} + P_{OSL}}{P_{DC}} \quad (4.34)$$

luego:

$$(P_{EC} + P_{OSL}) = eP_{DC} \quad (4.35)$$

reemplazando (4.34) en (4.35) se tiene:

$$P_{LL} = (e+1)P_{DC} \quad (4.36)$$

La ecuación (4.36) es válida bajo condiciones nominales de corriente y voltaje (sin distorsión). En caso la corriente esté distorsionada, su máximo valor eficaz debe reducirse, a fin de mantener constante este valor de  $P_{LL}$  con lo cual evitamos daños al transformador.

Para corriente de carga con componentes armónicos, la ecuación (4.36) debe reescribirse de la siguiente manera:

$$P_{LL} = (Ke+1) \left( \frac{I}{I_R} \right)^2 P_{DC} \quad (4.37)$$

igualando (4.38) y (4.39)

$$\left( \frac{I_R}{I} \right)^2 = \frac{1+Ke}{1+e} \quad (4.38)$$

reordenando la ecuación (4.38)

$$K = 1 + \frac{\sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) I_h^2}{I^2} \quad (4.39)$$

multiplicando y dividiendo por el valor eficaz de la corriente fundamental ( $I_1^2$ )

$$\left( \frac{I_R}{I} \right)^2 = \frac{1+e+e \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2}{1+e} \quad (4.40)$$

reduciendo

$$\left( \frac{I_R}{I} \right)^2 = 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (4.41)$$

El método de los organismos ingleses indica que se le debe quitar peso a los armónicos por lo que  $h^2 - 1$  se reemplaza por  $h^q$ , donde  $q$  es un factor empírico, que depende del tipo de devanado.

Aplicando el criterio mencionado e igualando las ecuaciones (4.40) y (4.41)

$$\text{Factor } K = \left( 1 + \frac{e}{e+1} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} \left( h^q \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.42)$$

donde,



$e$ : cociente de las pérdidas por corrientes parásitas divididas por las pérdidas óhmicas, ambas a la temperatura de referencia.

$h$ : orden armónico

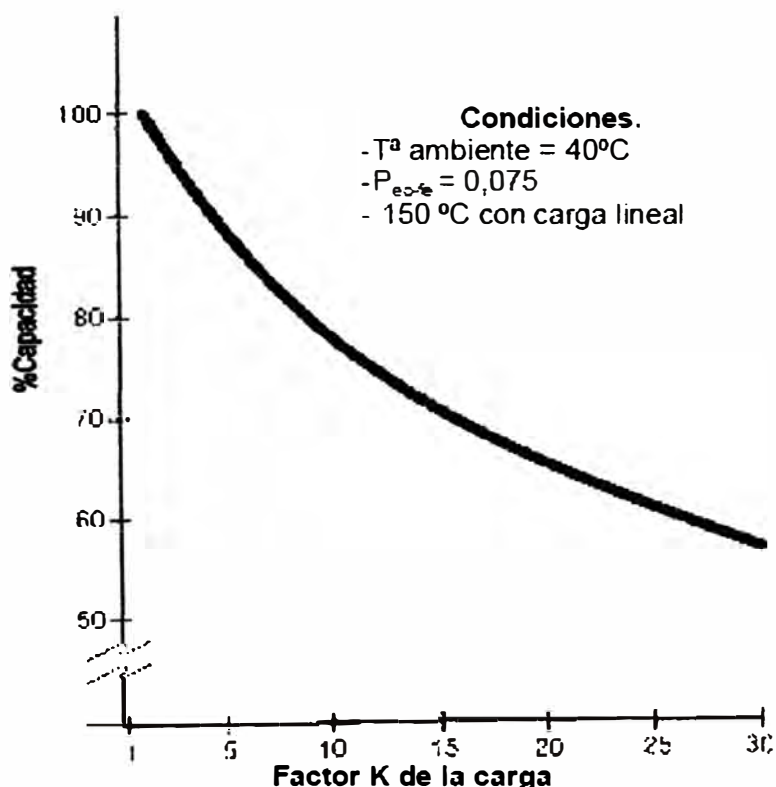
$I$ : valor eficaz de la corriente sinusoidal conteniendo todos los armónicos

$I_h$ : valor de la corriente del h-ésimo armónico

$I_1$ : valor de la corriente fundamental

$q$ : constante exponencial que depende del tipo de arrollamiento y de la frecuencia. Los valores típicos son 1,7 para transformadores con conductores de sección circular o rectangular en ambos arrollamientos y 1,5 para transformadores con arrollamientos de conductores de lámina en baja tensión.

Sea un transformador que está operando con cargas lineales, en caso se desee cargar a este con cargas no lineales un factor reductor de  $1/K$  deberá ser aplicado a su potencia nominal. La Fig. 4.6 muestra la desclasificación de la capacidad de carga de un transformador en función del Factor K de la carga.



**Fig. 4.6** Desclasificación típica de un transformador para operar con cargas no lineales

#### 4.7 Pérdida de Vida del transformador bajo cargas no lineales

Las pérdidas por causa de los armónicos se manifiestan como un incremento de calor disipado en los devanados y el efecto skin. Ambos están en función del cuadrado de la

corriente total eficaz, así como de las corrientes parásitas y pérdidas en el núcleo. Este exceso de temperatura puede tener un impacto significativo en la reducción del tiempo de vida del aislamiento del transformador.

La estimación de la reducción de vida del transformador está basada en el deterioro nominal logrado por el material aislante. Alrededor del 50% de la pérdida de vida de un transformador es causado por el stress térmico, el cual es producido por cargas no lineales.

La temperatura en el punto más caliente de los devanados se calcula como sigue:

$$\theta_{HS} = \theta_A + \Delta\theta_{HS} \quad (4.43)$$

Donde,

$\theta_A$  es la temperatura ambiente

$\theta_{HS}$  es la temperatura en el punto más caliente del devanado, en °C

$\Delta\theta_{HS}$  es el incremento de temperatura en relación con la temperatura ambiente en el punto más caliente.

El factor de envejecimiento puede ser expresado como:

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{1500}{383} - \frac{1500}{\theta_{HS} + 273}\right) \quad (4.44)$$

La reducción de la vida del transformador es:

$$\%LOL = \frac{F_{AA} \times 100}{\text{vida normal del aislamiento}} \quad (4.45)$$

La vida real del transformador es:

$$Vida(pu) = 9.8 \times 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right)} \quad (4.46)$$

$$Vida Real = Vida(pu) \times \text{vida normal del aislamiento} \quad (4.47)$$

$$Vida Real = \frac{\text{vida normal del aislamiento}}{F_{AA}} \quad (4.48)$$

## **CAPITULO V CASO DE ESTUDIO**

El objetivo del caso de estudio es hallar el valor de la potencia a la cual se reducirá un transformador para que opere con determinadas cargas no lineales sin exceder sus pérdidas nominales. Para tal efecto se desarrolló un ensayo experimental que se describe a continuación.

### **5.1 Descripción**

En primera instancia se operó el transformador con un banco de lámparas de descarga con balastro electrónico (CFL), luego se colocó un motor de inducción trifásico accionado por un variador de frecuencia y finalmente se cargó el transformador con las dos cargas anteriores más una carga lineal representado por una resistencia trifásica. Se tomaron medidas de corriente, tensión y potencia trifásica en vacío y en cortocircuito, posteriormente se tomaron mediciones de corriente efectiva, tensión efectiva, potencia efectiva y se registró el espectro armónico de corriente mientras el transformador estuvo operando con carga.

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ciencias e Ingeniería de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

### **5.2 Objetivo**

Evaluar la capacidad de carga del transformador de acuerdo a la carga no lineal instalada para lo cual se calcula el factor o porcentaje de reducción de la potencia del transformador para que este opere con una determinada carga no lineal sin exceder sus pérdidas nominales. Para el cumplimiento del objetivo se obtuvieron los siguientes datos en el ensayo.

- Resistencia del devanado primario y secundario.
- Pérdidas del transformador mediante el ensayo de cortocircuito y circuito abierto.
- Corriente de carga para cada configuración.
- Espectro armónico de la onda de corriente distorsionada para cada carga en estudio.
- Factor K registrado por el equipo de medición

### **5.3 Transformador usado en el ensayo**

Para la experiencia se usó un transformador trifásico cuyos datos de placa se muestran en la Tabla N° 5.1.

**Tabla N° 5.1** Datos de placa del transformador

Parámetro	Valor
Potencia	6,3kVA
Voltaje en el primario	380V
Voltaje en el secundario	220V
Corriente en el Primario	9.6A
Corriente en el Secundario	16.5A
Frecuencia	60Hz
Relación de transformación	1.73

#### 5.4 Equipos de laboratorio

Para la experiencia se usaron los siguientes equipos:

- Un Autotransformador Trifásico de 0 – 500V.
- Un Transformador Trifásico de 6,3kVA 380/220kV
- Un convertidor de frecuencia ABB Mod: ACS550 con las siguientes características:
  - Potencia Trifásica: 0,75 - 75 kW
  - Voltaje: 208 a 240 V, +10/-15%,
  - Frecuencia de red: 48 – 63Hz
  - Frecuencia en
  - Conexión con el
  - Motor: 0 – 500Hz
  - Factor de potencia: 0.98
- Un motor de inducción trifásico con las siguientes características:
  - Marca: ABB
  - Voltaje Nominal: 220 – 230V
  - Frecuencia: 60Hz
  - Rev/min: 3470
  - Potencia: 3HP
  - Factor de Potencia: 0.845
  - Corriente Nominal: 8.33
  - Peso: 24Kg
  - Conexión: Y
  - Año de Fabricación: 2011
- Un banco de lámparas de descarga con balastro electrónico con las siguientes características:
  - Marca: Phelix
  - Modelo: GL-42
  - Corriente: 205mA

Potencia: 26W

Voltaje: 220V

- Un banco de resistencias con las siguientes características

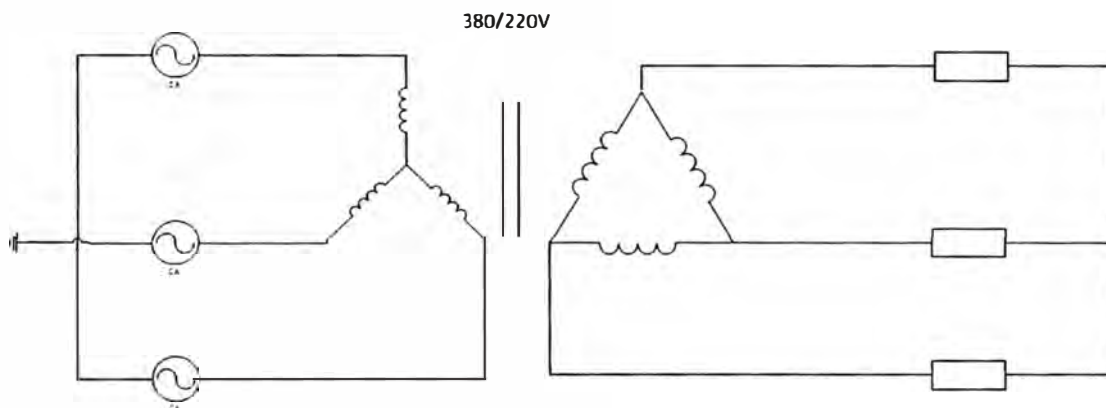
Cantidad: 03

Ohmiaje de cada resistencia:  $110\Omega$

- Un Analizador de Redes Fluke 39
- Una pinza amperimétrica.
- Un multímetro.
- Dos interruptores termomagnéticos trifásicos.
- Un vatímetro trifásico.
- Cables de conexión.

### 5.5 Esquema de conexiones general

En la Fig. 5.1 se puede observar el esquema de conexión general para todas las cargas ensayadas.



**Fig. 5.1** Esquema de conexión general para el ensayo con carga no lineal

### 5.6 Metodología de ensayo

#### 5.6.1 Medición de la Resistencia de los devanados

El objetivo de medir la resistencia de los devanados es obtener a través de  $I^2 R$ , las pérdidas óhmicas en el cobre.

Para la medición de la resistencia del devanado primario y secundario, se usó el método de caída de potencial dado que la corriente nominal del transformador es mayor a un ampere. La prueba consiste en hacer circular una corriente continua por el devanado sin que esta exceda el 15% de la corriente nominal. La resistencia se obtiene de dividir la caída de tensión en los devanados entre la corriente continua circulante. Las lecturas de corriente y voltaje se toman de los equipos según el esquema mostrado en la Fig. 5.2 y Fig. 5.3 [11].

#### 5.6.2 Determinación de las pérdidas en el núcleo

Las pérdidas en el núcleo o también llamadas pérdidas sin carga se determinan a través

del ensayo de circuito abierto. Al estar el transformador en vacío, no entrega potencia, y toda la que absorbe se gasta en pérdidas. Debido a que la corriente en el lado secundario es nula, no hay pérdidas en el cobre en ese devanado y, por otro lado debido a que la corriente en el lado primario (corriente en vacío) es mucho menor a la nominal, las pérdidas en el devanado primario son despreciables. Entonces si la tensión y la frecuencia son nominales, las pérdidas en el hierro también serán nominales.

Para determinar estas pérdidas hacemos el ensayo de vacío que consiste en aplicar al primario del transformador la tensión nominal, estando el secundario en circuito abierto. La potencia medida en vacío corresponde prácticamente a las pérdidas en el hierro [12].

### 5.6.3 Determinación de las pérdidas en carga

Las pérdidas en carga  $P_{LL}$  se determinan a través del ensayo de cortocircuito. Para este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente nominal del transformador por el devanado secundario. En estas condiciones se miden la potencia que representará las pérdidas en carga.

La tensión aplicada necesaria en esta prueba representa de 3 a 10% de la nominal, por lo que el flujo en el núcleo es pequeño, siendo en consecuencia despreciables las pérdidas en el hierro. La potencia absorbida en cortocircuito representa las pérdidas en el cobre. Siendo la corriente la nominal, en consecuencia las pérdidas también serán las nominales [12]

### 5.6.4 Ensayo con cargas no lineales

Para el ensayo con cargas no lineales se sigue el siguiente procedimiento.

- a) Se conecta el banco de lámparas de descarga en arreglo trifásico conectado en delta tal como se muestra en la Fig. 5.6.
- b) Con la pinza amperimétrica se comprueba que la corriente en todas las fases sean iguales, es decir que las cargas estén balanceadas.
- c) Con el analizador de redes se mide la tensión de carga eficaz en cualquiera de las fases y se registra el espectro armónico de tensión.
- d) Con el analizador de redes se mide la corriente eficaz de carga en cualquiera de las fases y se registra el espectro armónico de corriente.
- e) Se registra el Factor K que mide el analizador de redes.
- f) Se conecta el motor de inducción trifásico según el esquema mostrado en la Fig. 5.9 y se repiten los pasos a, b, c, d y e.
- g) Se conectan las tres cargas trifásicas en paralelo según el esquema mostrado en la Fig. 5.12 y se repiten los pasos a, b, c, d y e.

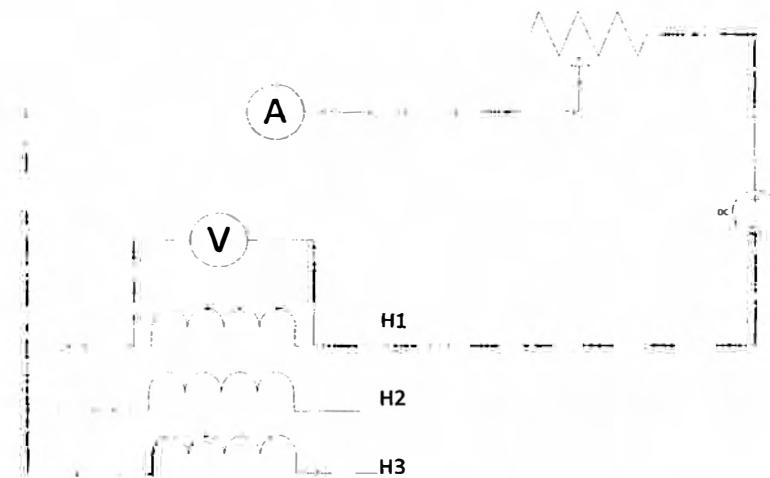
## 5.7 Desarrollo del ensayo y valores obtenidos

### 5.7.1 Condiciones del Ensayo

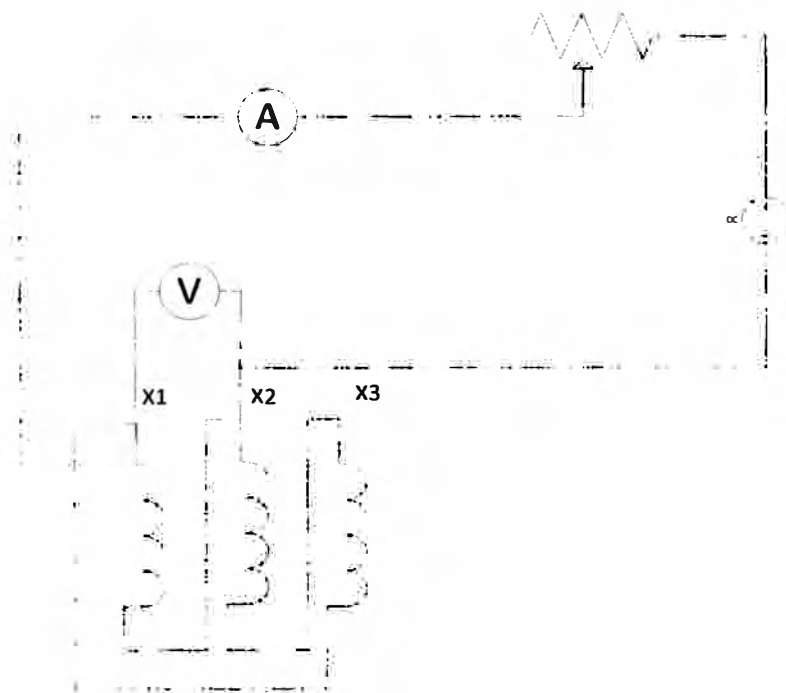
- Temperatura ambiente promedio: 19.2 °C
- Humedad Relativa: 89%
- Duración del ensayo: 5h

### 5.7.2 Resistencia de devanados

Para la obtención de la resistencia de devanados se usó la metodología de la caída de potencial. El esquema usado para la medición del devanado primario se muestra en la Fig. 5.2. El diagrama de conexión se repitió para las tres fases.



**Fig. 5.2** Diagrama de conexión para la medición de la resistencia del devanado primario  
El esquema usado para la medición del devanado secundario se muestra en la Fig. 5.3.



**Fig. 5.3** Diagrama de conexión para la medición de la resistencia del devanado secundario

Los valores de resistencia se pueden observar en la Tabla N° 5.2.

**Tabla N° 5.2** Valores de resistencia de los devanados

Resistencias Medidas ( $\Omega$ ) a 21.7° C	
$R_1$	0.3524
$R_2$	0.1186

### 5.7.3 Pérdidas en el núcleo

Las pérdidas en el núcleo se determinaron mediante la prueba de circuito abierto, en la Fig. 5.4 se muestra el esquema armado para tal efecto.

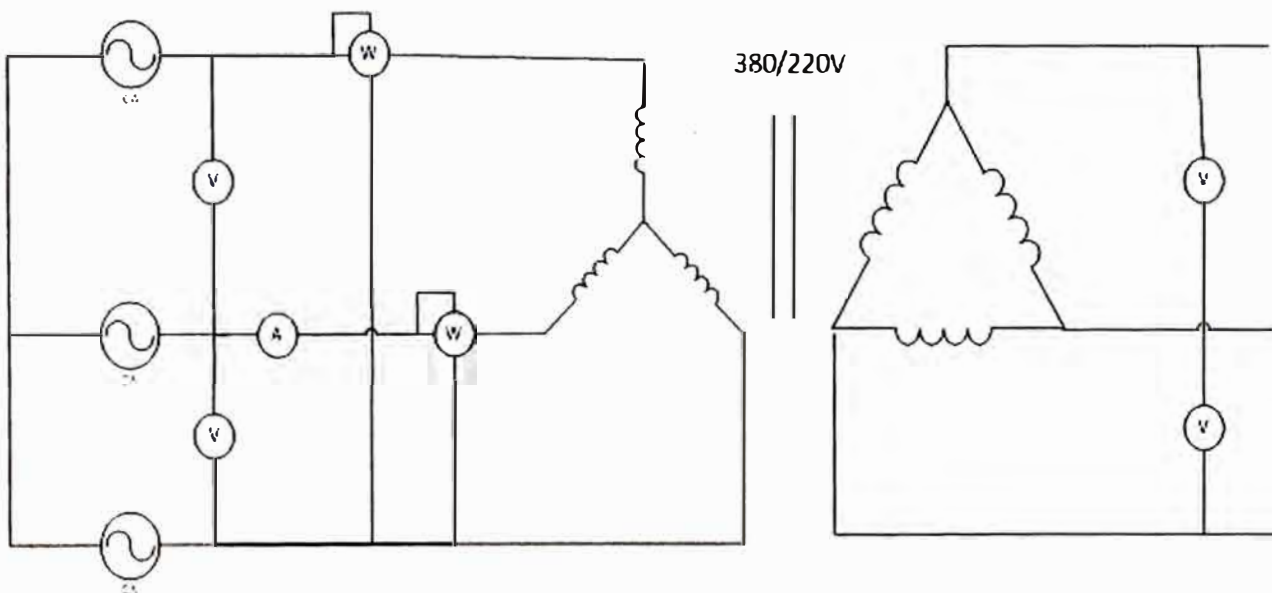
Los valores obtenidos son:

- Voltaje aplicado:  
 $V = 380V$
- Corriente de Línea:  
 $I_0 = 0.29A$
- Potencia Trifásica:  
 $P_0 = 59W$

La potencia trifásica represente las pérdidas en vacío y este a su vez es igual a las pérdidas en el núcleo.

Por lo tanto:

$$P_c = P_0 = 59W \quad (5.1)$$

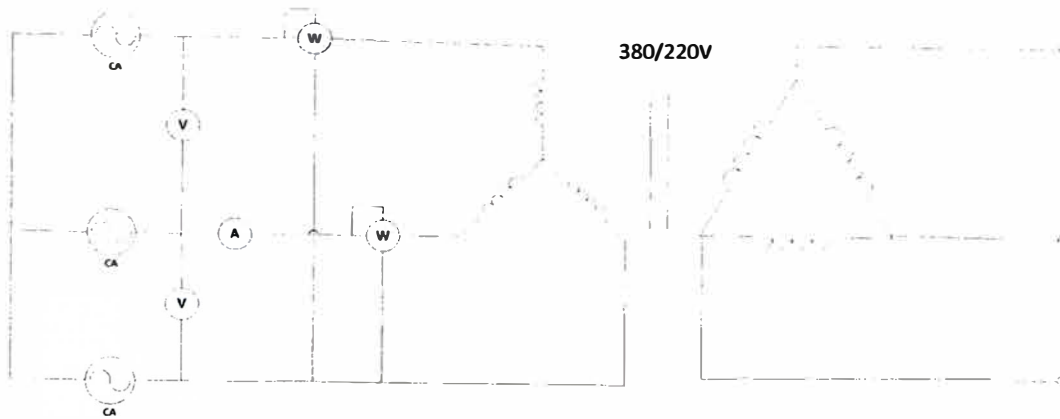


**Fig. 5.4** Esquema de conexión para la prueba de circuito abierto

### 5.7.4 Pérdidas en carga

Las pérdidas en los devanados o pérdidas en carga se determinaron mediante la prueba de corto circuito, en la Fig. 5.5 se puede apreciar el esquema armado para tal efecto.





**Fig. 5.5** Esquema de conexión para la prueba de corto circuito

Los valores obtenidos son:

- Voltaje aplicado:

$$V_{cc} = 10.8V$$

- Corriente de Línea:

$$I_1 = 9.59A$$

$$I_2 = 16.53A$$

- Potencia Trifásica:

$$P_{cc} = 144W$$

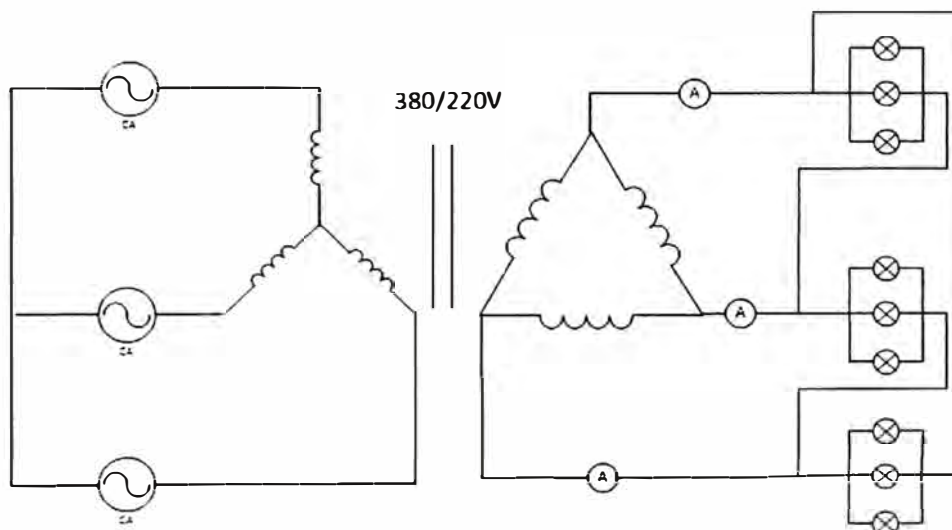
Por lo tanto el valor de las pérdidas en carga es:

$$P_{LL} = P_{cc} = 144W \quad (5.2)$$

### 5.7.5 Medición de parámetros con cargas no lineales

#### a. Caso 1: Lámparas de descarga con balastro electrónico

Se colocaron como carga no lineal, 9 lámparas en arreglo delta, tal como se aprecia en la Fig. 5.6.



**Fig. 5.6** Esquema de conexión para el caso 1

Los valores obtenidos con esta carga son:

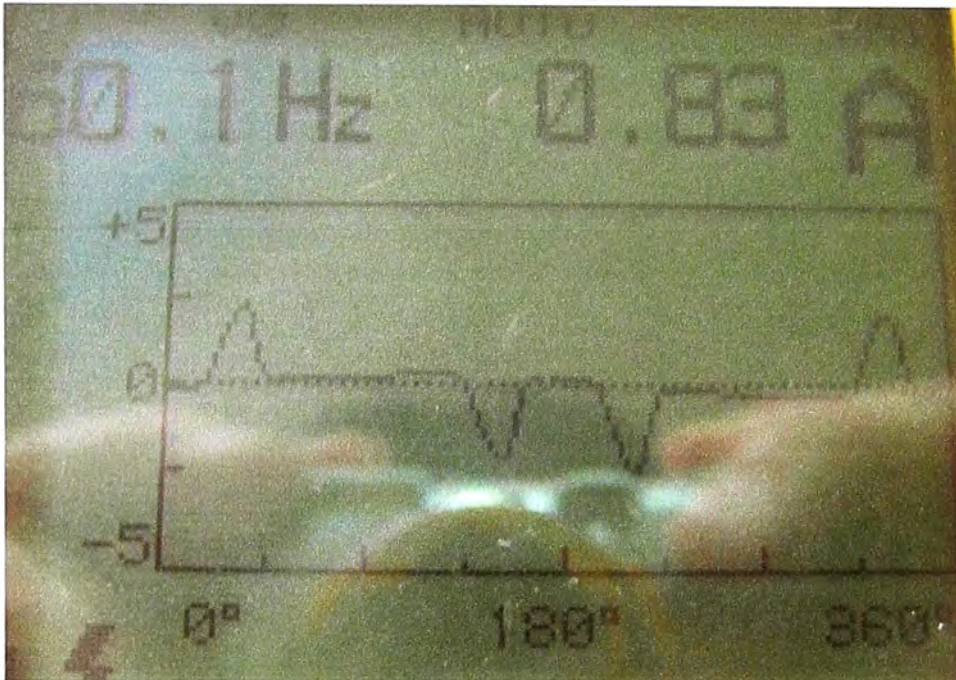
- Voltaje Eficaz Total

$$V_{RMS} = 218V \quad (5.3)$$

- Corriente de carga eficaz total:

$$I_{RMS} = 0.83A \quad (5.4)$$

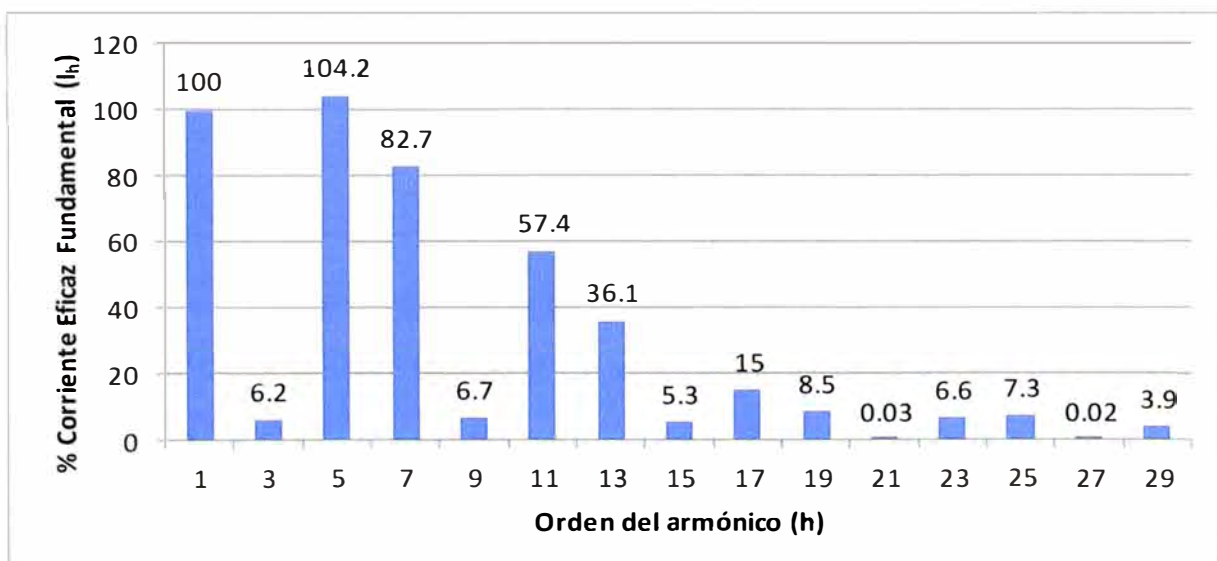
En la Fig. 5.7 se puede apreciar la forma de onda para la corriente de carga



**Fig. 5.7** Forma de onda de la corriente de carga para el caso 1

Espectro armónico de la corriente de carga:

En la Fig. 5.8 se aprecia el espectro armónico de la corriente de carga. Los valores están expresados en porcentaje de la corriente fundamental.



**Fig. 5.8** Espectro armónico de la corriente de carga para el caso 1

En la Tabla N° 5.3 se resumen los valores eficaces de los componentes armónicos de la corriente de carga.

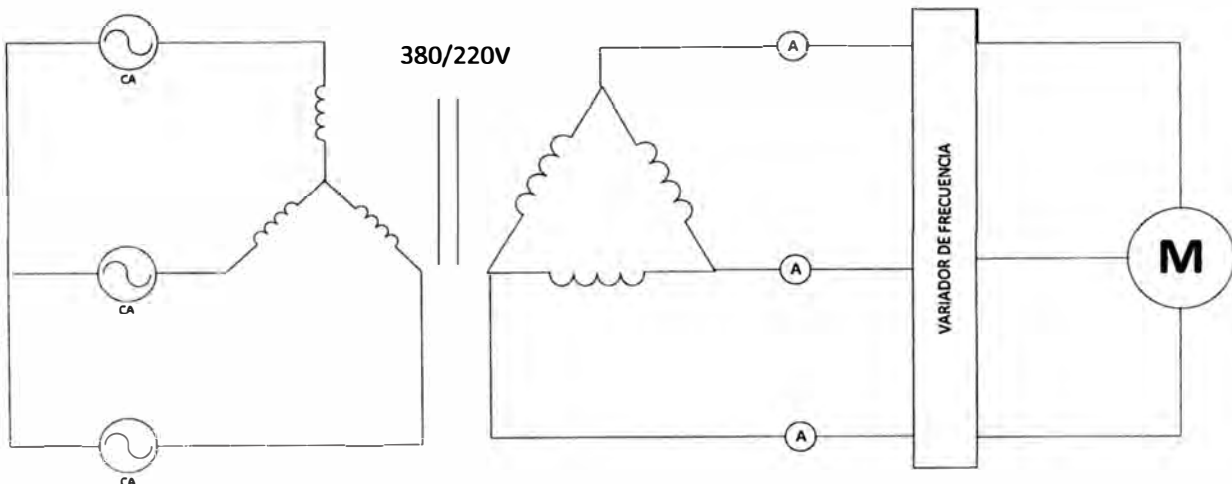
**Tabla N° 5.3** Valores eficaces de los componentes armónicos para el caso 1

h	$I_h$
1	100
3	6.2
5	104.2
7	82.7
9	6.7
11	57.4
13	36.1
15	5.3
17	15
19	8.5
21	0.3
23	6.6
25	7.3
27	0.2
29	3.9

El equipo no registro el valor del Factor K para esta carga.

**b. Caso 2: Motor de inducción trifásico con variador de frecuencia**

Se colocó como carga no lineal un motor de inducción trifásico con un variador de frecuencia, la conexión se aprecia en la Fig. 5.9.



**Fig. 5.9** Esquema de conexión para el caso 2

Los valores obtenidos con esta carga son:

- Voltaje eficaz total:

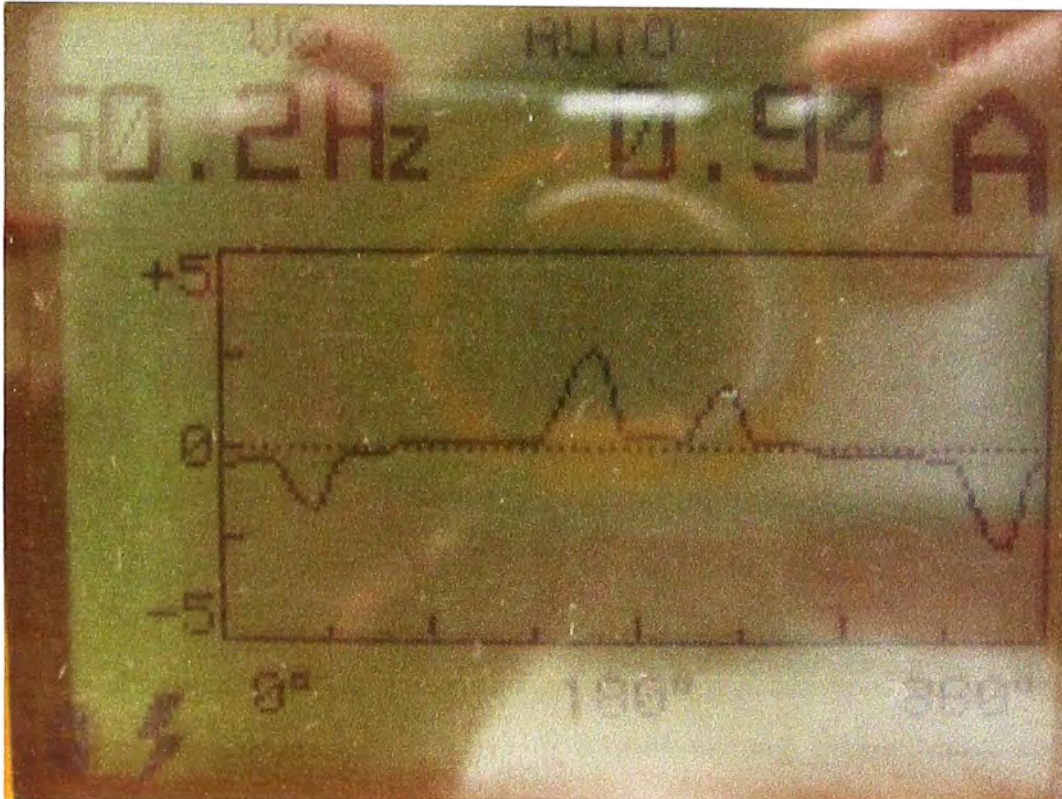
$$V_{RMS} = 213V \quad (5.5)$$

- Corriente de carga eficaz total

$$I_{RMS} = 0.94A \quad (5.6)$$

- Frecuencia del variador = 50Hz

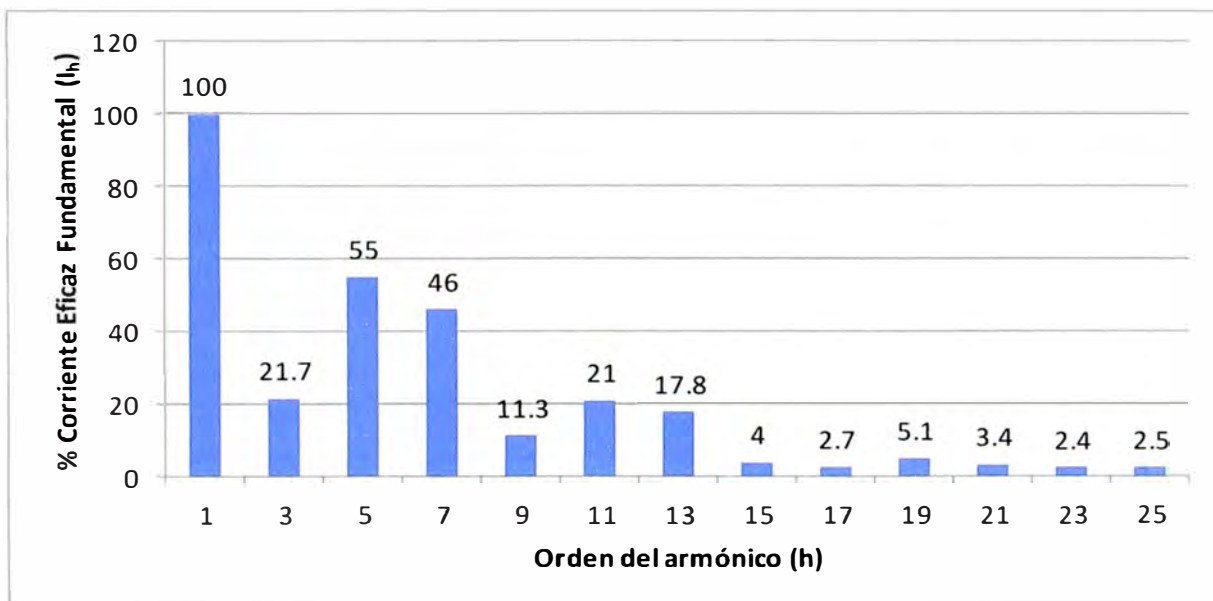
A continuación se muestra en la Fig. 5.10 la forma de onda de la corriente de carga.



**Fig. 5.10** Forma de onda de la corriente de carga para el caso 2

Espectro armónico de carga

En la Fig. 5.11 se aprecia el espectro armónico de la corriente de carga. Los valores están expresados en porcentaje de la corriente fundamental.



**Fig. 5.11** Espectro armónico de la corriente de carga para el caso 2

En la Tabla N° 5.4 se resumen los valores eficaces de los componentes armónicos de la corriente de carga.

**Tabla N° 5.4** Valores eficaces de los componentes armónicos para el caso 2

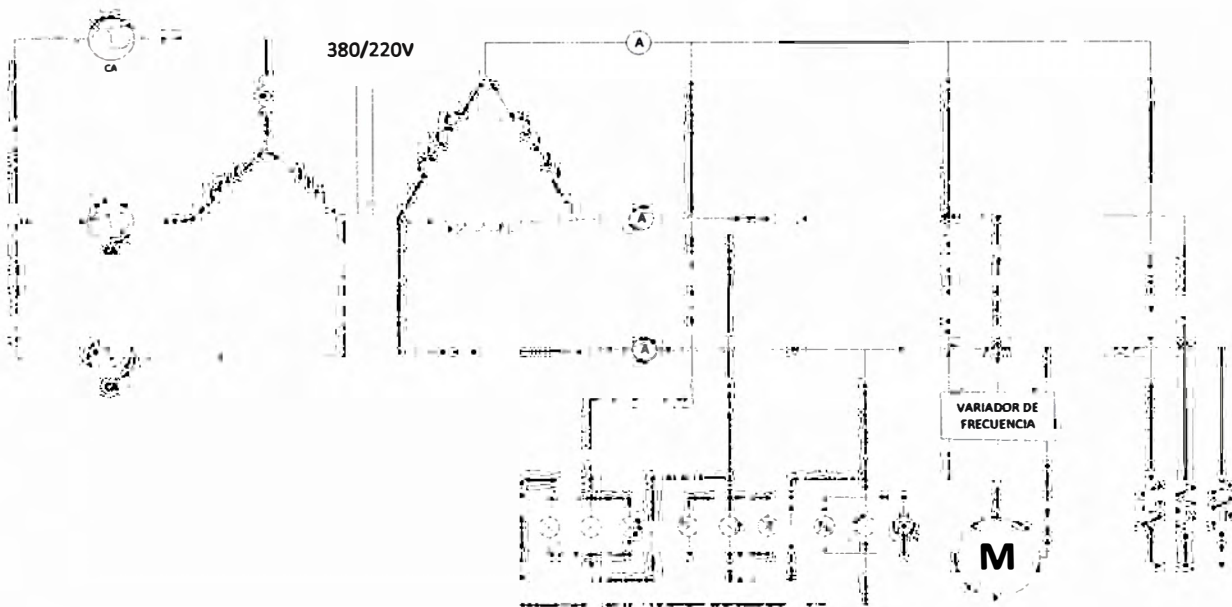
h	$I_h(A)$
1	0.73
3	0.16
5	0.4
7	0.33
9	0.08
11	0.15
13	0.13
15	0.03
17	0.02
19	0.04
21	0.02
23	0.02
25	0.02

Valor del Factor K medido por el equipo

$$\text{Factor } K = 20 \quad (5.7)$$

**c. Caso 3: Carga Mixta**

Para este caso se implementó el circuito con una carga variada. Se conectó al secundario del transformador tres cargas, el banco de lámparas ahorradoras, el motor de inducción trifásico con el variador de frecuencia y una resistencia trifásica lineal. El esquema de conexión se puede ver en la Fig. 5.12.



**Fig. 5.12** Esquema de conexión para el caso 3

Los valores obtenidos con esta carga son:

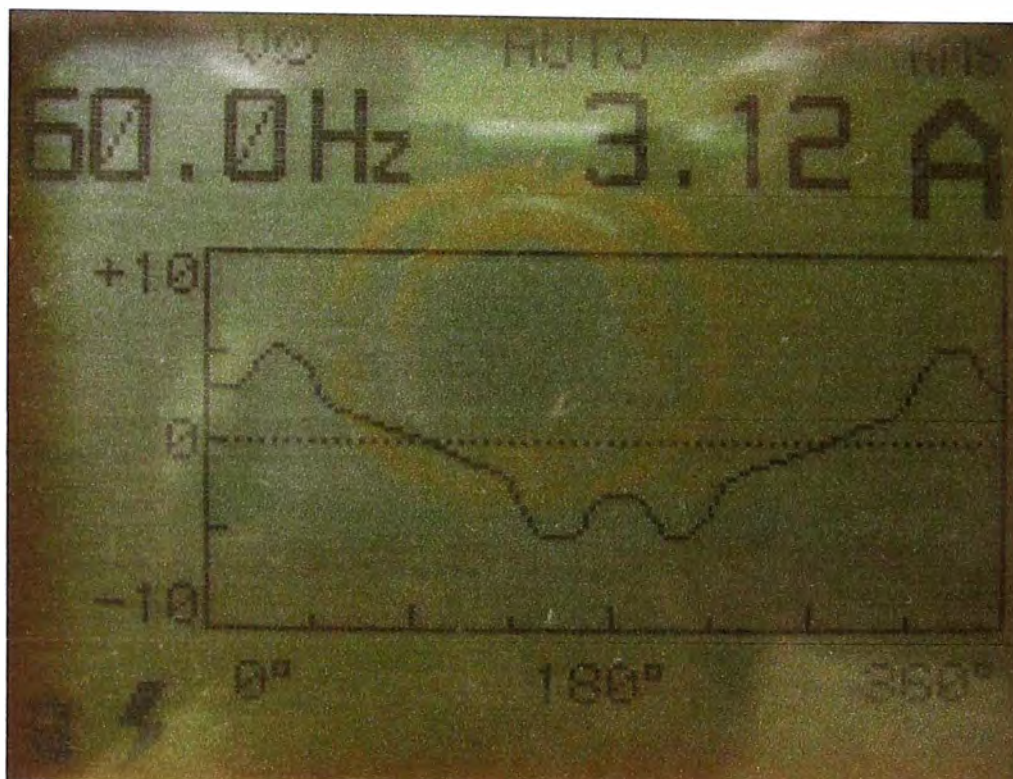
Voltaje eficaz total:

$$V_{RMS} = 214V \quad (5.8)$$

Corriente de carga eficaz total:

$$I_{RMS} = 3.12 A \quad (5.9)$$

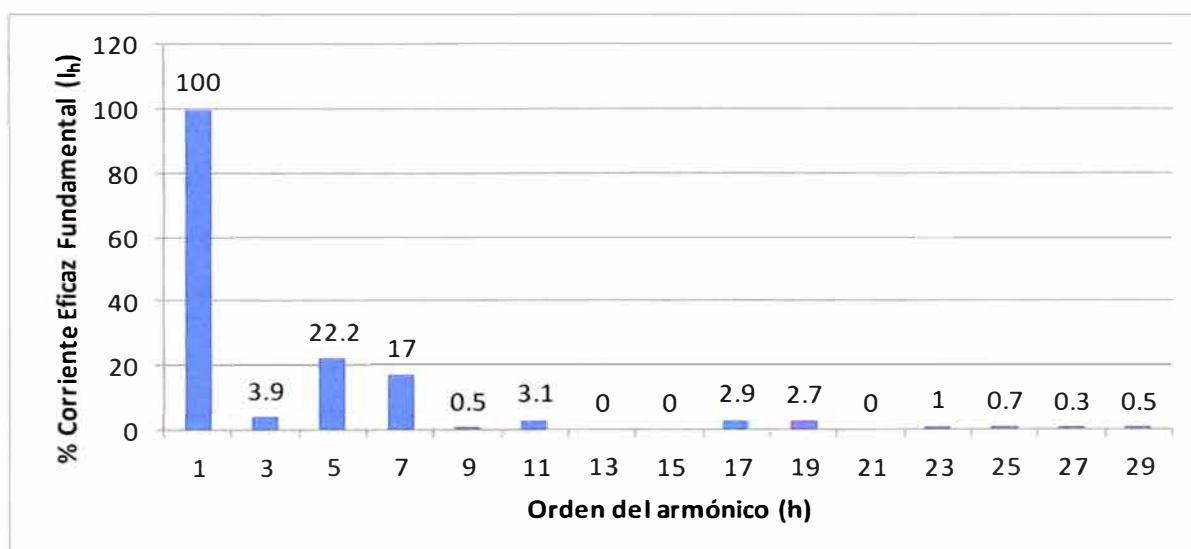
A continuación se muestra en la Fig. 5.13 la forma de onda de la corriente de carga.



**Fig. 5.13** Forma de onda de la corriente de carga para el caso 3

Espectro armónico de carga

En la Fig. 5.14 se aprecia el espectro armónico de la corriente de carga. Los valores están expresados en porcentaje de la corriente fundamental.



**Fig. 5.14** Espectro armónico de la corriente de carga para el caso 3

En la Tabla N° 5.5 se resumen los valores eficaces de los componentes armónicos de la corriente de carga.

**Tabla N° 5.5** Valores eficaces de los componentes armónicos para el caso 3

<b>h</b>	<b>I<sub>h</sub>(A)</b>
1	2.99
3	0.12
5	0.66
7	0.51
9	0.02
11	0.09
13	0
15	0
17	0.09
19	0.08
21	0
23	0.03
25	0.02
27	0.01
29	0.01

Factor K medido por el equipo

$$\text{Factor } K = 4.2 \quad (5.10)$$

## 5.8 Evaluación de la capacidad de carga del transformador de acuerdo a la carga no lineal instalada

### 5.8.1 Cálculo según la metodología de la norma C.57.110-1986 [1]

A continuación se hará el cálculo de derrateo del transformador usando la metodología descrita en la norma IEEE C57.110-1986 [1]. Se hará este cálculo para las tres configuraciones realizadas en el ensayo.

#### a. Caso 1: Lámparas CFL

Se procede según la metodología estudiada en el apartado 4.3

Las pérdidas por corrientes Eddy se calcula con la ecuación (4.27)

$$P_{EC-R} = 144 - 1.5(9.59^2 \times 0.3524 + 16.53^2 \times 0.1186) = 46.77 \text{ W}$$

El valor máximo de las pérdidas por corrientes Eddy para el transformador usado en el ensayo se calcula con la ecuación (4.28)

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{2.4 \times 46.77}{1.5 \times (16.53)^2 (0.1186)} (\text{pu}) = 2.309014(\text{pu})$$

Cálculo del valor de K'

Se calcula de acuerdo a lo descrito en el apartado (4.3.3), los resultados se muestran en la Tabla N° 5.6

Tabla N° 5.6 Cálculo del valor de K' para el caso 1

h	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	$h^2$	$(I_h/I_1)^2 \times h^2$
1	1.00000	1.0000000	1	1.00000
3	0.06522	0.0042533	9	0.03828
5	1.04348	1.0888469	25	27.22117
7	0.82609	0.6824197	49	33.43856
9	0.06522	0.0042533	81	0.34452
11	0.56522	0.3194707	121	38.65595
13	0.34783	0.1209830	169	20.44612
15	0.04348	0.0018904	225	0.42533
17	0.15217	0.0231569	289	6.69234
19	0.08696	0.0075614	361	2.72968
21	0.00000	0.0000000	441	0.00000
23	0.06522	0.0042533	529	2.25000
25	0.06522	0.0042533	625	2.65832
27	0.00000	0.0000000	729	0.00000
29	0.04348	0.0018904	841	1.58979
$\Sigma$		3.2632325		137.49008

De los sub totales:

$$K' = \frac{137.49008}{3.2632325} = 42.13$$

Finalmente calculamos la máxima corriente de carga con contenido armónico que puede manejar el transformador sin exceder su temperatura límite de funcionamiento con la ecuación (4.26)

$$I_{\max} (\text{pu}) = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}(\text{pu})}{1 + K' \cdot P_{EC-R}(\text{pu})}} = \sqrt{\frac{1 + 2.309014}{1 + 42.13 \times 2.309014}}$$

Por lo tanto:

$$I_{\max} (\text{pu}) = 0.183486 (\text{pu})$$

La corriente máxima en amperios:

$$I_{\max} = 0.1835 \times 16.53 = 3.03 \text{A}$$

La potencia recomendada

$$S = 0.1835 \times 6.3 \text{KVA}$$

$$S = 1.2 \text{KVA}$$

El porcentaje de derrateo

$$\% \text{Derrateo} = 18.34\%$$

#### b. Caso 2: Motor con variador de frecuencia

Bajo el mismo procedimiento de cálculo se hallaron los siguientes resultados:

El valor de K'

$$K' = 20.21$$



La corriente de carga máxima:

$$I_{\max} (\text{pu}) = 0.2635 (\text{pu})$$

$$I_{\max} = 4.36 A$$

La potencia recomendada

$$S = 1.7 \text{KVA}$$

El porcentaje de derrateo

$$\% \text{derrateo} = 26.35\%$$

### c. Caso 3: Carga Mixta

Valor de K'

$$K' = 4.0571$$

La corriente de carga máxima:

$$I_{\max} (\text{pu}) = 0.5649 (\text{pu})$$

$$I_{\max} = 9.34 A$$

La potencia recomendada

$$S = 3.6 \text{KVA}$$

El porcentaje de derrateo

$$\% \text{derrateo} = 56.49\%$$

## 5.8.2 Cálculo según la metodología de desclasificación del Factor K

A continuación se hará el cálculo de derrateo del transformador usando la metodología del Factor K, el cuál esta descrito en la norma BS 7821 Part 4 [2]. Se hará este cálculo para las tres configuraciones realizadas en el ensayo.

### a. Caso 1: Lámparas CFL

El cálculo se hace a través de la Tabla N° 5.7

Factor K:

$$K = 2.8332$$

Cálculo de la corriente máxima:

$$I_{\max} = \frac{I_R}{K} = \frac{16.53}{2.8332}$$

Por lo tanto:

$$I_{\max} = 5.83 A$$

Potencia Recomendada

$$S = 2.2 \text{KVA}$$

Porcentaje de derrateo

$$\% \text{derrateo} = 35.30\%$$

Tabla N° 5.7 Cálculo del Factor K para el caso 1

Armónico No	$I_h$ (RMS)	$(I_h/I_1)$	$(I_h/I)^2$	$h^q$	$(I_h/I)^2 \times h^q$
1	1	1	1		
3	0.065217	0.0652	0.0043	6.4730	0.0275
5	1.043478	1.0435	1.0888	15.4258	16.7964
7	0.826087	0.8261	0.6824	27.3317	18.6517
9	0.065217	0.0652	0.0043	41.8998	0.1782
11	0.565217	0.5652	0.3195	58.9342	18.8278
13	0.347826	0.3478	0.1210	78.2895	9.4717
15	0.043478	0.0435	0.0019	99.8516	0.1888
17	0.152174	0.1522	0.0232	123.5274	2.8605
19	0.086957	0.0870	0.0076	149.2386	1.1285
21	0	0.0000	0.0000	176.9183	0.0000
23	0.065217	0.0652	0.0043	206.5082	0.8783
25	0.065217	0.0652	0.0043	237.9567	1.0121
27	0	0.0000	0.0000	271.2179	0.0000
29	0.043478	0.0435	0.0019	306.2504	0.5789
$\Sigma_1 =$			3.26323	$\Sigma =$	70.60037
$I$ (RMS) =			1.80644	$\Sigma \times (I_1/I)^2$	21.63510
$(I_1/I)^2 =$			0.30644	$e/(1+e)$	0.32480
				$K^2 =$	8.02710
				$K =$	2.83321

**b. Caso 2: Motor con variador de frecuencia**

Aplicando el mismo procedimiento

Factor K:

$$K = 2.0950$$

Cálculo de la corriente máxima:

$$I_{\max} = 7.89A$$

Potencia Recomendada

$$S = 3KVA$$

Porcentaje de derrateo

$$\% \text{derrateo} = 47.73\%$$

**c. Caso 3: Carga Mixta**

Factor K:

$$K = 1.2494$$

Cálculo de la corriente máxima:

$$I_{\max} = 13.23A$$

Potencia Recomendada

$$S = 5KVA$$

Porcentaje de derrateo

$$\% \text{derrateo} = 80.04\%$$

### Resumen de resultados

Los resultados hallados en base a las dos metodologías para calcular la máxima corriente que puede manejar el transformador para no excede los límite de operación nominal se resumen en la Tabla N° 5.8.

**Tabla N° 5.8** Resumen de Resultados

Caso	Carga	Metodología	Factor	I <sub>max</sub> (A)	Potencia Recomendada (KVA)	Porcentaje de Derrateo (%)
1	Lámparas de descarga con balastro electrónico	C57.110	42.13	3.03	1.2	18.34
		Factor K	2.83	5.83	2.2	35.3
2	Motor de inducción trifásico con un variador de frecuencia	C57.110	20.21	4.36	1.7	26.35
		Factor K	2.1	7.89	3	47.73
3	Carga Mixta: Lámparas, motor y resistencia	C57.110	4.06	9.34	3.6	56.49
		Factor K	1.25	13.23	5	80.04

## CONCLUSIONES

1. A través de los resultados observados en la Tabla N° 5.8 se concluye que el método recomendado por el estándar C57.110-1986 [1] es más conservador que el recomendado por el estándar BS 7821 Part. 4 [2]. Las diferencias son más apreciables para el Caso 1, donde el porcentaje de derrateo calculado con  $K'$  igual a 42.13 representa el 51% del porcentaje calculado con el Factor K, esta diferencia se acorta cuando el valor de  $K'$  disminuye, pues para el Caso 2 donde  $K'=20.21$  el porcentaje de derrateo calculado con este valor representa el 55% del calculado con el Factor K, y las diferencias se acortan aún más para el Caso 3, ya que el porcentaje de derrateo calculado con  $K'$  igual a 4.06 representa el 70% del calculado con el Factor K. Esta tendencia se observa en todos los trabajos similares que se han hecho al respecto.
2. Las pérdidas por corriente eddy están en relación directa con el porcentaje de derrateo, de esto se concluye que si en el proceso de diseño del transformador se pone especial cuidado en seleccionar el material del núcleo para que tenga una menor densidad de flujo, las pérdidas por corrientes eddy pueden reducirse drásticamente.
3. El porcentaje de derrateo para el caso 1 es el más bajo de todos los analizados, alrededor de 18% y 35% con las dos metodologías. No se espera que ninguna instalación que tenga transformadores manejando cargas con este nivel de distorsión armónica reduzca la carga su potencia nominal hasta el porcentaje calculado. En la práctica, para estos casos se propone que se reemplace el transformador por uno adecuado para manejar cargas de este tipo. Por otro lado, transformadores fabricados para este valor de K resultan ser voluminosos y costosos, en el Anexo B se muestran costos de transformadores K-13 y K-1. Es necesario resaltar que el tipo de lámpara ahorradora usado puede afectar en menor o mayor medida a los equipos de la red, especialmente a los transformadores. Otros autores han hecho ensayos al respecto y han determinado que lámparas de distinta marca pueden generar valores de  $K'$  y THD muy distintos [6]. Cabe mencionar que en el presente ensayo se colocaron lámparas ahorradoras genéricas encontrándose un  $K'$  igual a 42, un valor elevado teniendo

en consideración que valores teóricos asignan un  $K'$  igual a 4 para una lámpara de este tipo, por tanto se concluye que debe hacerse una buena selección de la lámpara para hallar cual es la que provoca menor distorsión.

4. El caso del motor con un variador de frecuencia es menos severo pero también importante, es probable que existan muchas instalaciones que tengan transformadores operando con este nivel de distorsión. Para este caso el análisis para determinar el derrateo del transformador involucraría otras consideraciones de orden técnico y económico. En la actualidad se estila colocar transformadores con un  $K'$  determinado para atender solo cargas no lineales, mientras que los convencionales operan en circuitos de baja distorsión armónica. Esta podría ser una solución manejable, si se piensa ampliar la planta o si esta se está en proceso de implementación.
5. Sin duda el caso más común de contaminación por armónicos en la industria es el que se ensayó a pequeña escala en el caso 3. El objetivo era observar el comportamiento de la onda de corriente cuando se combinan cargas de distinta naturaleza. El ensayo se hizo con tres cargas, dos no lineales y una lineal, los resultados obtenidos indican que un acomodamiento de las cargas pueden devenir en una reducción de la distorsión por armónicos y por consiguiente favorecer la normal operación del transformador. Cuando el transformador operaba solo con las lámparas ahorradoras como carga no lineal, el THD resultante de la onda de corriente fue de 152% y el valor de  $K'$  igual a 42, cuando el transformador operó solo con el motor y el variador de frecuencia el THD resultante de la onda de corriente fue de 70% y el valor de  $K'$  igual a 20.7. Esta situación se revirtió considerablemente cuando se colocó el arreglo de las tres cargas en paralelo, en estas condiciones se midió un THD de 29%. y el valor de  $K'$  igual a 4.  
Para este caso es más recomendable una reducción de la potencia del transformador, reducir la carga hasta en 80% es manejable. Se asume que los análisis de derrateo se hacen para el caso más desfavorable; por consiguiente es aconsejable hacer mediciones periódicas para determinar un comportamiento en el uso de la carga.
6. En ninguno de los casos el transformador trabajo en el límite de sus condiciones nominales. Para el caso 1, la corriente efectiva de carga fue 0.83A, según la Tabla N° 5.9 el transformador llega al límite de su operación cuando la corriente de carga es 3.03A si tomamos en cuenta la metodología de la IEEE C57.110-1986 [1], y 5.83A si tomamos en cuenta la metodología de desclasificación usando el

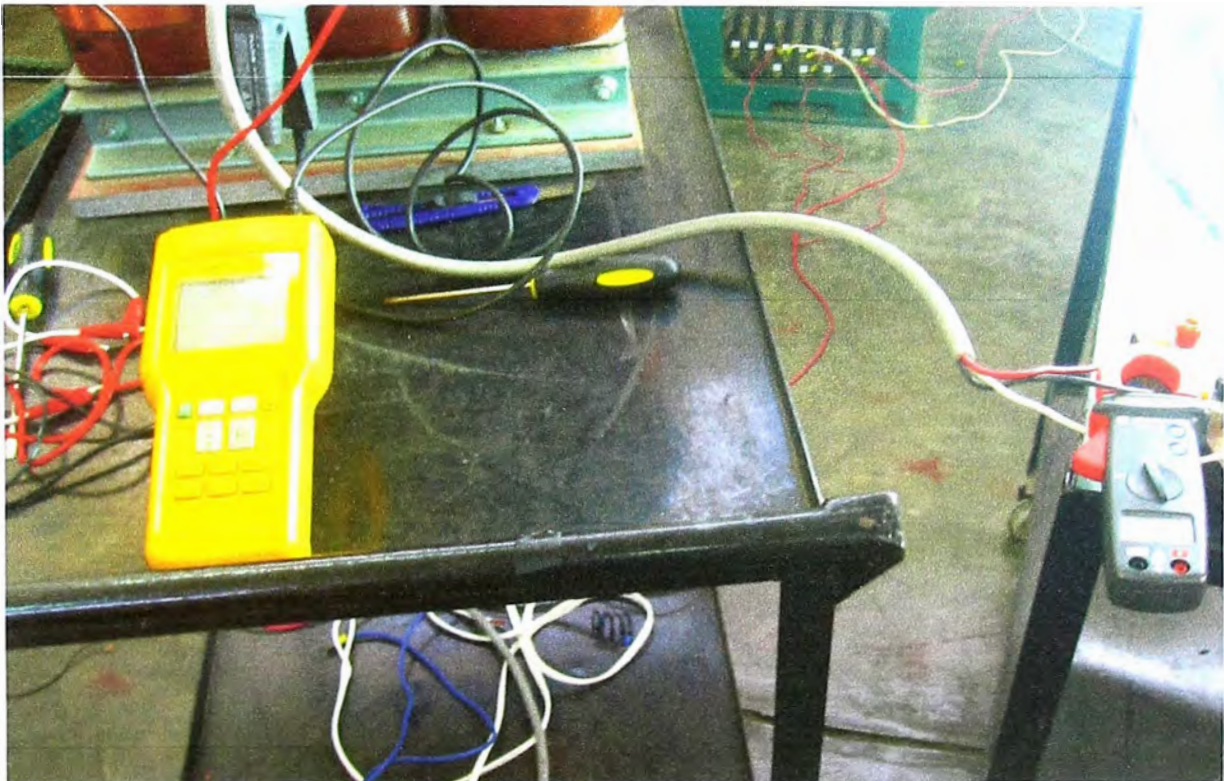
Factor K. Para el caso 2, la corriente efectiva de carga fue 0.94A mientras que las metodologías usadas recomiendan que no se exceda los 4.36A y 7.89A respectivamente. Para el caso 3, el transformador soporto una corriente de carga de 3.12A, en este caso las normas recomiendan según su metodología que no se excedan los 9.34A y 13.23A respectivamente.

7. El transformador usado en el ensayo es de tipo seco, pero la metodología descrita es aplicable también a transformadores sumergidos en aceite con la salvedad de que para estos transformadores se debe considerar las otras pérdidas parásitas o pérdidas de dispersión en el tanque y otras partes metálicas del transformador debido a que su influencia y magnitud es más significativa en este tipo de transformadores.
8. Los métodos usados tienen en común que usan como referencia la máxima corriente distorsionada que puede manejar el transformador sin exceder sus pérdidas nominales.
9. Muchos autores de publicaciones denominan Factor K a la expresión (4.25), en este informe se ha preferido denominarlo K' para evitar confusiones con el Factor K de la norma europea que también se estudia en este trabajo.

**ANEXO A**  
**FOTOGRAFIAS DEL ENSAYO**

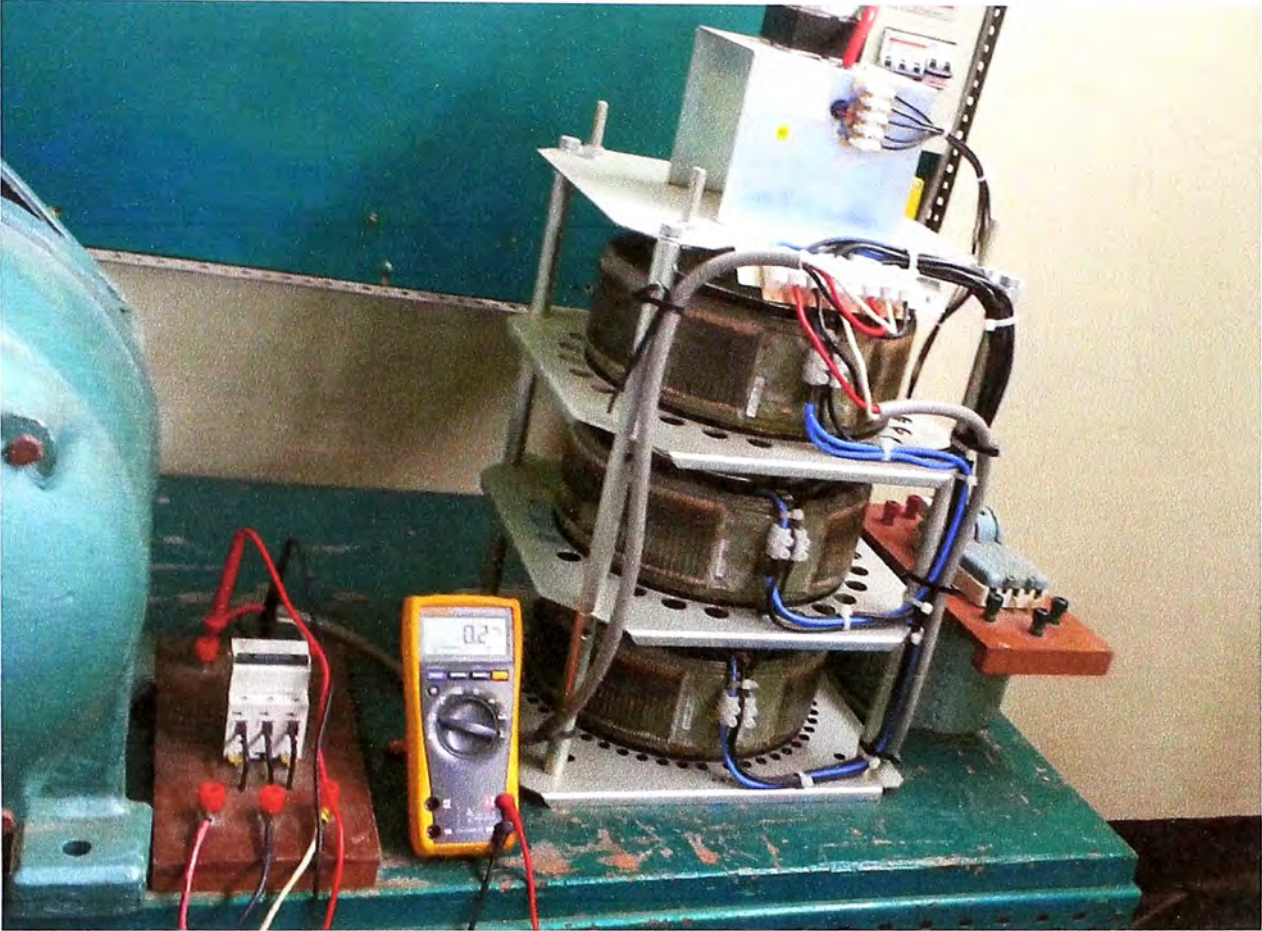


**Fig. A1** Transformador de 6kVA usado en el ensayo



**Fig. A2** Equipo de medición de armónicos Fluke 39





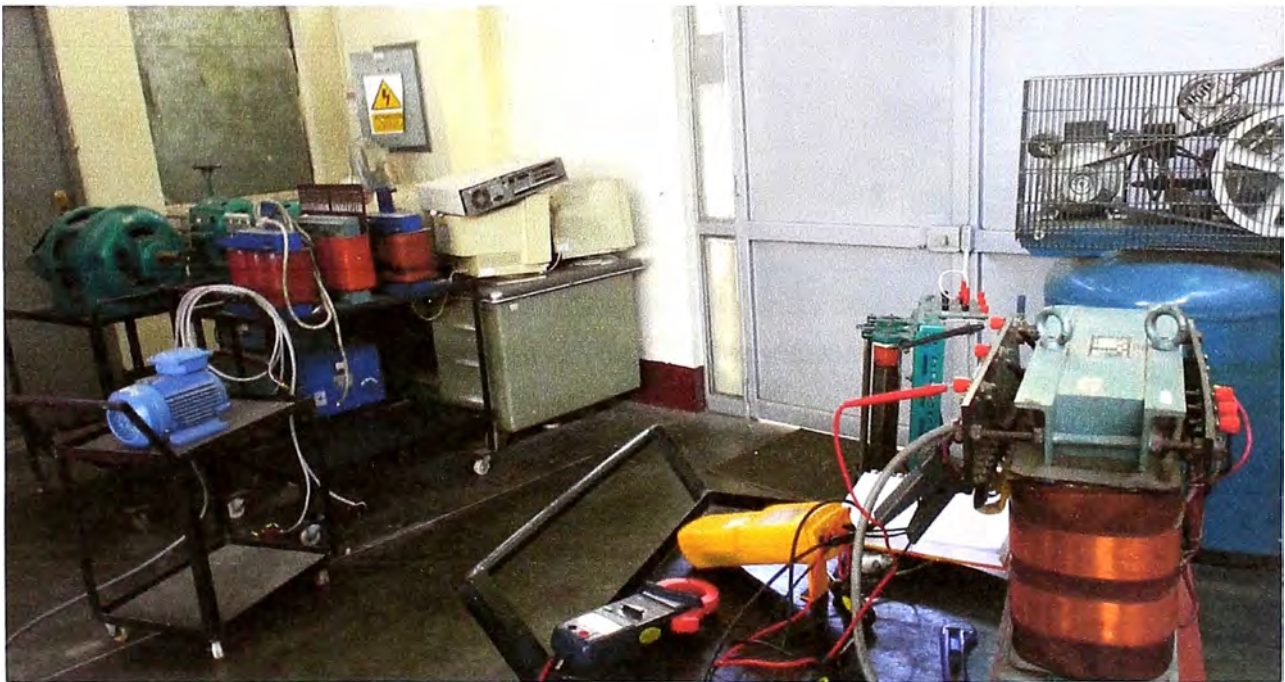
**Fig. A3 Autotransformador Trifásico 0-500V**



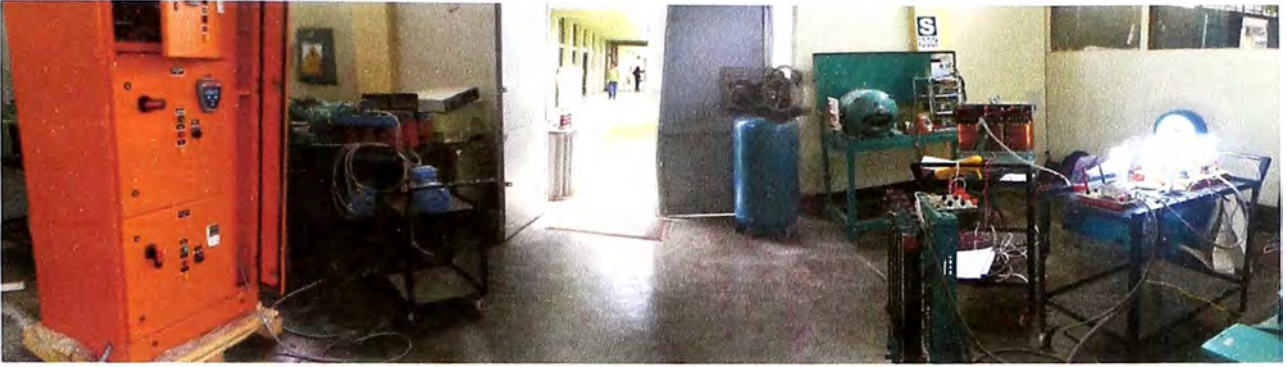
**Fig. A4 Prueba de Cortocircuito**



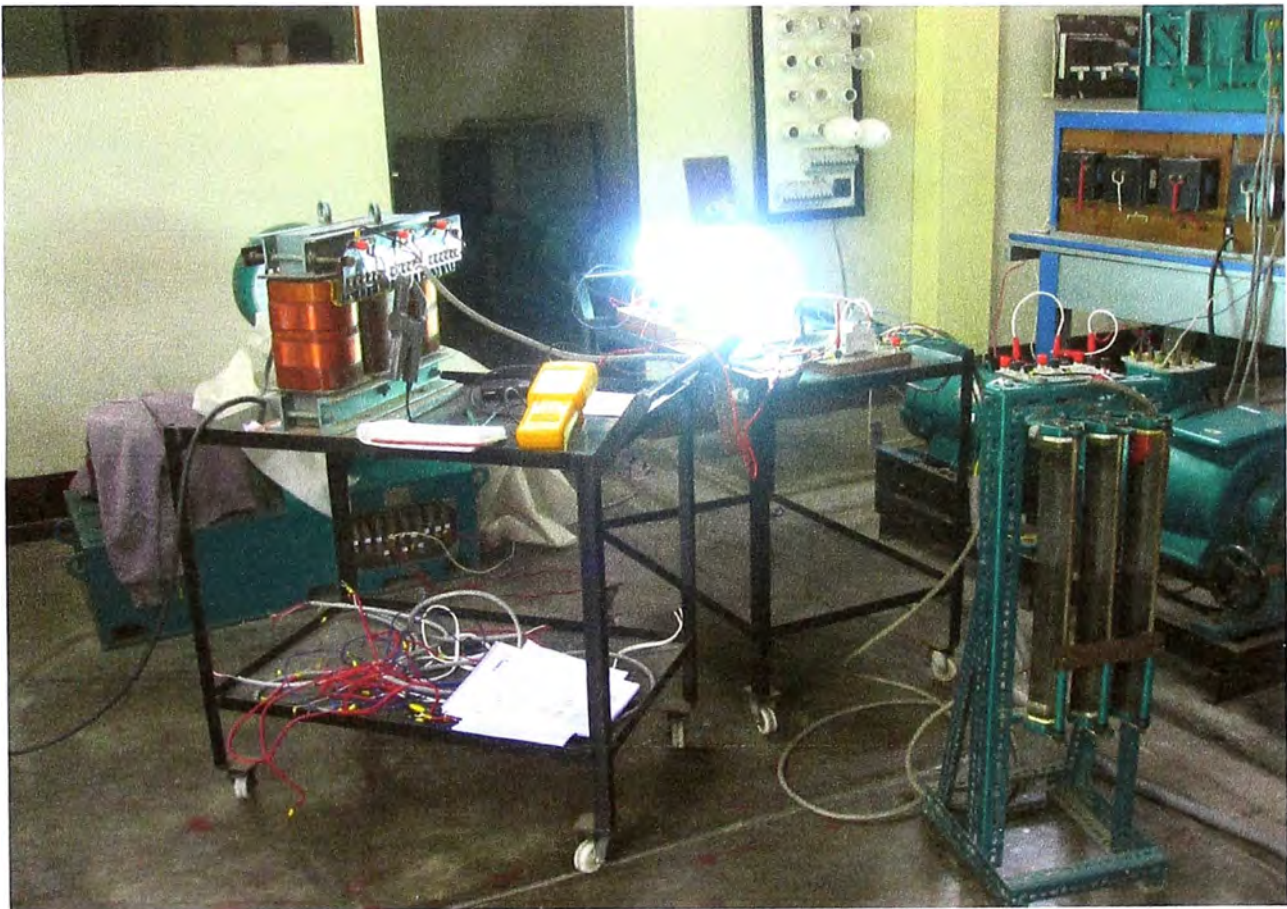
**Fig. A5** Ensayo con las lámparas CFL



**Fig A6** Ensayo con el motor de inducción trifásico



**Fig A7** Ensayo con las tres cargas



**Fig. A8** Ensayo con las tres cargas vista de otro ángulo

**ANEXO B**  
**PRESUPUESTO DE TRANSFORMADORES K-13, K1 DE DISTINTAS**  
**ESPECIFICACIONES SOLICITADOS POR UNA MINERA**

## COTIZACIÓN

ITEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
001	UND	1.00	<p><b>TRANSFORMADOR MONOFASICO 7.5KVA K13 480/120V 60HZ li0 IP22 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento monofásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC 60076.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Certificado de calidad: ISO 9001:2008.</li> <li>* Certificado ambiental: ISO 14001:2004</li> <li>* Norma de diseño, fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11, nacional N.T.P. 370-002.</li> <li>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</li> <li>* <b>NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H".</b> Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</li> <li>* <b>BOBINADO AUTOMATIZADO:</b> Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</li> <li>* <b>TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL.</b> Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</li> <li>* <b>GABINETE METALICO (ENVOLVENTE):</b> El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo % de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de protección IP22 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</li> </ul>	1,245.00	1,245.00

EM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
002	UND	3.00	<p>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</p> <p>* ACCESORIOS ESTANDARES: Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "H" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso bajo relieve.</p> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <p>* Potencia: 7.5KVA, monofásico, factor K13</p> <p>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP22 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</p> <p>* Tensión nominal Primaria: 480Vac +/-10%, N° de bornes: 2, esquema lado A.T.: Serie.</p> <p>* Tensión Secundaria: 120V con Neutro conectado a tierra, N° de bornes: 2, Esquema lado B.T. : Serie</p> <p>* Grupo de conexión: li0</p> <p>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</p> <p>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</p> <p>* Frecuencia: 60 Hz.</p> <p>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</p> <p>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</p> <p>* Temperatura ambiente: 40°C</p> <p>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</p> <p>* PROTOCOLO DE PRUEBAS: Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</p> <p><b>TRANSFORMADOR MONOFASICO 10KVA K13 480/120V 60HZ li0 IP22 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento monofásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC 60076.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <p>* Certificado de calidad: ISO 9001:2008.</p> <p>* Certificado ambiental: ISO 14001:2004</p> <p>* Norma de diseño, fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11, nacional N.T.P. 370-002.</p> <p>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</p> <p>* NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H". Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</p>	1,557.00	4,671.00

TEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
			<p>* <b>BOBINADO AUTOMATIZADO:</b> Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</p> <p>* <b>TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL.</b> Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</p> <p>* <b>GABINETE METALICO (ENVOLVENTE):</b> El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo % de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de proteccion IP22 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</p> <p>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</p> <p>* <b>ACCESORIOS ESTANDARES:</b> Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "H" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso bajo relieve.</p> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <p>* Potencia: 10KVA, monofásico, factor K13</p> <p>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP22 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</p> <p>* Tensión nominal Primaria: 480Vac +/-10%, N° de bornes: 2, esquema lado A.T.: Serie.</p> <p>* Tensión Secundaria: 120V con Neutro conectado a tierra, N° de bornes: 2, Esquema lado B.T. : Serie</p> <p>* Grupo de conexión: li0</p> <p>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</p> <p>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</p> <p>* Frecuencia: 60 Hz.</p> <p>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</p> <p>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</p> <p>* Temperatura ambiente: 40°C</p> <p>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</p> <p>* <b>PROTOCOLO DE PRUEBAS:</b> Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio</p>		

TEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
003	UND	2.00	<p>especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</p> <p><b>TRANSFORMADOR TRIFASICO 22.5KVA K1 480/208-120V 60Hz Dyn11 IP42 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento trifásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC, calidad ISO 9001:2008.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</li> <li>* Norma de calidad: ISO 9001:2008.</li> <li>* Norma de fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11.</li> <li>* NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H". Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</li> <li>* BOBINADO AUTOMATIZADO: Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</li> <li>* TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL. Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</li> <li>* GABINETE METALICO (ENVOLVENTE): El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo % de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de protección IP42 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</li> <li>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</li> <li>* ACCESORIOS ESTANDARES: Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "F" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso bajo relieve.</li> </ul> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Potencia: 22.5KVA, trifásico, factor K1</li> </ul>	2,255.00	4,510.00



ITEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
004	UND	3.00	<p>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP42 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</p> <p>* Tensión nominal Primaria: 480Vac, taps de regulación +/- 10%, N° de bornes: 3, esquema lado A.T.: Delta</p> <p>* Tensión Secundaria: 208-120V, N° de bornes: 4, Esquema lado B.T. : Estrella con neutro accesible.</p> <p>* Grupo de conexión: Dyn11</p> <p>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</p> <p>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</p> <p>* Frecuencia: 60 Hz.</p> <p>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</p> <p>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</p> <p>* Temperatura ambiente: 40°C</p> <p>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</p> <p>* PROTOCOLO DE PRUEBAS: Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</p> <p><b>TRANSFORMADOR TRIFASICO 30KVA K1 480/230V 60Hz Dyn11 IP42 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento trifásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC, calidad ISO 9001:2008.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <p>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</p> <p>* Norma de calidad: ISO 9001:2008.</p> <p>* Norma de fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11.</p> <p>* <b>NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H".</b> Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</p> <p>* <b>BOBINADO AUTOMATIZADO:</b> Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</p> <p>* <b>TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL.</b> Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</p> <p>* <b>GABINETE METALICO (ENVOLVENTE):</b> El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo</p>	2,398.00	7,194.00

ITEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
005	UND	3.00	<p>% de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de protección IP42 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</p> <p>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</p> <p>* ACCESORIOS ESTANDARES: Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "F" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso bajo relieve.</p> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <p>* Potencia: 30KVA, trifásico, factor K1</p> <p>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP42 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</p> <p>* Tensión nominal Primaria: 480Vac, taps de regulación +/- 10%, N° de bornes: 3, esquema lado A.T.: Delta</p> <p>* Tensión Secundaria: 230V, N° de bornes: 4, Esquema lado B.T. : Estrella con neutro accesible.</p> <p>* Grupo de conexión: Dyn11</p> <p>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</p> <p>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</p> <p>* Frecuencia: 60 Hz.</p> <p>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</p> <p>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</p> <p>* Temperatura ambiente: 40°C</p> <p>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</p> <p>* PROTOCOLO DE PRUEBAS: Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</p> <p><b>TRANSFORMADOR TRIFASICO 45KVA K1 480/230V 60Hz Dyn11 IP42 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento trifásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC, calidad ISO 9001:2008.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <p>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</p> <p>* Norma de calidad: ISO 9001:2008.</p> <p>* Norma de fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11.</p> <p>* NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H". Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado</p>	3,799.00	11,397.00

ITEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
			<p>de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</p> <p>* BOBINADO AUTOMATIZADO: Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</p> <p>* TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL. Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</p> <p>* GABINETE METALICO (ENVOLVENTE): El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo % de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de proteccion IP42 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</p> <p>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</p> <p>* ACCESORIOS ESTANDARES: Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "F" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso bajo relieve.</p> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <p>* Potencia: 45KVA, trifásico, factor K1</p> <p>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP42 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</p> <p>* Tensión nominal Primaria: 480Vac, taps de regulación +/- 10%, N° de bornes: 3, esquema lado A.T.: Delta</p> <p>* Tensión Secundaria: 230V, N° de bornes: 4, Esquema lado B.T. : Estrella con neutro accesible.</p> <p>* Grupo de conexión: Dyn11</p> <p>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</p> <p>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</p> <p>* Frecuencia: 60 Hz.</p> <p>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</p> <p>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</p>		

TEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
006	UND	2.00	<p>* Temperatura ambiente: 40°C</p> <p>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</p> <p>* PROTOCOLO DE PRUEBAS: Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</p> <p><b>TRANSFORMADOR TRIFASICO 75KVA K1 480/230V 60Hz Dyn11 IP42 4800msnm</b></p> <p>Transformador de aislamiento trifásico marca EPLI, fabricado en Perú, según norma IEC, calidad ISO 9001:2008.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES GENERALES:</b></p> <p>* Tipo SECO, de aislamiento, con doble devanado.</p> <p>* Norma de calidad: ISO 9001:2008.</p> <p>* Norma de fabricación y pruebas: internacional IEC 60076-11.</p> <p>* NÚCLEO MAGNÉTICO TIPO STEP LAP, CORTE V DE 45° TOTALES CORTE ROBOTIZADO - AISLAMIENTO TÉRMICO CLASE "H". Fabricado con láminas apiladas de acero de silicio de grano orientado con alto grado de magnetización, bajas pérdidas por histéresis y alta permeabilidad. cada lámina está cubierta con material aislante resistente a altas temperaturas. Corte V robotizado, tipo Step Lap de 45° totales, garantizando alta eficiencia, mínimas pérdidas de energía y un trabajo silencioso.</p> <p>* BOBINADO AUTOMATIZADO: Arrollamientos fabricados con conductores de cobre puro al 99%, aislados con papel clase "H" de alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento.</p> <p>* TRATAMIENTO TERMICO AL VACIO = MAYOR TIEMPO DE VIDA UTIL. Las bobinas y el núcleo completamente ensambladas son secadas AL VACIO e inmediatamente después impregnadas con barniz aislante especial. Contamos con grandes hornos para el secado AL VACIO, proceso ideal para transformadores clase "H", garantizando un secado muy rápido por debajo de la temperatura nominal, sin afectar el aislamiento de los materiales, garantizando un prolongado tiempo de vida útil sin fallas.</p> <p>* GABINETE METALICO (ENVOLVENTE): El transformador se entrega instalado en un gabinete metálico construido con planchas de acero de bajo % de carbón y de alta graduación comercial. El gabinete tiene grado de protección IP42 para uso interior, es fabricado en proceso automatizado con tecnología LASER de alta precisión, tratamiento de superficie con granallado automatizado eliminando totalmente el óxido y las impurezas, pintura base anticorrosiva y pintado AL HORNO con pintura epoxi en polvo para uso MARINO. Color de acabado RAL 7035.</p> <p>* Proceso de fabricación totalmente AUTOMATIZADO, insumos de primera calidad y uso, certificados con normas internacionales.</p> <p>* ACCESORIOS ESTANDARES: Borne a tierra, orejas de izaje para levantar la parte activa o el transformador completo, tablero interior de material clase "F" para fijación de los bornes del primario y secundario; placa de características en acero inoxidable con diagrama simple impreso</p>	4,455.00	8,910.00

ITEM	U.M.	Cantidad	Descripción	V.VENTA UNITARIO	V.VENTA TOTAL
			<p>bajo relieve.</p> <p><b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS Y PRUEBAS EN LABORATORIO ESPECIALIZADO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Potencia: 75KVA, trifásico, factor K1</li> <li>* Aislamiento térmico: clase "H", 180°C con un calentamiento máximo de 115°C, IP42 no ventilado, impregnado en barniz (no encapsulado).</li> <li>* Tensión nominal Primaria: 480Vac, taps de regulación +/- 10%, N° de bornes: 3, esquema lado A.T.: Delta</li> <li>* Tensión Secundaria: 230V, N° de bornes: 4, Esquema lado B.T. : Estrella con neutro accesible.</li> <li>* Grupo de conexión: Dyn11</li> <li>* Eficiencia: 97% +/- tol. IEC</li> <li>* Tensión de Corto Circuito: 4% +/- Tol. IEC.</li> <li>* Frecuencia: 60 Hz.</li> <li>* Montaje: Interior, refrigeración natural (ANAN).</li> <li>* Altitud de Servicio: 4800 msnm</li> <li>* Temperatura ambiente: 40°C</li> <li>* Pérdidas estándares según diseño EPLI. Tolerancia IEC.</li> <li>* PROTOCOLO DE PRUEBAS: Se realizarán todas las pruebas de rutina según norma IEC60076-11 para transformadores secos, en laboratorio especializado. Se entrega protocolo de pruebas y carga de garantía.</li> </ul>		
<b>SUB TOTAL DOLARES AMERICANOS:</b>					<b>37,927.00</b>
<b>DESCUENTO:</b>					<b>0.00</b>
<b>SUB TOTAL NETO:</b>					<b>37,927.00</b>
<b>IMPUESTOS (18%):</b>					<b>6,826.86</b>
<b>TOTAL DOLARES AMERICANOS:</b>					<b>44,753.86</b>

**ANEXO C**  
**ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL EQUIPO ANALIZADOR DE REDES FLUKE 39**

**FLUKE.**

Test Equipment Depot  
99 Washington Street  
Melrose, MA 02176-6024

[www.testequipmentdepot.com](http://www.testequipmentdepot.com)  
800-517-8431  
781-665-0780 FAX

# **Fluke 39/41B**

Power Harmonics Tester

**Users Manual**

4822 872 00916  
July 1995 Rev. 3, 11/00  
© 1995 Fluke Corporation. All rights reserved. Printed in the Netherlands.  
All product names are trademarks of their respective companies.

## **Specifications**

Basic electrical specifications are defined over the temperature range from 18°C to 28°C for a period of one year after calibration.

Accuracy is specified as  $\pm$ ([% of reading] + [number of units in least significant digit]).

### **Frequency Range, Fundamental**

6-65 Hz and dc

### **Minimum Input Levels**

5V rms or 1A rms

### **Volts Measurements (True rms)**

Input Range: 5.0V to 600V rms (ac + dc)  
5.0V to +/-933V peak

Basic Accuracy\*:

rms (ac + dc): +/- (0.5% + 2 digits)

peak, dc: +/- (2% + 3 digits)

\* < 15V rms, add 2 digits

Input Impedance: 1 M $\Omega$ , balanced

Crest Factor: > 3.0 below 300V, 1.56 @ 600V

### **Amps Measurements (True rms)**

#### **(1 mV/A) Isolated Input**

Input Range: 1.00 mV (A) to 1000 mV rms (A) (ac + dc)  
1.0 mV (A) to +/- 2000 mV (A) peak

Basic Accuracy:

rms (ac + dc): +/- (0.5% + 3 digits) + probe specs.

peak, dc: +/- (2% + 4 digits) + probe specs.

Input Impedance: 1 M $\Omega$  || 47 pF

Crest Factor: > 3.0 below 600 mV, 2.0 @ 1000 mV



### **Watts Measurements (Volt-Amps)**

#### **(1 mV/A) Isolated Input**

Range: 0 W (VA) to 600 kW (kVA) average  
0 W (VA) to 2000 kW (kVA) peak

Accuracy (ac + dc):

Active W (VA): +/- (1% + 4 digits) + probe specs

### **Harmonics Measurement Accuracy (Cursor Data)**

**(Harmonic Level > 5% Using Smooth ~20)**

#### **Volts:**

Fundamental to 13th Harmonic: +/- (2% + 2 digits)  
13th to 31st Harmonic: 13th (+/- (2% + 2 digits)) ----  
---- 31st (+/- (8% + 2 digits))

#### **Amps\* or Watts:**

Fundamental to 13th Harmonic: +/- (3% + 3 digits) + probe specs  
13th to 31st Harmonic: 13th (+/- (3% + 3 digits) + probe  
specs) ----- 31st (+/- (8% + 3  
digits)+ probe specs)

\* < 20A, add 3 digits

#### **Phase:**

Fundamental: (±2 degrees) + probe specs  
2nd to 31st Harmonic: 2nd (±5 degrees) -- 31st (±20  
degrees) + probe specs

### **Frequency Measurement Accuracy**

**(Fundamental, 6.0 Hz - 99.9 Hz)**

6.0 Hz - 99.9 Hz: +/- 0.3 Hz

**Specifications**

**Other Measurement Specifications**

<b>Measurement Function</b>	<b>Range/Resolution</b>	<b>Accuracy</b>
Input Bandwidth: (-0.5 dB):	DC 6 Hz to 2.1 kHz	
Crest Factor (CF): (Using Smooth $\Delta$ -20)	1.00 to 5.00	±4%
Power Factor (PF):	0.00 to 1.00	±0.02
Displacement Power Factor (DPF):	0.00 to 0.29	unspecified
	0.30 to 0.69	±0.04
	0.70 to 0.89	±0.03
	0.90 to 1.00	±0.02
Phase Measurement Range:	-179 to 180 degrees	
K-Factor (KF) Model 41B:	1.0 to 30.0	±10%
Total Harmonic Distortion (THD)		
%THD-F:	0.0 to 799.9	±(0.03 x Reading + 2.0%)
%THD-R:	0.0 to 99.9	±(0.03 x Reading + 2.0%)

**39/41B**  
*Users Manual*

---

***Ranges and Resolution***

<b>AC Volts</b>		<b>AC Amps</b>		<b>Watts</b>	
<b>Range (PK)</b>	<b>Resolution</b>	<b>Range (PK)</b>	<b>Resolution</b>	<b>Range (PK)</b>	<b>Resolution</b>
20V	0.1V	2A	0.01A	50W	1.0W
50V	0.1V	5A	0.01A	100W	1.0W
100V	0.1V	10A	0.01A	200W	1.0W
200V	0.1V	20A	0.01A	500W	1.0W
500V	1V	50A	0.1A	1 kW	0.01 kW
1 kV	1V	100A	0.1A	2 kW	0.01 kW
		200A	0.1A	5 kW	0.01 kW
		500A	1A	10 kW	0.1 kW
		1000A	1A	20 kW	0.1 kW
		2000A	1A	50 kW	0.1 kW
				100 kW	1 kW
				200 kW	1 kW
				500 kW	1 kW
				1 kW	1 kW
				2 kW	1 kW

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Std C57.110-1986, "Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents", IEEE, 1986.
- [2] BS 7821 Part 4, "Three Phase Oil-Immersed Distribution Transformers, 50 Hz from 50 to 2500 kVA with Highest Voltage for Equipment not Exceeding 36 kV Part 4: Determination of the Power Rating of a Transformer Loaded with Non-Sinusoidal Currents", British Standards Institution, 1995.
- [3] Christian Collombet, Jean-Marc Lupin, Jacques Schonek, "Cuaderno Técnico 152: Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento" Schneider Electric, 2000.
- [4] George J. Wakileh, "Power System Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design", Springer, 2001.
- [5] IEEE Std 519-1992, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic control in Electrical Power Systems", IEEE, 1993.
- [6] José Gregorio Díaz P., Juan Arcila, Charles Steblina, "Efectos del uso masivo de bombillos ahorradores de energía sobre los transformadores de distribución", Universidad José Antonio Páez, Valencia, Venezuela, 2008.
- [7] Salvador Acevedo P., "Conexiones de Transformadores para Eliminar Armónicos, Departamento de Ingeniería Eléctrica ITESM, Campus Monterrey
- [8] Jaime Vinicio Bardales Oliva, "Análisis del Desempeño de los Transformadores Ante Presencia de los Armónicos" Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.
- [9] Transformers University "K Factor", Federal Pacific, <http://www.federalpacific.com>
- [10] Leo L. Grigsby, "Electric Power Transformer Engineering, James H, Harlow, 2004.
- [11] Andrés Hernández Acevedo, Rubén Rodrigo Ledesma Vilchis, Eduardo Alejandro Perera Martínez, "Manual de Pruebas A Transformadores de Distribución" Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica Unidad Zacatenco, México 2007.
- [12] Jesús Fraile Mora, "Máquinas Eléctricas" Mc Graw Hill/Interamericana de España, Madrid 2003