

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **MEDICIONES Y EVALUACIÓN DEL FACTOR K EN UN SUBSISTEMA ELÉCTRICO**

### **INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

### **INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**ALEXANDER UBALDO DÁVILA CHAMBI**

**PROMOCIÓN  
2003 – II**

**LIMA – PERÚ  
2008**

**MEDICIONES Y EVALUACIÓN DEL FACTOR K EN UN  
SUBSISTEMA ELÉCTRICO**

## SUMARIO

Hoy en día es requisito fundamental en todo sistema eléctrico el cumplimiento de normas referentes a la calidad del servicio eléctrico. Sin embargo, estos se ven afectados por una gran cantidad de perturbaciones de distinto origen y distinto efecto sobre el sistema. Una de estas perturbaciones en particular, son los efectos de las corrientes armónicas sobre un elemento eléctrico que ve comprometido su rendimiento, y es que los efectos sobre los transformadores debido a corrientes parásitas conllevan a tomar medidas y desarrollar teorías que permitan proteger dichos elementos.

Estas corrientes armónicas inherentes a la carga no lineal, producen distorsión en estado estacionario; y por tanto los transformadores deben ser re valorados en su capacidad para que trabajen en estas condiciones. El factor  $k$ , es un valor que permite esta revalorización de la capacidad de un transformador a fin de mitigar los efectos de corrientes armónicas en un sistema eléctrico.

Dentro del marco de estudio, se presenta las normas y/o estándares que respaldan la validez del cálculo del Factor  $K$ . Dado que dicho estudio se encuentra íntimamente vinculado a los niveles de corriente armónica, también se hace referencia a las normas que las rigen y las recomendaciones, como limitaciones que estas contemplan, las causas y efectos de estas sobre un subsistema eléctrico.

Se abarca también, las ecuaciones que rigen el cálculo del factor  $k$ , así como la comparación entre los métodos existentes (americano y europeo) También se presenta aplicaciones y comparativos, conllevando a la problemática actual.

Finalmente se resalta, la aplicación y el porque de la medición y evaluación del factor  $k$ , así como su utilización en la recomendación y fabricación de equipos sobre la base de este factor.

## ÍNDICE

<b>SUMARIO</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE</b>	<b>V</b>
<b>PROLOGO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PROBLEMÁTICA ACTUAL. PRINCIPALES FUENTES DE ARMÓNICAS EN LA INDUSTRIA</b>	<b>3</b>
1.1. Calidad de energía.	3
1.2. Perturbaciones.	4
1.2.1. Caídas permanentes de tensión (en estado estacionario)	4
1.2.2. Elevaciones permanentes de tensión	5
1.2.3. Flicker de tensión	5
1.2.4. Caídas momentáneas de tensión (Voltage sags).	5
1.2.5. Elevaciones momentáneas de tensión. (Voltage swells)	5
1.2.6. Transitorios de tensión.	6
1.3. Armónicos.	6
1.3.1. Definición de armónicos.	6
1.3.2. Efectos sobre los equipos de la red.	8
1.3.2.1. Efecto en conductores y barras. Barra de neutro.	8
1.3.2.2. Efecto en equipos de protección.	9
1.3.2.3. Efecto en banco de condensadores.	9
1.3.2.4. Efecto en máquinas rotativas.	10
1.4. Evaluación. Consecuencias de los armónicos sobre los transformadores.	11
1.4.1. Pérdidas en el transformador.	11
1.4.2. Efecto de los armónicos sobre las pérdidas en un transformador.	13
1.5. Síntesis. Alcances.	14

**CAPÍTULO II****MARCO TEÓRICO**

2.1.	Capacidad equivalente del transformador.	18
2.2.	Pérdidas en por unidad en el transformador.	18
2.3.	Factor K. Definición de Underwriters Laboratory.	20
2.4.	Factor por pérdidas armónicas. Definición del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, IEEE.	24
2.5.	Factor K del sistema europeo. Definición del Comité Electrotécnico Internacional, IEC.	25
2.6.	Factor K del sistema español. Definición de los Comités Técnicos de Normalización de España, UNE.	26

**CAPÍTULO III****MEDICIÓN DE ARMÓNICOS. FACTOR K**

3.1.	Indicios de presencia de armónicos.	29
3.2.	Espectro de armónicos generales.	30
3.3.	Espectro de impedancias (Barrido en frecuencia)	32
3.4.	Medición del factor K.	32

**CAPÍTULO IV****EVALUACIÓN DEL FACTOR K. APLICACIÓN**

4.1.	Técnicas constructivas.	34
4.1.1.	Núcleo.	34
4.1.2.	Devanados secundarios.	35
4.1.3.	Devanados primarios.	35
4.1.4.	Conductor neutro.	36
4.1.5.	Pantallas electrostáticas.	36
4.2.	Aplicaciones.	37

**CONCLUSIONES**

41

**ANEXO A****FORMATO BASE PARA EVALUACIÓN DE CONTENIDO ARMONICO**

44

**BIBLIOGRAFÍA**

46

## PRÓLOGO

La cotidiana tarea de diseñar nuevos sistemas eléctricos y la de evaluar los ya existentes, permite poder ver la realidad del tipo de carga para la que se trabaja. Implementación de grandes centro de cómputo, en el mundo de la banca y las telecomunicaciones, donde se emplean numerosos equipos de protección y rectificación electrónica de diversas potencias; la investigación minuciosa de problemas eléctricos que afectan a equipos y procesos, han sido motivo del desarrollo del presente informe.

El campo de estudio, se avoca a un fenómeno particular, que junto a otros, afecta el desempeño de una red eléctrica; esto son los armónicos. Los armónicos afectan a distintos componentes del sistema eléctrico, y es motivo de estudio el impacto que tendrán sobre los transformadores.

En el capítulo I, es necesario partir del concepto de calidad de energía, concepto que toma considerable valor hoy en día, en el que las redes de energía alimentan a cargas sensibles. Se definen los distintos disturbios que afectan los sistemas, las causas y las repercusiones que estas tienen. Se destaca, a fin de seguir introduciendo el objetivo de este informe, la definición de los armónicos, los efectos de la misma sobre los elementos de la red, para llegar finalmente a exponer los efectos que estos ocasionan en los transformadores.

Básicamente los efectos que tienen las corrientes armónicas sobre el incremento de las pérdidas en los transformadores han sido estudiados por instituciones, fabricantes, empresas de distribución de energía eléctrica y usuarios. Este efecto de sobre calentamiento, debido a la presencia de corrientes armónicas, característica inherente de la carga no lineal que el transformador alimenta, obliga a establecer un método que le permita tener capacidad de sobrellevar este incremento en las pérdidas.

El Capítulo II, toma la conclusión dejada en el capítulo I, respecto a la influencia de las corrientes armónicas, sobre las pérdidas en el transformador especialmente sobre las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados. De aquí nace la idea de redimensionar o encontrar una capacidad equivalente en un transformador diseñado para alimentar cargas lineales, de modo tal que el incremento de las pérdidas debido a corrientes armónicas,

producto de cargas no lineales, no involucre su funcionamiento y su eficiencia. En todo caso la idea es la de mitigar el efecto y no la causa que los armónicos puedan ocasionar sobre el transformador.

Es esta idea, el origen de diversos estándares y normas, que introducen un parámetro, que permita encontrar una capacidad equivalente de un transformador que no fue diseñado para trabajar en un ambiente donde la carga presenta contenido armónico.

Se presentan los estándares americanos de la Underwriters Laboratory UL, y el estándar americano del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, IEEE los que introducen el término, sobre el cual se fundamenta este informe; este es el Factor K.

Adicionalmente, se mencionan otros métodos establecidos a través de estándares dados por otros organismos como el Comité Electrotécnico Internacional, IEC, o el dado a través de las normas dadas por los Comités Técnicos de Normalización de España, UNE, y algunas menciones más. Los cuales presentan métodos distintos, pero que apuntan al mismo objetivo de establecer la capacidad equivalente de un transformador, para que pueda alimentar cargas con contenido armónico sin afectar su rendimiento.

El Capítulo III, establece la medición de armónicos en un sistema dado, debido a que el factor K, resulta como medida indirecta de los mismos. Se presenta los criterios a tomar en cuenta para la evaluación y medición de cargas con contenido armónico.

El Capítulo IV, establece la utilización del factor K, y los aspectos constructivos de transformadores que van a ser sometidos a alimentar a cargas con contenido armónico. Criterios como utilización de materiales de mejor calidad, dimensionamiento de los conductores en los devanados y el conductor neutro, utilización de pantallas electrostáticas. Ejemplos de aplicación también se presentan, a fin de notar y comparar los resultados obtenidos con los criterios dados.

# **CAPITULO I**

## **PROBLEMÁTICA ACTUAL. PRINCIPALES FUENTES DE ARMÓNICAS EN LA INDUSTRIA**

El diseño e instalación de sistemas eléctricos sea cual fuere el nivel de tensión en la que se trabaje, o la magnitud de potencia exige ya de antemano cumplir con los criterios de ingeniería y de diseño establecidos, pero aún mas buscan de proveer el mejor servicio a los usuarios en cuanto a la calidad de energía ofrecida. Sin embargo, los sistemas eléctricos no son ajenos a la gran cantidad de situaciones que comprometen su correcto funcionamiento, y que tienen un origen, magnitud y ocurrencia distinta; y que finalmente se traducirá en pérdidas de tiempo y en pérdidas económicas, y otros inconvenientes que no pueden ser determinadas en términos económicos, como por ejemplo retraso en entrega de productos o costos indirectos en una operación no pueden ser evaluados.

El avance y uso masivo de dispositivos electrónicos en los diversos sectores de la sociedad, deja de lado el tradicional concepto de solo considerar la regulación de tensión como único parámetro para medir la calidad de tensión, pues otros parámetros básicos como frecuencia, magnitud, forma de onda, el no balanceado de cargas y continuidad afectan hoy en día muchos equipos que son muy sensibles a estos disturbios y a las interrupciones, especialmente aquellos que usan funciones de memoria, produciendo errores de datos durante períodos de adquisición de información, degradando la ejecución de un proceso por desgaste del silicio.

Pero este no es un fenómeno unilateral, ya que mucho de estos dispositivos electrónicos presentan una marcada característica no lineal, lo que incrementa considerablemente el deterioro de las señales de tensión y corriente de la red, afectando en muchas maneras a los diversos elementos de un sistema eléctrico.

### **1.1 Calidad de energía**

Dada la problemática actual en cuanto a la calidad en el servicio que se ofrece a los usuarios, un campo de estudio en la ingeniería eléctrica se ha desarrollado en los últimos



años. La continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión son términos vinculados íntimamente en este campo de la calidad del servicio de energía. El primer concepto hace referencia a como la compañía suministradora entrega la señal de tensión y el segundo, se refiere a como el usuario trata la señal de corriente, que posteriormente afecta a la señal de tensión.

La continuidad en el servicio, presenta índices estadísticos referentes al número de interrupciones por año, tiempo promedio por interrupción y usuarios afectados en promedio por interrupción. Sin embargo cada vez es más importante el término de calidad de la onda de tensión, y los parámetros básicos que a esta la caracterizan; pues la variación o desviaciones de sus valores ideales, o los valores máximos de desviación que pueden alcanzar sin que afecte el funcionamiento de los equipos eléctricos marcarán la calidad del suministro.

## **1.2 Perturbaciones**

Todo sistema eléctrico es susceptible a la presencia de disturbios y variaciones momentáneas; la naturaleza, magnitud, severidad, tasa de ocurrencia y efectos de los disturbios pueden variar ampliamente. El origen de estos disturbios puede darse en el sistema eléctrico de potencia debido a fallas temporales, fallas permanentes, operaciones de maniobra y descargas atmosféricas. Los disturbios pueden ser momentáneos o de corta duración, es decir en estado estacionario o en estado transitorio; los efectos de estos o perturbaciones que causan sobre la red son: impulsos transitorios de tensión, caídas momentáneas de tensión, elevaciones momentáneas de tensión, interrupciones momentáneas de tensión, interrupciones muy frecuentes de tensión, armónicos y flickers, [1].

### **1.2.1 Caídas permanentes de tensión (en estado estacionario)**

Un sistema eléctrico de potencia en estado estacionario, por su misma naturaleza no puede garantizar un mismo nivel de tensión nominal en cada una de las barras que lo componen, debido a la caída de tensión en cada uno de los componentes de la misma. Es por eso que las normas establecen rangos permisibles de tensión en los puntos de entrega, y a la vez los equipos son diseñados para operar en un rango similar o mayor. Debe de existir un punto

de equilibrio en la selección de este rango, pues ampliarlo o reducirlo solo conlleva a un mayor costo en la fabricación de los equipos o un mayor costo en la operación del sistema eléctrico de potencia. Las causas fundamentales de caídas permanentes de tensión son: caídas de tensión en transformadores y alimentadores, cambiadores de Taps, efecto Ferranti, compensación reactiva, cambios de generación y carga, cortocircuitos remotos, operación de pararrayos, operación de elementos de interrupción.

### **1.2.2 Elevaciones permanentes de tensión**

Se manifiestan en condiciones de baja demanda, cuando los equipos de compensación reactiva, como banco de condensadores, sobre compensan la demanda de energía reactiva de la barra donde se encuentran instalados, lo que trae como consecuencia la elevación permanente del nivel de tensión fuera del rango nominal o permisible.

### **1.2.3 Flicker de tensión**

Son cambios rápidos instantáneos en la tensión, causadas por la aplicación repentina de cargas con bajo factor de potencia, como grandes motores u hornos de arco, los que generan caídas de tensión variables y momentáneas.

### **1.2.4 Caídas momentáneas de tensión (Voltage sags)**

Son disminuciones de corta duración en la tensión de estado estacionario, duran entre 0.5 a 30 ciclos o más. Son ocasionadas por encendido de cargas grandes que tienen como resultado caídas de tensión entre 10 a 20% y fallas en el sistema eléctrico de potencia, siendo estas últimas más frecuentes y más severas. Las caídas momentáneas más severas en un sistema de distribución resultan de fallas en el mismo alimentador, en la subestación o en el alimentador adyacente.

### **1.2.5 Elevaciones momentáneas de tensión (Voltage swells)**

Estas pueden ser provocadas por fallas a tierra de una o dos fases en sistemas trifásicos, haciendo que la fase o fases que no están en falla eleven su tensión respecto a tierra;

pudiendo ser 30% aproximadamente en sistemas de 4 hilos multi aterrizado y sobre el 70% para sistemas de 3 hilos. La duración depende de la protección del sistema para liberar la falla. Los valores de sobre tensión durante fallas a tierra, son considerados al momento de dimensionar los pararrayos.

### **1.2.6 Transitorios de tensión**

Los transitorios de tensión son las perturbaciones más frecuentes, al ser de muy corta duración y de mayor implicancia a gran parte de la red de energía, este tipo de perturbaciones afecta en gran medida a equipos electrónicos sensibles. Los transitorios son causados por cambios repentinos en un circuito eléctrico debido a la energía almacenada contenida en la inductancia y la capacitancia de los circuitos. La amplitud y duración del transitorio depende de los valores de L y C y de la forma de onda aplicada. El origen más común de los transitorios son las descargas atmosféricas, también tienen origen en las maniobras de equipamiento eléctrico y electrónico, como conexión y desconexión de banco de condensadores.

## **1.3 Armónicos**

De un sistema eléctrico se espera la respuesta lineal de la característica del mismo, en donde la tensión suministrada y la corriente de carga son ondas sinusoidales perfectas. Sin embargo esto no se manifiesta en la práctica, ya que, en estado estacionario se encuentran ondas de tensión y corriente distorsionadas que no tienen su origen en perturbaciones transitorias si no en perturbaciones de régimen permanente ocasionadas por la no-linealidad característica de la carga, [2], [3].

### **1.3.1 Definición de armónicos**

La definición matemática, dada por Joseph Fourier, señala que en condiciones estacionarias, toda función u onda que sea periódica puede ser sustituida exactamente o aproximadamente por una suma trigonométrica de componentes sinusoidales, y que cada uno de estos términos será función del inverso del período de la onda o frecuencia fundamental. Cada uno de estos términos de la suma trigonométrica es conocido como

armónico y la búsqueda de esta representación en una suma trigonométrica de una función dada constituye el análisis armónico.

Este concepto matemático se aplica a las ondas de tensión y corriente distorsionadas producto de la respuesta a cargas no lineales, donde la frecuencia fundamental es la frecuencia del sistema de potencia, y donde las condiciones de estado estacionario, y periodicidad de la onda deben darse. Una vez que el sistema eléctrico de potencia ha sido modelado como un sistema lineal, el análisis armónico permite estudiar la propagación de cada armónico en forma independiente o no de las otras.

Luego, las ondas de tensión y de corriente con contenido armónico se definirán como, [3]:

$$v(t) = v_0 + \sum_{h=1}^{\infty} v_h \sqrt{2} \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t + \varphi_h) \quad (1.1)$$

$$i(t) = i_0 + \sum_{h=1}^{\infty} i_h \sqrt{2} \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t + \varphi_h) \quad (1.2)$$

Donde

$v_0, i_0$  son valores de la componente continua

$v_h, i_h$  son valores eficaces del armónico de orden n

$\omega$  es la frecuencia angular

$\varphi_n$  es el desfase de la componente armónica

Podemos expresar el valor rms de la corriente total generada por la carga con contenido armónico como:

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{Amperes} \quad (1.3)$$

Donde  $I_1$  es el valor rms de la componente fundamental y  $I_h$  es la componente de corriente armónica generada por la carga con contenido armónico. Consecuentemente, los armónicos generados pueden incrementar las pérdidas en un sistema eléctrico, ya la corriente rms total incluye el efecto de estos en su cálculo. Para efectos de diseño se puede asumir en la mayoría de los casos que no existe componente en continua o en DC, cuyo efecto es el desplazamiento de la onda en forma vertical. También se puede asumir nulo el desplazamiento angular. Sin embargo en el caso de estudio de un sistema se deben de

tomar en cuenta todos los parámetros a fin de definir con precisión el contenido armónico de la red eléctrica.

### **1.3.2 Efectos sobre los equipos de la red**

De acuerdo a la ecuación (1.3), el contenido de armónicos en un sistema, incrementa el valor rms de la corriente total que circula por cada uno de los componentes que forman parte del sistema eléctrico, lo que implica que cada elemento no solo conducirá la corriente nominal a la que fue diseñado, sino que deberá además conducir la corriente armónica presente. Son estas corrientes armónicas, no consideradas, las que producen sobre calentamiento, sobre cargas, elevaciones de corriente y tensión permanentes en conductores, especialmente el neutro, transformadores, motores de inducción, sistemas de medida, banco de condensadores, sistemas de protección como fusible y relés.

Además, las ondas de tensión y corriente con contenido armónico, no solo trabajan a la frecuencia fundamental, sino con múltiplos de ella, las cuales a frecuencias altas la respuesta del sistema varía manifestándose en fenómenos de inducción de ruidos, interferencia de señales, y la alta probabilidad de que se presente resonancia en serie o en paralelo con elementos del sistema eléctrico, como los equipos de compensación reactiva, o banco de condensadores de corrección del factor de potencia.

El estudio de todos estos efectos depende de muchos factores y muchas veces son difíciles de cuantificar en forma específica; la respuesta en cada uno de los componentes de un sistema eléctrico, es particular, lo que ha llevado al desarrollo de distintas normas y estándares que permitan plantear métodos de evaluación y solución a los efectos en ellos, [5], [6].

#### **1.3.2.1 Efecto en conductores y barras. Barra de neutro**

La corriente continua a través de un conductor produce pérdidas por efecto Joule,  $I^2R$ , donde  $R$  es la resistencia del conductor a corriente continua y la corriente es el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. Sin embargo para corriente alterna, a medida que se aumenta la frecuencia disminuye el área efectiva por donde circula esta, puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior, por lo tanto el valor de la resistencia  $R$  aumenta a medida que aumenta la frecuencia. Por lo tanto,

cuando se maneja corrientes con contenido armónico, el efecto, principalmente de los armónicos de mayor frecuencia será el incremento de las pérdidas por efecto Joule, manifestadas en incremento de calor en los conductores, degradando los mismos y los aislamientos de los mismos al llegar o pasar los límites de temperatura de operación.

En el caso de barras el efecto es similar, pero existe un efecto particular en sistemas con neutro no balanceados, ya que se puede sobrecargar por el efecto de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa que no se llegan a cancelar. Además las componentes de secuencia cero o conocidas como armónicas triplen presentes en sistemas balanceados y no balanceados no se cancelan. Alrededor de este concepto se han desarrollado muchas teorías que recomiendan dimensionar las barras y conductores neutros de modo tal que sean capaces de soportar la misma corriente de fase y las componentes armónicas en secuencia positiva, negativa y cero. Algunos señalan dimensionar estas 1.73 veces la corriente de fase otros señalan como buen criterio de diseño dimensionar al doble de capacidad del conductor de fase principal.

### **1.3.2.2 Efecto en equipos de protección**

Al incrementarse la corriente total rms, por la presencia de armónicos, los fusibles e interruptores termo magnético que tienen como característica de operación el efecto térmico producido por sobrecargas en la red podrían ver comprometido su operación, sino han sido dimensionados adecuadamente en régimen permanente. Es necesario notar que en caso de falla, no se considera el efecto de los armónicos, ya que estos son caso de estudio en estado estacionario y no en estado transitorio.

### **1.3.2.3 Efecto en banco de condensadores**

El primer efecto que se puede tener en los bancos de condensadores es el incremento de la tensión total por componentes armónicas, lo que crea una sobre tensión, al respecto el estándar de la IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-1992" establece para el diseño de banco de condensadores para corrección del factor de potencia dimensionar a 135% de los kVAR nominales, a 110% de la tensión nominal rms y a 180% de la corriente nominal rms, luego la potencia de estos bancos se calcula a partir de.

$$kVA_r = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \quad (1.4)$$

Donde  $V_h$  e  $I_h$  son valores de tensión y corrientes rms.

Otro efecto importante es la resonancia en serie o en paralelo, que se pueda presentar entre la reactancia equivalente del sistema y la reactancia del banco de condensadores, y ya que la onda de tensión y de corriente así como las reactancias son función de la frecuencia, podría entonces existir una frecuencia de sintonización en el que ambas reactancias sean iguales provocando resonancia. Existen dos tipos de resonancia, la resonancia en paralelo y la resonancia en serie.

La resonancia en paralelo, establece al banco de condensadores en paralelo a la carga no lineal y estos dos conectados al sistema eléctrico, si una de las componentes armónicas tiene una frecuencia igual o muy próxima a la frecuencia de resonancia del sistema, entonces las corrientes y voltajes experimentarán un incremento dado que la admitancia equivalente se acerca a cero o la impedancia es muy alta. La resonancia en serie establece al banco de condensadores en serie con la carga no lineal y en serie al sistema eléctrico, al presentarse la resonancia la impedancia equivalente del sistema será muy baja. Por este motivo se recomienda la instalación de banco de condensadores distribuidos y no centralizados a fin de incrementar la frecuencia de resonancia.

#### **1.3.2.4 Efecto en máquinas rotativas**

En el caso de las máquinas rotativas, no solo se incrementarán las pérdidas por efecto Joule  $I^2R$ , tanto en el estator como en el rotor, también disminuye el torque generado. También aumenta la corriente de magnetización, las pérdidas adicionales y las pérdidas en el núcleo, ya que son función de la densidad de flujo magnético en la máquina.

En general las componentes de secuencia positiva producen un torque en el mismo sentido al de rotación mientras que la de secuencia negativa un torque en contra del sentido de rotación, pero estos efectos se llegan a cancelar por lo que no es considerado. Las componentes de secuencia cero se cancelan con la conexión del neutro. Las corrientes armónicas del rotor interactúan con el flujo en el entrehierro produciendo torques pulsantes que comprometen el desempeño de la máquina, además estos torques pulsantes pueden

inducir frecuencias de resonancia mecánicas, lo que consigue desgaste del rotor y otras partes mecánicas.

#### **1.4 Evaluación. Consecuencias de los armónicos sobre los transformadores**

En un sistema eléctrico, los transformadores se diseñan normalmente para condiciones de trabajo con cargas lineales y a frecuencia fundamental, considerando las pérdidas inherentes a estos y una temperatura de operación menor a la temperatura ambiente. Sin embargo la presencia de armónicos en la carga afecta su rendimiento.

##### **1.4.1 Pérdidas en el transformador**

Toda máquina eléctrica real, ve afectado su rendimiento y eficiencia debido a las pérdidas que esta pueda presentar, estas pérdidas producen también calentamiento, factores que determinan la potencia nominal que puede obtenerse de la máquina sin deterioro de sus componentes; debe tenerse en cuenta también las caídas de tensión y las componentes de la corriente debidas a la necesidad de cubrir dichas pérdidas.

El Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, IEEE de sus siglas en inglés a través de los documentos IEEE C57.12.90-1993 y IEEE C57.12.91-1995 buscan clasificar las pérdidas producidas en los transformadores como pérdidas sin carga o en vacío (pérdidas por excitación), pérdidas bajo carga (pérdidas por impedancia), y pérdidas totales (la suma de las pérdidas sin carga y bajo carga)

Las pérdidas en vacío, son propiamente las pérdidas desarrolladas en la rama de excitación del circuito equivalente del transformador y pueden ser tomadas directamente por medición.

Las pérdidas bajo carga a su vez se subdividen en pérdidas en el cobre  $I^2R$  o conocidas como pérdidas por efecto Joule y pérdidas adicionales. Las perdidas adicionales son determinadas por la resta de las perdidas en el cobre  $I^2R$  (calculadas de la resistencia medida) de la medición de perdidas bajo carga (perdidas por impedancia) en la figura 1.1 se muestra el diagrama de clasificación de las pérdidas en transformadores de acuerdo a la IEEE, [7], [8], [9].



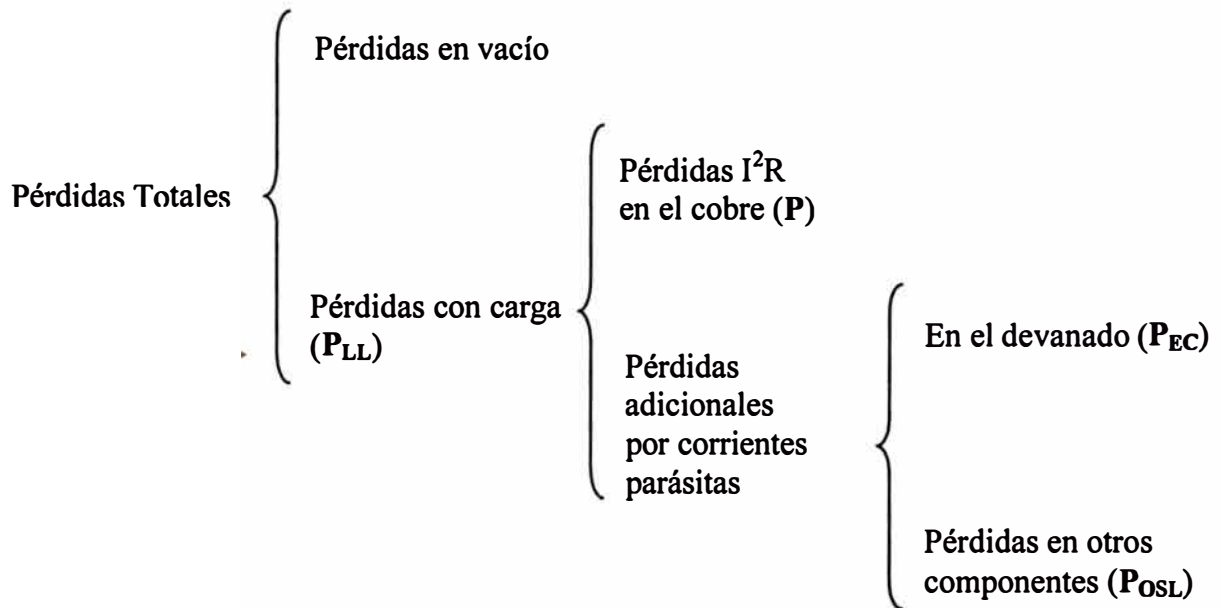


Fig. 1.1 Clasificación de pérdidas en un transformador de acuerdo a la IEEE

Las pérdidas adicionales pueden ser definidas como las pérdidas debido al flujo electromagnético disperso en los devanados, en el núcleo, en partes metálicas como grapas, abrazaderas, paredes del tanque, en las pantallas magnéticas, etc. Por lo que estas pérdidas adicionales se subdividen en pérdidas adicionales en el devanado debidas a la distribución no uniforme de la corriente en los conductores y pérdidas adicionales en otros componentes aparte de los devanados ( $P_{OSL}$ ) debidas a la distorsión del campo magnético producida por la corriente de la carga, [11].

La anterior clasificación de las pérdidas de una máquina es, desde un punto de vista estricto, un tanto artificiosa y difíciles de terminar con cierta exactitud. Se ha visto la subdivisión de las pérdidas en el hierro en pérdidas en vacío y en un incremento que nace con la corriente de la carga, y asimismo la subdivisión de las pérdidas en el cobre en pérdidas ohmicas  $I^2R$  y en un incremento debido a la desigual distribución de la corriente en la sección de los conductores, aunándose estos dos incrementos para formar las pérdidas adicionales en carga: Esta subdivisión obedece a razones prácticas de facilidad de ensayo, y esta justificada por el hecho de que el objetivo principal es el conocimiento de las pérdidas totales y del rendimiento a efectos de comparar distintas máquinas entre sí, teniendo al mismo tiempo valores lo más próximos posible a los reales.

Todas estas pérdidas son consideradas para constituir las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados,  $P_{EC}$ . Las pérdidas totales pueden ser indicadas como:

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad \text{watts} \quad (1.5)$$

Donde

$P_{LL}$  son las pérdidas totales con carga

$P$  son las pérdidas en el cobre por el efecto Joule  $I^2R$

$P_{EC}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados

$P_{OSL}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en otros componentes del transformador excepto los devanados

#### 1.4.2 Efecto de los armónicos sobre las pérdidas en un transformador

Cuando un transformador alimenta una carga, la cual tiene contenido armónico, las componentes de las pérdidas se ven afectadas, debido a la componente armónica de la corriente dada por la ecuación (1.3)

Las pérdidas que se ven afectadas por las componentes de corriente armónica son las pérdidas en el cobre  $I^2R$  y las pérdidas adicionales por corrientes parásitas tanto en el devanado como en otros componentes mecánicos del transformador.

Las pérdidas adicionales en el devanado por corrientes parásitas a la frecuencia fundamental tienden a ser proporcionales al cuadrado de la corriente y al cuadrado de la frecuencia, ecuación (1.6)

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 \cdot h^2 \quad \text{watts} \quad (1.6)$$

Donde

$P_{EC}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados

$P_{EC-R}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a corriente y frecuencia fundamental

$I_h$  corriente de la armónica  $n$ , en amperes

$I_R$  corriente nominal del transformador, en amperes

Esta misma relación se mantiene para corrientes con contenido armónico que incrementarán el valor rms de la corriente. Esta característica cuadrática tiene como

consecuencia el excesivo aumento de estas pérdidas y su efecto en el incremento anormal en la temperatura de los devanados, [15].

Luego, las pérdidas adicionales en las partes estructurales del transformador debido a corrientes parásitas también son proporcionales al cuadrado de la corriente, ecuación (1.7) Sin embargo no son proporcionales al cuadrado de la frecuencia como las pérdidas adicionales en los devanados.

$$P_{OSL} = P_{OSL1} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{I_n}{I} \right]^2 \cdot n \quad (1.7)$$

Donde

$P_{OSL1}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en las partes estructurales del transformador a corriente y frecuencia fundamental

Algunos estudios de fabricantes e investigadores muestran que las corrientes parásitas en los bornes de conexión y partes de la estructura se incrementan por un factor exponencial de 0.8 o menos de la corriente armónica.

Si la corriente de carga tiene contenido armónico, y tiene componente constante o nivel de corriente continua, esta también tendrá efecto sobre las pérdidas del transformador. En el núcleo su efecto es despreciable, sin embargo incrementa la corriente magnetizante y el nivel audible en el transformador.

Las componentes de secuencia cero, en un transformador de configuración delta – estrella circula en el lado estrella a través de las fases y el neutro, pero en el lado delta, esta se queda como una corriente circulante, lo que produce calentamiento en este devanado.

## 1.5 Síntesis. Alcances

Los efectos que tienen las corrientes armónicas sobre el incremento de las pérdidas en los transformadores han sido estudiados por instituciones, fabricantes, empresas de distribución de energía eléctrica y usuarios. Este efecto de sobre calentamiento, debido a la presencia de corrientes armónicas, característica inherente de la carga no lineal que el transformador alimenta, obliga a establecer un método que le permita tener capacidad de sobrellevar este incremento en las pérdidas.

De aquí nace la idea de redimensionar o encontrar una capacidad equivalente en un transformador diseñado para alimentar cargas lineales, de modo tal que el incremento de las pérdidas debido a corrientes armónicas, producto de cargas no lineales, no involucre su funcionamiento y su eficiencia. En todo caso la idea es la de mitigar el efecto y no la causa que los armónicos puedan ocasionar sobre un elemento particular del sistema eléctrico de potencia: el transformador.

Es esta idea, el origen de diversos estándares y normas, que introducen un parámetro, que permita cuantificar el redimensionamiento o que permita encontrar una capacidad equivalente de un transformador que no fue diseñado para trabajar en un ambiente donde la carga presenta contenido armónico.

Este parámetro adopta diferentes nombres y diferentes valores numéricos de acuerdo a la norma o estándar que lo introduzca, algunos guardan estrecha relación de cálculo, pero fundamentalmente apuntan en el mismo sentido a presentar una alternativa de solución al mismo problema y bajo el mismo concepto teórico de encontrar una capacidad equivalente para un transformador.

Son los estándares americanos de la Underwriters Laboratory UL, a través del documento UL 1562-1994 y el documento 1561-1994 y el estándar americano del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, IEEE de sus siglas en inglés a través del documento IEEE Std C57.110-1998 "IEEE Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents" los que introducen el término, sobre el cual se fundamenta este informe; este es el Factor K. En estos se detalla, los fundamentos teóricos acerca del cálculo de las pérdidas en un transformador, el efecto de las corrientes armónicas sobre estas pérdidas y el método para calcular a través del factor K, la capacidad equivalente de un transformador. También indican las restricciones para la aplicación de las normas y los alcances. Sin embargo no plantean técnicas de construcción o diseño de transformadores, el alcance neto de estas normas es el cálculo de la capacidad equivalente. Los criterios de diseño para la optimización en la construcción de transformadores que sean capaces de trabajar alimentando cargas no lineales con contenido de armónicos son dados por los fabricantes, empleando materiales y técnicas constructivas que mejoran el desempeño y eficiencia.

Otras normas, también exponen la necesidad de introducir un método para hallar la capacidad equivalente de un transformador bajo corrientes con contenido armónico; una de ellas es dada por la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC por sus siglas en inglés, a

través del documento IEC-BS 7821 Part 4, en la cual también establece un parámetro similar al factor K. Las normas dada por la UTE en el documento C15-112, o las normas dadas UNE, en los documentos UNE 21428-4 y UNE 21538-3 también establecen criterios similares.

Estas normas, no han sido motivo de estudio o base para fundamentar este informe, sin embargo se hace mención de ellas, descripción breve y presentación del parámetro equivalente al factor K, [12].

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En el capítulo 1 se expuso la problemática actual, que afecta a los sistemas eléctricos y a los componentes que lo forman, en particular se manifestó el efecto de los armónicos en los transformadores, y las consecuencias que ello implica en su rendimiento y eficiencia al incrementar las pérdidas naturales. En el afán de poder proponer un método que permita a los transformadores poder lidiar con estas perturbaciones sin ver comprometido su rendimiento, estudios por parte de instituciones de prestigio, fabricantes, ingenieros diseñadores y usuarios convergen en una misma idea, y es la de encontrar un modo de que el transformador pueda alimentar una carga con contenido armónico y el efecto de este sobre el transformador. Este método hace referencia a re calcular la capacidad equivalente de un transformador que fue diseñado para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental en condiciones de carga nominal capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobre calentarse ni deteriorar su vida útil para que pueda trabajar en nuevas condiciones bajo cargas con contenido armónico.

Existen diversos métodos encontrados de los cuales se hará mención, pero se profundizará en el que es base fundamental en este informe, y es el que define al factor  $K$ , como método de caracterización del contenido de armónicos de una determinada carga y el efecto que esta tendrá sobre el transformador que la alimenta.

El método sobre el cual se fundamenta, es dado por el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, IEEE, a través del estándar IEEE Std. C57.110-1998 “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”

También será motivo de mención los métodos brindados por instituciones como el Comité Electrotécnico Internacional, IEC, o por los Comités Técnicos de Normalización de España, UNE, o por la Administración de Usinas y Transmisiones Eléctricas de Uruguay, UTE. Los cuales también establecen criterios similares para establecer métodos que permitan a los transformadores alimentar cargas con contenido armónico.

## 2.1 Capacidad equivalente del transformador

Dado el efecto de las corrientes armónicas sobre las pérdidas en un transformador, y la consecuencia de un incremento anormal de temperatura en los devanados, se ve necesario establecer la capacidad equivalente de un transformador para que pueda mitigar el efecto que estas corrientes armónicas le pueda causar. El estándar IEEE C57.110-1998 (2), establece este método, partiendo de los siguientes alcances:

- a) El transformador, excepto por la distribución de corriente armónica de la carga, se presume a ser operada de acuerdo a “condiciones de servicios usuales” señaladas en el estándar IEEE C57.12.00-1993 o en el estándar IEEE C57.12.01-1998. Esto es, con corriente alterna a una frecuencia fundamental de 50 o 60Hz, a carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador deberá ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobre calentarse ni deteriorar su vida útil (8)
- b) Se asume que el transformador sea capaz de alimentar a una carga con cualquier contenido armónico, siempre y cuando las pérdidas totales bajo carga, las pérdidas bajo carga en cada devanado y la densidad de pérdidas en la región de mayores pérdidas por corrientes parásitas no excedan: los niveles para plena carga, frecuencia nominal y condiciones de diseño sinusoidal. Siendo la condición que limita más la capacidad del transformador la densidad de pérdidas en la región donde existen más altas pérdidas por corrientes parásitas en el devando.

## 2.2 Pérdidas en por unidad en el transformador

Debido a que en un sistema eléctrico existen transformadores de capacidades distintas entre sí, la impedancia interna de cada uno varía en gran medida, es por ello que el uso de unidades relativas que permita regularlas dentro de rangos estrechos se usa para efectos de estudio y cálculo. Este método de cálculo de unidades relativas es el sistema por unidad (pu) de medida. (11)

Se toma como corriente base a la corriente nominal del transformador, y como densidad de pérdidas base a la densidad de pérdidas por efecto Joule  $I^2R$  a la corriente nominal. Luego, la ecuación (1.5) en condiciones de carga nominal, y las bases planteadas puede re escribirse en el sistema por unidad como:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad pu \quad (2.1)$$

Donde

$P_{LL-R}$  son las pérdidas totales con carga a condiciones nominales en pu

$P_{EC-R}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados en pu

$P_{OSL-R}$  son las pérdidas por corrientes parásitas en otros componentes del transformador excepto los devanados en pu a condiciones nominales.

Las pérdidas por efecto Joule  $I^2R$  a carga nominal son uno por unidad. Para corrientes de carga no sinusoidal, la ecuación para la corriente rms, dada en la ecuación (1.3), tomando como corriente de base la corriente nominal del secundario del transformador,  $I_R$ , a frecuencia fundamental, dará:

$$I(pu) = \frac{I}{I_R}(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2} \quad pu \quad (2.2)$$

Donde:

$$I_h(pu) = \frac{I_h}{I_R} \quad pu \quad (2.3)$$

Donde:

$I_h$  es la corriente en amperios del armónico h

$I_h(pu)$  es la corriente en pu del armónico h

Por lo tanto, la corriente I en el sistema en pu se puede expresar como:

$$I(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2} \quad pu \quad (2.4)$$

Luego la ecuación (1.6) en el sistema en pu y con las bases descritas, puede ser escrita como:

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 \cdot h^2 \quad pu \quad (2.5)$$



Reordenando la ecuación (2.5), obtenemos la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados totales,  $P_{EC}$ , y las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a frecuencia fundamental, no considerando armónicos,  $P_{EC-R}$ , [1], [12], [13], [14].

$$\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 \cdot h^2 = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} pu \quad (2.6)$$

Este coeficiente de relación de pérdidas por corrientes parásitas en devanados indica el número de veces que se incrementan estas respecto a la fundamental.

### 2.3 Factor K. Definición de Underwriters Laboratory

A partir de la ecuación (2.6), Underwriters Laboratory, UL, la National Recognized Testing Laboratory, NTRL, y fabricantes definieron el factor K, como:

$$Factor K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 \cdot h^2 = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} pu \quad (2.7)$$

Establecido a través de las normas UL 1561-1994 “Dry-Type General Purpose and Power Transformer” y UL 1562-1994 “Transformer, Distribution, Dry-Type”, párrafo 7B.1 agregado a UL 1562 en mayo 12 de 1992, para transformadores de potencia secos, para indicar su aplicabilidad para corrientes de carga no lineales. Se debe acotar, que la ecuación (2.7) toma como base a la corriente rms nominal del transformador.

Luego, el efecto de los armónicos sobre el transformador repercutirá sobre las pérdidas del mismo, siendo la de mayor consideración las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados, las cuales producen sobre calentamiento; al igual que las otras pérdidas, las cuales no son consideradas debido a que en presencia de armónicos no aumentan su valor considerablemente. El factor K, describe la capacidad del transformador para alimentar diversos grados de carga no lineal sin exceder los límites de elevación de temperatura promedio.

La UL, establece que los transformadores con un factor K establecido, no han sido evaluados para ser usados con cargas con contenido armónico, donde la corriente rms de cualquier armónico en particular mayor al décimo, sea mayor que 1/h veces la corriente

rms fundamental. Esta es la única restricción que ofrece la norma, en la aplicación del método a un sistema eléctrico particular.

Las ecuaciones anteriormente escritas toman como corriente de base a la corriente rms nominal del transformador,  $I_R$ . Existe un método de normalización al método de la UL, y es el de usar como corriente de base a la corriente de la carga a frecuencia fundamental,  $I_1$ , esto debido a efectos prácticos, pues los equipos de medición de armónicos los muestra en el sistema por unidad tomando como base la corriente rms de la carga y no la corriente rms nominal del transformador. Los resultados resultan ser equivalentes, pues se trata de cambio de base, y numéricamente no son muy distintos. Por este motivo, la ecuación (2.7) se puede re escribir, tomando como base la corriente rms de la carga, de modo que:

$$Factor\ K = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h(pu)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2(pu)} = \frac{1}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2(pu)} \cdot \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} \quad (2.8)$$

Luego de la ecuación (2.1), despreciando las pérdidas por corrientes parásitas en partes estructurales del transformador,  $P_{OSL}$ , se la puede multiplicar por el cuadrado de la corriente total de la ecuación (2.4), obteniendo:

$$P_{LL-R}(pu) \cdot I^2(pu) = I^2(pu) + \left( \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2(pu) \cdot h^2 \right) \cdot P_{EC-R}(pu) \quad (2.9)$$

De donde:

$$P_{LL-R}(pu) \cdot I^2(pu) = P_{LL}(pu) \quad (2.10)$$

Reemplazando la ecuación (2.8) y (2.10) en la ecuación (2.9) se tiene que:

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) \cdot [1 + K \cdot P_{EC-R}(pu)] \quad pu \quad (2.11)$$

A partir de la ecuación (2.11), podemos encontrar la corriente máxima a frecuencia fundamental que puede soportar el transformador, este valor es siempre menor a la unidad, y se interpreta como la capacidad máxima de carga sinusoidal que puede alimentar el transformador dado que dicha carga tiene contenido armónico, luego tendremos que:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}(pu)}{1 + K \cdot P_{EC-R}(pu)}} \quad (pu) \quad (2.12)$$

El valor de  $P_{EC-R}$ , lo dan los fabricantes a partir de las pruebas a los transformadores. Para transformadores en el rango de 15 a 225kVA, las pérdidas  $P_{EC-R}$  están entre el 5% y 10%. Otros autores establecen los valores de  $P_{EC-R}$  de acuerdo a la tabla 2.1:

TABLA N° 2.1 Pérdidas por corrientes parásitas en el devanado

Tipo	MVA	Tensión	% $P_{EC-R}$
Seco	$\leq 1$		3 - 8
	$\geq 1.5$	5kV (AT)	12 - 20
	$\leq 1.5$	15kV (AT)	9 - 15
En aceite	$\leq 2.5$	480V	1
	2.5 a 5	480V	1 - 5
	$> 5$	480V	9 - 15

La ecuación (2.11) nos da el valor de la corriente rms máxima a frecuencia fundamental que aceptará el transformador ante cargas con contenido de armónicos, se puede expresar como un porcentaje de disminución de la capacidad nominal, de acuerdo a:

$$Disminución = [1 - I_{max}(pu)] \cdot 100\% \quad (2.13)$$

Esta característica se puede mostrar a continuación en la figura 2.1, en que la disminución de la capacidad queda en función del factor K de la carga, [13], [15].

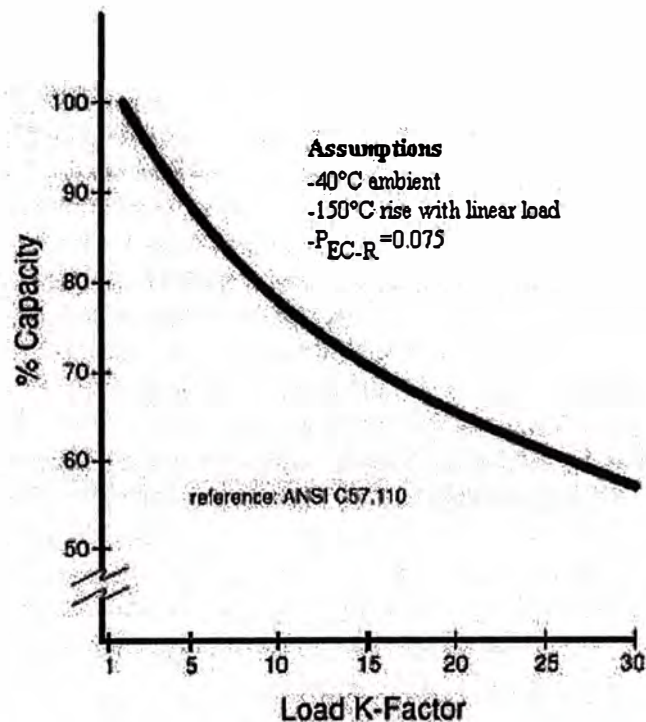


Fig. 2.1 Característica de la reducción de capacidad del transformador en función del factor K de la carga. Libert Corporation

La UL, dentro de la misma norma, y basadas en estudios de campo, ha clasificado las diversas cargas conocidas y las a agrupado y clasificado de acuerdo a la aplicación, asignando a cada grupo un valor para el factor K típico. Esto como una ayuda en el diseño e implementación de sistemas eléctricos, cuando no se puede tener acceso a mediciones de campo, pero se conoce el tipo de carga que se va a alimentar. En la tabla 2.2, se muestran cargas típicas, como sistemas de protección ininterrumpida UPS, equipos de soldadura, PLC, variadores de velocidad, etc. Cargas típicas en el actual mercado, [16], [17].

TABLA 2.2 Cargas típicas con factor K

<b>Table 2 Load</b>	<b>K-Factor</b>	<b><math>I_{Lk}</math></b>
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

Reprinted with permission from EDI Magazine

Un problema asociado al cálculo del Factor K, es la selección del rango de frecuencias de los armónicos que pueden ser incluidas en el mismo. Algunos diseñadores realizan los cálculos incluyendo hasta el 15vo armónico, otros hasta el 25avo armónico y algunos

incluso hasta el armónico 50. Para la misma carga, cada uno de estos cálculos puede dar resultados en el valor del Factor K significativamente diferentes, debido a que cada nivel de corriente muy pequeña asociada con los armónicos mas altos, al ser multiplicados por el numero de armónico al cuadrado (por ejemplo  $50^2 = 2500$ ), puede aumentar significativamente el Factor K. Basados en las asunciones fundamentales del estándar, es razonable de limitar el cálculo del Factor K a corrientes armónicas menores que el 25avo armónico.

Esto tiene fundamento en que, cuando la corriente armónica fluye a través de los devanados del transformador esta genera un flujo magnético a cada una de las frecuencias de los armónicos (h), con la intensidad del flujo magnético esta en proporción directa a cada frecuencia. Por encima del 15vo armónico, este flujo produce calentamiento por pérdidas por corrientes parásitas del tipo exponencial por  $h^2$  en cualquier parte metálica con sección transversal significativa.

A grandes frecuencias armónicas la relación es no más exponencial, pero es inversa, y definida por  $1/h$ . Entre los dos límites este es medianamente lineal e igual a h.

#### **2.4 Factor por pérdidas armónicas. Definición del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos IEEE**

La IEEE, a través de su estándar IEEE C57.110-1998 “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents” presenta un método muy similar al planteado por la UL, que guardan estrecha relación con la normalización del mismo.

Acá se utiliza como corriente base, la corriente rms de la carga, no se emplea la corriente nominal del transformador, pues por razones muy prácticas es más sencillo conseguir las mediciones de la corriente de carga y todo su contenido armónico a través de los instrumentos de medida. En este caso, también establece un número, conocido como el factor de pérdidas armónicas,  $F_{HL}$ , que define las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a total y a frecuencia fundamental, y la relación de incremento que existe entre ellos, a través de un cociente, como se muestra en la ecuación (2.14)

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h (pu)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 (pu)} \quad (2.14)$$

Donde:

$P_{EC}$  son las pérdidas totales por corrientes parásitas en los devanados

$P_{EC-O}$  son las pérdidas por corrientes parásitas a frecuencia fundamental (excluyendo a los armónicos) tomando como base la corriente rms de la carga

$I_h$  es la corriente rms del armónico h, tomando como base la corriente de la carga

Existe muy estrecha relación entre ambos métodos, la ecuación (2.15) muestra la relación que existe entre ambos términos: el factor K y el factor de pérdidas armónicas.

$$Factor K = \left[ \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] \cdot F_{HL} \quad (2.14)$$

El factor de pérdidas armónicas,  $F_{HL}$ , es función de la distribución de corriente armónica, y es independiente de la magnitud relativa de las mismas. El factor K, en cambio, es dependiente tanto de la magnitud y de la distribución de la corriente armónica. Los cálculos del factor K, dependen del valor de la corriente del secundario del transformador. Numéricamente llegan a ser iguales cuando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las corrientes armónicas es igual a la corriente nominal del secundario del transformador.

## 2.5 Factor K del sistema europeo. Definición del Comité Electrotécnico Internacional IEC

La IEC, ataca la misma problemática de encontrar un método que permita a un transformador poder mitigar el efecto de la carga con contenido armónico no contemplado en el diseño inicial. Y apunta en la misma dirección que los estándares americanos; define un número que también se denomina factor K, a través del documento IEC-BS 7821 Part 4,

el cual establece un método para reducir la capacidad nominal de un transformador estándar, que no haya sido diseñado para el manejo de corrientes parásitas. Este método se define en la ecuación (2.16)

$$K = \left[ 1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left( \frac{I_2}{I} \right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{n=N} \left( n^q \cdot \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0.5} \quad (2.16)$$

Donde:

$e$  es el cociente de las corrientes parásitas a la frecuencia fundamental, divididas entre las pérdidas debidas a una corriente DC igual al valor rms de la corriente sinusoidal, ambas a temperatura referencia.

$n$  es el orden del armónico

$I$  es el valor RMS de la corriente sinusoidal, incluyendo todos los armónicos, dado por:

$$I = \left( \sum_{n=1}^{n=N} (I_n)^2 \right)^{0.5} = I_1 \cdot \left[ \sum_{n=1}^{n=N} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (2.17)$$

$I_n$  es la magnitud del n-esimo armónico

$I_1$  es la magnitud de la corriente fundamental

$q$  es una constante exponencial, que es dependiente del tipo de arrollamiento y la frecuencia. Valores típicos son 1.7 para transformadores con conductores de sección circular o sección rectangular cruzada/transpuesta en ambos arrollamientos, y 1.5 para estos con arrollamientos de bajo voltaje.

Textualmente, al número establecido por la UL, se le conoce como K-Factor en inglés y al número establecido por la IEC, se le conoce como Factor K.

El factor K, de la IEC, establece valores superiores a la unidad, y la inversa de este número multiplicado por el 100% indica a que valor debe de llegar la carga sinusoidal en el transformador para evitar sobre calentamientos. Por ejemplo, un factor K de 1.29, indicara que el transformador puede alimentar cargas lineales hasta 77.52% de su capacidad.

## 2.6 Factor K del sistema español. Definición de los Comités Técnicos de Normalización de España, UNE



Dentro de la búsqueda de métodos, las normas españolas UNE 21428-4 y UNE 21538-3 y otras similares como la norma técnica uruguaya UTE C15-112, también presentan términos que permitan encontrar una capacidad equivalente del transformador. La ecuación (2.18), muestra al término  $k$ , en función de las formas de onda características de la carga del sistema eléctrico, un criterio a tener en cuenta si se conoce estas características.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \cdot \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1.6} \cdot T_h^2 \right)}} \quad (2.18)$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (2.19)$$

Donde

Para corrientes “de forma rectangular” (espectro en  $1/h$  (\*)):  $k = 0,86$

Para corrientes tipo convertidor de frecuencia (THD a 50%):  $k = 0,80$

(\*) En realidad, la forma de la señal de corriente se aproxima a una forma rectangular. Este es el caso de todos los rectificadores de corriente (rectificadores trifásicos, hornos de inducción)

Se puede señalar, que los métodos presentados son una caracterización del contenido armónico de una carga, sin embargo este no es el único parámetro que las caracteriza, parámetros como la distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente también son estudiadas, pero la falta de uno no necesariamente es la carencia del otro. Se puede presentar un sistema en el que se ha aplicado un buen criterio de diseño para la selección de un transformador para una carga con un factor  $K$ , pero la distorsión de tensión permanece esencialmente no afectado, sometiendo a las cargas a una excesiva distorsión de tensión. Los datos reflejan el hecho de que mientras exista diversidad de ángulos de fase de la carga y resulte en corrientes de bajo contenido de armónicos, esta no será la única razón para reducir niveles de distorsión de corriente. Son términos íntimamente ligados y ambos representan el contenido de armónicos, y deben ser tomados en cuenta



El factor K, aún no ha considerado dentro de las normas peruanas, en el tema de calidad de energía y armónicos el parámetro que la rige es el índice de distorsión armónica. Para efectos de diseño y evaluación de sistemas eléctricos donde exista contenido de armónicos, un factor importante a tomar en cuenta también debería ser el efecto que causan las armónicas sobre los transformadores y los métodos que existen para mitigar este efecto. El estándar mas utilizado en la escena mundial es el de la UL, y puede ser aplicado en los diseños nacionales, [18], [19], [20], [21], [22].

## **CAPITULO III**

### **MEDICIÓN DE ARMÓNICOS. FACTOR K**

Las características de la corriente no sinusoidal de la carga deben ser definidas en términos de la magnitud de la componente fundamental de frecuencia o la magnitud de la corriente total rms. Cada componente armónica de la frecuencia también debe ser definida de las mediciones en el sistema de potencia. Adicionalmente, la información de la magnitud de la densidad de pérdidas por corrientes parásitas en los devanados debe estar disponible.

Para la medición de armónicos, se definen diferentes regiones de funcionamiento denominadas ventanas. Estas ventanas son períodos de tiempo correspondientes a 10 ciclos de red (200mS); con la finalidad de proporcionar una resolución de 5Hz para la transformada de Fourier. Cada una de estas ventanas o periodos de tiempo corresponderá a una situación o modo de operación de la carga en función de las perturbaciones medidas en esta ventana.

Los armónicos producen distorsión en estado estacionario de señales de tensión o corriente cuando son comparados con una onda sinusoidal pura. Para determinar la presencia de armónicos en un sistema eléctrico existen pasos que establecen un método o procedimiento para la identificación del fenómeno (23). En el anexo A, se muestra una ficha que establecá un procedimiento para la determinación y medición de armónicos. .

#### **3.1 Indicios de presencia de armónicos**

Antes de adquirir equipamiento costoso para la medición de armónicos, varias tareas sencillas pueden ser efectuadas para determinar la presencia de armónicos. Esta medición requiere dispositivos True-rms y convencionales. Lo primero es definir una descripción de la empresa y de la instalación, sistema de distribución, topología de la red. En el caso de sistemas trifásicos a cuatro hilos, la medición de la corriente del neutro nos dará un buen indicio, si esta es considerablemente elevada respecto al valor estimado por corrientes de fase no balanceadas, cave la posibilidad de tener gran contenido de armónicos de secuencia

cero. Otros síntomas de presencia de armónicos en la red es una inexplicable sobre temperatura en los transformadores, la distorsión de voltaje y un gran factor de cresta.

En el caso de que este procedimiento general muestre problemas o incumplimiento de las normas de calidad del suministro eléctrico se aplican otros procedimientos particulares.

### **3.2 Espectros de armónicos generales**

Si hay presencia de armónicos en el sistema de potencia, entonces una investigación adicional requiere el uso de un analizador de armónicos. Como un dispositivo que pueda proveer información específica acerca de los niveles de armónicos. Algunos de estos solo proveen de la distorsión armónica total (THD), mientras que otros proveen el THD y un espectro completo de armónicos. Este espectro es muy útil y caracteriza completamente a la carga, permitiendo determinar la contribución de cada uno de los armónicos a la distorsión total de corriente y tensión

Los espectros de armónicos pueden ser muy útiles en lograr ver dentro del tipo general de carga(s) cual puede ser la que contribuye a la distorsión total.

Los analizadores de armónicos pueden medir la amplitud, el ángulo de fase de una función periódica, la distribución de potencia de una señal en función de la frecuencia, proporcionando el espectro lineal de la señal observada. La IEC, a través de su estándar IEC 61000-4-7 “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto” establece los requerimientos que deben cumplir estos equipos para el correcto análisis de las señales de onda con contenido armónico. La figura 3.1, muestra el diagrama de bloques de un analizador de armónicos; es usado para la medición del valor de cada armónico usando la transformada discreta de Fourier, con una resolución de 5Hz, debido a la ventana de medición de 200ms, donde son agrupados y luego atenuados a través de un filtro de 1.5 segundos. Es aplicado a equipos digitales con capacidad de análisis de tipos digital, y en tiempo real.

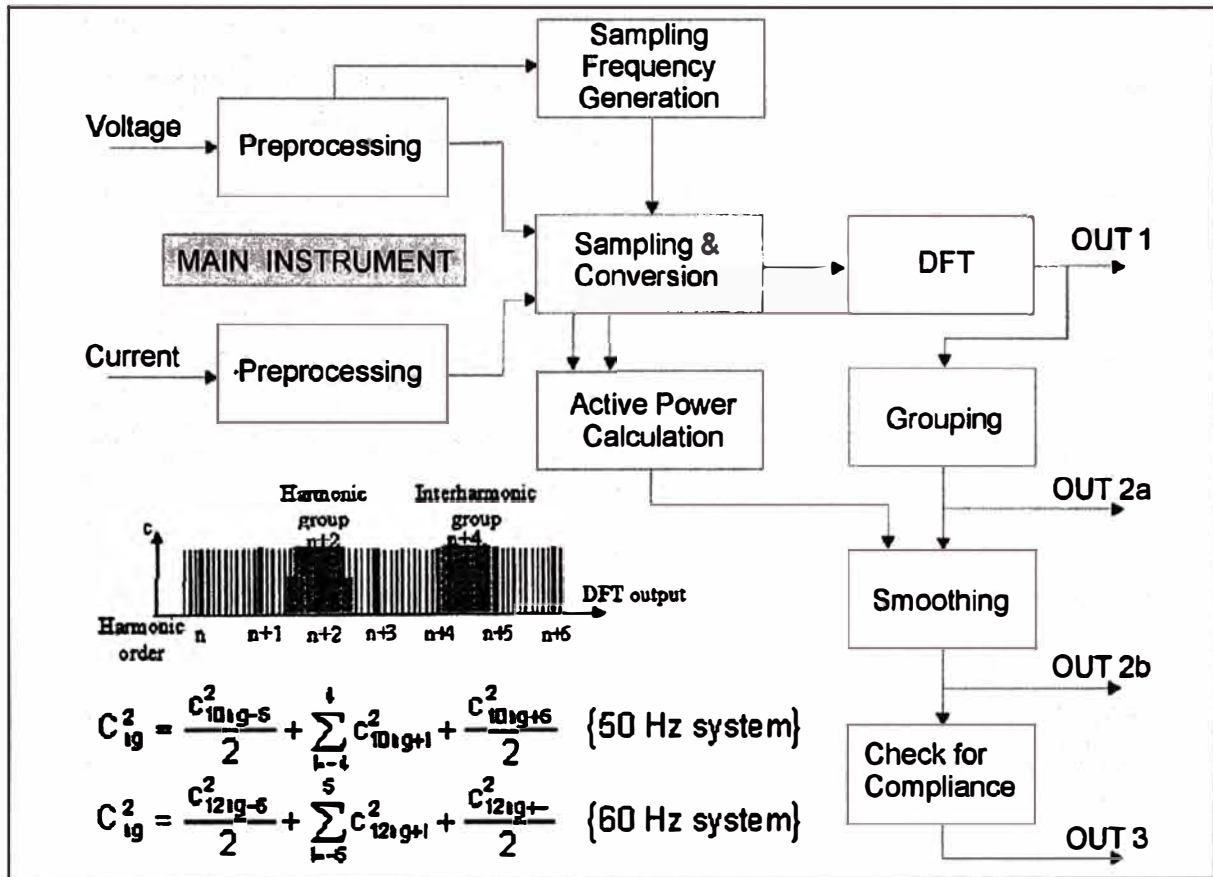


Fig. 3.1 Diagrama de bloque de un analizador de armónicos, según la IEC 61000-4-7 Segunda Edición.

El análisis digital puede ser utilizado con dos técnicas básicas:

- Por medición de un filtro digital. En el sistema para una medición particular, el rango de frecuencias será el conjunto de mediciones contenidas en los filtros digitales para dicho rango. También, el ancho de banda varía para optimizar la captura de pequeños armónicos cuando se está en presencia de una fundamental muy grande.
- Técnica de la Transformada de Fourier Rápida. Estos métodos en tiempo real son muy rápidos, ya que realizan un análisis del espectro permitiendo la evaluación de un gran número de funciones.

Para mediciones exactas de armónicos, los siguientes requerimientos importantes deben ser encontrados: Exactitud, el instrumento debe utilizar la medición de una componente armónica con un error compatible con los límites permisibles. Es razonable usar un instrumento con una incertidumbre no mayor al 5% del límite permisible. Y selectividad, es una indicación de esta habilidad para separar los componentes armónicos a diferentes frecuencias. Una manera práctica de asegurar una buena selectividad es definir los requerimientos para una mínima atenuación de la frecuencia inyectada, mientras el

instrumento es situado (afinado) a una frecuencia  $f_h = 60$  Hz.

En muchas aplicaciones, la corriente fundamental puede ser mucho mayor en comparación a las corrientes armónicas. Las corrientes armónicas pueden ser lo suficientemente significativas para causar serias distorsiones. En tales situaciones, el rango dinámico requerido por la vigilancia armónica global en un sistema de potencia se hace importante. Casi todos los dispositivos para medir armónicos pueden encontrarse en un mínimo de 60 dB (0.1% de la fundamental).

### **3.3 Espectro de impedancias (Barrido en frecuencia)**

La última técnica a ser examinada es el espectro de impedancia. Este método toma los datos de tensión y corriente armónica y grafica la impedancia versus la frecuencia del sistema de potencia. Este provee de información útil respecto a la respuesta en frecuencia del sistema, puntos de resonancia, y problemas potenciales debido a la distorsión armónica. Para generar el espectro de impedancia, la data de corriente armónica deseada y la diferencia en la data de tensión armónica en el punto de interés necesita ser medido.

El ancho de banda del instrumento afectará fuertemente la lectura, especialmente cuando los armónicos sean fluctuantes. Es recomendable que sean usados instrumentos con un ancho de banda constante para un rango completo de frecuencias. El ancho de banda puede ser de  $3 \pm 0.5$  Hz entre los puntos a  $-3$  dB con una atenuación mínima de 40 dB a una frecuencia de  $f_h + 15$  Hz. En situaciones en las que los interarmónicos y transitorios estén presentes, un ancho de banda más grande causará mayores errores positivos.

### **3.4 Medición del factor K**

La medición del factor K, propiamente dicha, se obtiene en forma indirecta. Aunque existen instrumentos que pueden mostrar este valor directamente. Los instrumentos presentan los valores de las componentes armónicas en por unidad, tomando como base la corriente rms de la carga a frecuencia fundamental, por lo tanto el factor K, calculado corresponderá al método normalizado de la UL, y la IEEE. Los criterios para la medición del factor K, dependerán entonces de los criterios y normas usados para la medición de armónicos, de ahí su estrecha relación de estudio.

El valor hallado, caracteriza a la carga, mas no al transformador que la alimenta. A partir de este valor se podrá determinar dentro de la lista de la UL, un transformador con un factor K, por encima del calculado y que sea normalizado.

La marca Fluke, tiene instrumentos sencillos, tipo pinza amperimétrica que permiten obtener el valor del factor K en forma inmediata, otro modo es calculando en forma manual o a través de un programa computacional y a partir del espectro de armónicos hallado por un analizador de redes.

## **CAPITULO IV**

### **EVALUACIÓN DEL FACTOR K. APLICACIÓN**

Se ha determinado que el factor K, es un parámetro que junto a otros caracteriza el contenido armónico de la corriente en un sistema eléctrico. Y que este factor, permite re considerar la capacidad nominal del transformador que provee de energía a esta carga particular, puesto que este inusual contenido armónico tiene repercusiones en distintos elementos del sistema eléctrico, en especial en el transformador. Y aún mas, el contenido armónico incrementa las pérdidas que por si mismo presentaba el transformador, siendo la mas afectada y de mayor consideración las pérdidas en los devanados por corrientes parásitas.

El factor K, entonces define, como el contenido de armónicos incrementa las pérdidas en los devanados k veces las pérdidas como sino estuviesen presentes los armónicos, es decir a frecuencia fundamental. Determinar el factor K, permite conocer cuantas pérdidas ocasionaran las corrientes armónicas, y permite seleccionar el transformador adecuado para alimentar la carga nominal y su efecto sobre él. El transformador seleccionado con un factor K mayor al factor K de la carga, lo distinguirá sus datos de placa.

Los fabricantes además de considerar la re-categorización de la potencia nominal del transformador, añaden técnicas constructivas a estos transformadores los que le permiten, un mejor rendimiento, una mayor eficiencia, una reducción de volumen y una reducción en costos de fabricación.

#### **4.1 Técnicas constructivas**

##### **4.1.1 Núcleo**

Las pérdidas en el núcleo se ven afectadas por la distorsión de tensión, que incrementa la densidad de flujo en el núcleo, incrementando las pérdidas, la corriente de magnetización, el ruido audible, y sobre calentamiento. Para reducir la densidad de flujo, se considera un

diseño del núcleo de baja inducción, para esto se emplea láminas de acero de mayor grado de grano orientado, como el tipo 27 ZH 100 o el H-1 o acero manético M6.

#### 4.1.2 Devanados secundarios

Los devanados, que fueron diseñados para trabajar y soportar pérdidas adicionales con ondas puramente sinusoidales, al estar sometidos a los armónico, y al aumentar la frecuencia y manteniendo la corriente rms igual al valor de la corriente continua, disminuye el área efectiva por donde circula, puesto que la densidad de corriente crece en la periferia interior, efecto Skin. Por lo tanto la resistencia a corriente alterna es mayor que a corriente continua a medida que aumenta la frecuencia. Para compensar esto, lo que se busca es laminar el conductor, de modo que las corrientes de Foucault, encuentren un área efectiva dividida en secciones más pequeñas, usando conductores como se muestra en la figura 4.1, donde se usa conductores paralelos aislados entre sí, y técnicas de interpolación y transposición de conductores.

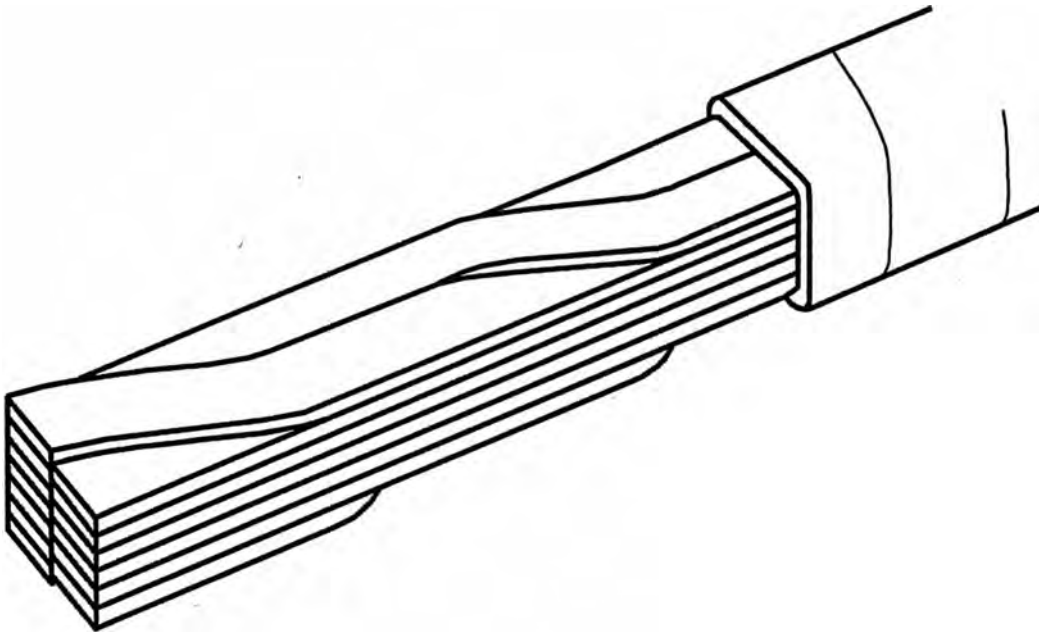


Fig. 4.1 Conductor continuo transpuesto. Cooper Development Association

#### 4.1.3 Devanados primarios

Usualmente los transformadores de distribución, tienen configuración en el primario en delta, por lo que las componentes de secuencia cero o triplens de los armónicos se reflejan



en ese lado, quedando como corrientes circulantes induciendo pérdidas y calentamiento adicional. Por este motivo, se sobredimensiona los conductores del devanado primario, para que pueda soportar estas corrientes.

#### 4.1.4 Conductor neutro

En el conductor neutro las corrientes armónicas son aditivas. En el caso de las componentes de secuencia positiva y negativa, se cancelarán entre sí solo si el sistema es balanceado. Las componentes en secuencia cero no se anulan, y circulan a través del neutro.

Por este motivo se sobredimensiona el conductor neutro, algunos autores señalan dimensionar el conductor neutro 1.73 veces del conductor de fase, pero un buen criterio de diseño para el conductor neutro es duplicar el tamaño respecto al de fase. Igualmente la ferretería que sostiene a las barras de neutro debe de incrementar su tamaño al doble.

#### 4.1.5 Pantallas electrostáticas

Las pantallas electrostáticas son colocadas entre el devando primario y secundario del transformador y son aterradas. La razón es que la proximidad entre el primario y secundario da origen a la capacitancia del modelo fundamental, figura 4.2, y ruidos de alta frecuencia pueden usar esta vía para reflejarse entre ambos devanados.

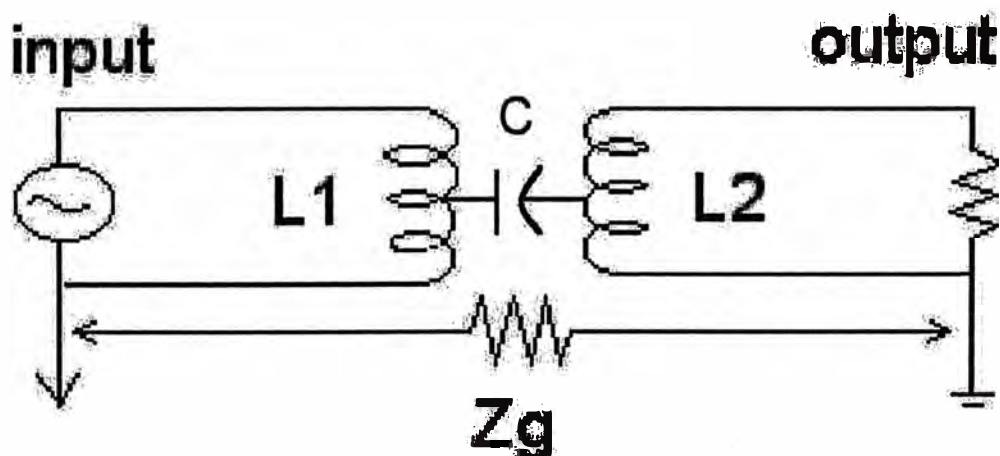


Fig. 4.2 Modelo del transformador, donde se presenta el efecto capacitivo entre los devanados primario y secundario.



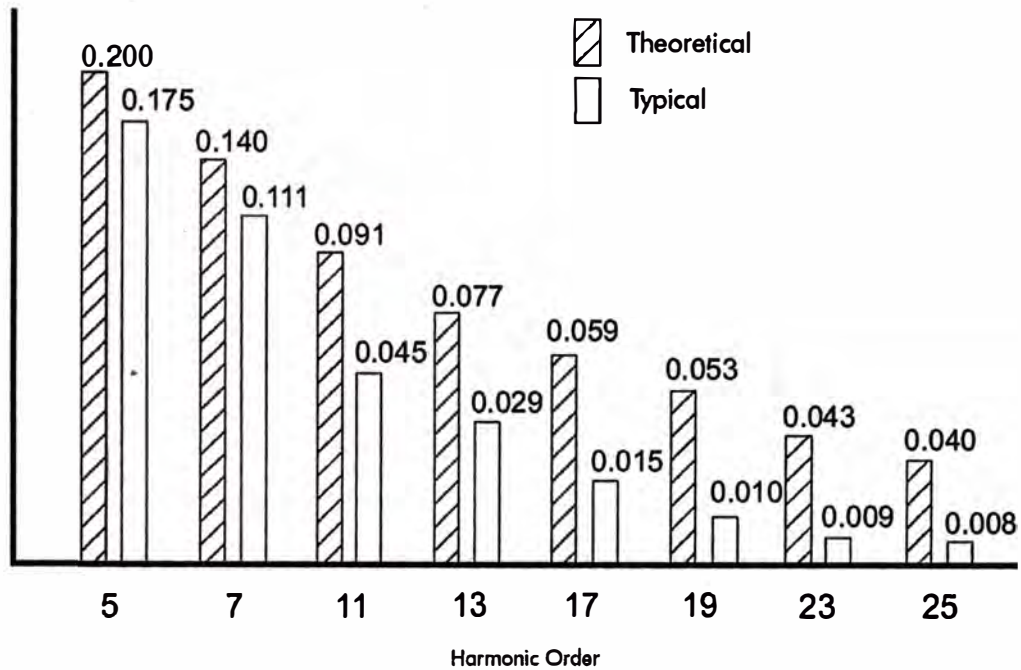


Fig. 4.4 Valores reales y teóricos de corrientes armónicas generadas por un inversor de seis pulsos

La tabla 4.2, muestra las mediciones de los armónicos hasta el 25vo armónico, expresado en por unidad, tomando como base la corriente rms de la carga a frecuencia fundamental.

TABLA N° 4.2 Cálculo del factor K

Número de armónico	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	$I_h/I$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 \times h^2$
1	1.000	1.0000	0.9606	0.9227	0.9227
5	0.200	0.0400	0.1921	0.0369	0.9227
7	0.140	0.0196	0.1345	0.0181	0.8862
11	0.091	0.0083	0.0874	0.0076	0.9246
13	0.077	0.0059	0.0740	0.0055	0.9246
17	0.058	0.0034	0.0557	0.0031	0.8971
19	0.056	0.0031	0.0538	0.0029	1.0446
23	0.043	0.0018	0.0413	0.0017	0.9025
25	0.040	0.0016	0.0384	0.0015	0.9227
	Sum $(I_h/I_1)^2$	1.084			
	$I$ (rms) =	1.041			
				<b>Factor K =</b>	<b>8.3476</b>

Este es el resultado del factor K de la carga, por lo tanto se podría seleccionar un transformador estandarizado con factor K igual a nueve, para alimentar dicha carga.

Luego si para el mismo ejemplo consideramos el estándar IEC, calculamos en la tabla 4.3, el valor del factor K, considerando el exponente  $q = 1.7$  y el coeficiente  $e = 0.1$ , tendremos que:

TABLA N° 4.3 Cálculo del factor K

Número de armónico	$I_r/I_1$	$(I_r/I_1)^2$	$h^q$	$(I_r/I)^2 \times h^2$
1	1.000	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.200	0.0400	15.4258	0.6170
7	0.140	0.0196	27.3317	0.5357
11	0.091	0.0083	58.9342	0.4880
13	0.077	0.0059	78.2895	0.4642
17	0.058	0.0034	123.5274	0.4155
19	0.056	0.0031	149.2386	0.4680
23	0.043	0.0018	206.5082	0.3818
25	0.040	0.0016	237.9567	0.3807
	Sum $(I_r/I_1)^2$	1.084	[a]=	4.7511
	I (rms) =	1.041	[a] $\times(I_1/I)^2$ =	4.3838
	$(I_1/I)^2$ =	0.9227	K=	1.1828

Lo que significa que el transformador debe ser reconsiderado a trabajar a una potencia de 84.75% (1/1.1828) de su potencia nominal, [23].

Para otro tipo de carga tendremos los que los valores medidos, tabla 4.4, están dados por:

TABLA N° 4.4 Cálculo del factor K, ejemplo 2

Número de armónico	$I_r/I_1$	$(I_r/I_1)^2$	$I_r/I$	$(I_r/I)^2$	$(I_r/I)^2 \times h^2$
1	1.000	1.0000	0.9603	0.9223	0.9223
3	0.016	0.0003	0.0154	0.0002	0.0021
5	0.261	0.0681	0.2507	0.0628	1.5706
7	0.050	0.0025	0.0480	0.0023	0.1130
9	0.003	0.0000	0.0029	0.0000	0.0007
11	0.089	0.0079	0.0855	0.0073	0.8839
13	0.031	0.0010	0.0298	0.0009	0.1498
15	0.002	0.0000	0.0019	0.0000	0.0008
17	0.048	0.0023	0.0461	0.0021	0.6141
19	0.026	0.0007	0.0250	0.0006	0.2251
21	0.001	0.0000	0.0010	0.0000	0.0004
23	0.033	0.0011	0.0317	0.0010	0.5313
25	0.021	0.0004	0.0202	0.0004	0.2542
	Sum $(I_r/I_1)^2$	1.084			
	I (rms) =	1.041			
				<b>Factor K =</b>	<b>5.2683</b>

De la ecuación (2.12) y tomando las pérdidas en los devanados por corrientes parásitas a corriente nominal como 8%, tendremos que:

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{1 + 0.08}{1 + 5.28 \cdot 0.08}} = 0.87 pu \quad (4.1)$$

Lo que significa que el transformador puede asumir carga a frecuencia fundamental hasta el 87% de su capacidad.

## CONCLUSIONES

1. La calidad de la energía es un tema actual, que compete la continuidad de servicio y a calidad de la onda de tensión. Las perturbaciones que la afectan son temas de muchos estudios sobre sus causas y efectos en la red eléctrica por organismos, instituciones, fabricantes, distribuidores de energía y usuarios, los cuales establecen normas y estándares que regulen los efectos de estas.
2. Una de las perturbaciones, motivo de estudio, son el contenido de armónicos sobre la red, el origen de estas y sus efectos en forma directa e indirecta sobre los elementos de una red eléctrica. El ámbito de los armónicos se dan en estado estacionario, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios.
3. En los transformadores, como en toda máquina eléctrica, son inherentes las pérdidas. Las cargas con contenido armónico, repercuten sobre las pérdidas en los transformadores, las incrementan; pero dicho incremento es más evidente y más considerables sobre las pérdidas en los devanados, provocadas por corrientes parásitas o corrientes de Foucault o corrientes torbellino.
4. El incremento en estas pérdidas, tiene como consecuencia que el transformador presente elevación de temperatura en los devanados y sobre calentamiento en general, afectando el rendimiento y eficiencia.
5. Como consecuencia de esto, se presenta un método que permita cuantificar este incremento, y lo relaciona con las pérdidas evaluadas a frecuencia fundamental. De modo que permite determinar la potencia real, menor a la nominal, que puede soportar el transformador que alimenta cargas con contenido armónico. Este método, introduce el factor K.
6. Se define al factor K, como la relación entre las pérdidas con contenido armónico y las pérdidas a frecuencia fundamental, estas pérdidas son en los devanados debido a corrientes parásitas, ecuación (2.7)
7. El Factor K, es la caracterización de los contenidos de armónicos de la corriente de una determinada carga y el efecto que esta tendrá sobre el transformador que la alimenta.

En todo caso la idea es la de mitigar el efecto y no la causa que los armónicos puedan ocasionar sobre un elemento particular del sistema eléctrico de potencia: el transformador.


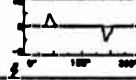
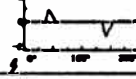
8. El método presentado por la UL, trabaja en el sistema por unidad, tomando como corriente base la corriente rms nominal del transformador, por lo que es dependiente de la distribución y magnitud armónica. En la práctica, los instrumentos de medición toman los valores de la corriente armónica tomando como base la corriente a frecuencia fundamental de la carga, por este motivo el método tiene una variante que normaliza las fórmulas de cálculo, tomando como base la corriente de la carga y no la nominal del transformador, por lo que es función de la distribución de la corriente armónica e independiente de la magnitud relativa de las mismas.
9. Como restricción al estándar IEEE C57.110, este establece que los transformadores con factor K, no han sido evaluados para ser usados con cargas con contenido armónico donde la corriente rms de cualquier armónico en particular mayor al décimo, sea mayor que  $1/h$  veces la corriente rms fundamental.
10. Para efectos prácticos, la UL, estandariza cargas típicas presente en las redes eléctricas y asigna un valor de factor para cada grupo de ellas, tabla 2.2
11. Otros métodos alternativos propuestos, también consideran el mismo principio del factor K, de buscar la capacidad equivalente de un transformador para que pueda alimentar una carga con contenido armónico y no perjudique su rendimiento.
12. Para la medición de armónicos y en consecuencia el cálculo del factor K, los instrumentos utilizados se recomiendan cumplir con las normas que exigen de ellos precisión, selectividad, forma de adquisición de datos. Para esto último, el instrumento usado para la medición de armónicos debe emplear la técnica de la transformada de Fourier, que es un método en tiempo real muy rápido, analizando el espectro. Las ventanas o períodos de tiempo deberían tener 10 ciclos o 200mS, con la finalidad de proporcionar una resolución de 5Hz para la transformada de Fourier.
13. Los transformadores caracterizados con el factor K, tienen técnicas contractivas que mejoran su rendimiento, eficiencia, reducción de tamaño y optimización de costos de fabricación. Estas son mejoras en la calidad de los materiales, dimensión adecuada de los conductores, técnicas de laminación, transposición e interpolación de los devanados.

14. Se puede señalar, que los métodos presentados son una caracterización del contenido armónico de una carga, sin embargo este no es el único parámetro que las caracteriza, parámetros como la distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente también son estudiadas, pero la falta de uno no necesariamente es la carencia del otro



## ANEXO A FORMATO BASE PARA EVALUACIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO

Ficha de procedimiento para la determinación y medición de armónicos.

PROCEDIMIENTO. ARMÓNICOS. INSTALACIONES COMERCIALES. IDENTIFICACIÓN. Nº PROCEDIMIENTO:							Página ... de ....	
<b>6. MÉTODO.</b>								
6.1.- Obtener el esquema unifilar de toda la instalación y asignar identificadores a todas las líneas. Representar en la página correspondiente de la plantilla.								
6.2.- Rellenar las tablas de datos de cargas, líneas y transformadores. <i>(se muestran las primeras filas de la perteneciente a un transformador.)</i>								
Trafo nº	Conexión	Neutro	Placa características de $S_{m}$			Índice de carga	Propio?	Ubicación
			$V_{1a}$	$V_{2a}$	$S_a$			
6.3.- Con el analizador de armónicos medir la corriente de línea de las cargas e identificarlas comparando con modelos establecidos. <i>(se muestra parte de la tabla de modelos)</i>								
Carga	Forma de onda			THD %	K	Pf		
Carga electrónica Monofásica	ORDENADOR				73 %	13,6	0,57	
	IMPRESORA (FAX)				80%	13	0,54	
ILUMIN.	BALASTO				85%	12	0,8	
6.4.- Tomar medidas en los siguientes puntos:								
- Puntos de acoplamiento								
- Primario y secundario del transformador								
- Neutros								
6.5.- Analizar el grado de cancelación.								
6.6.- Si no es posible tomar medidas, se estima según el cuadro.								
Caso	Descripción	Nivel de carga no lineal			Distorsión armónica			
		Electro mica	Ilumina ción	Variado res	V	I		
1	Caso tipo	20	30	5	3,5	14,5		
2	Predominio de carga de iluminación	20%	60	5	3,9	17,1		
3	Predominio de cargas electrónicas	40	30	5	5,7	21,8		
4	Predominio de variadores de velocidad de motores	20	30	10	5,1	20,3		
6.7.- Detallar (si existe) el tipo de corrección de factor de potencia. <i>(se incluye tabla)</i>								
6.8.- Marcar las casillas de los problemas detectados. <i>(se muestra parte de la tabla de problemas)</i>								
Calentamiento		Transformador <input type="checkbox"/>						
		Conductor neutro <input type="checkbox"/>						
		Conductor de fase <input type="checkbox"/>						
		Otros <input type="checkbox"/>						
Dispositivos interruptivos		Interruptores <input type="checkbox"/>						
		Diferenciales <input type="checkbox"/>						
Realizado por:				Empresa:				
Fecha:				Encargado:				
Inspección nº:								

PROCEDIMIENTO. ARMÓNICOS.  
 INSTALACIONES COMERCIALES. SOLUCIONES.  
 N° PROCEDIMIENTO:

Página ... de .....

6. MÉTODO.

6.1.- Conductor neutro.

- 6.1.1.- Anotar la medida obtenida en el procedimiento de identificación.  
 6.1.2.- En caso de no poder medir la corriente del neutro calcularlo mediante la fórmula:

$$I = \sqrt{\frac{0,56 \cdot P_{\text{realizad}}}{1 + 0,56 \cdot P_{\text{realizad}}}} \cdot I_{\text{fase}}$$

6.1.3.- Comprobar si el neutro está bien dimensionado. Si no es así elegir una de las siguientes posibilidades:

- Aumentar la sección del neutro.
- Duplicar el conductor neutro
- Colocar un conductor de neutro para cada carga
- Pasar a procedimiento INSTALACIONES INDUSTRIALES: SOLUCIONES. FILTROS y escoger uno de tercer armónico.

6.2.- Transformadores.

*Desclasificación*

- 6.2.1.- Medir la distorsión armónica en el conductor de fase.  
 6.2.2.- Calcular el factor K según la fórmula de la norma UNE 21-428:

$$K' = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{n=N} \left(n^2 \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right)}$$

(Se explica el significado de cada término)

6.2.3.- Obtener la potencia del nuevo transformador multiplicando este factor por la potencia nominal de la placa de características. Estudiar la posibilidad de sustituir el existente por uno de la nueva potencia calculada o acoplar otro para completar dicha potencia y repartir la carga.

*Transformador de factor K*

6.2.4.- En caso de que la potencia del transformador desclasificado sea muy elevada y se quieran mejorar las condiciones de funcionamiento de este, se puede considerar la sustitución por un transformador de factor K (No confundir con el factor K de la norma UNE). Para ello:

6.2.5.- Mediante un analizador de armónicos capaz de ello, medir el factor K de la carga total. Se escogerá un transformador de valor K normalizado inmediatamente superior.

6.2.6.- Si no se dispone mediante medida directa de este dato, se puede estimar:

- Si la carga no lineal supone casi el 100% de la carga total, la K será de 13.
- Si la carga no lineal supone entre el 50% y el 80% de la carga total, la K será de 9.
- En el resto de los casos se toma K = 4.

*Transformador Zig-Zag*

6.2.7.- En el caso de que las corrientes en el neutro sean muy elevadas y también el calentamiento del transformador se puede optar por un transformador con secundario en Zig-zag que desvía los triplens a los conductores de fase.

6.3.- Variadores de velocidad.

6.3.1.- Anotar los siguientes datos del variador:

Nº de r.p.m. de trabajo :	
Tipo de variador	Tensión <input type="checkbox"/>
	Corriente <input type="checkbox"/>
	PWM <input type="checkbox"/>
Nº de pulsos del rectificador (ver tabla de peñones)	
Lleva bobina serie incorporada:	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>

Realizado por:  
 Fecha:  
 Inspección n°:

Empresa:  
 Encargado:

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Samuel Ramírez Castaño y Eduardo Antonio Cano Plata, “Calidad del Servicio de Energía Eléctrica”, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Junio 2003.
2. A. Tejada y A. Llamas, “Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos”, México
3. I. Bronshtein y K. Semendiaev, “Manual de Matemáticas para Ingenieros y Estudiantes”. Mir Moscú - URSS, 1973
4. IEEE Std. 1459-2000, “IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, IEEE Publications – USA, Enero 2000.
5. IEEE std 1159-1995, “Recomended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE Publications, Junio 1995.
6. IEEE Std. 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, IEEE Publications – USA, Junio 2004.
7. IEEE Std. 1100-1999, “IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment”, IEEE Publications – USA, Marzo 1999.
8. Stephen J. Chapman, “Máquinas Eléctricas”, McGraw-Hill Interamericana S.A., 2001
9. A.E. Fitzgerald and Charles Kngsley, Jr., “Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961
10. IEEE Std. C57.110-1998, “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, IEEE Publications – USA, Julio 1998.
11. F.E. Evdokímov, “Fundamentos Teóricos de la Electrotecnia”, Mir Moscú – URSS, 1984
12. Jan Desmet, “Harmonics: Selection and Rating of Transformer”, Cooper Developemet Association, Noviembre 2005.
13. “K-Factor Transformers and Nonlinear Loads”, Liebert Web Notice and Conditions, 2000.
14. “AN-7 Application Note: Transformer Ratings”, Teal Electronics Corporation, 1999.

15. "AN102 Application Note: K-Factor Defined"
16. N.R. Jayasinghe, J.R. Lucas and K.B.I.M. Perera, "Power System Harmonics Effects on Distribution Transformer and New Design Considerations for K Factor Transformers", IEE Sri Lanka Annual Sessions, Septiembre 2003.
17. Arnold Schwaiger and Florian Sutor, "Electric Power in Internet Centres", SGB Starkstrom – Technical Articles.
18. Philip J.A. Ling and Cyril J. Eldridge, "K-Factor can be a Misleading Power Quality Indicator", Powersmiths International Corp – Canada.
19. Tony Hoevenaars, "How the Harmonic Mitigating Transformer Outperforms the K-Rated Transformer", Mirus International Inc., Septiembre 1999.
20. Mauricio Ardón, "Nota Técnica N°2, Importancia del Factor K en Transformadores", Fazor Power Quality, Noviembre 2006.
21. "Data Bulletin: Harmonic Mitigating Transformer", Square D Company, Julio 2003.
22. Owen Christopher Geduldt, "The Impact of Harmonic Distortion on Power Transformers Operating Near the Thermal Limit", University of Johannesburg, Octubre 2005.
23. Derek A. Paice, "Power Electronic Converter Harmonics, Multipulse Methods for Clean Power", IEEE Press, 1996.