

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON FACTOR K**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**CARLOS ALBERTO SILVA CORONADO**

**PROMOCIÓN  
1979 - II**

**LIMA – PERU  
2003**

A mi Esposa e  
Hijos

Y a todas aquellas personas que  
me alentaron y apoyaron en la  
culminación con éxito de este  
Trabajo.

**CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON  
FACTOR K**

## SUMARIO

En el presente Informe de Suficiencia realizaremos el prediseño de un Transformador de Potencia con factor  $K = 1$ , cuando trabaja en una red eléctrica que no tiene armónicos y realizaremos el prediseño del mismo Transformador de Potencia con factor  $K$  mayor que 1, que se puede presentar cuando el Transformador trabaja en una red eléctrica que tiene gran presencia de armónicos.

Para poder comprender el Impacto de las Armónicos en el Funcionamiento de los Transformadores de Potencia presentaremos un Capítulo Teórico Inicial con los conceptos fundamentales sobre los armónicos

Asimismo revisaremos las recomendaciones de la Norma IEEE C57.110 para el buen funcionamiento de los transformadores cuando trabajan con armónicos.

En el capítulo final realizaremos una comparación técnico económico entre ambos prediseños de transformadores que nos permitirá evaluar las ventajas y desventajas de fabricar un Transformador cuando trabaja en redes eléctricas sin presencia de armónicos y cuando trabaja en redes eléctricas con presencia de armónicos.

# INDICE

	Página
<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE ARMÓNICOS</b>	
1.1 Definición de los Armónicos	4
1.2 Fuentes de Armónicos	5
1.3 Problemas Creados por los Armónicos	5
1.4 Análisis de Fourier	6
<b>CAPITULO II</b>	
<b>PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS EN LOS ARROLLAMIENTOS DE LOS TRANSFORMADORES</b>	
2.1 Generalidades	10
2.2 Pérdidas	11
2.2.1 Definición	11
2.2.2 Clasificación	11
2.3 Efectos de las Corrientes Armónicas en las Pérdidas del Transformador	13
2.3.1 Efectos en las Pérdidas Resistivas	16
2.3.2 Efectos en las Pérdidas por Corriente Eddy	16
2.3.3 Efectos en Otras Pérdidas Parásitas	17
2.4 Determinación del Factor Alfa ( $\alpha$ )	17
2.5 Efecto de las corrientes armónicas en el Factor Alfa	18
2.6 El Factor K	18

**CAPITULO III****APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE C57.110 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR QUE ALIMENTA CORRIENTES DE CARGA NO SINUSOIDALES**

3.1	Alcances	19
3.2	Aplicación	19

**CAPITULO IV****IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS EN LOS TRANSFORMADORES**

4.1	Problemas creados en los Transformadores	24
4.2	Soluciones para Transformadores que alimentan cargas no lineales	25
4.3	Medición de los Armónicos	27
4.4	Consideraciones técnicas en el diseño de Transformadores con factor K	28

**CAPITULO V****PREDISEÑO DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K IGUAL A 1**

5.1	Especificaciones Generales del Transformador	30
5.2	Características Eléctricas del Transformador	30
5.3	Cálculo del Núcleo y de los Arrollamientos	32
5.4	Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Fierro	37
5.5	Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Cobre	38
5.6	Cálculo de Pérdidas por Corrientes Eddy	39
5.7	Cálculo de la Reactancia entre AT y BT	41
5.8	Cálculo Térmico	42
5.9	Dimensiones del Tanque del Transformador	43
5.10	Cálculo del Número de Radiadores	43
5.11	Accesorios del Transformador	47
5.12	Esquema de Dimensiones del Transformador	48

**CAPITULO VI****PREDISEÑO DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K MAYOR QUE 1**

6.1	Especificaciones Generales del Transformador	51
6.2	Características Eléctricas del Transformador	51
6.3	Cálculo del Núcleo y de los Arrollamientos	53
6.4	Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Fierro	57
6.5	Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Cobre	58
6.6	Cálculo de Pérdidas por Corrientes Eddy	59
6.7	Cálculo de la Reactancia entre AT y BT	61
6.8	Cálculo Térmico	62
6.9	Dimensiones del Tanque del Transformador	63
6.10	Cálculo del Número de Radiadores	63
6.11	Accesorios del Transformador	67
6.12	Esquema de Dimensiones del Transformador	68

**CAPITULO VII****EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE AMBOS PREDISEÑOS**

7.1	Comparación Técnica de transformadores	69
7.2	Costo de los Transformadores	71
7.3	Valorización de Pérdidas	73
7.4	Comparación Económica de Transformadores	74

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 75**ANEXO A****NORMA IEEE C57.110** 78**ANEXO B****CORRIENTES PARÁSITAS EN TRANSFORMADORES** 93**ANEXO C****MEDICIONES DE ARMONICOS** 122**ANEXO D****CROQUIS DE DIMENSIONES** 167**ANEXO E**

**PLACA DE CARACTERISTICAS**

170

**BIBLIOGRAFÍA**

173



## PROLOGO

En los últimos años el uso creciente de cargas no lineales ha generado diversos problemas en los Sistemas Eléctricos.

Ello se ha presentado tanto en los usuarios a nivel residencial como a nivel industrial, por el desarrollo de la Electrónica de Potencia.

Ambos tipos de usuarios requieren un suministro de Energía Eléctrica con frecuencias y tensiones controlables. Es así que los usuarios residenciales que están en la búsqueda de una mejor calidad de vida utilizan en sus domicilios diversos equipos electrónicos monofásicos como son: televisores, computadoras, impresoras, fotocopiadoras, etc; y los usuarios industriales que están en la búsqueda de optimizar sus procesos, utilizan equipos electrónicos trifásicos como son : Rectificadores, compensadores estáticos, drivers, etc.

Todas estas cargas no lineales generan corrientes no sinusoidales que están conformadas por una corriente sinusoidal de frecuencia fundamental y por otras corrientes que tienen frecuencias múltiplos enteros de la fundamental a las que denominaremos Armónicos.

Se ha demostrado que estos armónicos generan calentamiento excesivo en los transformadores y pueden dañarlos severamente e inclusive quemarlos.

El objetivo del presente trabajo es investigar en los transformadores las razones por las cuales se genera calentamiento adicional y definir los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta, cuando éstos operan en una red eléctrica con alto contenido de armónicos.

Este trabajo se ha dividido en siete capítulos y los temas tratadas son:

En el primer capítulo se describen los conceptos fundamentales sobre los armónicos, se analiza su procedencia y los problemas que genera su presencia en las instalaciones eléctricas.

En el segundo capítulo se describen las pérdidas por corrientes parásitas en los arrollamientos de los transformadores y se determina la influencia de las corrientes armónicas en estas pérdidas suplementarias.

En el tercer capítulo se analiza la Norma IEEE C57.110 que da recomendaciones para una adecuada operación de los Transformadores que alimentan cargas no lineales.

En el cuarto capítulo se indica en forma particular los problemas que generan los armónicos en el funcionamiento de los Transformadores, y se proponen alternativas de solución.

En el quinto capítulo se realiza un prediseño de un transformador de 6 MVA con un factor  $K=1$ , cuando trabaja en una red eléctrica. Esta es una condición ideal que se caracteriza porque la red eléctrica no tiene armónicos y el Transformador alimenta una carga exclusivamente lineal.

En el sexto capítulo se realiza el prediseño de un Transformador de potencia de 6 MVA con un Factor  $K = 16$ , que es una situación mas real, donde la carga que alimenta el transformador es del tipo no lineal.

Finalmente en el séptimo capítulo, utilizando ambos prediseños podemos hacer una comparación técnica económica.

# CAPITULO I

## CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE ARMÓNICOS

### 1.1 Definición de los Armónicos

Los Armónicos son corrientes y voltajes con frecuencias que son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (En el Perú la frecuencia fundamental es de 60 hertz.). Por ejemplo la segunda armónica .de una onda de voltaje y corriente de 60 hertz, tendrá una frecuencia de 120 hertz, la tercera armónica será de 180 hertz y así sucesivamente. En la mayoría de los sistemas eléctricos, las armónicas que causan mayores problemas son la tercera, quinta y la séptima.

Los Armónicos pueden distorsionar las ondas de voltaje o de corriente o a ambas simultáneamente. La distorsión de corriente se presenta solamente en la carga mientras que la distorsión de voltaje se presenta en todo el sistema eléctrico.

Los Transformadores con cargas lineales tienen formas de ondas de tensión y corriente de forma sinusoidal, mientras que si la carga es no lineal la forma de onda del voltaje y la corriente cambia debido a la frecuencia de la corriente de carga con armónicos. En este último caso se obtiene una onda fundamental con varias ondas de diversas frecuencias superpuestas sobre la fundamental obteniéndose una onda distorsionada.

## **1.2 Fuentes de Armónicos**

Los Armónicos provienen principalmente del uso de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica. Entre las principales cargas no lineales podemos mencionar:

- Equipos Electrónicos de Potencia Industriales, que se comportan como verdaderas fuentes que inyectan corrientes armónicas al sistema. Entre estos aparatos se encuentran los rectificadores, inversores, convertidores de frecuencia, compensadores estáticos de potencia reactiva y cicloconvertidores.
- Cargas monofásicas como son: computadoras, impresoras, cargadores de batería, televisores, lámparas fluorescentes, etc.
- Cargas trifásicas como son: mandos de motores (drivers) y dispositivos de mantenimiento de la energía (UPS).

## **1.3 Problemas creados por los Armónicos**

La presencia de Armónicos en el Sistema Eléctrico, nos puede generar muchos problemas, los cuales podemos clasificar en:

- Deterioro de la capacidad dieléctrica en materiales aislantes por sobretensión.
- Fallas de aislamiento y aumento de pérdidas debido a corrientes armónicas excesivas.
- Mal funcionamiento de equipos de protección, control y medida.

Estos problemas se pueden presentar puntualmente en los diversos equipos que conforman el Sistema Eléctrico, como son:

- Destrucción de condensadores por sobretensión.
- Incendio de reactores por sobrecorriente.
- Destrucción de cables por sobretensión.
- Operación incorrecta de relés de protección.
- Calentamiento de motores de inducción.
- Calentamiento de Transformadores.
- Oscilaciones mecánicas en motores y generadores.
- Errores de medición de energía activa y reactiva.
- Interferencias con sistemas de comunicación.
- Aumento de pérdidas.

#### **1.4 Análisis de Fourier**

La presencia de cargas no lineales en el Sistema Eléctrico producen corrientes de carga no sinusoidales, las cuales podemos estudiar utilizando la Transformada de Laplace cuando trabajamos en el dominio del tiempo y el Análisis de Fourier cuando analizamos estas ondas distorsionadas en el dominio de la frecuencia. El análisis de Fourier fue desarrollado por el matemático francés Juan Bautista José Fourier (1768 – 1830).

En este informe estamos interesados en el impacto de las corrientes no sinusoidales en los transformadores en el dominio de la frecuencia, por lo que haremos uso del Análisis de Fourier para estudiar este tipo de corrientes.

El Análisis de Fourier establece que una forma de onda periódica no senoidal con periodo  $T$  ( frecuencia fundamental  $f=1/T$ ) puede reemplazarse por un número infinito de términos senoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental. Por lo que la forma de onda será igual a la suma de una componente senoidal de frecuencia  $f$  (llamada fundamental), una segunda componente senoidal de frecuencia  $2f$  (llamada segunda armónica), una tercera componente senoidal de frecuencia  $3f$  (llamada tercera armónica) hasta una  $h$ -ésima componente senoidal de frecuencia  $hf$  (llamada  $h$ -ésima armónica). De esta manera cualquier forma de onda periódica no senoidal (que se encuentra distorsionada con respecto a una senoidal) es igual a la suma de la fundamental y las armónicas. Si se trata de una corriente, entonces ésta será la suma de la componente fundamental de la corriente más las corrientes armónicas. Por otro lado, hay que tomar en cuenta la simetría de la forma de onda con respecto al eje horizontal; cuando ésta es asimétrica, a los términos senoidales hay que agregar un término constante, denominado valor medio o componente de corriente continua.

Las formas de onda que se presentan en los Sistemas Eléctricos son distorsionadas pero la mayoría tienen características especiales como son: periódicas, simétricas y/o impares.

Dependiendo de esta forma de onda distorsionada podremos obtener los diversos valores de los términos que conforman la serie de Fourier como se indica a continuación:

Una función  $f(t)$  es periódica, si se verifica:

$$f(t) = f(t + T)$$

El menor valor de T que satisface la ecuación anterior es el periodo de la misma.

Estas funciones verifican:

$$f(t_1) = f(t_1 + T)$$

para cualquier valor de  $t_1$ . Al periodo T le corresponde la frecuencia  $f = 1/T$ .

El desarrollo en serie de Fourier de la función  $f(t)$ , viene dado por la expresión:

$$f(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \operatorname{sen} n\omega t) \dots \dots \dots (1.1)$$

Siendo:

$$a_0/2 = 1/T \int_0^T f(t) dt \dots \dots \dots (1.2)$$

$$a_n = 2/T \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \dots \dots \dots (1.3)$$

$$b_n = 2/T \int_0^T f(t) \operatorname{sen} n\omega t dt \dots \dots \dots (1.4)$$

$a_0/2$  es el valor medio de la función y  $\omega = 2\pi / T$ .

Los límites de integración de las expresiones anteriores pueden ser diferentes, por ejemplo,  $-T/2, T/2$ .  $a_0$  puede determinarse a partir de la expresión de  $a_n$ , haciendo en ésta  $n=0$ . Bajo un punto de vista electrotécnico  $a_0/2$  es la componente de continua, los términos para  $n=1$  constituyen la componente fundamental de la onda y para  $n>1$  tenemos los diferentes armónicos.

Las simetrías de las ondas distorsionadas nos simplifican la expresión de  $f(t)$  y se pueden presentar los siguientes casos:

- Si la función  $f(t)$  tiene simetría respecto al eje horizontal,  $a_0$  es nulo y por tanto no existe componente continua.



- Si la función  $f(t)$  es par y se verifica que  $f(-t) = f(t)$ , resulta  $b_n = 0$

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \dots \dots \dots (1.5)$$

Por tanto, una función par sólo tiene términos en coseno.

- Si la función  $f(t)$  es impar y se verifica que  $f(-t) = -f(t)$ , resulta que  $a_n = 0$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sen n\omega t \, dt \dots \dots \dots (1.6)$$

Por tanto, una función impar solo tiene términos en seno.

- Si la función  $f(t)$  tiene simetría de media onda, se verifica que  $f(t) = -f(t + T/2)$ , entonces la función contiene sólo armónicos impares, siendo:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \quad (n \text{ impar}) \dots \dots \dots (1.7)$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sen n\omega t \, dt \quad (n \text{ impar}) \dots \dots \dots (1.8)$$

En los sistemas eléctricos es muy frecuente que se presente este tipo de simetría.

- Si la función  $f(t)$  es impar y tiene simetría de media onda, como es el caso de la onda cuadrada, se verifica que  $a_n = 0$ , por lo tanto:

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \sen n\omega t \, dt \dots \dots \dots (1.9)$$

## **CAPITULO II**

### **PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS EN LOS ARROLLAMIENTOS DE LOS TRANSFORMADORES**

#### **2.1 Generalidades**

Se define el Transformador como una máquina eléctrica estática, de inducción electromagnética, destinado a transformar un sistema de tensiones y corrientes alternas de igual frecuencia en otro de un nivel de tensión y corriente generalmente diferentes.

Un transformador se diseña de acuerdo a ciertas características nominales que son solicitadas por el usuario y otras que son definidas por el Ingeniero de diseño.

Al realizar el diseño térmico de un transformador se definen todas las características térmicas del transformador así como sus accesorios que permitan disipar todas las pérdidas del transformador sin sobrepasar los límites de temperatura que fijan las distintas Normas Eléctricas.

Por ejemplo la Norma IEC 76-2 fija los siguientes límites de sobreelevación de temperatura para servicio continuo con potencia nominal, ver tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Límites de Temperatura para Transformadores en aceite con aislamiento clase A ( 105 °C )**

Sobreelevación media del devanado para Transformadores ON-OFF	Máxima sobreelevación de Temperatura
Arrollamientos	65 °C
Sobreelevación del aceite en la parte superior	60 °C

Por lo expuesto el transformador debe ser capaz de conducir en servicio continuo la potencia nominal sin exceder los límites de temperatura para el cual ha sido diseñado.

Si el transformador alimenta cargas no lineales se presentarán corrientes de carga con gran presencia de armónicos, que incrementarán las pérdidas de diseño del transformador, generándose un sobrecalentamiento que disminuirá su vida útil.

A continuación se definirán las pérdidas de diseño del transformador y se explicará las razones de su variación cuando la corriente de carga tiene gran presencia de armónicos.

## **2.2 Pérdidas**

### **2.2.1 Definición**

Se definen las pérdidas del transformador como parte de la energía suministrada que no puede ser utilizada y que se dispersa prácticamente en forma de calor al espacio circundante provocando el calentamiento del transformador.

### **2.2.2 Clasificación**

Las pérdidas del transformador se clasifican en:

**a. Pérdidas sin carga**, son las pérdidas que se presentan en el transformador cuando éste trabaja en vacío con el secundario a circuito abierto y se denominan también pérdidas por histéresis, son producidas por un fenómeno afín a la fricción molecular, ya que las partículas mas pequeñas del núcleo tienden a alinearse primero en un sentido y después en el otro, a medida que el flujo magnético varía periódicamente. Las pérdidas por histéresis son proporcionales al volumen del núcleo magnético y al área del bucle de histéresis trazadas en función de "B" (densidad de flujo) y "H"(fuerza magnetizante).

Por lo tanto si la frecuencia de alternancia del flujo es "f"(ciclos/segundo), las pérdidas por histéresis serán:

$$P_h = \eta M/\delta f B_m^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde "η" es una constante de proporcionalidad característica del material del núcleo magnético, dependiendo su magnitud de las unidades en que están expresados M, δ y B<sub>m</sub>.

M es la masa del núcleo.

δ es la densidad del material del núcleo magnético.

**b. Pérdidas con carga**, son las pérdidas que se presentan en los arrollamientos de los devanados y que además de las pérdidas resistivas "I<sup>2</sup>R" incluyen las pérdidas en la carga por la desigual distribución de la densidad de corriente en los conductores. Dicha desigualdad de la densidad de corriente puede suponerse que obedece a las corrientes superpuestas a la densidad de corriente teóricamente uniforme, la que solamente produciría pérdidas óhmicas puras.

Las pérdidas con carga se subdividen en:

- Pérdidas Resistivas que son las pérdidas óhmicas iguales a  $I^2R$
- Pérdidas Parásitas (Stray), las cuales se definen como las pérdidas debido a flujos electromagnéticos dispersos en los devanados, núcleo, tanque, etc.

Las pérdidas parásitas (Stray) se subdividen en:

Pérdidas Parásitas en los devanados ( $P_{EC}$ )

Otras pérdidas parásitas ( $P_{OSL}$ )

Las pérdidas parásitas en los devanados ( $P_{EC}$ ) incluyen las pérdidas parásitas que se presentan en el devanado del conductor y las pérdidas debido a la circulación de corriente entre conductores o circuitos paralelos del bobinado. Estos dos tipos de pérdidas constituyen las Pérdidas en el devanado por corrientes Eddy ( $P_{EC}$ ).

Las pérdidas con carga se establecen como:

Pérdidas con carga = Pérdidas Resistivas + Pérdidas Eddy + Otras  
pérdidas parásitas

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \dots \dots \dots (2.2).$$

### 2.3 Efectos de las Corrientes Armónicas en las Pérdidas del Transformador

Los devanados de alta y baja tensión del transformador son de forma cilíndrica y están montados sobre las columnas de un núcleo de sección circular o rectangular. Las columnas y yugo que conforman el núcleo magnético están fabricados de láminas de acero muy delgadas. En la parte superior e inferior del yugo se instalan abrazaderas que son fabricadas de material metálico o aislante. Los Transformadores inmersos en aceite se instalan dentro de un tanque de acero.

Si una corriente continua "DC" circula a través de los conductores del devanado de un transformador, se produce una pérdida resistiva  $I^2R$  donde "R" es la resistencia DC del devanado del Transformador. Sin embargo si una corriente alterna AC de la misma magnitud circula a través de los conductores del devanado, una pérdida adicional se presentará debido a que cada conductor es circundado por un campo electromagnético alterno cuya fuerza es directamente proporcional a la magnitud de la corriente. Cada conductor metálico que recibe el flujo electromagnético experimenta un voltaje inducido interno que produce corrientes Eddy que circulan en ese conductor. Las corrientes Eddy producen pérdidas que son disipadas en forma de calor, incrementando el nivel de temperatura en el conductor y sus alrededores.

Este tipo de pérdidas son frecuentemente llamadas "Pérdidas Parásitas" (Stray).

A pesar que todas las pérdidas adicionales son pérdidas por corriente Eddy, las pérdidas que se producen en los devanados se denominan Pérdidas por corriente Eddy ( $P_{EC}$ ) y las pérdidas que se producen fuera de los devanados se denominan Otras Pérdidas Parásitas ( $P_{OSL}$ ).

Las pérdidas por corriente Eddy en los arrollamientos del Transformador ( $P_{EC}$ ) son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga que produce el campo y al cuadrado de la frecuencia AC.

Las otras pérdidas parásitas ( $P_{OSL}$ ) son generalmente proporcionales a la corriente elevada a una potencia menor que 2 porque la profundidad de penetración del flujo electromagnético al interior de las otras partes metálicas (usualmente acero) varía con las fuerzas del campo magnético. Para corrientes armónicas de muy alta

frecuencia el flujo electromagnético no puede inducir corriente en los conductores del devanado, pero es conservador asumir que las pérdidas por corriente Eddy ( $P_{EC}$ ) son proporcionales al cuadrado de la magnitud de la corriente armónica.

Cuando un transformador suporta una corriente de carga que tiene alto contenido de armónicos, las pérdidas por corriente Eddy en los conductores de los arrollamientos y en otras partes metálicas elevará la temperatura de todas ellas sobre su temperatura normal de operación.

Experimentalmente se ha demostrado que los conductores de los arrollamientos son las partes más críticas del transformador en la determinación de la temperatura aceptable de operación, así que el objetivo debe ser prevenir las pérdidas en los arrollamientos bajo condiciones de cargas no lineales y no exceder las pérdidas de diseño bajo condiciones de operación nominales a 60 Hz.

El devanado interior de un transformador normalmente tiene pérdidas de corriente Eddy mayores que las pérdidas del arrollamiento exterior porque el flujo electromagnético tiene una mayor tendencia a recorrer la ruta de menor reluctancia desde la columna del núcleo. Las mayores pérdidas Eddy usualmente ocurren al final de los conductores del arrollamiento interior. Esta es justamente la región de mayor flujo electromagnético radial y este flujo atraviesa la dimensión ancha del conductor rectangular de los arrollamientos. Dado que la dimensión ancha del conductor es típicamente 3 a 5 veces su espesor y las pérdidas Eddy son proporcionales al cuadrado de la dimensión, las mayores pérdidas se producen al final de los conductores.

Las corrientes armónicas que circulan a través de las impedancias del transformador y del sistema pueden producir pequeñas distorsiones armónicas en la forma de onda de la tensión en los terminales del transformador. Estos armónicos de voltaje pueden causar pérdidas armónicas adicionales en el núcleo del transformador. Sin embargo la experiencia no ha indicado que la temperatura del núcleo será el parámetro limitante para la determinación de magnitudes seguras de corriente no sinusoidales.

De lo expuesto podemos concluir que la presencia de cargas no lineales producirá en el transformador corrientes con alta presencia de armónicos, la cual incrementará las pérdidas con carga del transformador como se indican a continuación:

### **2.3.1 Efecto en las Pérdidas Resistivas**

Si el valor eficaz de la corriente de carga se incrementa debido a la presencia de armónicos, las pérdidas resistivas  $I^2R$  se incrementarán en función del cuadrado de la corriente.

### **2.3.2 Efecto en las Pérdidas por Corriente Eddy ( $P_{EC}$ )**

Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente y al cuadrado de la frecuencia. Esta característica puede causar excesivas pérdidas en los arrollamientos y por ende sobretemperaturas muy altas en los transformadores que entreguen corrientes de carga no sinusoidales.



### 2.3.3 Efecto en Otras Pérdidas Parásitas ( $P_{OSL}$ )

Se conoce que otras pérdidas parásitas en el núcleo, sujetadores y partes estructurales también se incrementarán como resultado de una corriente de carga no sinusoidal. Sin embargo la temperatura en estas regiones será menos crítica que en los devanados.

### 2.4 Determinación del Factor Alfa ( $\alpha$ )

De acuerdo al artículo "Corrientes Parásitas en Transformadores" escrito por el Ing. Manuel Carranza, que se encuentra publicado en la página WEB de ABB, cuya copia incluimos en el anexo B, se determina el factor  $\alpha$  como la relación porcentual entre las pérdidas por corriente Eddy en los arrollamientos del transformador respecto a las pérdidas resistivas del transformador, la que se obtiene de la siguiente relación:

$$\alpha = (20 \times \pi \times \mu/\rho)^2 \times (m \times b/h)^2 \times (f/60)^2 \times a^4 \times (n^2 - 0.2) \dots \dots \dots (2.3)$$

Para  $\alpha$  en %, cobre a 75 °C y a en mm. ( $\mu = 4 \pi \times 10^{-7}$  vsm/A) resulta:

$$\alpha\% = 1.336 \times 10^{-3} \times (f/60)^2 \times (m \times b/h)^2 \times a^4 \times (n^2 - 0.2) \dots \dots \dots (2.4)$$

Donde:

f = frecuencia (hz)

m = número de conductores por capa.

b = espesor del conductor (mm)

h = altura de la columna (mm)

a = ancho del conductor (mm)

n = número de capas del arrollamiento

## 2.5 Efecto de las Corrientes Armónicas en el Factor Alfa

La presencia de armónicos en la corriente de carga del transformador modifica la fórmula (2.4) como se indica a continuación:

$$\alpha_{\%K} = 1.336 \times 10^{-3} \times (f/60)^2 \times (m \times b/h)^2 \times a^4 \times (n^2 - 0.2) \times (h \times I_h)^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Por lo que podemos concluir que la presencia de armónicos en la corriente de carga del transformador modifica la relación de pérdidas, la cual se incrementa de acuerdo a la siguiente relación :

$$\alpha_a = \alpha \times ( \sum (h \times I_h)^2 ) / ( \sum I_h^2 ) \dots \dots \dots (2.6)$$

## 2.6 El Factor K

La relación  $K = ( \sum (h \times I_h)^2 / ( \sum I_h^2 )$  recibe en la práctica el nombre de factor K y se utiliza para indicar el grado de distorsión armónica de las aplicaciones; este factor K es el que se utilizará para indicar la capacidad de un transformador para soportar contenido armónico, mientras se mantiene operando dentro de los límites de temperatura de su sistema de aislamiento.

El factor K también se menciona en la Norma IEEE C57.110 y se desarrolla con mayor amplitud en el próximo capítulo.

# **CAPITULO III**

## **APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE C57.110 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR QUE ALIMENTA CORRIENTES DE CARGA NO SINUSOIDALES**

### **3.1 ALCANCES**

La presente norma establece las recomendaciones que se deben seguir cuando los transformadores de potencia trabajan con corrientes de carga no sinusoidales que tienen un factor armónico ( $f_h$ ) que excede el valor de 0.05 por unidad.

El objetivo de La Norma C57.110 es establecer métodos para determinar la capacidad de los transformadores al suplir corrientes de carga no sinusoidales sin disminuir la expectativa de la vida útil del transformador.

La aplicación de esta Norma nos permitirá:

- Evaluar la factibilidad de aplicar corrientes de carga no sinusoidales a transformadores existentes.
- Especificar nuevos transformadores para alimentar cargas no sinusoidales.

### **3.2 APLICACIÓN**

La Norma establece el valor en pu de la máxima corriente de carga no sinusoidal, con la cual se obtendrá el mismo valor de diseño de pérdidas de la corriente de carga sinusoidal a 60 hz.

$$I_{\max} (\text{pu}) = \left\{ \frac{P_{\text{LL-R}} (\text{pu})}{1 + [ (\sum f_h^2 h^2 / \sum f_h^2) \times P_{\text{EC-R}} (\text{pu}) ]} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(3.1)$$

donde:

$I_{\max} (\text{pu})$  = Máxima corriente eficaz (rms) de carga no sinusoidal permisible ( por unidad de la corriente eficaz (rms) de carga sinusoidal ).

$P_{\text{LL-R}} (\text{pu})$  = Pérdidas de carga bajo condiciones nominales (por unidad de las pérdidas de carga resistivas  $I^2R$ ).

$f_h$  = Factor de corriente armónica para la armónica "h" (igual a la componente de corriente de la armónica h dividida por la componente fundamental de corriente a 60 hz).

h = Orden de la armónica.

$P_{\text{EC-R}}(\text{pu})$  = Pérdidas de corriente en el devanado Eddy bajo condiciones nominales (por unidad de las pérdidas de carga resistivas  $I^2R$ ).

Asimismo :  $P_{\text{LL}} = I^2R + P_{\text{EC}} + P_{\text{OSL}}$

En pu :  $P_{\text{LL-R}}(\text{pu}) = 1 + P_{\text{EC-R}} (\text{pu}) + P_{\text{OSL-R}}(\text{pu})\dots\dots\dots(3.2)$

Donde  $P_{\text{OSL-R}}(\text{pu})$  = Otras pérdidas parásitas (stray) bajo condiciones nominales (por unidad de pérdidas de carga  $I^2R$ ).

Asumimos que  $P_{\text{OSL-R}} (\text{pu}) = 0$

$$P_{\text{LL-R}}(\text{pu}) = 1 + P_{\text{EC-R}}(\text{pu})\dots\dots\dots(3.3)$$

Si definimos:

$$P_{\text{EC-R}}(\text{pu}) = \alpha$$

$$K = (\sum f_h^2 \times h^2 / \sum f_h^2) \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\text{Obtenemos : } P_{\text{LL-R}}(\text{pu}) = 1 + \alpha \dots\dots\dots(3.5)$$

Reemplazamos (3.4) y (3.5) en (3.1)

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(3.6)$$

Aplicando esta fórmula podemos:

- 1) En el caso de un Transformador ya fabricado, encontrar la máxima corriente de carga no sinusoidal que puede entregar sin exceder las pérdidas totales de diseño de los devanados, y que pueda generar calentamiento en los devanados y disminuir la vida útil del transformador. A esta aplicación la definimos como "derateo de transformadores".
- 2) En el caso de tener que fabricar un nuevo transformador que alimentará cargas no lineales con presencia de corrientes no sinusoidales, nos permitirá determinar la corriente de carga y la potencia equivalente del transformador que podrá alimentar sin generar calentamiento en los devanados.

En la norma C57.110 se dá un ejemplo que nos permitirá comprender su aplicación:

Dada una corriente de carga no sinusoidal de magnitud rms igual a 1 pu y la siguiente distribución de armónicos, ver tabla 3.1.

Tabla 3.1 : Distribución de Armónicos

H	$I_h(\text{pu})$
1	0.978
5	0.171
7	0.108

11	0.044
13	0.028
17	0.015
19	0.00098

Determinar la máxima corriente de carga que puede ser continuamente entregada por el transformador, si tiene una corriente nominal de 1200 amperios y las pérdidas de corriente Eddy en el devanado bajo condiciones nominales ( $P_{EC-R}$ ) es 15% de las pérdidas  $I^2R$ .

Entonces :  $P_{EC-R} = 0.15 \text{ pu}$

$$P_{LL-R} = 1 + P_{EC-R} = 1 + 0.15 = 1.15 \text{ pu}$$

A continuación realizamos la siguiente tabulación:

Tabla 3.2 Cálculo del Factor K

h	$I_h(\text{pu})$	$I_h(\text{pu})^2$	$h^2$	$I^2h^2$	$f_h$	$f_h^2$	$f_h^2 h^2$
1	0.978	0.957	1	0.957	1.000	1.0000	1.0000
5	0.171	0.029	25	0.731	0.175	0.0306	0.7643
7	0.108	0.012	49	0.571	0.110	0.0122	0.5975
11	0.044	0.002	121	0.234	0.045	0.0020	0.2449
13	0.028	0.00078	169	0.133	0.029	0.0008	0.1385
17	0.015	0.00023	289	0.065	0.015	0.0002	0.0680
19	0.0098	0.00010	361	0.035	0.010	0.0001	0.0362
$\Sigma$		1.00		2.726		1.0459	2.8494

El factor K obtenido es igual a 2.726.

$$P_{LL}(pu) = 1.0 + 0.15 \times 2.726 = 1.4089 \text{ pu}$$

$$I_{\max}(pu) = \left[ \frac{1.15}{1 + 2.8494/1.0459 \times 0.15} \right]^{1/2} = 0.9035$$

$$I_{\max}(pu) = 0.9035 \times 1200 = 1084 \text{ Amp.}$$

Entonces con la composición de armónicas de la corriente de carga no sinusoidal, la capacidad del transformador es aproximadamente 90% de su capacidad de corriente de carga sinusoidal.

En el anexo A incluimos copia de las Normas IEEE57.110

## CAPITULO IV

### IMPACTO DE LOS ARMÓNICOS EN LOS TRANSFORMADORES

#### 4.1 Problemas creados en los Transformadores

Los efectos negativos que se pueden presentar en los transformadores cuando trabajan con corrientes de carga con gran presencia de armónicos son:

a) En los sistemas eléctricos trifásicos las armónicas impares triples de tercer orden están en fase, lo cual significa que ellos se adicionan en el neutro. El resultado que se obtiene es una corriente en el neutro que puede ser mayor que la corriente de fase. También las corrientes armónicas de orden impar tienden a circular en el devanado primario en conexión delta ( $\Delta$ ), alcanzándose un incremento en las pérdidas y generación de mayor calor en el transformador.

b) Se presenta el efecto piel (Skin), que consiste en que las corrientes tienden a fluir en el perímetro exterior del conductor debido a las altas frecuencias de los armónicos, dando como resultado un incremento de la resistencia del conductor, por lo que las pérdidas se aumentan generándose mayor calor en el transformador.

c) La presencia de armónicas incrementa las pérdidas Eddy y parásitas en el Transformador. Como ya se indicó las pérdidas Eddy son generadas en los



conductores por donde circula corriente por la presencia del campo magnético alterno y son una función del cuadrado de la frecuencia y del cuadrado de la corriente. Las pérdidas parásitas se generan en las partes metálicas del transformador que no conducen corriente como son el tanque y el núcleo magnético, como un resultado del campo magnético disperso producido por la corriente de carga de los bobinados del Transformador.

Con cargas lineales el pico de corriente o voltaje es igual a la raíz cuadrada de 2 (1.4142135...) multiplicada por el valor eficaz RMS de la corriente o voltaje. Con cargas no lineales el pico de corriente o voltaje puede alcanzar 2.5 a 3 veces la corriente eficaz RMS. El incremento del pico de voltaje crea grandes esfuerzos en el aislamiento del transformador y puede originar fallas en este aislamiento.

d) Con el incremento de pérdidas el transformador pierde eficiencia.

e) Los armónicos incrementan la densidad del flujo magnético del núcleo y este puede alcanzar la saturación.

## **4.2 Soluciones para Transformadores que alimentan Cargas no Lineales**

Las principales soluciones son:

4.2.1 Instalar filtros de armónicos en el Sistema, como en cualquier problema la mejor solución para evitar un efecto no es mitigarlo, sino eliminar la causa que lo produce. En nuestro caso eliminar los armónicos de la red. Los filtros más utilizados son:

- Filtros pasivos, son los mas populares y están contruidos basados en condensadores e inductancias ajustados para bloquear o absorber determinados armónicos. Las aplicaciones en que son empleados deben estudiarse con cuidado

para asegurar su compatibilidad con el resto del sistema. Pueden llegar a ser excesivamente voluminosos y crear efectos indeseables como transitorios y resonancias.

-Filtros Activos, son sofisticados sistemas electrónicos que empiezan hacer su aparición en el mercado. Son costosos y delicados.

4.2.2 Utilizar algunos tipos de conexión de transformadores como son:

- En los transformadores triángulo-estrella las corrientes armónicas triples impares ( armónica 3°,9°,15°,...) se suman en el conductor neutro.En el primario, las corrientes armónicas triples impares de las cargas desequilibradas salen por los conductores y los de las cargas equilibradas quedan atrapadas en los bobinados del arrollamiento en triángulo. Aunque este tipo de conexión podría utilizarse para eliminar las corrientes armonicas triples impares, solo es válido en determinadas aplicaciones por los problemas que generan la recirculación por el triángulo de dichas corrientes.
- Los transformadores con secundario en conexión Zig-Zag están formados por seis devanados iguales, dos por fase. Esta disposición desvia las corrientes armónicas triples impares del neutro a los conductores de fase del transformador.
- Los transformadores de doble salida se construyen con dos devanados secundarios desfasados entre sí 30 grados. El primario conectado en triángulo, bloquea las corrientes armónicas triples impares de cargas equilibradas Los secundarios compensan sobre todo los armónicos de orden 5,7,11 y 19.

4.2.3 Aplicar la Norma C57.12.110 para deratear transformadores en funcionamiento o fabricar nuevos transformadores que puedan trabajar con las corrientes armónicas de las cargas no lineales. Para realizar el diseño del nuevo transformador se requiere conocer el espectro de armónicos de la carga a alimentar.

### **4.3 Medición de los Armónicos**

Para conocer el espectro de armónicos de las cargas se requiere utilizar analizadores de armónicos que proporcionen los valores de corriente de todos los armónicos presentes en el Sistema Eléctrico. Con los valores de las corrientes armónicas y el orden de cada armónica, podremos calcular el factor K que requerimos para diseñar el nuevo transformador.

Tuvimos acceso a la medición de corrientes armónicas que realizó una Empresa de Distribución de Energía Eléctrica de Lima, realizada a algunos Transformadores de Potencia de 25 MVA, 60/10 KV y que en aplicación de la Norma Peruana de Calidad de Energía tienen que realizar mediciones periódicas. Esta medición se realiza a las tres fases por separado y en periodos de tiempo de 10 minutos. En el anexo C incluimos el formato de medición de estas corrientes armónicas realizada al Transformador N°1 en las tres fases (A,B y C) y en aplicación de la norma C57.110 calculamos el factor K.

En la tabla 4.1 mostramos un resumen de los "K" máximos y "K" mínimos que se encontraron en las mediciones realizadas a 4 Transformadores de 25 MVA:

Tabla N° 4.1

## Determinación de Factores K

TRANSFORMADOR	% CARGA	$K_{max}$	% CARGA	$K_{min}$
1	21.64	2.1484	67.01	1.2814
2	15.13	29.1527	22.53	13.81
3	40.05	1.9046	66.38	1.3635
4	21.30	2.9598	108.23	1.0129

De este cuadro podemos observar que el valor de K de estos 4 Transformadores es bastante variado y de acuerdo a la experiencia de algunas empresas industriales el valor K en promedio que se presenta en sus instalaciones es de  $K=16$ . Por lo que elegimos para el presente informe de suficiencia el valor de  $K=16$  para el prediseño del Transformador que se muestra en el Capítulo VI.

#### 4.4 Consideraciones técnicas en el diseño de Transformadores con factor K

Para diseñar un Transformador que alimentará cargas no lineales debemos tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sobredimensionar la potencia del transformador de acuerdo al factor K obtenido en el sistema eléctrico, aplicando la Norma ANSI/IEEE C57.110.
- Sobredimensionar los conductores primarios para soportar las corrientes reflejadas por las corrientes armónicas triples impares.
- Las secciones del núcleo y sus conexiones se deben dimensionar para una corriente doble de línea.
- Diseñar el núcleo para una menor densidad de flujo magnético y utilizar acero magnético de la mejor calidad.

- Las pérdidas por corriente Eddy en los conductores de los Transformadores se pueden reducir empleando varios conductores paralelos aislados entre sí. A veces se recomienda utilizar conductores de tipo fleje y otras técnicas de interpolación y transposición de conductores.

Para efectos de realizar una Comparación Técnica Económica entre un Transformador con factor  $K=1$  y un Transformador con factor  $K$  mayor que 1 realizaremos ambos prediseños y utilizaremos la Norma C57.110 para sobredimensionar la potencia nominal del transformador con factor  $K$  mayor que 1.

## CAPITULO V

### PREDISEÑO DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K

#### IGUAL A 1

Para realizar el prediseño del transformador utilizamos el método de dimensionado y cálculo de un Transformador que se menciona en el capítulo 2.9 y 2.10 del libro "Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas" Tomo II escrito por Juan Corrales Martín.

#### 5.1 Especificaciones Generales del Transformador

Estas especificaciones son proporcionadas por los clientes de acuerdo a los requerimientos deseados.

El transformador del presente proyecto será trifásico, tipo exterior, con conmutador de tensión en vacío, en baño de aceite con refrigeración por circulación natural de aceite (ONAN) para poder entregar en los secundarios en funcionamiento normal y continuo, la potencia nominal especificada, estando el conmutador en cualquiera de sus tomas.

#### 5.2 Características Eléctricas del Transformador

##### 5.2.1 Características principales

a) Tensión nominal de A.T	:22.9	KV
b) Tensión máxima de servicio de A.T	:24.0	KV
c) Tensión nominal de B.T	:10	KV

d) Tensión máxima de servicio de B.T	:12	KV
e) Frecuencia nominal	:60	HZ
f) Altura máxima de operación	:1 000	M.S.N.M.
g) Potencia nominal ONAN	:6	MVA
h) Relación de transformación en vacío	:22.9±2x2.5%/10	KV
i) Grupo de conexión	:YNd5	
j) N° de terminales AT / BT	:4 / 3	
k) Esquema de conexión lado AT	:Estrella con neutro saliente	
l) Esquema de conexión lado BT	:Triángulo	

## 5.2.2 Requerimientos de diseño

### a. Eficiencia

El transformador será de la más alta eficiencia y mínimas pérdidas.

### b. Impedancia equivalente de corto circuito

El valor de la impedancia equivalente de corto circuito será de 6% (AT/BT)

Potencia Base: 6 MVA

### c. Límites de calentamiento

El calentamiento de los arrollamientos, del aceite y de los circuitos magnéticos del transformador, no excederán los siguientes valores:

Calentamiento del aceite en la parte superior      60°C.

Calentamiento de los arrollamientos                      65°C.

Las temperaturas ambientes a tomar en consideración son las siguientes:

Temperatura máxima      40°C

Temperatura media      25°C

Temperatura mínima      5°C

#### d. Tensiones para las pruebas del dieléctrico

El transformador será diseñado para las siguientes tensiones de prueba:

##### Aislamiento Externo

##### Tensión de ensayo a la onda de choque

- Pasatapas AT : 125 KVp
- Pasatapas BT : 75 KVp

##### Tensión de ensayo a frecuencia industrial

- Pasatapas AT : 50 KVp
- Pasatapas BT : 28 KVp

##### Aislamiento Interno

##### Tensión de ensayo a la onda de choque

- Devanados AT : 125 KVp
- Devanados BT : 75 KVp

##### Tensión de ensayo a frecuencia industrial

- Devanados AT : 50 KVp
- Devanados BT : 28 KVp

### 5.3 Cálculo del Núcleo y de los Arrollamientos

#### 5.3.1 Cálculo de la sección circular escalonada del núcleo:

$$S = \text{Potencia total} / 3 = 6 / 3 = 2 \text{ MVA}$$

$$A_{Fe} = K_{As} S^{1/2} \dots\dots\dots(5.1)$$

Usando la tabla 5.1

Tabla 5.1 Determinación del valor  $K_{As}$  :



Clase de Transformador	Porcentaje de Reactancia		Kas $K_{As}=A_{Fe}/S^{1/2}$		Kvs $K_{Vs}=(V/N)/S^{1/2}$
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	$K_{Vs}=2.22B_m K_{As} \times 10^2$
Generador	12.0-18.0	15.0	0.056-0.075	0.071	26.8
Transm. primaria	12.0 -22.5	17.5	0.040-0.060	0.050	19.0
Transm. Secundaria	10.0 -26.0	14.2	0.051-0.069	0.058	20.0
Distribución	4.75	4.75	0.054-0.060	0.057	19.6

$$A_{Fe} = 0.043 ( 2 )^{1/2}$$

$$A_{Fe} = 0.0608 \text{ m}^2$$

$$A_{Fe} = 608 \text{ cm}^2$$

Ø nominal = 290 mm.

$$A_{Fe} = 602 \text{ cm}^2$$

### 5.3.2 Tensiones y Corrientes por fase:

- Tensiones primarias por fase (conexión estrella)

$$V_p = 22900/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\% \text{ V./fase}$$

$$(24045/\sqrt{3}\text{V}; 23473/\sqrt{3}\text{V}; 22900/\sqrt{3}\text{V}; 22328/\sqrt{3}\text{V}; 21755/\sqrt{3}\text{V})$$

$$V_p = 13214 \pm 2 \times 330.35 \text{ V./fase}$$

1era Toma : 13874.7 Voltios = 13.87 KV

2da Toma : 13544.4 Voltios = 13.54 KV

3era Toma : 13214.0 Voltios = 13.21 KV

4ta Toma : 12883.6 Voltios = 12.88 KV

5ta Toma : 12553.3 Voltios = 12.55 KV

- Tensión secundaria en vacío (conexión triángulo)

$$V_s = 10000 \text{ Volt/fase}$$

Corrientes primarias por fase:

$$I_n = (P_n / m) / V_n \dots\dots\dots(5.2)$$

Donde :  $P_n$  Potencia Nominal Trifásica

$m$  Número de fases

$V_n$  : Tensión Nominal

$I_n$  : Corriente Nominal

Máxima (5ta Toma)  $I_p = (6000/3) / 12.55 = 159.36 \text{ A}$

Media (3era Toma - nominal) :  $I_p = (6000/3) / 13.21 = 151.40 \text{ A}$

Mínima (1era Toma )  $I_p = (6000/3) / 13.87 = 144.19 \text{ A}$

- Corriente secundaria por fase

$$I_s = (6000/3) / 10 = 200 \text{ A}$$

Estimando una longitud de columna igual a 1121 mm y considerando la sección encontrada de 602 cm<sup>2</sup> se procede al cálculo para estas dimensiones iniciales, con lo cual se estaría tentando una primera solución, lo que se busca es la tensión de cortocircuito garantizada que es igual a 6% (AT-BT).

### 5.3.3 Inducción en el núcleo en vacío:

$$B_m = 1.75 \text{ Tesla}$$

$$V_{ef} = 4,44 f N B_m A_{fe} \dots\dots\dots(5.3)$$

\* El valor de  $B_m$  se asume para valores entre 1.65 y 1.76 teslas para frecuencia de 60 Hz.

### 5.3.4 Número de espiras por fase en BT:

$$N_{BT} = V_{ef} / (4,44 f B_m A_{fe}) = 10000 \times 10^4 / (4,44 \times 60 \times 1,75 \times 602) = 356.31 \text{ espiras}$$

considerando  $N_{BT} = 356$  espiras, recalculamos la inducción:

$$B_m = 10000 \times 10^4 / (4.44 \times 60 \times 356 \times 602) = 1,751 \text{ Teslas}$$

### 5.3.5 Diámetro del Núcleo:

$D = 290 \text{ mm}$  (que le corresponde un área igual a 602 cm<sup>2</sup>)

### 5.3.6 Número de espiras por fase en AT:

$$N_{BT} = 356 \text{ espiras}$$

$$V / \text{espira} = 10000 / 356 = 28.089887$$

1ra. Toma:  $24045/\sqrt{3}$  Volt - 494 espiras diferencia: 11 espiras

2da. Toma:  $23473/\sqrt{3}$  Volt - 483 espiras diferencia: 12 espiras

3ra. Toma:  $22900/\sqrt{3}$  Volt - 471 espiras diferencia: 12 espiras

4ta. Toma:  $22328/\sqrt{3}$  Volt - 459 espiras diferencia: 11 espiras

5ta. Toma:  $21755/\sqrt{3}$  Volt - 448 espiras

### 5.3.7 Distancias eléctricas mínimas:

- Distancia núcleo-baja tensión = 12 mm
- Distancia baja tensión-alta tensión = 12 mm
- Distancia alta tensión-yugo superior = 76 mm
- Distancia alta tensión-yugo inferior = 56 mm
- Distancia baja tensión-yugo superior = 60 mm
- Distancia baja tensión-yugo inferior = 40 mm
- Distancia entre fases AT = 13 mm

### 5.3.8 Arreglo del Devanado Baja Tensión : Tipo Capas (10 Capas)

- Número de espiras = 356
- Distancia B.T.-yugo =  $60 + 40 = 100$  mm
- Altura de bobinado =  $1240 - 100 = 1140$  mm
- Sección del conductor =  $I / J = 200 / 2.763 = 72.38$  mm<sup>2</sup>
- Forrado del papel el conductor = 0.5 mm
- Ancho del conductor (desnudo / forrado) = 14.7 / 15.2 mm

- Espesor del conductor (desnudo / forrado) = 2.5 / 3.0 mm
- Sección total del conductor =  $2 \times 14.7 \times 2.5 \times 0.985 = 72.38 \text{ mm}^2$
- Número de platinas radiales = 1
- Número de platinas axiales = 2
- Ancho de bobina =  $10 \times 3 + 8 \times 0.38 + 1 \times 5 = 38.04 \text{ mm}$  (sin tolerancia)
- Ancho de bobina =  $38.04 + 1.96 = 40.0 \text{ mm}$  (tolerancia = 1.96 mm)
- Longitud de bobina =  $(36+1) \times 15.2 \times 2 = 1124.80 \text{ mm} = 1125 \text{ mm}$ .
- Refuerzos de aislamientos =  $2 \times 7.5 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$
- Longitud de separadores en los cruces =  $21 \times 4.5 = 95 \text{ mm}$
- Longitud final de Baja Tensión =  $1125 + 2 \times 7.5 = 1140 \text{ mm}$
- Densidad final de corriente =  $200 / 72.38 = 2.76 \text{ A/mm}^2$

### 5.3.9 Arreglo del Devanado de AT: Tipo Capas

- Número de espiras = 494
- Distancia AT-yugo =  $76 + 56 = 132 \text{ mm}$
- Altura de bobinado =  $1240 - 132 = 1108 \text{ mm}$
- Sección del conductor =  $I / J = 151.45 / 2.25 = 67.3 \text{ mm}^2$
- Forrado del papel del conductor = 0.5 mm
- Ancho del conductor (desnudo / forrado) = 12 / 12.5 mm
- Espesor del conductor (desnudo / forrado) = 1.90 / 2.40 mm
- Sección total del conductor =  $3 \times 12 \times 1.9 \times 0.98 = 67.03 \text{ mm}^2$
- Número de platinas radiales = 1
- Número de platinas axiales = 3
- Ancho de bobina =  $18 \times 2.4 + 1 \times 5 + 16 \times 0.25 = 52.2 \text{ mm}$  (sin tolerancia)
- Ancho de bobina =  $52.20 + 2.3 = 54.5 \text{ mm}$  (con tolerancia)

- Longitud de bobina =  $29 \times 3 \times 12.5 = 1087.5 \text{ mm} = 1088 \text{ mm}$ .

- Refuerzo de aislamiento =  $2 \times 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$ .

- Longitud final de AT =  $1088 + 2 \times 10 \text{ mm} = 1108 \text{ mm}$ .

- Densidad final de corriente =  $151.47 / 67.3 = 2.25 \text{ A/mm}^2$

\* La densidad de corriente se asume para valores entre 2.0 y 3.5 A/mm<sup>2</sup>, dependiendo de la valorización de pérdidas se pueden emplear valores mas altos o mas bajos.

## 5.4 Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Fierro

### 5.4.1 Cálculo de Masa de Fierro

$$m_{fe} = A_{fe} \cdot l_{fe} \cdot \rho_{fe} \dots\dots\dots(5.4)$$

$$b_{central} = b_w - b_{fe}$$

$$b_w = b_{central} - b_{fe} = 540 - 280 = 260$$

$$l_{fe} = \{ 3 h_w + 4b_w + 6b_{fe} \} \times 10^{-3} B_m A_{fe}^3 \text{ m}$$

$$l_{fe} = \{ 3(1240) + 4(260) + 6(280) \} \times 10^{-3} \text{ m}$$

Donde:

$b_{central}$  : Distancia entre ejes

$b_{fe}$  : Ancho maximo del fierro

$h_w$  : Altura de ventana de fierro

$$l_{fe} = 6.44 \text{ m}$$

$$A_{fe} = 602 \text{ cm}^2 = 0.0602 \text{ m}^2$$

$$m_{fe} = 0.0602 \times 6.44 \times 7.9 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\mathbf{m_{fe} = 3\ 062.7 \text{ Kg}}$$

### 5.4.2 Cálculo de Pérdidas en el Fierro

Pérdidas específicas del hierro = 1.52 W/Kg. (El tipo de hierro empleado es acero al silicio de pérdidas específicas bajas)

$$P_{fe} = m_{fe} \times p_{fe} \times 10^{-3} \times F.\text{ensamble} \dots\dots\dots(5.5)$$

$$P_{fe} = 3062.7 \times 1.52 \times 10^{-3} \times 1.15 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 5.35 \text{ kW}$$

El factor de ensamble es un valor que está comprendido entre 1.1 y 1.2, depende mucho de las máquinas y del personal que trabaja el hierro silicioso.

### 5.5 Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Cobre

#### 5.5.1 Cálculo de Masa de Cobre

$$m_{cu} = 3 \rho_{cu} (N \times l_m + 7) S_{cu} / 1000 \dots\dots\dots(5.6)$$

donde:

$m_{cu}$  = masa del cobre

$N$  = número de espiras

$L_m$  = longitud de la espira media ( $\pi \times \varnothing_{\text{medio}}$ )

$S_{cu}$  = sección total del cobre

$\rho_{cu}$  = densidad del cobre (8.9)

$$m_{Cu_{BT}} = 3 \times 8.9 \{ 356 [\pi (314 + 40)] / 1000 \} \times 72.38 / 1000$$

$$\mathbf{m_{Cu_{BT}} = 764.7 \text{ kg}}$$

$$m_{Cu_{AT}} = 3 \times 8.9 \{ 494 [\pi (418 + 54.5)] / 1000 \} \times 67.03 / 1000$$

$$\mathbf{m_{Cu_{AT}} = 1311.7 \text{ kg}}$$

### 5.5.2 Cálculo de Pérdidas en el Cobre

#### Pérdidas por Efecto Joule a 75°C

$$\text{BT: } W_{I\text{BT}} = 2.43 \times m_{\text{cu BT}} \times \delta_{\text{BT}}^2 \dots\dots\dots(5.7)$$

$$W_{I\text{BT}} = 2.43 \times 764.7 \times 2.76^2$$

$$W_{I\text{BT}} = 14155.2 \text{ W}$$

$$W_{I\text{BT}} = 14.16 \text{ KW}$$

$$\text{AT: } W_{I\text{AT}} = 2.43 \times m_{\text{cu AT}} \times \delta_{\text{AT}}^2 \times N^\circ \text{ esp.Pos.Nominal} / N^\circ \text{ esp.Totales} \dots\dots(5.8)$$

$$W_{I\text{AT}} = 2.43 \times 1311.7 \times 2.25^2 \times 471 / 494$$

$$W_{I\text{AT}} = 15385.08 \text{ W}$$

$$W_{I\text{AT}} = 15.39 \text{ KW (Posición nominal)}$$

### 5.6 Cálculo de Pérdidas por Corrientes Eddy

$$\%P_i = 100 P_i / W_i \cong 11.4 [ b_c I N / (100 h J) ]^2 \text{ a } 60 \text{ Hz} \dots\dots(5.9)$$

Donde :

$b_c$  : Espesor de la platina

$$\text{BT: } \%P_{i\text{BT}} = 11.4 [ 2.5 \times 200 \times 356 / (100 \times 1140 \times 2.76) ]^2$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 3.65\% W_{I\text{BT}}$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 3.65 \times 14.16 / 100 \text{ KW}$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 0.52 \text{ KW}$$

$$\text{AT: } \%P_{i\text{AT}} = 11.4 [ 1.9 \times 151.45 \times 471 / (100 \times 1108 \times 2.25) ]^2$$

$$\%P_{i\text{AT}} = 3.36\% W_{I\text{AT}}$$

$$\%P_{i\text{AT}} = 3.36 \times 15.39 / 100 \text{ KW}$$

$$\%P_{i\text{AT}} = 0.52 \text{ KW}$$

$$\text{Entonces: } P_{\text{cu BT}} = 14.16 + 0.52 = 14.68 \text{ KW}$$

$$P_{\text{cu AT}} = 15.39 + 0.52 = 15.91 \text{ KW}$$

### Resumen de Resultados

#### Arrollamientos

Arrollamiento	BT	AT
Tipo de arrollamiento	Capas	Capas
N° de espiras	356	494
Corriente (A)	200	151.4
Area del conductor (mm <sup>2</sup> )	72.38	67.03
Densidad de corriente (A/mm <sup>2</sup> )	2.76	2.25
Altura de bobinado (mm)	1140	1108
Distancia yugo sup/inf (mm)	60 / 40	100 / 100
Canal de refrigeración (mm)	1x5	1x 5
Diámetro interno (mm)	314	418
Ancho radial (mm)	40.0	54.5
Ancho de platina (mm)	14.70	12.0
Espesor de platina (mm)	2.5	1.9
Aislamiento de platina (mm)	0.5	0.5
Masa del conductor (kg)	764.7	1311.7
Pérdidas en el cobre (kW)	14.68	15.91
Pérdidas de Salida (kW)	1.3	1.3
Distancia entre fases (mm)		13

#### Núcleo

Diámetro	290 mm (Area = 602 cm <sup>2</sup> )
Longitud	1121 mm



Distancia entre ejes	540 mm
Peso del fierro	3 062.7 kg
Inducción	1.75 Tesla
Pérdidas en el fierro	: 5.35 KW

### 5.7 Cálculo de la reactancia entre AT y BT

$$\%X = 59.4 I N (3b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2) / (10^8 \phi_m (h + 0.32(b_0 + b_1 + b_2))) \dots (5.10)$$

donde:  $b_1 = 40 \text{ mm}$

$$b_2 = 54.5 \text{ mm}$$

$$b_0 = 12.0 \text{ mm}$$

$$S_1 = \pi \times (314 + 40) = 1112.13 \text{ mm}$$

$$S_2 = \pi \times (418 + 54.5) = 1484.41 \text{ mm}$$

$$S_0 = \pi \times (418 - 12.0) = 1275.49 \text{ mm}$$

$$h = 1120 \text{ mm}$$

Tenemos:

$$3 b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2 = 3 \times 12 \times 1275.49 + 40 \times 1112.13 + 54.5 \times 1484.41$$

$$3 b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2 = 171303.18$$

Entonces:

$$\%X = (59.4 \times 356 \times 200 \times 171303.18) / (10^8 \times 1.751 \times 0.0602 \times (1140 + 0.32(12 + 54.5 + 40)))$$

100

$$\%X = 5.85 \%$$

Además:

$$\%R = 30.59 / 6000 \times 100 = 0.51 \%$$

$$\%Z = (5.85^2 + 0.51^2)^{1/2}$$

$$\%Z = 5.87 \%$$

## 5.8 Cálculo Térmico

### 5.8.1 Calentamiento del bobinado de B.T.

Espiras por bobina	$n = 356$
Corriente	$I = 200 \text{ A.}$
Longitud por bobina	$h = 1140 \text{ mm.}$
Carga lineal por bobina	$q = 356 \times 200 / 114 = 624.56 \text{ Av/cm}$
Densidad de corriente	$j = 2.76 \text{ A/mm}^2$
Índice de calentamiento	$(qd) = 624.56 \times 2.76 = 1723.79$
Ancho de bobina	$b = 40 \text{ mm}$
Relación	$b/h = 40/1140 = 0.035$

Calentamiento medio de las bobinas sobre la temperatura media del aceite  $\theta = 17^\circ \text{ C.}$

### 5.8.2 Calentamiento del bobinado de A.T.

Espiras por bobina	$n = 494$
Corriente	$I = 151.45 \text{ A.}$
Longitud por bobina	$h = 1108 \text{ mm.}$
Carga lineal por bobina	$q = 494 \times 151.45 / 110.8 = 675.23 \text{ Av/cm}$
Densidad de corriente	$j = 2.25 \text{ A/mm}^2$
Índice de calentamiento	$(qd) = 675.23 \times 2.25 = 1519.27$
Ancho de bobina	$b = 54.5 \text{ mm}$
Relación	$b/h = 54.5/1519.27 = 0.036$

Calentamiento medio de las bobinas sobre la temperatura media del aceite  $\theta = 17^\circ \text{ C.}$

## 5.9 Dimensiones del Tanque del Transformador

Las dimensiones del tanque pueden ahora ser calculadas. La longitud  $b_{T1}$  del tanque será, con  $b_{cen}$  por distancia entre los centros de las columnas y  $d_{2e}$  por diámetro exterior de la bobina de alta-tensión,

$$b_{T1} = 2b_{cen} + d_{2e} + 100 \dots\dots\dots (5.11)$$

$$b_{T1} = 2 \times 540 + 527 + 100 \approx 1700 \text{ mm}$$

El ancho del tanque  $b_{T2}$  es,

$$b_{T2} = d_{2e} + 120 \dots\dots\dots (5.12)$$

$$b_{T2} = 527 + 120 \approx 650 \text{ mm}$$

Para obtener  $h_{omin}$  para el nivel de aceite mínimo, se asume un valor razonable en exceso sobre la altura del núcleo de 400 mm, con el aceite a una temperatura promedio de 15 °C. Con  $h_w$  para la altura de la ventana y  $b_{Fe}$  para la mitad del ancho mayor de las láminas del núcleo, tenemos:

$$h_c = h_w + 4 b_{Fe} \dots\dots\dots (5.13)$$

para un transformador de núcleo apilado con el yugo superior de igual ancho que la columna. Asimismo,

$$h_{omin} = h_c + 200 \dots\dots\dots (5.14)$$

$$h_{omin} = 1240 + 4 \times 140 + 200 = 2000 \text{ mm}$$

## 5.10 Cálculo del Número de Radiadores

Vale notar aquí que es muy poco lo que se va a ganar en este tipo de transformador economizando la altura del tanque ya que, si la altura fuera menor,

se requerirían más radiadores para efectos de un mejor enfriamiento. Esto es porque es más económico en estos transformadores ajustar los radiadores de enfriamiento directamente en el tanque y no acomodarlos en un banco de enfriamiento separado.

El tipo de radiador que se va a utilizar aquí será del tipo placa-plana, ensamblados en grupos, cada grupo es conectado al tanque mediante una tubería común.

El límite del incremento de temperatura en la superficie superior del aceite es 60 °C para un transformador equipado con tanque conservador de aceite. Se debe suministrar suficiente superficie de enfriamiento para superar esta limitación; se debe también superar la limitación del incremento de temperatura promedio en las bobinas el cual no debe exceder de 65 °C. Ya que la bobina de baja tensión tiene una diferencia de temperatura promedio de 17 °C con la del aceite circundante, el incremento de temperatura promedio  $\Delta\theta_{om}$  no debe, por consiguiente, exceder:

$$65 - 17 = 48 \text{ °C}$$

Sabemos que para un transformador con tanque enfriado por radiadores,  $\Delta\theta_o = 0.7M_{eT}$  y  $\Delta\theta_{om} = 0.85 \times 0.7 M_{eT}^{0.8}$ , donde  $M_{eT}$  es la potencia térmica promedio disipada por una unidad de superficie de tanque en watts por metro cuadrado. Ya que:

$$\Delta\theta_{om} = 0.85 \times 0.7 M_{eT}^{0.8} = 48 \text{ °C}$$

Asimismo

$$M_{eT} = [\Delta\theta_{om} / (0.85 \times 0.7)]^{1.25} = 241.8 \text{ W m}^{-2}$$

El incremento de temperatura en la superficie superior del aceite es:

$$\Delta\theta_o = \Delta\theta_{om} / 0.85 = 48 / 0.85 = 56.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esto esta por debajo de lo que mandan las especificaciones que es 60 °C, lo cual refuerza la suposición de que la diferencia de temperatura en la bobina de baja tensión y el aceite debía ser reducida. Esto tendría el efecto de aumentar el incremento de temperatura promedio aceptable del aceite y reduciría el costo de los radiadores. La posibilidad de realizar economías de este tipo ciertamente serian exploradas si el diseño fuera para transformadores de producción en serie, o en grandes cantidades.

La potencia total que va ha ser disipada es la suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas en carga a la potencia máxima nominal. A menos que el comprador estime lo contrario, los límites del incremento de temperatura, para un transformador con un rango de derivaciones que no exceda el  $\pm 5\%$ , se aplica solamente a la toma principal, aunque el límite del incremento de temperatura puede ser excedido en otras tomas si se opera a la potencia máxima continua, pero esto resulta aceptable para un transformador con un rango de tomas que no exceda el  $\pm 5\%$ . Se debe tomar en consideración el hecho que las pérdidas pueden ser menores a las garantizadas, y la previsión del enfriamiento puede ser reducida correspondientemente. Sin embargo, las pérdidas pueden ser mayores que las garantizadas, aunque nunca deben exceder más del 10%.

Los límites de incremento de temperatura, por supuesto, se aplican al transformador terminado. El diseñador debe considerar las posibilidades de variación con respecto a las pérdidas garantizadas. Sin embargo, asumimos aquí que después que todas las tolerancias de diseño y manufactura han sido tomadas

en cuenta, las pérdidas totales  $P_{tot}$  serán la suma de las pérdidas garantizadas en vacío y en carga,  $P_{Fe}$  y  $P_{Cut}$  a potencia continua máxima:

$$P_{tot} = P_{Fe} + P_{Cut} \dots\dots\dots(5.15)$$

$$P_{tot} = 5.35 + 30.59 + 5 \text{ kW} = 40.94 \text{ kW}$$

Asimismo

$$\text{Superficie requerida} = 40940 / M_{eT} = 40940 / 241.8 = 169.31 \text{ m}^2$$

De acuerdo a los fabricantes se puede obtener una superficie de  $1,59 \text{ m}^2$  para una altura de radiador de 1.5 m.

El tanque mismo tendrá una superficie  $A_T$  de:

$$A_T = 2 (\text{longitud} + \text{ancho}) \times \text{nivel de aceite} \dots\dots\dots(5.16)$$

$$A_T = 2 (1.71 + 0.65) \times 2.0 = 9.44 \text{ m}^2$$

Se deben tomar las previsiones del caso para convertir esta área en área efectiva por la pérdidas debido a la colocación de las cajas de cables y las tuberías de los radiadores; por tanto haremos una reducción de  $0.5 \text{ m}^2$  a esta área. Entonces:

$$A_T = 9.44 - 0.5 = 8.94 \text{ m}^2$$

$$\text{Area total requerida} = 169.31 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$\text{Area requerida por radiador} = 169.31 - 8.94 = 160.37 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de elementos requerido} = 160.37 / 1.5 = 106.91$$

$$\text{Número de radiadores requerido} = 106.91 / 22 = 5 \text{ radiadores}$$

Por simetría seleccionamos 6 radiadores

Se debe notar que se tienen que tomar todas las provisiones del caso para alojar a todos los dispositivos externos, como por ejemplo los terminales, los controles de intercambiador de tomas, los indicadores de temperatura y del nivel de aceite, etc.

### **5.11 Accesorios del Transformador**

El transformador se diseñará con todos los accesorios necesarios para su buen funcionamiento y se suministrará con los siguientes equipos:

- 3 Bornes de Alta tensión 30 KV / 250 A.
- 3 Bornes de Baja tensión 20 KV / 630 A.
- 1 Borne Neutro de Alta tensión 30 KV/250 A.
- Tanque conservador de aceite
- Indicador de nivel de aceite
- Conmutador de tomas en vacío de 5 posiciones con mando exterior sobre la tapa
- Válvula de filtrado
- Platina de puesta a tierra del neutro
- 6 Radiadores
- Relé Buchholz
- Relé de imagen térmica
- Desecador de aire
- Termómetro
- Ruedas
- Placa de características

### **5.12 Esquema de Dimensiones del Transformador**

Con las dimensiones del tanque del transformador obtenidas en la sección 4.5 y teniendo en cuenta todos los accesorios con que se diseñará el transformador , procedemos a realizar una disposición del transformador que incluya todos los accesorios y se muestra en el Croquis de Dimensiones del Anexo D.



## CAPITULO VI

### PRE-DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K MAYOR QUE 1

Para realizar el prediseño del transformador con factor K mayor que 1, elegimos el factor K= 16 de acuerdo al análisis realizado en la sección 4.3.

Asimismo utilizamos el mismo método de cálculo utilizado en el capítulo V para diseñar el transformador de 6 MVA con factor K=16.

El factor alfa ( $\alpha$ ) lo calculamos utilizando la formula 2.4 tanto para el devanado secundario (10 KV) como para el devanado primario (22.9 KV), tal como se indica a continuación:

$$\alpha_{\%10KV} = 1.336 \times 10^{-3} \times (60/60)^2 \times (2 \times 36 \times 14.7 / 1140)^2 \times 2.5^4 \times (10^2 - 0.2)$$

$$\alpha_{\%10KV} = 4.83\%$$

$$\alpha_{10KV} = 0.0483$$

$$\alpha_{\%22.9KV} = 1.336 \times 10^{-3} \times (60/60)^2 \times (3 \times 28 \times 12 / 1108)^2 \times 1.9^4 \times (18^2 - 0.2)$$

$$\alpha_{\%22.9KV} = 5.12\%$$

$$\alpha_{\%22.9KV} = 0.0512$$

A continuación realizamos el cálculo de la corriente o potencia equivalente del transformador de 6 MVA para que pueda trabajar con corriente armónicas con un factor K = 16, aplicando la Norma IEEE C57.10 (Fórmula 3.6):

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(6.1)$$

$$I_{\max} = \left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} I_n$$

$$P_{\max} = \left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} P_n$$

$$6 \text{ MVA} = \left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} P_n$$

**1er Caso:**  $\alpha_{10\text{KV}}=0.0483$   $K=16$

$$\left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1 + 0.0483}{1 + 16 \times 0.0483} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1.0483}{1.7728} \right\}^{1/2} = 0.7689$$

$$P_n = 6 \text{ MVA} / 0.7689$$

$$P_n = 7.80 \text{ MVA}$$

**2do Caso:**  $\alpha_{22.9\text{KV}}=0.0512$   $K=16$

$$\left\{ \frac{1 + \alpha}{1 + K\alpha} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1 + 0.0512}{1 + 16 \times 0.0512} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1.0512}{1.08192} \right\}^{1/2} = 0.7601$$

$$P_n = 6 \text{ MVA} / 0.7601$$

$$P_n = 7.89 \text{ MVA}$$

Elegimos el 2do caso y por estandarización diseñamos el Transformador para una Potencia Nominal de 8 MVA.

## 6.1 Especificaciones Generales del Transformador

Estas especificaciones son proporcionadas por los clientes de acuerdo a los requerimientos deseados.

El transformador del presente proyecto será trifásico, tipo exterior, con conmutador de tensión en vacío, en baño de aceite con refrigeración por circulación natural de aceite (ONAN) para poder entregar en los secundarios en funcionamiento normal y continuo, la potencia nominal especificada, estando el conmutador en cualquiera de sus tomas.

## 6.2 Características eléctricas del transformador

### 6.2.1 Características principales

a) Tensión nominal de A.T	:22.9	KV
b) Tensión máxima de servicio de A.T	:24.0	KV
c) Tensión nominal de B.T	:10	KV
d) Tensión máxima de servicio de B.T	:12	KV
e) Frecuencia nominal	:60	HZ
f) Altura máxima de operación	:1 000	M.S.N.M.
g) Potencia nominal ONAN (K=16)	:6	MVA
Potencia nominal ONAN (K=1)	:8	MVA
h) Relación de transformación en vacío	:22.9±2x2.5%/10	KV
i) Grupo de conexión	:YNd5	
j) Nº de terminales AT / BT	:4 / 3	
k) Esquema de conexión lado AT	:Estrella con neutro saliente	
l) Esquema de conexión lado BT	:Triángulo	

## 6.2.2 Requerimientos de diseño

### a. Eficiencia

El transformador será de la más alta eficiencia y mínimas pérdidas.

### b. Impedancia equivalente de corto circuito

El valor de la impedancia equivalente de corto circuito será de 8% (AT/BT)

Potencia Base: 8 MVA

### c. Límites de calentamiento

El calentamiento de los arrollamientos, del aceite y de los circuitos magnéticos del transformador, no excederán los siguientes valores:

Calentamiento del aceite en la parte superior      60°C.

Calentamiento de los arrollamientos                      65°C.

Las temperaturas ambientes a tomar en consideración son las siguientes:

Temperatura máxima      40°C

Temperatura media      25°C

Temperatura mínima      5°C

### d. Tensiones para las pruebas del dieléctrico

El transformador será diseñado para las siguientes tensiones de prueba:

#### Aislamiento Externo

##### Tensión de ensayo a la onda de choque

Pasatapas AT      125 KVp

Pasatapas BT      75 KVp

##### Tensión de ensayo a frecuencia industrial

Pasatapas AT      50 KVp

Pasatapas BT      28 KVp

### Aislamiento Interno

Tensión de ensayo a la onda de choque

- Devanados AT : 125 KVp
- Devanados BT : 75 KVp

**Tensión de ensayo a frecuencia industrial**

- Devanados AT : 50 KVp
- Devanados BT : 28 KVp

### 6.3 Cálculo del Núcleo y de los Arrollamientos

#### 6.3.1 Cálculo de la sección circular escalonada del núcleo:

$$S = \text{Potencia total} / 3 = 8 / 3 = 2.66 \text{ MVA}$$

$$A_{Fe} = K_{As} S^{1/2} \dots\dots\dots(6.2)$$

Usando la tabla II.

Tabla II: Determinación del Valor  $K_{As}$

Clase de Transformador	Porcentaje de Reactancia		Kas $K_{As} = A_{Fe} / S^{1/2}$		Kvs $K_{vs} = (V/N) / S^{1/2}$
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	$K_{vs} = 2.22 B_m K_{As} \times 10^2$
Generador	12.0-18.0	15.0	0.056-0.075	0.071	26.8
Transm. primaria	12.0-22.5	17.5	0.040-0.060	0.050	19.0
Transm. Secundaria	10.0-26.0	14.2	0.051-0.069	0.058	20.0
Distribución	4.75	4.75	0.054-0.060	0.057	19.6

$$A_{Fe} = 0.045 (2.66)^{1/2}$$

$$A_{Fe} = 0.073392 \text{ m}^2$$

$$A_{Fe} = 733.92 \text{ cm}^2$$

$$\varnothing \text{ nominal} = 320 \text{ mm.}$$

$$A_{Fe} = 734 \text{ cm}^2$$

### 6.3.2 Tensiones y Corrientes por fase:

- Tensiones primarias por fase (conexión estrella)

$$V_p = 22900/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\% \quad V./\text{fase}$$

$$(24045/\sqrt{3}V; 23473/\sqrt{3}V; 22900/\sqrt{3}V; 22328/\sqrt{3}V.; 21755/\sqrt{3}V)$$

- Tensión secundaria en vacío (conexión triángulo)

$$V_s = 10000 \quad \text{Volt/fase}$$

Corrientes primarias por fase

$$\text{Máxima (toma mínima): } I_p = (8000/\sqrt{3}) / 21.76 = 212.51 \text{ A}$$

$$\text{Media (toma nominal): } I_p = (8000/\sqrt{3}) / 22.9 = 201.93 \text{ A}$$

$$\text{Mínima (toma máxima): } I_p = (8000/\sqrt{3}) / 24.05 = 192.27 \text{ A}$$

- Corriente secundaria por fase

$$I_s = (8000/3) / 10 = 267 \text{ A}$$

Estimando una longitud de columna igual a 1114 mm y considerando la sección encontrada de 734 cm<sup>2</sup> se procede al cálculo para estas dimensiones iniciales, con lo cual se estaría tentando una primera solución, lo que se busca es la tensión de cortocircuito garantizada que es igual a 8% (AT-BT).

### 6.3.3 Inducción en el núcleo en vacío:

$$B_m = 1.69 \quad \text{Tesla}$$

$$V_{ef} = 4,44 f N B_m A_{fe} \dots\dots\dots(6.3)$$

\* El valor de  $B_m$  se asume para valores entre 1.65 y 1.76 teslas para frecuencia de 60 Hz.

### 6.3.4 Número de espiras por fase en BT:

$$N_{BT} = V_{ef} / (4,44 f B_m A_{fe}) = 10000 \times 10^4 / (4,44 \times 60 \times 1,69 \times 734) = 302.6 \text{ espiras}$$

considerando  $N_{BT} = 302$  espiras, recalculamos la inducción:

$$B_m = 10000 \times 10^4 / (4.44 \times 60 \times 302 \times 734) = 1,693 \text{ Teslas}$$

### 6.3.5 Diámetro del Núcleo:

$D = 320 \text{ mm}$  (que le corresponde un área igual a  $734 \text{ cm}^2$ )

### 6.3.6 Número de espiras por fase en AT:

$$N_{BT} = 302 \text{ espiras}$$

$$V / \text{espira} = 10000 / 302 = 33.11$$

1ra. Toma:  $24045/\sqrt{3}$  Volt - 419 espiras diferencia: 10 espiras

2da. Toma:  $23473/\sqrt{3}$  Volt - 409 espiras diferencia: 10 espiras

3ra. Toma:  $22900/\sqrt{3}$  Volt - 399 espiras diferencia: 10 espiras

4ta. Toma:  $22328/\sqrt{3}$  Volt - 389 espiras diferencia: 10 espiras

5ta. Toma:  $21755/\sqrt{3}$  Volt - 379 espiras

### 6.3.7 Distancias eléctricas mínimas:

- Distancia núcleo-baja tensión = 12 mm
- Distancia baja tensión-alta tensión = 12 mm
- Distancia alta tensión-yugo superior = 52 mm
- Distancia alta tensión-yugo inferior = 34 mm
- Distancia baja tensión-yugo superior = 63 mm
- Distancia baja tensión-yugo inferior = 43 mm
- Distancia entre fases AT = 14 mm

### 6.3.8 Arreglo del Devanado Baja Tensión : Tipo Capas (7 Capas)

- Número de espiras = 302
- Distancia B.T.-yugo =  $63 + 43 = 106 \text{ mm}$

- Altura de bobinado =  $1200 - 106 = 1094$  mm
- Sección del conductor =  $I / J = 267 / 2.9107 = 91.73$  mm<sup>2</sup>
- Forrado del papel el conductor = 0.5 mm
- Ancho del conductor (desnudo / forrado) = 11.7 / 12.2 mm
- Espesor del conductor (desnudo / forrado) = 4.0 / 4.5 mm
- Sección total del conductor =  $2 \times 11.7 \times 4.0 \times 0.980 = 91.73$  mm<sup>2</sup>
- Número de platinas radiales = 1
- Número de platinas axiales = 2
- Ancho de bobina =  $7 \times 4.5 + 4 \times 0.5 + 2 \times 5 = 43.5$  mm (sin tolerancia)
- Ancho de bobina =  $43.5 + 2.00 = 45.5$  mm (tolerancia = 2 mm)
- Longitud de bobina =  $(44 + 1) \times 12.2 \times 2 = 1098$  mm.
- Refuerzos de aislamientos =
- Longitud de separadores en los cruces =
- Longitud final de Baja Tensión =  $1125 + 2 \times 7.5 = 1094$  mm
- Densidad final de corriente =  $267 / 91.73 = 2.91$  A/mm<sup>2</sup>
- Arreglo del Devanado de AT: Tipo Capas ( 5 Capas)
- Número de espiras = 419
- Distancia AT-yugo =  $52 + 34 = 86$  mm
- Altura de bobinado =  $1200 - 86 = 1114$  mm
- Sección del conductor =  $I / J = 201.93 / 2.06 = 98.02$  mm<sup>2</sup>
- Forrado del papel del conductor = 0.5 mm
- Ancho del conductor (desnudo / forrado) = 12.5 / 13.0 mm
- Espesor del conductor (desnudo / forrado) = 4.0 / 4.5 mm
- Sección total del conductor =  $2 \times 12.5 \times 4.0 \times 0.98 = 98$  mm<sup>2</sup>



- Número de platinas radiales = 2
  - Número de platinas axiales = 1
  - Ancho de bobina =  $2 \times 5 \times 4.5 + 2 \times 5 + 2 \times 0.5 = 56$  mm (sin tolerancia)
  - Ancho de bobina =  $56.00 + 2.5 = 58.5$  mm (con tolerancia)
  - Longitud de bobina =  $84 \times 1 \times 13 = 1092$  mm
  - Refuerzo de aislamiento =  $2 \times 11$  mm = 22 mm.
  - Longitud final de AT =  $1092 + 2 \times 11$  mm = 1114 mm.
  - Densidad final de corriente =  $201.93 / 98.02 = 2.06$  A/mm<sup>2</sup>
- \* La densidad de corriente se asume para valores entre 2.0 y 3.5 A/mm<sup>2</sup>, dependiendo de la valorización de pérdidas se pueden emplear valores mas altos o mas bajos.

## 6.4 Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Fierro

### 6.4.1 Cálculo de Masa de Fierro

$$m_{fe} = A_{fe} \cdot l_{fe} \cdot \rho_{fe} \dots\dots\dots(6.4)$$

$$b_{central} = b_w - b_{fe}$$

$$b_w = b_{central} - b_{fe} = 600 - 280 = 320$$

$$l_{fe} = \{ 3 h_w + 4b_w + 6b_{fe} \} \times 10 B_m A_{fe}^3 \text{ m}$$

$$l_{fe} = \{ 3(1200) + 4(320) + 6(280) \} \times 10^{-3} \text{ m}$$

Donde:

$b_{central}$  : Distancia entre ejes

$b_{fe}$  : Ancho maximo del fierro

$h_w$  : Altura de ventana de fierro

$$l_{fe} = 6.56 \text{ m}$$

$$A_{fe} = 734 \text{ cm}^2 = 0.0734 \text{ m}^2$$

$$m_{fe} = 0.0734 \times 6.56 \times 7.9 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$m_{fe} = 3803.9 \text{ Kg}$$

#### 6.4.2 Cálculo de Pérdidas en el Fierro

Pérdidas específicas del fierro = 1.52 W/Kg. (El tipo de fierro empleado es acero al silicio de pérdidas específicas bajas)

$$P_{fe} = m_{fe} \times p_{fe} \times 10^{-3} \times F.\text{ensamble} = 3803.9 \times 1.52 \times 10^{-3} \times 1.15 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 6.65 \text{ kW}$$

El factor de ensamble es un valor que está comprendido entre 1.1 y 1.2, depende mucho de las máquinas y del personal que trabaja el fierro silicioso.

#### 6.5 Cálculo de la Masa y Pérdidas en el Cobre

##### 6.5.1 Cálculo de Masa de Cobre

$$m_{cu} = 3 \rho_{cu} (N \times l_m + 7) S_{cu} / 1000 \dots\dots\dots(6.5)$$

donde:

$m_{cu}$  = masa del cobre

$N$  = número de espiras

$l_m$  = longitud de la espira media ( $\pi \times \varnothing_{\text{medio}}$ )

$S_{cu}$  = sección total del cobre

$\rho_{cu}$  = densidad del cobre (8.9)

$$m_{Cu BT} = 3 \times 8.9 \{302 [\pi (344 + 45.5)] / 1000\} \times 72.38 / 1000$$

$$m_{Cu BT} = 904.62 \text{ kg}$$

$$m_{Cu AT} = 3 \times 8.9 \{419 [\pi (469 + 58.5)] / 1000\} \times 98 / 1000$$

$$m_{Cu AT} = 1815.95 \text{ kg}$$

### 6.5.2 Cálculo de Pérdidas en el Cobre

#### Pérdidas por Efecto Joule a 75°C

$$\text{BT: } W_{I\text{BT}} = 2.43 \times m_{\text{Cu BT}} \times \delta_{\text{BT}} \dots\dots\dots(6.6)$$

$$W_{I\text{BT}} = 2.43 \times 904.62 \times 2.91^2$$

$$W_{I\text{BT}} = 18614.80 \text{ W}$$

$$W_{I\text{BT}} = 18.14 \text{ KW}$$

$$\text{AT: } W_{I\text{AT}} = 2.43 \times m_{\text{Cu AT}} \times \delta_{\text{AT}}^2 \times N^{\circ} \text{ esp. Pos.Nominal} / N^{\circ} \text{ esp.Totales} \dots\dots(6.7)$$

$$W_{I\text{AT}} = 2.43 \times 1815.95 \times 2.06^2 \times 400 / 420$$

$$W_{I\text{AT}} = 17834.26 \text{ W}$$

$$W_{I\text{AT}} = 17.83 \text{ KW (Posición nominal)}$$

### 6.6 Cálculo de Pérdidas por Corrientes Eddy

$$\%P_i = 100 P_i / W_i \cong 11.4 [ b_c I N / (100 h J) ]^2 \text{ a } 60 \text{ Hz} \dots\dots\dots(6.8)$$

Donde :

$b_c$  : Espesor de la platina

$$\text{BT: } \%P_{i\text{BT}} = 11.4 [ 4 \times 267 \times 302 / (100 \times 1094 \times 2.91) ]^2$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 11.7\% W_{I\text{BT}}$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 11.7 \times 18.14 / 100 \text{ KW}$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 2.12 \text{ KW}$$

$$\text{AT: } \%P_{i\text{AT}} = 11.4 [ 4 \times 201.93 \times 400 / (100 \times 1114 \times 2.06) ]^2$$

$$\%P_{i\text{AT}} = 22.6\% W_{I\text{AT}}$$

$$\%P_{i\text{AT}} = 22.6 \times 17.83 / 100 \text{ KW}$$

$$\%P_{i\text{BT}} = 4.03 \text{ KW}$$

Entonces:  $P_{cu\ BT} = 18.14 + 4.03 = 22.17\ KW$

$P_{cu\ AT} = 17.83 + 1.96 = 19.79\ KW$

### Resumen de Resultados

#### Arrollamientos

Arrollamiento	BT	AT
Tipo de arrollamiento	Capas	Capas
N° de espiras	302	419
Corriente (A)	267	201.93
Area del conductor (mm <sup>2</sup> )	91.73	98.00
Densidad de corriente (A/mm <sup>2</sup> )	2.91	2.06
Altura de bobinado (mm)	1094	1114
Distancia yugo sup/inf (mm)	63 / 43	52 / 34
Canal de refrigeración (mm)	1x5	1x 5
Diámetro interno (mm)	344	469
Ancho radial (mm)	45.5	58.5
Ancho de platina (mm)	11.70	12.5
Espesor de platina (mm)	4.0	4.0
Aislamiento de platina (mm)	0.5	0.5
Masa del conductor (kg)	904.62	1815.95
Pérdidas en el cobre (kW)	22.17	19.79
Pérdidas de Salida (kW)		
Distancia entre fases (mm)		14

**Núcleo**

Diámetro	320 mm (Area = 734 cm <sup>2</sup> )
Longitud	1094 mm
Distancia entre ejes	600 mm
Peso del fierro	3 803.9 kg
Inducción	1.69 Tesla
Pérdidas en el fierro	6.65 KW

**6.7 Cálculo de la reactancia entre AT y BT**

$$\%X = 59.4 I N (3b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2) / (10^8 \phi_m (h + 0.32(b_0 + b_1 + b_2))) \dots \dots (6.9)$$

donde:  $b_1 = 45.5$  mm

$$b_2 = 58.5$$
 mm

$$b_0 = 17.0$$
 mm

$$S_1 = \pi \times (344 + 45.5) = 1223.65$$
 mm

$$S_2 = \pi \times (469 + 58.5) = 1657.19$$
 mm

$$S_0 = \pi \times (469 - 17.0) = 1420.00$$
 mm

$$h = 1094$$
 mm

Tenemos:

$$3 b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2 = 3 \times 17 \times 1420 + 45.5 \times 1223.65 + 58.5 \times 1657.19$$

$$3 b_0 S_0 + b_1 S_1 + b_2 S_2 = 225041.68$$

Entonces:

$$\%X = (59.4 \times 302 \times 267 \times 225041.68) / (10^9 \times 1.69 \times 0.0734 \times (1094 + 0.32(17 + 58.5 + 45.5)))$$

$$\%X = 7.67 \%$$

Además:

$$\%R = 41.96 / 8000 \times 100 = 0.52 \%$$

$$\%Z = (7.67^2 + 0.52^2)^{1/2}$$

$$\%Z = 7.69 \%$$

## 6.8 Cálculo Térmico

### 6.8.1 Calentamiento del bobinado de B.T.

Espiras por bobina	n= 302
Corriente	I= 267 A.
Longitud por bobina	h= 1094 mm.
Carga lineal por bobina	q= 302 x 267 / 109.4 = 737.06 Av/cm
Densidad de corriente	j= 2.91 A/mm <sup>2</sup>
Indice de calentamiento	(qd)= 737.06 x 2.91 = 2144.85
Ancho de bobina	b= 45.5 mm
Relación	b/h = 45.5/1094 = 0.042

Calentamiento medio de las bobinas sobre la temperatura media del aceite ,  $\theta = 17^\circ \text{C}$ .

### 6.8.2 Calentamiento del bobinado de A.T.

Espiras por bobina	n= 419
Corriente	I= 201.93 A.
Longitud por bobina	h= 1114 mm.
Carga lineal por bobina	q= 419 x 201.93/ 111.4 = 759.5 Av/cm
Densidad de corriente	j= 2.06 A/mm <sup>2</sup>
Indice de calentamiento	(qd)= 759.5 x 2.06 = 1564.57
Ancho de bobina	b= 58.5 mm
Relación	b/h = 58.5/1114 = 0.053

Calentamiento medio de las bobinas sobre la temperatura media del aceite,  $\theta = 17^\circ \text{C}$ .

### 6.9 Dimensiones del Tanque del Transformador

Las dimensiones del tanque pueden ahora ser calculadas. La longitud  $b_{T1}$  del tanque será, con  $b_{cen}$  por distancia entre los centros de las columnas y  $d_{2e}$  por diámetro exterior de la bobina de alta-tensión,

$$b_{T1} = 2b_{cen} + d_{2e} + 100 \dots\dots\dots(6.10)$$

$$b_{T1} = 2 \times 600 + 586 + 100 \approx 1886 \text{ mm}$$

El ancho del tanque  $b_{T2}$  es,

$$b_{T2} = d_{2e} + 120 \dots\dots\dots(6.11)$$

$$b_{T2} = 586 + 120 \approx 706 \text{ mm}$$

Para obtener  $h_{omin}$  para el nivel de aceite mínimo, se asume un valor razonable en exceso sobre la altura del núcleo de 400 mm, con el aceite a una temperatura promedio de  $15^\circ \text{C}$ . Con  $h_w$  para la altura de la ventana y  $b_{Fe}$  para la mitad del ancho mayor de las láminas del núcleo, tenemos:

$$h_c = h_w + 4 b_{Fe} \dots\dots\dots(6.12)$$

para un transformador de núcleo apilado con el yugo superior de igual ancho que la columna. Asimismo,

$$h_{omin} = h_c + 200 \dots\dots\dots(6.13)$$

$$h_{omin} = 1200 + 4 \times 140 + 200 = 1960 \text{ mm}$$

Aproximamos la altura del tanque a 2000 mm por facilidad de construcción.

### 6.10 Cálculo del Número de Radiadores

Vale notar aquí que es muy poco lo que se va a ganar en este tipo de transformador economizando la altura del tanque ya que, si la altura fuera menor,

se requerirían más radiadores para efectos de un mejor enfriamiento. Esto es porque es más económico en estos transformadores ajustar los radiadores de enfriamiento directamente en el tanque y no acomodarlos en un banco de enfriamiento separado.

El tipo de radiador que se va a utilizar aquí será del tipo placa-plana, ensamblados en grupos, cada grupo es conectado al tanque mediante una tubería común.

El límite del incremento de temperatura en la superficie superior del aceite es 60 °C para un transformador equipado con tanque conservador de aceite. Se debe suministrar suficiente superficie de enfriamiento para superar esta limitación; se debe también superar la limitación del incremento de temperatura promedio en las bobinas el cual no debe exceder de 65 °C. Ya que la bobina de baja tensión tiene una diferencia de temperatura promedio de 17 °C con la del aceite circundante, el incremento de temperatura promedio  $\Delta\theta_{om}$  no debe, por consiguiente, exceder:

$$65 - 17 = 48 \text{ °C}$$

Sabemos que para un transformador con tanque enfriado por radiadores,  $\Delta\theta_o = 0.7M_{eT}$  y  $\Delta\theta_{om} = 0.85 \times 0.7 M_{eT}^{0.8}$ , donde  $M_{eT}$  es la potencia térmica promedio disipada por una unidad de superficie de tanque en watts por metro cuadrado. Ya que:

$$\Delta\theta_{om} = 0.85 \times 0.7 M_{eT}^{0.8} = 48 \text{ °C}$$

Asimismo

$$M_{eT} = [\Delta\theta_{om} / (0.85 \times 0.7)]^{1.25} = 241.8 \text{ W m}^{-2}$$

El incremento de temperatura en la superficie superior del aceite es:



$$\Delta\theta_o = \Delta\theta_{om} / 0.85 = 48 / 0.85 = 56.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esto está por debajo de lo que mandan las especificaciones que es 60 °C, lo cual refuerza la suposición de que la diferencia de temperatura en la bobina de baja tensión y el aceite debía ser reducida. Esto tendría el efecto de aumentar el incremento de temperatura promedio aceptable del aceite y reduciría el costo de los radiadores. La posibilidad de realizar economías de este tipo ciertamente serían exploradas si el diseño fuera para transformadores de producción en serie, o en grandes cantidades.

La potencia total que va a ser disipada es la suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas en carga a la potencia máxima nominal. A menos que el comprador estime lo contrario, los límites del incremento de temperatura, para un transformador con un rango de derivaciones que no exceda el  $\pm 5\%$ , se aplica solamente a la toma principal, aunque el límite del incremento de temperatura puede ser excedido en otras tomas si se opera a la potencia máxima continua, pero esto resulta aceptable para un transformador con un rango de tomas que no exceda el  $\pm 5\%$ . Se debe tomar en consideración el hecho que las pérdidas pueden ser menores a las garantizadas, y la previsión del enfriamiento puede ser reducida correspondientemente. Sin embargo, las pérdidas pueden ser mayores que las garantizadas, aunque nunca deben exceder más del 10%.

Los límites de incremento de temperatura, por supuesto, se aplican al transformador terminado. El diseñador debe considerar las posibilidades de variación con respecto a las pérdidas garantizadas. Sin embargo, asumimos aquí que después que todas las tolerancias de diseño y manufactura han sido tomadas

en cuenta, las pérdidas totales  $P_{tot}$  serán la suma de las pérdidas garantizadas en vacío y en carga,  $P_{Fe}$  y  $P_{Cut}$  a potencia continua máxima:

$$P_{tot} = P_{Fe} + P_{Cut} \dots\dots\dots(6.14)$$

$$P_{tot} = 6.65 + 41.96 + 7 \text{ kW} = 55.61 \text{ kW}$$

Asimismo:

$$\text{Superficie requerida} = 55610 / M_{eT} = 55610 / 241.8 = 229.98 \text{ m}^2$$

De acuerdo a los fabricantes se puede obtener una superficie de 1,59 m<sup>2</sup> para una altura de radiador de 1.5 m.

El tanque mismo tendrá una superficie  $A_T$  de:

$$A_T = 2 (\text{longitud} + \text{ancho}) \times \text{nivel de aceite} \dots\dots\dots(6.15)$$

$$A_T = 2 (1.89 + 0.71) \times 2.0 = 10.4 \text{ m}^2$$

Se deben tomar las previsiones del caso para convertir esta área en área efectiva por la pérdidas debido a la colocación de las cajas de cables y las tuberías de los radiadores; por tanto haremos una reducción de 0.5 m<sup>2</sup> a esta área.

Entonces:

$$A_T = 10.4 - 0.5 = 9.9 \text{ m}^2$$

$$\text{Area total requerida} = 229.98 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$\text{Area requerida por radiador} = 229.98 - 9.9 = 220.18 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de elementos requerido} = 220.18 / 1.5 = 146.79$$

$$\text{Número de radiadores requerido} = 146.79 / 22 = 7 \text{ radiadores}$$

Por simetría seleccionamos 8 radiadores.

Se debe notar que se tienen que tomar todas las previsiones del caso para alojar a todos los dispositivos externos, como por ejemplo los terminales, los controles de intercambiador de tomas, los indicadores de temperatura y del nivel de aceite, etc.

### **6.11 Accesorios del Transformador**

El transformador se diseñará con todos los accesorios necesarios para su buen funcionamiento y se suministrará con los siguientes equipos:

- 3 Bornes de Alta tensión 30 KV / 250 A.
- 3 Bornes de Baja tensión 20 KV / 630 A.
- 1 Borne Neutro de Alta tensión 30 KV/250 A.
- Tanque conservador de aceite
- Indicador de nivel de aceite
- Conmutador de tomas en vacío de 5 posiciones con mando exterior sobre la tapa
- Válvula de filtrado
- Platina de puesta a tierra del neutro
- 8 Radiadores
- Relé Buchholz
- Relé de imagen térmica
- Desecador de aire
- Termómetro
- Ruedas
- Placa de características

## **6.12 Esquema de Dimensiones del Transformador**

Con las dimensiones del tanque del transformador obtenidas en la sección 6.9 y teniendo en cuenta todos los accesorios con que se diseñará el transformador , procedemos a realizar una disposición del transformador que incluya todos los accesorios y se muestra en el Croquis de Dimensiones del Anexo D.

## CAPITULO VII

### EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE AMBOS PREDISEÑOS

#### 7.1 Comparación Técnica de Transformadores

En el cuadro adjunto realizaremos una comparación técnica de ambos prediseños como se indica en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 : Comparación Técnica

DESCRIPCIÓN	PREDISEÑO 1	PREDISEÑO 2
Potencia Nominal (K=1)	6 MVA	8 MVA
Potencia Nominal (K=16)	4.6 MVA	6 MVA
Tensión Nominal de AT	22.9 KV	22.9 KV
Tensión Nominal de BT	10 KV	10 KV
Frecuencia Nominal	60 Hz	60 Hz
Grupo de Conexión	YNd5	YNd5
Relación de Transformación	22.9±2x2.5%/10 KV	22.9±2x2.5%/10 KV
Altura Máxima de Operación	1000 msnm	1000 msnm
Tensión de Cortocircuito	6 %	8 %
Tensión de Ensayo AT/BT	50/28 KV	50/28 KV

BIL AT/BT	125/75 KV	125/75 KV
Diámetro del núcleo	290 mm.	320 mm.
Area de la Sección del nucleo	602 cm <sup>2</sup>	734 cm <sup>2</sup>
Masa del fierro	3062.7 Kg.	3803.9 Kg
Pérdidas en el fierro	5.35 Kw	6.65 Kw.
Masa de cobre de AT	1311.7 Kg	1815.9 Kg
Masa de cobre de BT	764.7 Kg	904.6 Kg
Pérdidas en el cobre AT	15.91 kW	19.79 Kw
Pérdidas en el cobre BT	14.68 kW	22.17 Kw
Largo del tanque	1700 mm.	1886 mm.
Ancho del tanque	650 mm.	706 mm.
Altura del tanque	2000 mm.	2000 mm.
Número de Radiadores	6	8
Dimensiones del Transformador		
Largo	2700 mm.	3000 mm.
Ancho	2900 mm.	3200 mm.
Altura	3100 mm.	3100 mm.
Pesos del Transformador		
Parte Activa	5920 Kgs	7050 Kgs
Aceite	1900 Kgs	2500 Kgs
Total	11000 Kgs	13000 Kgs

## 7.2 Costo de los Transformadores

Para realizar el costeo de los transformadores utilizaremos los valores obtenidos de peso del fierro y del cobre de ambos prediseños, así como los valores estimados de mano de obra y valores de accesorios estandar para transformadores, como se indica en la Tabla 7.2:

Tabla 7.2: Costo de los Transformadores

<b>Descripción</b>	<b>Transformador de 6 MVA, K= 1</b>	<b>Transformador de 6 MVA, K=16</b>
<b><u>Mano de Obra</u></b>		
N° de horas de diseño	40 horas	60 horas
Costo de diseño	US\$ 1000	US\$1,500
N° de horas de fabricación	600 horas	800 horas
Costo de fabricación	US\$ 1800	US\$2,400
<b>Costo de mano de obra</b>	<b>US\$ 2,800</b>	<b>US\$ 3,900</b>
<b><u>Materiales</u></b>		
Peso del fierro	3062.7 Kg.	3803.9 Kg.
Costo del fierro	US\$ 4,808	US\$ 5972
Peso del cobre	2076.4 Kg.	2720.5 Kg.
Costo del cobre	US\$ 8,929	US\$ 11,698
<b>Costo de materiales</b>	<b>US\$ 13737</b>	<b>US\$ 17,670</b>
<b><u>Accesorios</u></b>		
Tanque	US\$ 5,000	US\$ 6,000
4 Bornes de AT	US\$ 1,700	US\$ 1,700

3 Bornes de BT	US\$ 300	US\$ 300
Radiadores	US\$ 5,400	US\$ 7,200
Conmutador de Tomas	US\$ 1,200	US\$ 1,200
Aceite	US\$ 1,300 (1900 Kg.)	US\$ 1700 (2500 Kg.)
Relé Buchholz	US\$ 250	US\$ 250
Válvula de seguridad	US\$ 300	US\$ 300
Indicador de Nivel	US\$ 150	US\$ 150
Desecador	US\$ 100	US\$ 100
Termómetro	US\$ 250	US\$ 250
Relé de Imagen Térmica	US\$ 300	US\$ 300
Trafo de Corriente para RIT	US\$ 200	US\$ 200
Caja de Bornes	US\$ 1850	US\$ 1850
4 Ruedas	US\$ 1200	US\$ 1,500
Aislamientos	US\$ 1500	US\$ 2,000
Otros : 10% Accesorios	US\$ 2100	US\$ 2,500
<b>Costo de accesorios</b>	<b>US\$ 23,100</b>	<b>US\$ 27,500</b>
<u>Resumen</u>		
Costo de Mano de Obra	US\$ 2,800	US\$ 3,900
Costo de Materiales	US\$ 13,737	US\$ 17,680
Costo de Accesorios	US\$ 23,100	US\$ 27,500
<b>Total costo del Transformador</b>	<b>US\$ 39,637</b>	<b>US\$ 49,080</b>



### 7.3 Valorización de Pérdidas

Para simplificar el cálculo de valorización de pérdidas , utilizaremos los factores que utilizan las principales Empresas Eléctricas de Lima que se muestra en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3: Valorización de Pérdidas

<b>Descripción</b>	<b>Transformador de 6 MVA, K= 1</b>	<b>Transformador de 6 MVA, K=16</b>
Pérdidas en el fierro	5.35 KW	6.65 KW
Factor de Valorización de Pérdidas en el fierro	US\$ 2500/KW	US\$ 2500/KW
<b>Valorización de pérdidas en el fierro</b>	<b>US\$ 13,375</b>	<b>US\$ 16,625</b>
Pérdidas en el cobre	30.59 KW	41.96 KW
Factor de Valorización de Pérdidas en el cobre	US\$ 1,450/KW	US\$ 1,450/KW
<b>Valorización de pérdidas en el cobre</b>	<b>US\$ 44,356</b>	<b>US\$ 60,842</b>

#### 7.4 Comparación Económica de Transformadores

Para realizar la comparación económica de transformadores se suma el costo total del transformador mas la valorización de pérdidas en el fierro y en el cobre como se indica en la Tabla 7.4

Tabla 7.4: Comparación Económica de Transformadores

Descripción	<b>Transformador de 6 MVA, K= 1</b>	<b>Transformador de 6 MVA, K=16</b>
Costo	US\$ 39,637	US\$ 49,080
Valorización de pérdidas en el fierro	US\$ 13,375	US\$ 16,625
Valorización de pérdidas en el cobre	US\$ 44,356	US\$ 60,842
<b>Costo Total incluyendo pérdidas</b>	<b>US\$ 97,368</b>	<b>US\$ 126,547</b>

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. En todos los sistemas eléctricos existen transformadores de potencia y distribución, los cuales alimentan cargas no lineales y se puede generar calentamiento en el transformador por la presencia de los armónicos.
2. El principal problema para que fallen los transformadores es el sobrecalentamiento que se puede producir en éste. Por cada 8° a 10° de incremento de temperatura de operación del transformador, se puede reducir a la mitad la vida media de este equipo.
3. Los Transformadores de potencia estandar son diseñados para operar a tensión y frecuencia nominal para un factor  $K=1$  considerando sólo el efecto térmico de la onda fundamental.
4. Los Transformadores tipo K, son transformadores diseñados y probados para operar con cargas no lineales . El factor K indica la severidad de la distorsión armónica que el transformador puede soportar.

5. Un Transformador diseñado con un determinado factor K puede ocupar mas del 120% de espacio y pesar mas del 115% de un transformador estandar diseñado con factor K=1. Asimismo el costo del Transformador con factor K mayor que 1 es mucho mas caro que un transformador estandar.

En los cálculos realizados en el presente informe demostramos que el transformador de 6 MVA con factor K=16, tiene un volumen mayor del 122% y pesar 118% más, que el transformador de 6 MVA con factor K=1. Asimismo el costo, incluyendo valorización de pérdidas, del primer Transformador es mayor en 130% que el segundo Transformador

6. El principal factor que se toma en cuenta en el diseño de los transformadores con factor K es el incremento de corrientes parásitas en los arrollamientos de los transformadores de potencia. Experimentalmente se ha demostrado que los conductores de los arrollamientos son las partes mas críticas del transformador y los que pueden sufrir mayor daño al elevarse la temperatura. Por lo que no se toma en cuenta las pérdidas parásitas que se pueden presentar en el núcleo, ya que la temperatura en el núcleo no es un factor limitante, como lo es la temperatura en los arrollamientos.
7. Si se tienen varias cargas no lineales en una Empresa Industrial, se calcula el factor K de cada carga y se elige el factor K mayor, que sería el caso mas desfavorable, para diseñar el Transformador.

## RECOMENDACIONES

1. Cuando un transformador ya está construido y alimenta una carga con cierto contenido de armónicas de corriente, se recomienda utilizar la Norma IEEE C57.110, que nos indica como deratear el transformador que en la práctica significa establecer una intensidad de la carga reducida :  $I_r$ , de modo que las pérdidas totales en los arrollamientos no excedan los valores de diseño del transformador.
2. Tanto en los expedientes de compra de Transformadores así como en las placas de características de los transformadores se debe indicar claramente el factor K de los transformadores. En la actualidad este factor K no se utiliza, por lo que la mayor parte de Transformadores fabricados en el Perú han sido diseñados con un factor  $K = 1$ .
3. El cálculo del factor K es independiente del factor de carga y experimentalmente se observa que a menor porcentaje de carga del transformador, el factor K es mayor. Si el porcentaje de carga del transformador es demasiado bajo, se puede obtener factores K demasiados altos y en este caso se recomienda realizar nuevas mediciones con un porcentaje de carga del transformador lo más cercano a su potencia nominal.

**ANEXO A**  
**NORMA IEEE C57.110**

*An American National Standard*

**IEEE Recommended Practice for Establishing  
Transformer Capability When Supplying  
Nonsinusoidal Load Currents**

Sponsor

**Performance Characteristics Subcommittee  
of the  
Transformers Committee  
of the  
IEEE Power Engineering Society**

Secretariat

**Institute of Electrical and Electronics Engineers  
National Electrical Manufacturers Association**

Approved March 11, 1982  
Reaffirmed March 19, 1992

**IEEE Standards Board**

Approved August 19, 1985  
Reaffirmed December 2, 1992

**American National Standards Institute**

• Copyright 1988 by

**The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc  
345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA**

*No part of this publication may be reproduced in any form,  
in an electronic retrieval system or otherwise,  
without the prior written permission of the publisher.*

**IEEE Standards** documents are developed within the Technical Committees of the IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Board. Members of the committees serve voluntarily and without compensation. They are not necessarily members of the Institute. The standards developed within IEEE represent a consensus of the broad expertise on the subject within the Institute as well as those activities outside of IEEE that have expressed an interest in participating in the development of the standard.

Use of an IEEE Standard is wholly voluntary. The existence of an IEEE Standard does not imply that there are no other ways to produce, test, measure, purchase, market, or provide other goods and services related to the scope of the IEEE Standard. Furthermore, the viewpoint expressed at the time a standard is approved and issued is subject to change brought about through developments in the state of the art and comments received from users of the standard. Every IEEE Standard is subjected to review at least every five years for revision or reaffirmation. When a document is more than five years old and has not been reaffirmed, it is reasonable to conclude that its contents, although still of some value, do not wholly reflect the present state of the art. Users are cautioned to check to determine that they have the latest edition of any IEEE Standard.

Comments for revision of IEEE Standards are welcome from any interested party, regardless of membership affiliation with IEEE. Suggestions for changes in documents should be in the form of a proposed change of text, together with appropriate supporting comments.

Interpretations: Occasionally questions may arise regarding the meaning of portions of standards as they relate to specific applications. When the need for interpretations is brought to the attention of IEEE, the Institute will initiate action to prepare appropriate responses. Since IEEE Standards represent a consensus of all concerned interests, it is important to ensure that any interpretation has also received the concurrence of a balance of interests. For this reason IEEE and the members of its technical committees are not able to provide an instant response to interpretation requests except in those cases where the matter has previously received formal consideration.

Comments on standards and requests for interpretations should be addressed to:

Secretary, IEEE Standards Board  
445 Hoes Lane  
P.O. Box 1331  
Piscataway, NJ 08855-1331  
USA

<p>IEEE Standards documents are adopted by the Institute of Electrical and Electronics Engineers without regard to whether their adoption may involve patents on articles, materials, or processes. Such adoption does not assume any liability to any patent owner, nor does it assume any obligation whatever to parties adopting the standards documents.</p>
--



## Foreword

(This Foreword is not a part of ANSI/IEEE C57.110-1986, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.)

The increasing use of static rectification equipment in industrial loads on small and medium power transformers has resulted in an increase in the harmonic content of the load current for this equipment. It is now quite common for the harmonic factor of the current to exceed 0.05 per unit, which is the limit specified for "usual service conditions" in ANSI/IEEE C57.12.00-1987 and C57.12.01-1979. Higher harmonic content in the current causes higher eddy current loss in winding conductors and structural parts linked by the transformer leakage flux field and, consequently, higher operating temperature. Users identified to the IEEE Transformers Committee the need for guidance in their loading practices, so that the useful life of transformers would not be shortened when carrying nonsinusoidal load currents. A working group was formed to respond to this need and has prepared the subject recommended practice. Precise determination of the extra eddy current loss produced by harmonic currents is a complex subject that may involve sophisticated computer analysis. Such treatment is not given in this document. Rather, the document presents approximate calculation techniques that have two features to recommend them: they may be made with a simple hand-held calculator and their results will be conservative.

The Accredited Standards Committee C57 had the following membership when it reviewed and approved this document:

**Roger Ensign, Chairman**

**L. S. McCormick, Vice Chairman**

**C. H. White, Secretary**

*Organization Represented*

Electric Light and Power .....

Institute of Electrical and Electronics Engineers .....

National Electrical Manufacturers Association .....

Testing Laboratory Group .....

Tennessee Valley Authority .....

US Department of the Navy .....

US Department of Energy .....

US Department of the Interior .....

US Department of Agriculture REA .....

American National Standards Institute .....

*Name of Representative*

W. Cole (*Delegation Chairman*)  
 G. Gunnel  
 P. Orehek  
 D. Soffrin (*Alt*)  
 J. Sullivan (*Alt*)  
 A. Velazquez  
 J. Bonucchi  
 O. Compton (*Delegation Chairman*)  
 J. Dutton  
 R. Ensign  
 F. Huber, Jr (*Alt*)  
 L. McCormick  
 W. Neiswander  
 H. Smith (*Alt*)  
 B. Stanleigh  
 H. Tucker  
 P. Cacaloro (*Alt*)  
 P. Dewever (*Alt*)  
 J. Douglas  
 W. Kendall  
 K. Linsley (*Delegation Chairman*)  
 G. Mayall  
 W. McNutt  
 J. Nay (*Alt*)  
 T. Reback  
 D. Strang (*Alt*)  
 R. Uptegraff, Jr  
 W. O'Grady  
 R. Seelbach  
 L. Smith  
 H. Stickley  
 D. Torgerson  
 F. Cook, Sr  
 J. Arnold, Jr  
 C. Zegers

At the time this recommended practice was completed, the Working Group on Harmonic Load-Current Heating had the following membership:

**W. J. McNutt, *Chairman***

B. F. Allen  
A. Bimbirls  
G. C. Bryant  
O. R. Compton  
D. A. Duckett  
C. G. Evans  
S. L. Foster

E. H. Gabel, Jr  
W. P. Gibbons  
R. S. Grgis  
A. D. Kline  
L. W. Long  
C. J. McMillen

**E. W. Kalkstein, *Secretary***

W. H. Mutschler  
S. Northrup  
D. E. Shefka  
D. Takach  
V. Thenappan  
R. E. Uptegraph  
R. A. Veitch

The following persons were on the balloting committee that approved this standard for submission to the IEEE Standards Board:

D. J. Allan  
B. F. Allen  
R. Allustiartl  
R. J. Alton  
E. H. Arjeski  
J. C. Arnold  
R. Bancroft  
P. L. Bellaschi  
S. Bennon  
J. J. Bergeron  
J. V. Bonucchi  
J. D. Borst  
G. H. Bowers  
F. J. Brutt  
D. J. Cash  
E. Chitwood  
O. R. Compton  
F. W. Cook, Sr.  
J. Corcran  
D. Crofts  
M. G. Daniels  
D. H. Douglas  
J. D. Douglass  
J. C. Dutton  
J. K. Easley  
J. A. Ebert  
E. C. Edwards  
R. L. Ensign  
C. G. Evans  
P. P. Falkowald  
W. R. Farber  
H. G. Flscher  
J. A. Forster  
S. L. Foster  
M. Frydman  
H. E. Gabel

D. A. Gillies  
A. W. Goldman  
W. F. Griffard  
R. L. Grubb  
G. Gunnels  
G. Hall  
J. H. Harlow  
F. W. Heinrichs  
W. Henning  
K. R. Highton  
P. J. Hoedler  
C. C. Honey  
F. Huber, Jr  
C. Hurty  
G. W. Liff  
R. G. Jacobson  
C. P. Kappeler  
O. Keller  
J. J. Kelly  
A. D. Kline  
W. Lampe  
H. F. Light  
T. G. Lipscomb  
R. Little  
R. I. Lowe  
M. L. Manning  
H. B. Margolis  
J. W. Matthews  
L. S. McCormick  
C. J. McMillen  
W. J. McNutt  
G. G. McCrae  
J. McGill  
S. P. Mehta  
N. J. Melton  
C. K. Miller  
C. Millan

R. E. Minkwitz, Sr  
C. E. Mitchell  
H. R. Moore  
R. J. Musil  
W. H. Mutschler  
E. T. Norton  
B. K. Patel  
H. A. Pearce  
D. Perco  
D. A. Roach  
C. A. Robbins  
L. J. Savio  
D. E. Shefka  
B. E. Smith  
L. R. Smith  
W. W. Stein  
L. R. Stenslund  
R. B. Stetson  
F. R. Stockum  
A. L. Tanton  
R. C. Thomas  
F. W. Thomason  
J. A. Thompson  
T. P. Traub  
D. E. Truax  
R. E. Uptegraff, Jr  
R. A. Veitch  
L. B. Wagenaar  
J. W. Walton  
S. A. Weincek  
R. J. Whearty  
A. Wilks  
W. E. Wrenn  
A. C. Wurdack  
D. A. Yannucci  
E. J. Yasuda

When the IEEE Standards Board approved this standard on June 19, 1986, it had the following membership:

**John E. May, *Chairman***

James H. Beall  
Fletcher J. Buckley  
Paul G. Cummings  
Donald C. Fleckenstein  
Jay Forster  
Daniel L. Goldberg  
Kenneth D. Hendrix  
Irvin N. Howell

**Sava I. Sherr, *Secretary***

Jack Kinn  
Joseph L. Koepfinger\*  
Edward Lohse  
Lawrence V. McCall  
Donald T. Michael\*  
Marco W. Migliaro  
Stanley Owens  
John P. Riganati  
Frank L. Rose

**Irving Kolodny, *Vice Chairman***

Robert E. Rountree  
Martha Sloan  
Oley Wanselja  
J. Richard Weger  
William B. Wilkens  
Helen M. Wood  
Charles J. Wylie  
Donald W. Zipse

\*Member emeritus

## Contents

SECTION	PAGE
1. Scope and References .....	7
1.1 Scope .....	7
1.2 References .....	7
2. Definitions .....	7
3. Letter Symbols .....	8
4. General Considerations .....	8
4.1 Transformer Losses .....	8
4.1.1 Harmonic Current Effect on $I^2R$ Loss .....	8
4.1.2 Harmonic Current Effect on $P_{EC}$ .....	8
4.1.3 Harmonic Current Effect on $P_{OCL}$ .....	8
4.1.4 DC Components of Load Current .....	8
4.2 Transformer Capability Equivalent .....	9
5. Recommended Procedures .....	9
5.1 Basic Data .....	9
5.2 Per Unit Losses .....	9
5.3 Transformer Capability Equivalent Calculation Using Design Eddy-Current Loss Data .....	9
5.3.1 Example .....	10
5.4 Transformer Capability Equivalent Calculation Using Data Available from Certified Test Report .....	10
5.4.1 Calculations .....	11
5.4.2 Example .....	11
6. Bibliography .....	12
APPENDIX	
Appendix — Tutorial Discussion of Transformer Losses and the Effect of Harmonic Currents on These Losses .....	13
APPENDIX FIGURE	
Fig A1 Electromagnetic Field Produced by Load Current in a Transformer .....	13

# *An American National Standard*

## **IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents**

### **1. Scope and References**

**1.1 Scope.** This recommended practice applies to all power transformers covered by ANSI/IEEE C57.12.01-1979 [2]<sup>1</sup> and to power transformers up to 50 MVA maximum nameplate rating covered by ANSI/IEEE C57.12.00-1987 [1], when subjected to nonsinusoidal load currents having a harmonic factor exceeding 0.05 per unit. (*Harmonic factor* is defined in ANSI/IEEE C57.12.80-1978 [3] as the ratio of the effective value of all the harmonics to the effective value of the fundamental.) It does not apply to rectifier transformers or to other specific purpose transformers not covered by ANSI/IEEE C57.12.00-1987 [1] or ANSI/IEEE C57.12.01-1979 [2].

The purpose of this document is to establish uniform methods for determining the capability of transformers to supply nonsinusoidal load currents of known characteristics, without loss of normal life expectancy. Two methods are described as follows. The first is intended for use by those with access to detailed information on loss density distribution within the transformer windings. The second method is less accurate and is intended for use by those with access to transformer certified test report data only. It is anticipated that the first method will be used primarily by transformer design engineers, while the second method will be employed primarily by users. This recommended practice will be applicable for evaluating the feasibility of applying nonsinusoidal load currents to existing transformers and for

<sup>1</sup>The numbers in brackets correspond to those of the references listed in 1.2. When preceded by "B," they refer to the bibliographic entries in Section 6.

specifying new transformers to supply nonsinusoidal loads.

### **1.2 References**

[1] ANSI/IEEE C57.12.00-1987, American National Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.<sup>2</sup>

[2] ANSI/IEEE C57.12.01-1979, American National Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers.

[3] ANSI/IEEE C57.12.80-1978 (R1987), American National Standard Terminology for Power and Distribution Transformers.

[4] ANSI/IEEE C57.12.00-1987, American National Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.

[5] ANSI/IEEE C57.12.91-1979, American National Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers.

[6] ANSI/IEEE Std 100-1984, IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms.

### **2. Definitions**

All definitions are in accordance with ANSI/IEEE Std 100-1984 [6], or are in accord with the standards quoted in the text.

<sup>2</sup>ANSI/IEEE publications can be obtained from the Sales Department, American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, NY 10018, or from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Service Center, Placataway, NJ 08854-4150.

### 3. Letter Symbols

$f_h$	Harmonic current distribution factor for harmonic "h" (equal to the harmonic "h" component of current divided by the fundamental 60 Hz component of current for any given loading level)
$h$	Harmonic order
$I$	rms load current (amperes)
$I(\text{pu})$	rms load current (per unit of rated rms load current)
$I_h$	rms current at harmonic "h" (amperes)
$I_h(\text{pu})$	rms current at harmonic "h" (per unit of rated rms load current)
$I_{\text{max}}$	Maximum permissible rms nonsinusoidal load current (amperes)
$I_{\text{max}}(\text{pu})$	Maximum permissible rms nonsinusoidal load current (per unit of rated rms load current)
$I_R$	rms sine wave current under rated frequency and load conditions (amperes)
$I_{1-R}$	H.V. rms sine wave line current under rated frequency and load conditions (amperes)
$I_{2-R}$	L.V. rms sine wave line current under rated frequency and load conditions (amperes)
$P_{\text{EC}}$	Winding eddy-current loss (watts)
$P_{\text{EC}}(\text{pu})$	Winding eddy-current loss (per unit of rated load $I^2R$ loss)
$P_{\text{EC-R}}$	Winding eddy-current loss under rated conditions (watts)
$P_{\text{EC-R}}(\text{pu})$	Winding eddy-current loss under rated conditions (per unit of rated load $I^2R$ loss)
$P_{\text{LL}}$	Load loss (watts)
$P_{\text{LL}}(\text{pu})$	Load loss density (per unit of rated load $I^2R$ loss density)
$P_{\text{LL-R}}$	Load loss under rated conditions (watts)
$P_{\text{LL-R}}(\text{pu})$	Load loss density under rated conditions (per unit of rated load $I^2R$ loss density)
$P_{\text{OSL}}$	Other stray loss (watts)
$P_{\text{OSL}}(\text{pu})$	Other stray loss (per unit of rated load $I^2R$ loss)
$P_{\text{OSL-R}}$	Other stray loss under rated conditions (watts)
$P_{\text{OSL-R}}(\text{pu})$	Other stray loss under rated conditions (per unit of rated load $I^2R$ loss)
$R$	dc resistance (ohms)

$R_1$	dc resistance measured between two H.V. terminals (ohms)
$R_2$	dc resistance measured between two L.V. terminals (ohms)

### 4. General Considerations

**4.1 Transformer Losses.** ANSI/IEEE C57.12.90-1987 [3] and ANSI/IEEE C57.12.91-1979 [5] categorize transformer losses as: no-load loss (excitation loss); load loss (impedance loss); and total loss (the sum of no-load loss and load loss). Load loss is subdivided into  $I^2R$  loss and "stray loss." Stray loss is determined by subtracting the  $I^2R$  loss (calculated from the measured resistance) from the measured load loss (impedance loss).

"Stray loss" can be defined as the loss due to stray electromagnetic flux in the windings, core, core clamps, magnetic shields, enclosure or tank walls, etc. Thus, the stray loss is subdivided into winding stray loss and stray loss in components other than the windings ( $P_{\text{OSL}}$ ). The winding stray loss includes winding conductor strand eddy-current loss and loss due to circulating currents between strands or parallel winding circuits. All of this loss may be considered to constitute winding eddy-current loss,  $P_{\text{EC}}$ . The total load loss can then be stated as

$$P_{\text{LL}} = I^2R + P_{\text{EC}} + P_{\text{OSL}} \quad (\text{Eq 1})$$

**4.1.1 Harmonic Current Effect on  $I^2R$  Loss.** If the rms value of the load current is increased due to harmonic components, the  $I^2R$  loss will be increased accordingly.

**4.1.2 Harmonic Current Effect on  $P_{\text{EC}}$ .** Winding eddy-current loss ( $P_{\text{EC}}$ ) in the power frequency spectrum is proportional to the square of the load current and the square of frequency [B1], [B2], [B3]. It is this characteristic that can cause excessive winding loss and hence abnormal winding temperature rise in transformers supplying nonsinusoidal load currents.

**4.1.3 Harmonic Current Effect on  $P_{\text{OSL}}$ .** It is recognized that other stray loss ( $P_{\text{OSL}}$ ) in the core, clamps, and structural parts will also increase as a result of nonsinusoidal load current. However, temperature rise in these regions will be less critical than in the windings.

**4.1.4 DC Components of Load Current.** Harmonic load currents are frequently accompanied by a dc component in the load current. A dc component of load current will increase the



transformer core loss slightly, but will increase the magnetizing current and audible sound level more substantially.

Relatively small dc components (up to the rms magnitude of the transformer excitation current at rated voltage) are expected to have no effect on the load carrying capability of a transformer determined by this recommended practice. Higher dc load current components may adversely affect transformer capability and should be avoided.

**4.2 Transformer Capability Equivalent.** The transformer capability equivalent established by following the procedures in this recommended practice is based on the following premises:

(1) The transformer, except for the load current harmonic factor, is presumed to be operated in accordance with "Usual Service Conditions" in ANSI/IEEE C57.12.00-1987 [1] or ANSI/IEEE C57.12.01-1979 [2].

(2) The transformer is presumed to be capable of supplying a load current of any harmonic content provided that the total load loss, the load loss in each winding, and the loss density in the region of the highest eddy-current loss do not exceed the levels for full load, 60 Hz sine wave design conditions. It is further presumed that the limiting condition is the loss density in the region of highest winding eddy-current loss; hence, this is the basis used for establishing capability equivalency.<sup>3</sup>

## 5. Recommended Procedures

**5.1 Basic Data.** In order to perform the calculations in this section, the characteristics of the nonsinusoidal load current must be defined in terms of the magnitude of the fundamental frequency component and each harmonic frequency component from power system measurements. In addition, information on the magnitude of winding eddy-current loss density must be available from the manufacturer or information on the total load loss and  $I^2R$  loss must be available from test records.

<sup>3</sup>The simple methods of calculation of transformer capability equivalent given in this document assume that eddy currents at all harmonic frequencies generate loss in a constant path resistance. In fact, skin effect becomes more pronounced as frequency increases and eddy current loss is smaller than predicted. Thus, the methods presented in this document become increasingly conservative at the higher harmonics included in the calculation, particularly those above the 19th.

**5.2 Per Unit Losses.** Since the greatest concern under harmonic load conditions will be for overheating of the windings, it is convenient to consider loss density in the windings on a per unit basis. (Base current is rated current and base loss density is the  $I^2R$  loss density at rated current in watts per pound of conductor.) Thus Equation 1 applied to rated load conditions can be rewritten on a per unit basis as follows:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (\text{Eq 2})$$

Given the eddy current loss under rated conditions for a transformer winding or portion of a winding, ( $P_{EC-R}$ ), the eddy-current loss due to any defined nonsinusoidal load current can be expressed as

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \text{ watts} \quad (\text{Eq 3})$$

Equation 3 can also be written in per unit form:

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h(pu)^2 h^2 \quad (\text{Eq 4})$$

Other stray loss or the sum of eddy-current loss plus other stray loss could be calculated for a given nonsinusoidal load current in the same fashion.

The  $I^2R$  loss at rated load is one per unit (by definition), but it will change for nonsinusoidal load currents if the rms value of the nonsinusoidal current differs from one per unit. The rms value of the load current is given by

$$I = \left[ \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2 \right]^{1/2} \text{ amps} \quad (\text{Eq 5})$$

In per unit form this equation will be

$$I(pu) = \left[ \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(pu))^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Eq 6})$$

### 5.3 Transformer Capability Equivalent Calculation Using Design Eddy-Current Loss Data.

The per unit eddy-current loss in the region of highest loss density can be defined for 60 Hz operation at rated current by the transformer manufacturer in terms of Equation 2, with  $P_{OSL-R}(pu)$  equal to zero (since there is no other stray loss in the windings by definition).

The per unit loss density in the region of highest eddy-current loss can then be recalculated for the defined nonsinusoidal load current by combining Equations 2, 4, and 6.

$$P_{LL}(\text{pu}) = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(\text{pu})^2 + P_{EC-R}(\text{pu}) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(\text{pu})^2 h^2 \quad (\text{Eq 7})$$

The per unit value of nonsinusoidal load current that will make the result of the Equation 7 calculation just equal to the design value of loss density in the highest loss region for 60 Hz, rated current operation is given by Equation 8.

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left[ \frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + \left[ \left( \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_k^2 h^2 / \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} f_k^2 \right) \cdot P_{EC-R}(\text{pu}) \right]} \right]^{1/2} \quad (\text{Eq 8})$$

**5.3.1 Example.** Given a nonsinusoidal load current of 1 pu rms magnitude and the following harmonic distribution,

$h$	$I_h(\text{pu})$
1	0.978
5	0.171
7	0.108
11	0.044
13	0.028
17	0.015
19	0.0098

determine the maximum load current that can be continuously drawn (under standard conditions) from an ANSI/IEEE C57.12.01-1979 [2] transformer having a rated full load current of 1200 amperes and whose winding eddy-current loss under rated conditions ( $P_{EC-R}$ ) at the point of maximum loss density is 15% of the local  $I^2R$  loss.

The maximum per unit local loss density under rated conditions,  $P_{LL-R}(\text{pu})$ , is then 1.15 pu. Equation 7 requires values for  $I_h(\text{pu})^2$ ,  $h^2$ , and  $I_h(\text{pu})^2 h^2$ . Equation 8 also requires values for  $f_h$ ,  $f_h^2$ , and  $f_h^2 h^2$ . These can be calculated and tabulated as follows.

$h$	$I_h(\text{pu})$	$I_h(\text{pu})^2$	$h^2$	$I_h(\text{pu})^2 h^2$	$f_h$	$f_h^2$	$f_h^2 h^2$
1	0.978	0.957	1	0.957	1.000	1.0000	1.0000
5	0.171	0.029	25	0.731	0.175	0.0306	0.7643
7	0.108	0.012	49	0.571	0.110	0.0122	0.5975
11	0.044	0.002	121	0.234	0.045	0.0020	0.2449
13	0.028	0.00078	169	0.133	0.029	0.0008	0.1385
17	0.015	0.00023	289	0.065	0.015	0.0002	0.0680
19	0.0098	0.00010	361	0.035	0.010	0.0001	0.0362
$\Sigma$		1.00		2.726		1.0459	2.8494

From Equation 7 the local loss density for the nonsinusoidal load current is

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1.00 + 0.15 \cdot 2.726 = 1.4089 \text{ pu}$$

and the maximum permissible nonsinusoidal load current with the given harmonic composition, from Equation 8, is

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left[ \frac{1.15}{1 + \frac{2.8494}{1.0459} \cdot 0.15} \right]^{1/2} = 0.9035$$

or

$$I_{\max} = 0.9035 \cdot 1200 = 1084 \text{ amps}$$

Thus, with the given nonsinusoidal load current harmonic composition the transformer capability is approximately 90% of its sinusoidal load current capability.

**5.4 Transformer Capability Equivalent Calculation Using Data Available from Certified Test Report.** In order to make the calculation with this limited data, certain assumptions have been made that are considered to be conservative. These assumptions may be modified based on guidance from the manufacturer for a particular transformer.

(1) The certified test report includes all data listed in the appendixes to ANSI/IEEE C57.12.90-1987 [4] or ANSI/IEEE C57.12.91-1979 [5].

(2) All of the stray loss is assumed to be winding eddy-current loss.

(3) The  $I^2R$  loss is assumed to be uniformly distributed in each winding.

(4)<sup>4</sup> The division of eddy-current loss between the windings is assumed to be as follows:

(a) 60% in the inner winding and 40% in the outer winding for all transformers having a maximum self-cooled current rating of less than 1000 amperes (regardless of turns ratio).

(b) 60% in the inner winding and 40% in the outer winding for all transformers having a turns ratio of 4:1 or less.

(c) 70% in the inner winding and 30% in the outer winding for all transformers having a turns ratio greater than 4:1 and also having one or more windings with a maximum self-cooled current rating greater than 1000 amperes.

(5)<sup>5</sup> The eddy-current loss distribution within each winding is assumed to be nonuniform. The

<sup>4</sup>A high percentage of the leakage flux flowing axially in and between the windings is attracted radially inward at the ends of the windings, because there is a lower reluctance return path through the core leg than through the unit permeability space outside the windings. As a result, the highest magnitude of the radial component of leakage flux density (and highest eddy loss) occurs in the end regions of the inner winding. In the absence of other information, the inner winding may be assumed to be the low voltage winding. The eddy loss distribution assumptions (4) and (5) are very conservative.

<sup>5</sup>See footnote 4.



maximum eddy-current loss density is assumed to be in the region of the winding hottest-spot and is assumed to be 400% of the average eddy-current loss density for that winding.

**5.4.1 Calculations.** As established in test codes ANSI/IEEE C57.12.90-1987 [4] and ANSI/IEEE C57.12.91-1979 [5], the stray loss component of the load loss is calculated by subtracting the  $I^2R$  loss of the transformer from the measured load loss. By assumption (2) of this section, all of the stray loss is taken to be winding eddy-current loss. Therefore:

$$P_{EC-R} = P_{LL} - K [(I_{1-R})^2 R_1 + (I_{2-R})^2 R_2] \text{ watts} \quad (\text{Eq 9})$$

where

$$K = 1 \text{ for single-phase transformers} \\ = 1.5 \text{ for three-phase transformers (ANSI/IEEE C57.12.91-1979 [4], 9.2.5.1)}$$

NOTE: Many test reports for three-phase transformers show the resistance of three phases in series. In these cases values for  $R_1$  and  $R_2$  may be calculated as follows:

Delta Winding:  $R_1$  or  $R_2 = 2/9$  of three-phase resistance  
Wye Winding:  $R_1$  or  $R_2 = 2/3$  of three-phase resistance

The low-voltage (inner) winding eddy-current loss can be calculated from the value of  $P_{EC-R}$  determined from Equation 9 as either  $0.6 P_{EC-R}$  watts or  $0.7 P_{EC-R}$  watts, depending on the transformer turns ratio and current rating. The low-voltage winding eddy-current loss in per unit of that winding's  $I^2R$  loss will be either

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0.6 P_{EC-R} \text{ watts}}{K (I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (\text{Eq 10})$$

or

$$P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0.7 P_{EC-R} \text{ watts}}{K (I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (\text{Eq 11})$$

Since by assumption (3) above the  $I^2R$  loss is assumed to be uniformly distributed within the winding, and by assumption (5) the maximum eddy-current loss density is assumed to be 400% of the average value,

$$\text{Max } P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{2.4 P_{EC-R} \text{ watts}}{K (I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (\text{Eq 12})$$

or

$$\text{Max } P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{2.8 P_{EC-R} \text{ watts}}{K (I_{2-R})^2 R_2 \text{ watts}} \text{ pu} \quad (\text{Eq 13})$$

**5.4.2 Example.** Given a nonsinusoidal load current with the following harmonic distribution:

$h$	$I_h(\text{pu})$
1	1.0
5	0.175
7	0.110
11	0.045
13	0.029
17	0.015
19	0.010

determine the maximum load current that can be continuously drawn (under standard conditions) from an ANSI/IEEE C57.12.01-1979 [2] transformer with the following characteristics taken from the certified test report.

High-Voltage Winding

12 000 volts delta

Resistance = 3.8150 ohms @ 170 °C\*

Low-Voltage Winding

480 volts delta

Resistance = 0.00411 ohms @ 170 °C\*

Rated Capacity

2500 kVA, 3-phase, 150 °C rise

Type AA

Load Losses at 170 °C = 31 232 watts

(\*Resistances are the sum of the three phases in series.)

Values for  $R_1$  and  $R_2$  can be determined using the note in 5.4.1:

$$R_1 = 0.84778 \text{ ohms} \quad R_2 = 0.0009133 \text{ ohms}$$

Values for  $I_{1-R}$  and  $I_{2-R}$  calculated from kVA and voltage ratings are as follows:

$$I_{1-R} = 120.28 \text{ amps} \quad I_{2-R} = 3007 \text{ amps}$$

$P_{EC-R}$  can be calculated from Equation 9 as follows:

$$P_{EC-R} = 31\,232 - 1.5 [(120.28)^2 (0.894778) \\ + (3007)^2 (0.0009133)] \\ = 31\,232 - 1.5 [12\,264.7 + 8258.6] \\ = 31\,232 - 30\,785 = 447 \text{ watts}$$

Since the transformer turns ratio exceeds 4:1 and the secondary current exceeds 1000 amps, the low-voltage winding eddy-current loss is 0.7 times  $P_{EC-R}$  and Max  $P_{EC-R}$  can be calculated from Equation 13 as follows:

$$\text{Max } P_{EC-R} = \frac{2.8 \cdot 447}{1.5 \cdot 8258.6} = 0.101 \text{ pu}$$

As in the previous example, values for  $I_h(\text{pu})^2$ ,  $h^2$ , and  $I_h(\text{pu})^2 h^2$  are required for the calculation of  $P_{LL}(\text{pu})$  from Equation 7. These are calculated and tabulated as follows (in this case  $f_h = I_h(\text{pu})$ , so the calculation of factors for Equation 8 is simplified):

$h$	$\frac{f_h}{I_h(\text{pu})}$	$\frac{f_h^2}{I_h(\text{pu})^2}$	$h^2$	$\frac{f_h^2 h^2}{I_h(\text{pu})^2 h^2}$
1	1.000	1.000	1	1.000
5	0.175	0.0306	25	0.765
7	0.110	0.0121	49	0.593
11	0.045	0.002025	121	0.245
13	0.029	0.000841	169	0.142
17	0.015	0.000225	289	0.065
19	0.010	0.000010	361	0.036
		1.045826		2.846

Applying the third column summation in Equation 6 gives an rms value of the nonsinusoidal load current of 1.023 pu. From Equation 7 the local loss density produced by the nonsinusoidal load current in the region of highest eddy-current loss is:

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1.0458 + 0.101 \cdot 2.846 = 1.333 \text{ pu}$$

Thus, the rms value of the maximum permissible nonsinusoidal load current with the given harmonic composition, from Equation 8, is

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left[ \frac{1.101}{1 + \frac{2.846}{1.0458} \cdot 0.101} \right]^{1/2} = 0.9293$$

or

$$I_{\max} = 0.9293 \cdot 3007 = 2794 \text{ amps}$$

In this case the transformer capability with the given nonsinusoidal load current harmonic composition is approximately 93% of its sinusoidal load current capability.

## 6. Bibliography

- [B1] Sergio Crepaz, "Eddy-Current Losses in Rectifier Transformers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-89, No 7, Sept/Oct 1970.
- [B2] *Electrical Coils and Conductors*, Ch 3, H. B. Dwight, McGraw-Hill Book Co, Inc 1945.
- [B3] *Magnetic Circuits and Transformers*, Ch 5, MIT Elect Engr Staff, John Wiley & Sons, NY 1949.

## Appendix

(This Appendix is not a part of ANSI/IEEE C57.110-1986, but is included for information only.)

### Tutorial Discussion of Transformer Losses and the Effect of Harmonic Currents on These Losses

Power transformers with ratings up to 50 MVA are almost always of core form construction. High-voltage and low-voltage windings are concentric cylinders surrounding a vertical core leg of rectangular or circular cross section. The vertical core legs and the horizontal core yoke members that constitute the magnetic circuit are made up of thin steel laminations. In the top and bottom yoke regions there are usually external clamping structures (clamps) that may be made of either metallic or insulating materials. Oil-immersed transformers are contained within a steel tank, while dry-type transformers may be either free-standing or surrounded by a metal enclosure.

If direct current is passed through the transformer winding conductors, a simple  $I^2R$  loss will be produced, where  $R$  is the dc resistance of the winding. However, if an alternating current (ac) of the same magnitude is passed through the winding conductors, an additional loss is produced. This can be explained as follows.

When the transformer windings carry the ac current, each conductor is surrounded by an alternating electromagnetic field whose strength is directly proportional to the magnitude of the current. A picture of the composite field produced by rated load current flowing through all the winding conductors is shown in Fig A1, which is a cross-sectional view through the core, windings, clamps, and tank. Each metallic conductor linked by the electromagnetic flux experiences an internal induced voltage that causes eddy currents to flow in that conductor. The eddy currents produce losses that are dissipated in the form of heat, producing an additional temperature rise in the conductor over its surroundings. This type of extra loss beyond the  $I^2R$  loss is frequently referred to as "stray loss." Although all of the extra loss is an eddy-current loss, the portion in the windings is usually called "eddy-current loss" ( $P_{EC}$ ), and the portion outside the windings is called "other stray loss" ( $P_{OSL}$ ).

Eddy-current loss in winding conductors is proportional to the square of the electromagnetic field strength (or the square of the load current that produces the field) and to the square of the ac frequency. Other stray losses are generally proportional to current raised to a power slightly less than 2, because the depth of penetration of

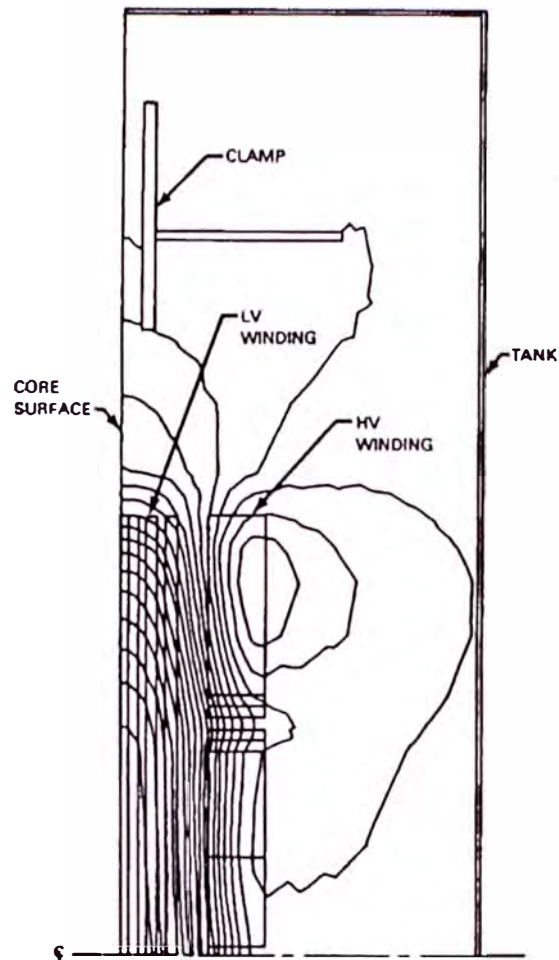


Fig A1  
Electromagnetic Field Produced by  
Load Current in a Transformer

the electromagnetic flux into the other metallic parts (usually steel) varies with the field strength. (For very high-frequency harmonic currents the electromagnetic flux may not totally penetrate the winding conductors either, but it is conservative to assume that the eddy-current loss,  $P_{EC}$ , is proportional to the square of the harmonic current magnitude.)

When a transformer is subjected to a load current having significant harmonic content, the extra eddy-current loss in winding conductors

and in other metallic parts will elevate the temperature of those parts above their normal operating temperature under rated conditions. Experience has shown that the winding conductors are the more critical parts for determination of acceptable operating temperature, so the objective should be to prevent the losses in winding conductors under harmonic load conditions from exceeding the losses under rated 60 Hz operating conditions.

The inner winding of a core form transformer typically has higher eddy-current loss than the outer winding, because the electromagnetic flux has a greater tendency to fringe inwardly toward the low reluctance path of the core leg. Furthermore, the highest local eddy-current loss usually occurs in the end conductors of the inside winding. This is a result of the fact that this is the region of highest radial electromagnetic flux density (closest spacing of the radially directed flux lines in Fig A1) and the radial flux passes through the width dimension of the rectangular winding conductor. Since the width dimension of a conductor is typically 3 to 5 times the thickness dimension and eddy-current loss is proportional to the square of the dimension, high loss is produced in the end conductors. Certain simplifying assumptions have been made in this recommended practice about the relative proportions of the eddy-current losses in the inner and outer windings and the relation between average eddy-current losses and maximum local eddy-current

losses. These assumptions, which are conservative, may be used when specific knowledge of the eddy-current loss magnitude is not available. However, more accurate calculations can be made if design values of eddy-current losses are available from the transformer manufacturer.

The recommendations for determination of acceptable operating conditions contained in this recommended practice are based on calculation of a "transformer capability equivalent," which establishes a current derating factor for load currents having a given harmonic composition. Equation 8 provides a calculation of the maximum rms value of a nonsinusoidal load current (in per unit of rated load current) that will ensure that the losses in the highest loss density region of the windings do not exceed the design value of losses under rated 60 Hz operating conditions. Two example cases are presented for the situations where design eddy-current loss data are available from the manufacturer or where they are not.

Harmonic currents flowing through transformer leakage impedance and through system impedance may also produce some small harmonic distortion in the voltage waveform at the transformer terminals. Such voltage harmonics also cause extra harmonic losses in the transformer core. However, operating experience has not indicated that core temperature rise will ever be the limiting parameter for determination of safe magnitudes of nonsinusoidal load currents.

**ANEXO B**  
**CORRIENTES PARÁSITAS EN TRANSFORMADORES**



**50**  
**AÑOS**

**1952-2002**

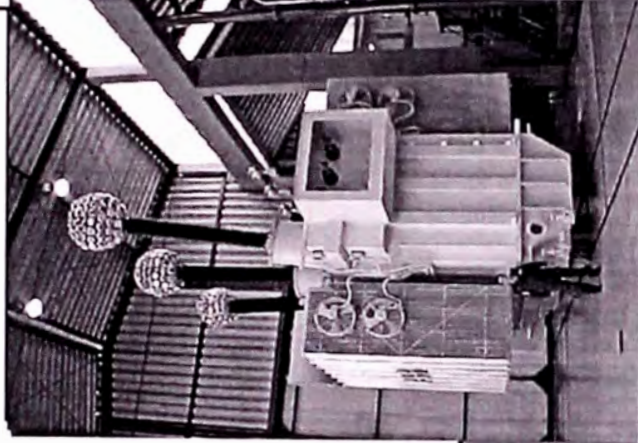


**Liderando el  
Mercado Peruano**

**ABB**

# Corrientes Parásitas en Transformadores

Ing. Manuel Carranza A.  
Asesor Gerencia General



# Corrientes Parásitas en Transformadores

Este capítulo está dedicado a la explicación de la producción de pérdidas por corrientes parásitas en los arrollamientos de transformadores de potencia.

Se distingue la influencia de las **corrientes armónicas** en éstas pérdidas y se presenta la evaluación del **Factor K** señalado por las normas ANSI para la selección de transformadores utilizados en redes con elevado contenido de corrientes armónicas.

Se considera de utilidad la difusión de estos conceptos por estar involucrados en la problemática de la calidad de la energía.

La **Calidad de la Energía** es un tema muy **actual**, sobre el cual habrá seguramente mucha actividad de difusión en nuestro medio.



# 1 Pérdidas específicas en un conductor

En un conductor de Sección  $S$ , longitud  $L$ . Se tiene:

Peso:  $G = \gamma * S * L$

Resistencia:  $R = \rho * L / S$

Intensidad  $I = S * J$

Potencia  $R * I^2 = \rho * S * L * J^2$

Dividiendo potencia entre peso:

$$\text{watt / kg} = (\rho / \gamma) * J^2 \Rightarrow P_e = \alpha * J^2 \quad (1)$$

Para Cu a 75 °C:

$$\rho = 2.16 * 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$\gamma = 8.9 * 10^3 \text{ kg/ m}^3$$

expresando  $J$  en  $\text{A/ mm}^2$  :  $P_e = 2.427 * J^2 \text{ [W / kg]}$

## 2 Pérdidas por Corrientes Parásitas

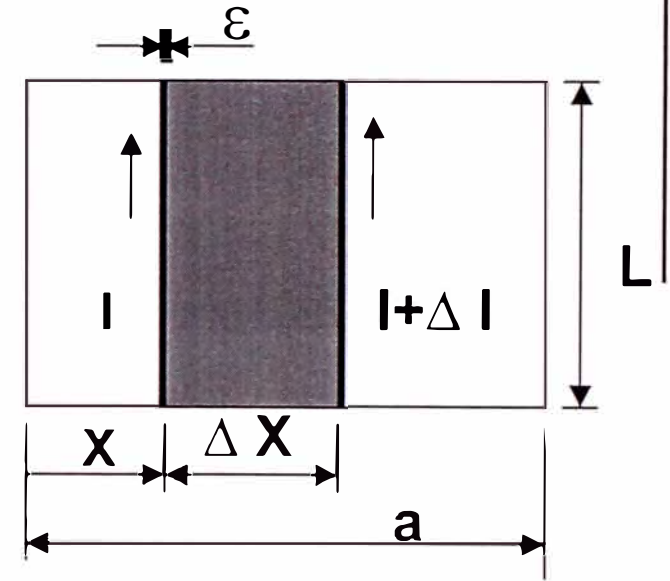
Hipótesis:

- 1 Intensidad de campo normal al plano
- 2 Las C. Parásitas no alteran el campo
- 3 Longitud  $L \gg a$

Sea  $b$  el espesor del conductor completo y  $\varepsilon$  el espesor de los caminos elementales en los puntos  $X$  y  $\Delta X$ .

La resistencia en cada elemento es:

$$R = \rho * L / ( b * \varepsilon ) \quad (2)$$



## 2 Pérdidas por Corrientes Parásitas

En el cuadrilátero sombreado:

Tensión inducida:

$$e = - \mu * L * \Delta X * (dH / dt) \quad (3)$$

Caída de tensión:

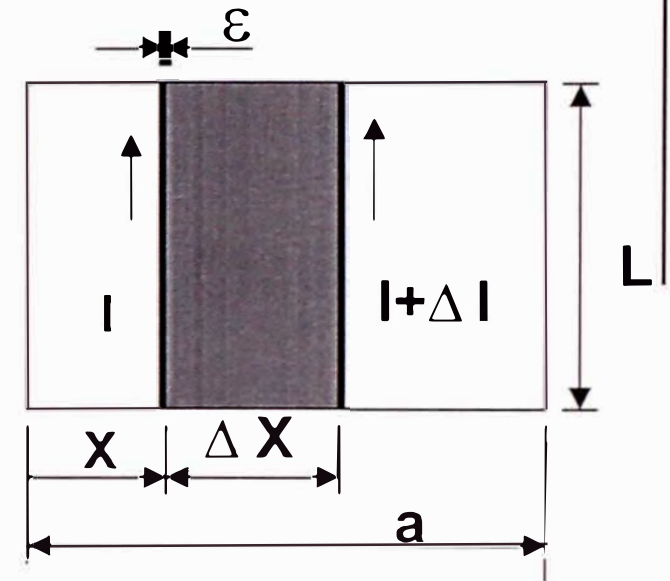
$$\Sigma (I * R) = R * (I + \Delta I) - R * I = R * \Delta I$$

Introduciendo la densidad de corriente **J**:

$$\Delta I = b * \varepsilon * \Delta J$$

Tomando **R** de (2):

$$\Sigma (I * R) = \rho * L * \Delta J \quad (4)$$



## 2.1 Ecuación fundamental

Aplicando la 2da ley de Kirchhoff:

$$\sum e = \sum (I * R)$$

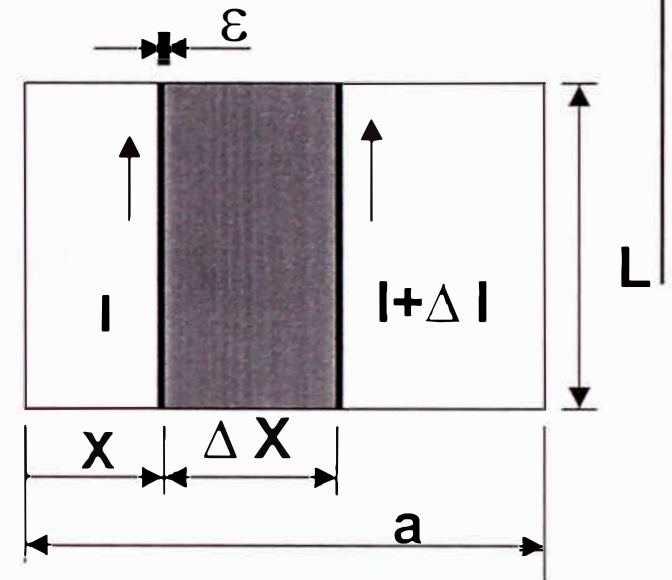
de (3) y (4):

$$- \mu * L * \Delta X * (dH / dt) = \rho * L * \Delta J$$

$$y: \frac{\Delta J}{\Delta X} = - \frac{\mu}{\rho} * \frac{dH}{dt}$$

En la forma diferencial:

$$\frac{dJ}{dX} = - \frac{\mu}{\rho} * \frac{dH}{dt} \quad (5)$$



## 2.2 Aplicación a conductor pasivo: H independiente de X

$$H_t = H * \text{Sen}(\omega t) \quad \Rightarrow \quad (dH_t / dt) = \omega * H * \text{Cos}(\omega t)$$

Con la ecuación fundamental (5), se tiene:

$$(dJ / dx) = - (\mu / \rho) * \omega * H * \text{Cos}(\omega t)$$

cuya integración da:

$$J = C - (\mu / \rho) * \omega * H * \text{Cos}(\omega t) * X$$

Como la corriente parásita no tiene efecto externo, se cumple:

$$I = \int J * dX = 0 \quad \Rightarrow \quad C = (\mu / \rho) * \omega * H * \text{Cos}(\omega t) * a / 2$$

y se tiene para J:

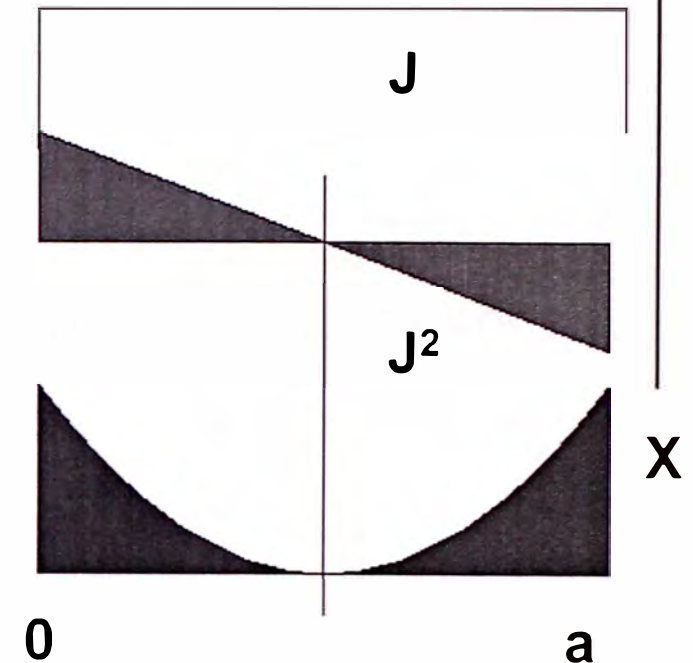
$$J = (\mu / \rho) * \omega * H * \text{Cos}(\omega t) * (a / 2 - X) \quad (6)$$

## 2.2 Conductor pasivo

Para conocer las pérdidas se calcula el valor medio cuadrático de  $J$ , para el ancho del conductor, en el rango de 0 a  $A$ ., de la función:  $Y = ( A/2 - X )$

$$J_m^2 = 1/a * \int J^2 * dX$$

$$J_m = (\mu / \rho) * \omega * H * \text{Cos}(\omega t) * a / \sqrt{12}$$



Tomando el valor eficaz:

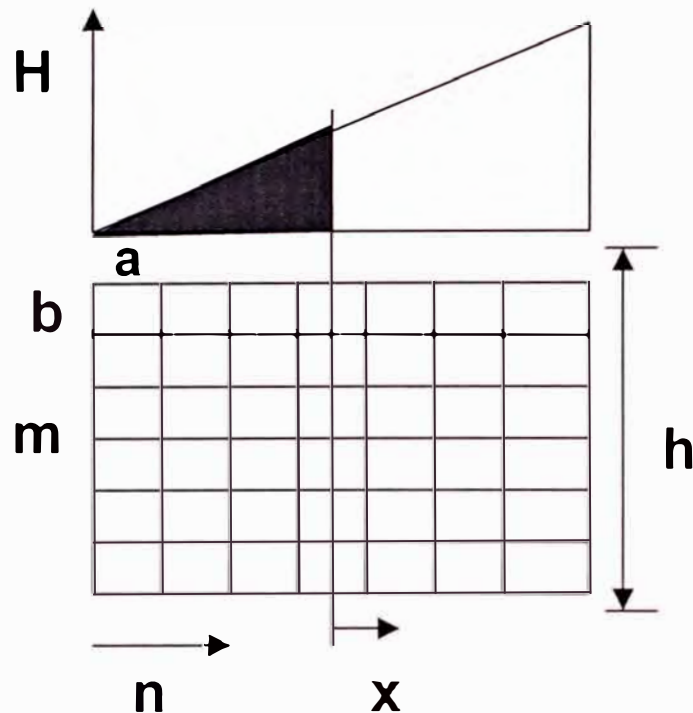
$$J_m = (\mu / \rho) * \omega * H * a / \sqrt{24} \quad (7)$$

y las pérdidas específicas:

$$\text{watt / kg} = (\rho / \gamma) * (\mu / \rho)^2 * (\omega * H * a)^2 / 24 \quad (8)$$



## 2.3 Aplicación a conductores activos



Arrollamiento de **m** conductores por capa

Densidad de corriente de trabajo:  $J_0$

Altura de columna: **h**

Intensidad de campo en la placa **n** :

$$H = ( m * b/h ) * \sqrt{2} * \text{Sen}(\omega t) * J_0 * ( ( n - 1 ) * a + X ) \quad (9)$$

## 2.3 Aplicación a conductores activos

De la ecuación del campo:

$$H = ( m * b/h ) * \sqrt{2} * \text{Sen}(\omega t) * J_0 * ( ( n - 1 ) * a + X ) \quad (9)$$

obtenemos su derivada con respecto al tiempo:

$$( dH/dt ) = ( m * b/h ) * \sqrt{2} * \omega * \text{Cos}(\omega t) * J_0 * ( ( n - 1 ) * a + X )$$

Para continuar con la función de  $n$  y  $X$ , usamos el parámetro:

$$P = ( m * b/h ) * \sqrt{2} * \omega * \text{Cos}(\omega t) * J_0 \quad (10)$$

de modo que:

$$( dH/dt ) = P * ( ( n - 1 ) * a + X ) \quad (11)$$



## 2.3 Aplicación a conductores activos

Aplicando esta expresión a la ecuación fundamental (5):

$$dJ / dX = ( \mu / \rho ) * ( dH / dt )$$

resulta:

$$( dJ/dX ) = - ( \mu / \rho ) * P * ( ( n - 1 ) * a + X ) \quad (12)$$

Integrando:

$$J = C - ( \mu / \rho ) * P * ( ( n - 1 ) * a * X + X^2 / 2 ) \quad (13)$$

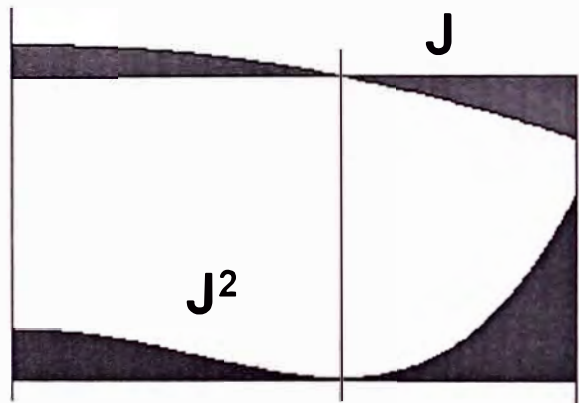
Como la corriente parásita no tiene efecto externo, se cumple:

$$I = \int J * dX = 0 \quad \Rightarrow \quad C = ( \mu / \rho ) * P * ( (n-1) a^2 / 2 + a^2 / 6 )$$

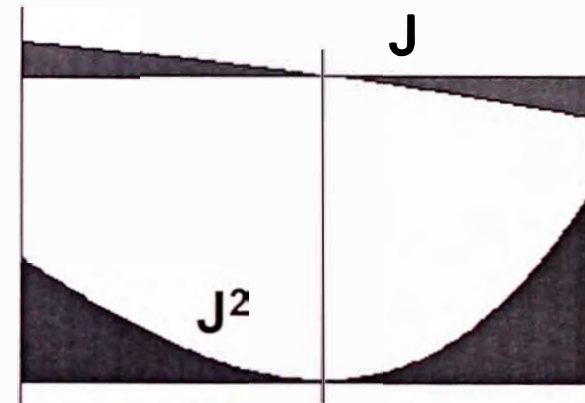
## 2.3 Aplicación a conductores activos

y la función de **J** resulta :

$$J = (\mu / \rho) * P * (a^2 * (3 * n - 2) - 6 * a * (n - 1) * X - 3 * X^2) / 6 \quad (14)$$



$n = 1$



$n = 2$

## 2.3 Aplicación a conductores activos

La distribución de la densidad de corriente no es lineal, como en el caso del conductor pasivo, sino parabólica.

Este efecto se nota más en la primera capa. A medida que aumenta el número de capas, se acerca más a la distribución lineal, porque se reduce el peso de la corriente de trabajo propia en relación a la suma de las corrientes de las capas anteriores.

Para la evaluación de las pérdidas se debe calcular:

- \* El valor medio cuadrático de  $\mathbf{J}$  en cada capa:  $\mathbf{J}_c$
- \* La media aritmética de  $\mathbf{J}_c$  , para las capas de  $\mathbf{1}$  a  $\mathbf{n}$  :  $\mathbf{J}_m$ :



## 2.3 Aplicación a conductores activos

El valor medio cuadrático:  $J_c$  , para cada capa es:

$$J_c^2 = (\mu / \rho)^2 * P^2 * a^4 * (n * (n - 1) / 12 + 1 / 45) \quad (15)$$

La media aritmética:  $J_m$  , para las capas de 1 a n es :

$$J_m^2 = (\mu / \rho)^2 * P^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) / 36 \quad (16)$$

Para visualizar la relación con el número de capas, hacemos: :

$$N_c^2 = (n * (n - 1) / 12 + 1 / 45) \quad (17)$$

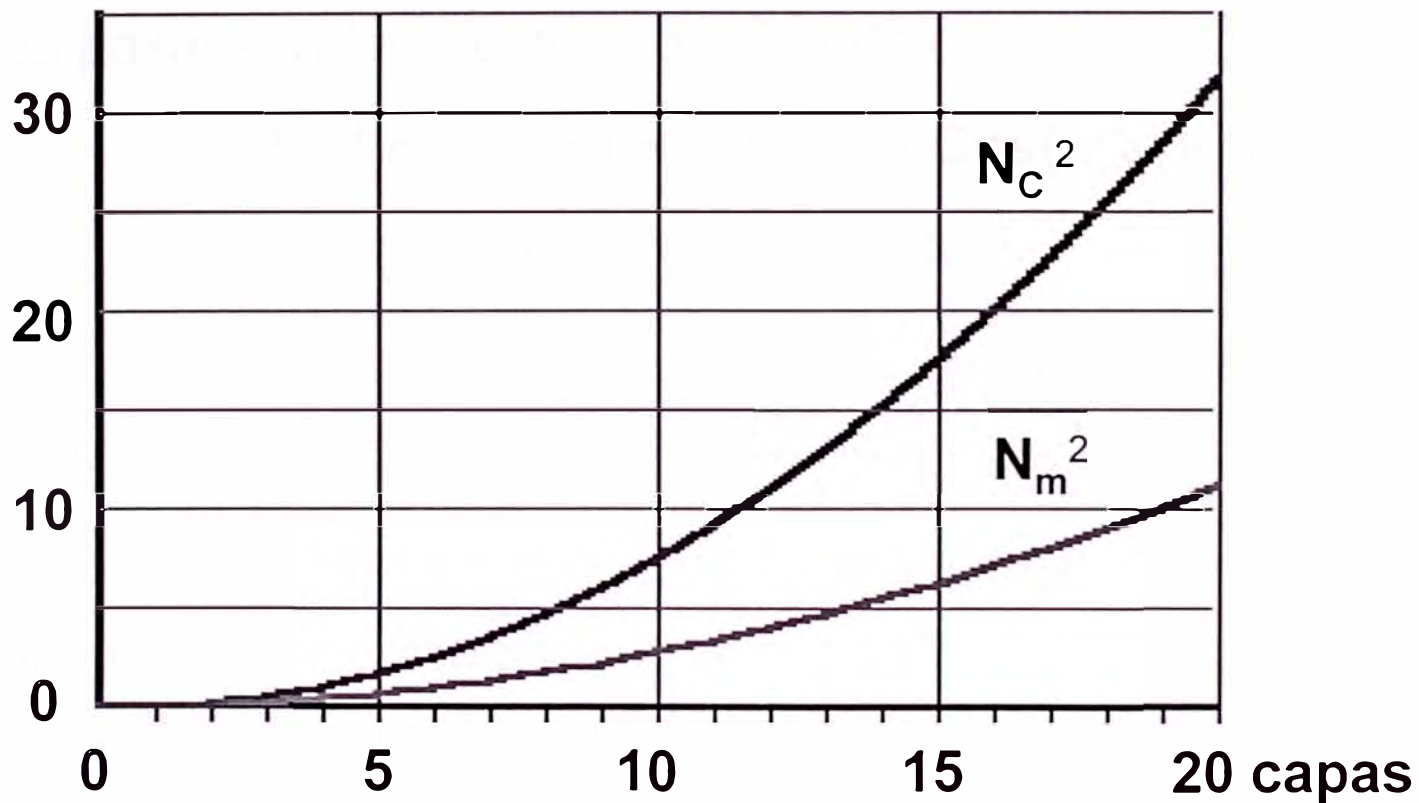
$$N_m^2 = (n^2 - 0.2) / 36 \quad (18)$$

En el siguiente cuadro se muestra el gráfico de estas funciones



## 2.3 Aplicación a conductores activos

### Función del Número de Capas



## 2.3 Conductores activos. Adición de las Pérdidas

El parámetro P de la ecc. (10), está dado en forma sinusoidal. Podemos pasar a valor efectivo, dividiéndolo entre  $\sqrt{2}$  :

$$(10) : \quad \mathbf{P} = ( m * b/h ) * \sqrt{2} * \omega * \mathbf{Cos}(\omega t) * \mathbf{J}_0$$
$$\mathbf{P}^* = ( m * b/h ) * \omega * \mathbf{J}_0 * \mathbf{N}_m \quad (19)$$

Para evaluar la pérdidas totales, debería considerarse el cuadrado de la suma de las intensidades: de trabajo y parásitas.

Como las corrientes parásitas están en **cuadratura** con la corriente de trabajo, las pérdidas totales se obtienen haciendo la suma de las pérdidas, calculadas por **separado**.

## 2.3 Conductores activos. Pérdidas por Corrientes Parásitas

Introduciendo en (16) el nuevo valor de P:

$$J_m^2 = (\mu / \rho)^2 * P^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) / 36$$

$$J_m^2 = (\mu / \rho)^2 * (m*b/h)^2 * \omega^2 * J_0^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) / 36$$

Para indicar estas pérdidas en relación a las pérdidas óhmicas,

Hacemos la relación  $\alpha = J_m^2 / J_0^2$

$$\alpha = (\mu / \rho)^2 * (m*b/h)^2 * \omega^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) / 36 \quad (20)$$

Para la frecuencia fundamental:

$$\alpha = (20 * \pi * \mu / \rho)^2 * (m*b/h)^2 * (f / 60)^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) \quad (21)$$

## 2.3 Conductores activos. Pérdidas por Corrientes Parásitas

$$\alpha = ( 20 * \pi * \mu / \rho ) ^ 2 * ( m * b / h ) ^ 2 * ( f / 60 ) ^ 2 * a ^ 4 * ( n ^ 2 - 0.2 ) \quad ( 21 )$$

Para  $\alpha$  en %, Cobre a 75 °C y  $a$  en mm (  $\mu = 4\pi * 10^{-7} \text{ V s m / A}$  ) resulta:

$$\alpha \% = 1,336 * 10^{-3} * ( f / 60 ) ^ 2 * ( m * b / h ) ^ 2 * a ^ 4 * ( n ^ 2 - 0.2 ) \quad ( 22 )$$

Ej: Para  $a = 5\text{mm}$ ,  $n = 4$  capas y  $f = 60 \text{ Hz}$

$$\alpha \% = 13.2 \%$$

Estas reciben también el nombre de **Pérdidas Suplementarias**



### 3 Efecto de las armónicas de corriente

En la ecuación (20)

$$\alpha = (\mu / \rho)^2 * (m*b/h)^2 * \omega^2 * a^4 * (n^2 - 0.2)/36$$

la velocidad angular es:  $\omega = 2 * \pi * h * f$ , donde **h** es el número de orden de la armónica

Si consideramos también que la amplitud de la armónica está referida al valor fundamental por un factor  $I_h$  (por unidad p.u.), la fórmula (22), recibe un factor adicional para expresar las pérdidas ocasionadas por cada armónica:  $(h * I_h)^2$

$$\alpha_{\%k} = 1,336 * 10^{-3} * (f / 60)^2 * (m*b/h)^2 * a^4 * (n^2 - 0.2) * (h * I_h)^2 \quad (23)$$

## 4 Factor K para transformadores

Salvo indicación en contrario, los transformadores son diseñados considerando sólo el efecto térmico de la onda fundamental.

Dadas las armónicas de intensidad, referidas a la fundamental ( $I_{60} = 1$ ), la relación de pérdidas  $\alpha$ , aumenta a:

$$\alpha_a = \alpha * (\sum (h * I_h)^2) / (\sum I_h^2) \quad (24)$$

La relación :  $K = (\sum (h * I_h)^2) / (\sum I_h^2) \quad (25)$

recibe en la práctica el nombre de **Factor K** y se lo utiliza para indicar el grado de distorsión armónica de las aplicaciones.

Si hubiera necesidad de aplicar, a un transformador ya construido, una carga con cierto contenido de armónicas de corriente, habría que establecer una intensidad de la carga reducida:  $I_r$ , de modo que las pérdidas totales en los arrollamientos no excedan los valores de diseño

Se respeta la igualdad:

$$I_n^2 * (1 + \alpha) = I_r^2 * (1 + K * \alpha)$$

de donde resulta: 
$$I_r = I_n * ((1 + \alpha) / (1 + K * \alpha))^{1/2}$$

Ej.: para  $\alpha = 15\%$  (0.15 p.u.) y  $K = 2.76$ , resulta:

$$I_r = I_n * ((1 + 0.15) / (1 + 2.726 * 0.15))^{1/2} = 0.903 * I_n$$

#### 4. 1      **Calculo del Factor K**

<b>h</b>	<b>I<sub>h</sub></b>	<b>I<sub>h</sub><sup>2</sup></b>	<b>(h * I<sub>h</sub>)<sup>2</sup></b>	<b>f<sub>h</sub></b>	<b>f<sub>h</sub><sup>2</sup></b>	<b>(h * f<sub>h</sub>)<sup>2</sup></b>
1	0.9780	0.9570	0.957	1.000	1.0000	1.0000
5	0.1710	0.0290	0.731	0.175	0.0306	0.7643
7	0.1080	0.0120	0.571	0.110	0.0122	0.5975
11	0.0440	0.0020	0.234	0.045	0.0020	0.2449
13	0.0280	0.0078	0.133	0.029	0.0008	0.1385
17	0.0150	0.00023	0.065	0.015	0.0002	0.0680
19	0.0098	0.00010	0.035	0.010	0.0001	0.0362
<b>Σ</b>		<b>1.000</b>	<b>2.726</b>		<b>1.0459</b>	<b>2.8404</b>

**Factor K = 2.8404 / 1.0459 = 2.724**



## 4.2 Transformadores tipo K

El factor K sirve para especificar los transformadores previstos para soportar corrientes distorsionadas

Los valores comerciales de **K** : **4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50.**

Estos transformadores son de mayor tamaño que los convencionales, pueden ocupar 30 a 40 % más espacio, pesar 15 a 25 % más

## **4.3 Fuentes de Armónicas**

### **A Electrónica de potencia**

**Variadores de velocidad AC y DC**

### **B Arcos Eléctricos**

**Hornos de arco, Luz fluorescente, Soldadura eléctrica**

### **C Dispositivos Ferromagnéticos**

**Transformadores y reactores saturados**

# 5 Bibliografía

---

**5.1 Vidmar, Milan. ( Ljubljana ) Die Transformatoren**  
Spriger - Verlag. Berlin 1921

**5.2 Kuchler, Rudolf. ( Stuttgart ) Die Transformatoren**  
Springer - Verlag. Berlin / Heidelberg 1966

**5.3 ANSI /IEEE C57.110-1986**  
IEEE Recommended Practice for Establishing  
Transformer Capability When Supplying  
Nonsinusoidal Load currentes

ABB

Brain Power.<sup>TM</sup>

[www.abb.com/pe](http://www.abb.com/pe)



**ANEXO C**  
**MEDICIONES DE ARMONICOS**

## Phase A Current Harmonics (Amps - RMS)

Para Transformador TR1

From 02/22/2002 11:01:56 To 03/08/2002 11:01:56

Date	Harmonic: 1		Harmonic: 2		Harmonic: 3	
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
02/22/2002 11:01:5	84.876122	86.585297	0.349604	1.165347	0.07769	0.233069
22/02/2002 11:11	83.516548	86.002625	0.271914	0.621518	0.116535	0.271914
02/22/2002 11:21:5	83.050415	85.264572	0.15538	0.427294	0.15538	0.388449
02/22/2002 11:31:5	81.10817	84.953812	0.233069	0.466139	0.116535	0.271914
02/22/2002 11:41:5	81.651993	82.817337	0.388449	0.660363	0.116535	0.194225
02/22/2002 11:51:5	81.885063	83.516548	0.427294	0.738053	0.116535	0.233069
02/22/2002 12:01:5	82.933876	84.876122	0.504984	0.738053	0.116535	0.310759
02/22/2002 12:11:5	84.021538	86.080315	0.349604	0.660363	0.116535	0.271914
02/22/2002 12:21:5	81.574303	84.720741	0.349604	0.621518	0.07769	0.271914
02/22/2002 12:31:5	78.738625	80.60318	0.233069	0.738053	0.07769	0.427294
02/22/2002 12:41:5	78.894005	80.60318	0.194225	0.427294	0.07769	0.233069
02/22/2002 12:51:5	78.389023	80.68087	0.194225	0.427294	0.07769	0.233069
02/22/2002 13:01:5	81.729683	85.536484	0.349604	0.621518	0.233069	0.388449
02/22/2002 13:11:5	84.138069	87.401039	0.310759	0.660363	0.233069	0.621518
02/22/2002 13:21:5	82.972725	88.255623	0.349604	0.699208	0.271914	0.699208
02/22/2002 13:31:5	81.030479	82.700806	0.310759	0.738053	0.233069	0.621518
02/22/2002 13:41:5	81.10817	82.739647	0.310759	0.582674	0.233069	0.621518
02/22/2002 13:51:5	81.069321	83.827309	0.194225	0.582674	0.194225	0.621518
02/22/2002 14:01:5	81.613144	83.516548	0.116535	0.349604	0.194225	0.621518
02/22/2002 14:11:5	81.885063	83.943848	0.07769	0.310759	0.15538	0.582674
02/22/2002 14:21:5	84.487671	86.507607	0.07769	0.310759	0.194225	0.543829
02/22/2002 14:31:5	85.730705	87.090279	0.194225	0.504984	0.233069	0.660363
02/22/2002 14:41:5	85.653015	88.10025	0.310759	0.582674	0.233069	0.660363
02/22/2002 14:51:5	84.17691	85.924934	0.271914	0.543829	0.271914	0.427294
02/22/2002 15:01:5	84.138069	85.536484	0.271914	0.582674	0.271914	0.427294
02/22/2002 15:11:5	83.555389	85.109192	0.116535	0.427294	0.233069	0.621518
02/22/2002 15:21:5	84.17691	85.653015	0.194225	0.466139	0.271914	0.388449
02/22/2002 15:31:5	85.070343	86.391068	0.271914	0.504984	0.233069	0.427294
02/22/2002 15:41:5	84.681892	86.274536	0.15538	1.281882	0.233069	0.504984
02/22/2002 15:51:5	83.78846	85.769554	0.233069	0.543829	0.271914	0.427294
02/22/2002 16:01:5	79.981667	84.759583	0.388449	0.660363	0.233069	0.349604
02/22/2002 16:11:5	77.4179	79.515526	0.349604	0.582674	0.233069	0.349604
02/22/2002 16:21:5	77.145988	78.660934	0.233069	0.466139	0.233069	0.349604
02/22/2002 16:31:5	75.786407	78.117111	0.388449	0.621518	0.194225	0.349604
02/22/2002 16:41:5	77.029449	80.875092	0.466139	0.738053	0.233069	0.388449
02/22/2002 16:51:5	73.611099	75.902946	0.233069	0.582674	0.194225	0.349604
02/22/2002 17:01:5	71.668854	73.727631	0.271914	0.543829	0.15538	0.388449
02/22/2002 17:11:5	72.018456	73.261497	0.310759	0.621518	0.116535	0.271914
02/22/2002 17:21:5	71.668854	73.183807	0.233069	0.466139	0.15538	0.271914
02/22/2002 17:31:5	72.562286	74.31031	0.310759	0.543829	0.15538	0.310759
02/22/2002 17:41:5	70.30928	72.911888	0.466139	0.660363	0.194225	0.349604
02/22/2002 17:51:5	69.76545	70.814262	0.310759	0.660363	0.233069	0.388449
02/22/2002 18:01:5	70.270439	71.863075	0.07769	1.087657	0.116535	0.466139
02/22/2002 18:11:5	70.037361	72.290375	0.15538	0.310759	0.07769	0.15538
02/22/2002 18:21:5	68.405884	73.64994	0.116535	0.349604	0.07769	0.15538
02/22/2002 18:31:5	68.755486	70.697731	0.116535	0.466139	0.038845	0.194225
02/22/2002 18:41:5	72.834198	76.485619	0.116535	0.349604	0.038845	0.15538
02/22/2002 18:51:5	75.553345	76.91291	0.07769	0.310759	0.07769	0.15538
02/22/2002 19:01:5	75.669876	76.796379	0.07769	0.194225	0.07769	0.15538
02/22/2002 19:11:5	76.369087	77.456741	0.07769	0.310759	0.07769	0.15538

Harmonic: 4		Harmonic: 5		Harmonic: 6		Harmonic: 7
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg
0.543829	1.825711	6.797858	7.341687	0.07769	0.194225	0.776898
0.466139	0.815743	6.836704	7.380532	0.07769	0.194225	0.621518
0.504984	0.776898	6.681324	7.069773	0.07769	0.15538	0.504984
0.504984	0.660363	6.487099	7.147463	0.07769	0.15538	0.543829
0.543829	0.738053	6.525945	6.992083	0.07769	0.15538	0.738053
0.388449	0.582674	6.40941	6.836704	0.07769	0.15538	0.621518
0.427294	0.776898	6.137495	6.487099	0.07769	0.194225	0.543829
0.427294	0.776898	6.17634	6.603634	0.07769	0.15538	0.621518
0.427294	0.660363	6.059805	6.40941	0.07769	0.194225	0.543829
0.427294	0.893433	6.292875	6.914393	0.038845	0.15538	0.271914
0.427294	0.699208	6.525945	7.108618	0.038845	0.15538	0.310759
0.427294	0.699208	6.40941	6.836704	0.07769	0.15538	0.233069
0.388449	1.786866	5.321752	6.875548	0.07769	0.194225	0.194225
0.233069	0.738053	4.777924	5.282907	0.038845	0.15538	0.15538
0.15538	0.427294	5.399442	6.487099	0.07769	0.194225	0.194225
0.233069	0.466139	6.215185	6.564789	0.07769	0.194225	0.271914
0.15538	0.310759	6.137495	6.448255	0.07769	0.194225	0.310759
0.15538	0.310759	6.25403	6.642479	0.038845	0.15538	0.349604
0.194225	0.388449	6.215185	6.681324	0.038845	0.15538	0.310759
0.15538	0.427294	6.370565	6.875548	0.038845	0.15538	0.271914
0.116535	0.310759	6.487099	6.992083	0.038845	0.15538	0.466139
0.07769	0.310759	6.137495	6.836704	0.038845	0.15538	0.427294
0.07769	0.271914	5.943271	6.564789	0.038845	0.15538	0.466139
0.07769	0.271914	5.865581	6.215185	0.07769	0.194225	0.427294
0.116535	0.271914	6.059805	6.525945	0.07769	0.194225	0.466139
0.116535	0.310759	6.40941	6.836704	0.038845	0.233069	0.427294
0.07769	0.271914	6.370565	6.992083	0.07769	0.194225	0.466139
0.116535	0.349604	5.710201	6.797858	0.038845	0.194225	0.310759
0.116535	1.009968	5.632512	6.40941	0.038845	0.15538	0.349604
0.15538	0.388449	5.554821	6.33172	0.07769	0.194225	0.427294
0.116535	0.349604	5.515976	6.797858	0.07769	0.194225	0.349604
0.116535	0.310759	5.166372	6.02096	0.07769	0.15538	0.349604
0.116535	0.271914	5.088683	5.399442	0.07769	0.15538	0.194225
0.15538	0.310759	5.282907	5.787891	0.07769	0.194225	0.233069
0.116535	0.543829	5.554821	6.059805	0.116535	0.233069	0.233069
0.116535	0.427294	5.865581	6.33172	0.07769	0.194225	0.310759
0.116535	0.349604	5.477132	6.059805	0.038845	0.15538	0.310759
0.116535	0.310759	5.282907	5.671356	0.038845	0.15538	0.271914
0.07769	0.233069	5.321752	5.593667	0.07769	0.15538	0.271914
0.116535	0.466139	5.127528	5.593667	0.07769	0.15538	0.271914
0.194225	0.310759	5.399442	5.749046	0.116535	0.194225	0.388449
0.15538	0.271914	5.749046	7.108618	0.07769	0.194225	0.466139
0.194225	2.757988	5.865581	7.341687	0.038845	0.194225	0.271914
0.07769	0.194225	6.137495	6.487099	0.038845	0.15538	0.194225
0.116535	0.233069	6.02096	6.40941	0.038845	0.194225	0.233069
0.116535	0.233069	5.904426	6.215185	0.038845	0.15538	0.194225
0.07769	0.194225	5.515976	5.943271	0.038845	0.15538	0.233069
0.038845	0.15538	5.399442	5.749046	0.038845	0.15538	0.271914
0.07769	0.15538	5.438287	5.749046	0.038845	0.116535	0.310759
0.07769	0.194225	5.477132	5.826735	0.038845	0.15538	0.310759

Max	Harmonic: 8		Harmonic: 9		Harmonic: 10		
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Max
0.932278	0.038845	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.07769	
0.893433	0.038845	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.07769	
0.738053	0.07769	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.07769	
0.815743	0.038845	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.07769	
0.932278	0.038845	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.932278	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.776898	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.776898	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.738053	0.038845	0.07769	0.07769	0.15538	0	0.07769	
0.582674	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.660363	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.388449	0.07769	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.038845	
0.388449	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.349604	0.038845	0.07769	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.349604	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.388449	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.504984	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.466139	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.427294	0.07769	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.07769	
0.543829	0.07769	0.116535	0.038845	0.07769	0.038845	0.07769	
0.660363	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.582674	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.621518	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.582674	0.07769	0.15538	0.07769	0.116535	0	0.07769	
0.621518	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.582674	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.621518	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.504984	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.504984	0.038845	0.194225	0.038845	0.194225	0	0.07769	
0.582674	0.07769	0.116535	0.07769	0.116535	0	0.07769	
0.543829	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.504984	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.310759	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.388449	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.466139	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.504984	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.466139	0.07769	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.038845	
0.466139	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.388449	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.466139	0.07769	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.543829	0.038845	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.582674	0.07769	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.660363	0.15538	0.310759	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.349604	0.194225	0.310759	0.038845	0.07769	0	0.038845	
0.349604	0.233069	0.310759	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.310759	0.271914	0.310759	0.038845	0.07769	0	0.038845	
0.349604	0.233069	0.310759	0.038845	0.116535	0	0.07769	
0.349604	0.233069	0.310759	0.038845	0.116535	0	0.038845	
0.388449	0.233069	0.310759	0.07769	0.116535	0	0.07769	
0.427294	0.233069	0.310759	0.07769	0.116535	0	0.07769	



Harmonic: 11		Harmonic: 12		Harmonic: 13		Harmonic: 14	
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	
0.310759	0.388449	0	0.038845	0.116535	0.15538	0	
0.271914	0.349604	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.233069	0.349604	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.194225	0.310759	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.271914	0.388449	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.194225	0.388449	0	0.07769	0.038845	0.15538	0	
0.194225	0.271914	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.194225	0.271914	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.194225	0.310759	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.271914	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.194225	0	0.07769	0.07769	0.15538	0	
0.038845	0.116535	0	0.07769	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.233069	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.07769	0.233069	0	0.07769	0.07769	0.194225	0	
0.038845	0.15538	0	0.07769	0.07769	0.15538	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.07769	0.116535	0	
0	0.07769	0	0.07769	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.15538	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.15538	0.233069	0	0.07769	0.15538	0.233069	0	
0.15538	0.271914	0	0.07769	0.15538	0.233069	0	
0.15538	0.271914	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.194225	0.271914	0	0.07769	0.15538	0.233069	0	
0.233069	0.310759	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.233069	0.310759	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.116535	0.194225	0	
0.233069	0.310759	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.233069	0.310759	0	0.07769	0.116535	0.194225	0	
0.116535	0.271914	0	0.038845	0.038845	0.15538	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.233069	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.233069	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.116535	0.271914	0	0.038845	0.038845	0.15538	0	
0.038845	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.07769	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.116535	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.116535	0	0.07769	0.038845	0.116535	0	

















Harmonic: 39		Harmonic: 40		Harmonic: 41		Harmonic: 42	
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.038845	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.038845	0	0.07769	0	0.07769	0	0





Harmonic: 46		Harmonic: 47		Harmonic: 48		Harmonic: 49	
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	
0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0.038845	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0.038845	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0.038845	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.15538	0	0.07769	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0.038845	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0
0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0

Harmonic: 50		Harmonic: 51		Harmonic: 52		
Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.15538	0.038845	0.15538	0	0.116535
0.15538	0	0.116535	0.038845	0.194225	0	0.15538
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.15538	0	0.194225
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.15538
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.15538
0.15538	0	0.194225	0.038845	0.15538	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.15538
0.07769	0	0.15538	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0	0.15538	0	0.15538
0.116535	0	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0.038845	0.15538
0.116535	0	0.15538	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.15538	0	0.15538
0.15538	0	0.116535	0.038845	0.15538	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0	0.15538
0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535









**Max**

0.233069  
0.233069  
0.271914  
0.233069  
0.194225  
0.233069  
0.271914  
0.233069  
0.233069  
0.194225  
0.194225  
0.271914  
0.194225  
0.310759  
0.271914  
0.310759  
0.271914  
0.233069  
0.233069  
0.271914  
0.233069  
0.233069  
0.233069  
0.233069  
0.233069  
0.194225  
0.233069  
0.233069  
0.271914  
0.194225  
0.194225  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.15538  
0.271914  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.233069  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.233069



Phase C Current Harmonics (Amps - RMS)  
 Para Transformador TR1  
 From 02/22/2002 11:01:56 To 03/08/2002 11:01:56

Date	Harmonic: 1		Harmonic: 2		Harmonic: 3	
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
02/22/2002 11:01:5	85.730705	87.7118	0.194225	2.369539	0.310759	0.660363
22/02/2002 11:11	84.565361	87.323349	0.194225	0.388449	0.388449	0.543829
02/22/2002 11:21:5	83.904999	86.352226	0.116535	0.349604	0.388449	0.543829
02/22/2002 11:31:5	81.807373	86.041466	0.116535	0.388449	0.388449	0.466139
02/22/2002 11:41:5	82.506577	83.827309	0.194225	0.388449	0.388449	0.504984
02/22/2002 11:51:5	82.817337	84.487671	0.271914	0.466139	0.349604	0.504984
02/22/2002 12:01:5	84.060379	86.235695	0.271914	0.504984	0.349604	0.466139
02/22/2002 12:11:5	84.992661	87.206818	0.194225	0.504984	0.310759	0.466139
02/22/2002 12:21:5	82.584267	86.158005	0.116535	0.310759	0.349604	0.466139
02/22/2002 12:31:5	79.398987	81.613144	0.194225	0.660363	0.349604	0.543829
02/22/2002 12:41:5	79.437836	81.418922	0.194225	0.388449	0.349604	0.466139
02/22/2002 12:51:5	79.127075	81.574303	0.15538	0.349604	0.349604	0.466139
02/22/2002 13:01:5	82.506577	86.468758	0.233069	0.466139	0.388449	0.543829
02/22/2002 13:11:5	84.798431	89.226746	0.271914	0.504984	0.427294	0.699208
02/22/2002 13:21:5	83.71077	90.469788	0.233069	0.582674	0.427294	0.854588
02/22/2002 13:31:5	81.690834	84.91497	0.194225	0.582674	0.388449	0.776898
02/22/2002 13:41:5	81.613144	84.526512	0.233069	0.427294	0.388449	0.738053
02/22/2002 13:51:5	81.457771	86.158005	0.271914	0.504984	0.427294	0.776898
02/22/2002 14:01:5	81.885063	84.992661	0.233069	0.738053	0.388449	0.776898
02/22/2002 14:11:5	82.079292	85.730705	0.271914	0.699208	0.388449	0.815743
02/22/2002 14:21:5	84.953812	87.206818	0.233069	0.427294	0.388449	0.582674
02/22/2002 14:31:5	86.313377	89.110214	0.271914	0.699208	0.388449	0.815743
02/22/2002 14:41:5	86.391068	90.275558	0.271914	0.504984	0.427294	0.699208
02/22/2002 14:51:5	84.798431	86.624138	0.194225	0.388449	0.427294	0.543829
02/22/2002 15:01:5	84.604202	86.041466	0.15538	0.349604	0.466139	0.582674
02/22/2002 15:11:5	84.060379	85.847244	0.116535	0.310759	0.427294	0.699208
02/22/2002 15:21:5	84.681892	86.429916	0.15538	0.349604	0.466139	0.582674
02/22/2002 15:31:5	85.691864	87.090279	0.233069	0.427294	0.427294	0.582674
02/22/2002 15:41:5	85.186882	86.779526	0.15538	1.281882	0.427294	0.543829
02/22/2002 15:51:5	84.332291	86.158005	0.15538	0.388449	0.427294	0.543829
02/22/2002 16:01:5	80.408958	85.148033	0.271914	0.466139	0.427294	0.543829
02/22/2002 16:11:5	77.884033	80.059357	0.233069	0.388449	0.427294	0.543829
02/22/2002 16:21:5	77.689812	79.282455	0.15538	0.349604	0.427294	0.543829
02/22/2002 16:31:5	76.058327	78.699776	0.271914	0.466139	0.427294	0.543829
02/22/2002 16:41:5	77.4179	81.224701	0.233069	0.466139	0.466139	0.621518
02/22/2002 16:51:5	73.766479	75.980637	0.15538	0.466139	0.388449	0.543829
02/22/2002 17:01:5	71.707695	74.07724	0.233069	0.543829	0.349604	0.504984
02/22/2002 17:11:5	72.173836	73.455719	0.271914	0.543829	0.388449	0.504984
02/22/2002 17:21:5	71.746544	73.49456	0.15538	0.349604	0.388449	0.504984
02/22/2002 17:31:5	72.601128	74.698753	0.194225	0.388449	0.427294	0.504984
02/22/2002 17:41:5	70.425819	73.144958	0.271914	0.427294	0.427294	0.543829
02/22/2002 17:51:5	69.92083	71.047333	0.194225	0.349604	0.466139	0.543829
02/22/2002 18:01:5	70.697731	72.368065	0.07769	2.253005	0.349604	1.087657
02/22/2002 18:11:5	70.50351	73.144958	0.07769	0.194225	0.271914	0.349604
02/22/2002 18:21:5	68.910866	74.426842	0.07769	0.271914	0.233069	0.349604
02/22/2002 18:31:5	69.221626	71.202713	0.07769	0.349604	0.233069	0.349604
02/22/2002 18:41:5	73.378029	76.990608	0.07769	0.349604	0.233069	0.349604
02/22/2002 18:51:5	75.980637	77.49559	0.038845	0.233069	0.194225	0.271914
02/22/2002 19:01:5	76.097176	77.223679	0.038845	0.15538	0.194225	0.310759
02/22/2002 19:11:5	76.75753	77.922882	0.038845	0.15538	0.194225	0.271914
02/22/2002 19:21:5	75.902946	78.155952	0.038845	0.194225	0.194225	0.310759

Harmonic: 4		Harmonic: 5		Harmonic: 6		Harmonic: 7
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg
1.087657	2.019935	6.953238	7.497067	0.038845	0.15538	0.738053
1.009968	1.243037	7.069773	7.574757	0.038845	0.116535	0.582674
1.009968	1.243037	6.875548	7.341687	0	0.116535	0.466139
1.048812	1.204192	6.681324	7.380532	0.038845	0.116535	0.504984
1.087657	1.281882	6.759014	7.147463	0.038845	0.116535	0.699208
0.971123	1.165347	6.720169	7.147463	0.038845	0.15538	0.621518
1.009968	1.243037	6.487099	6.914393	0.038845	0.15538	0.543829
0.971123	1.243037	6.487099	6.953238	0.038845	0.15538	0.660363
0.971123	1.126502	6.292875	6.681324	0.038845	0.15538	0.504984
0.893433	1.359572	6.487099	7.147463	0.038845	0.116535	0.271914
0.932278	1.165347	6.759014	7.458222	0	0.116535	0.310759
0.971123	1.126502	6.642479	7.108618	0.038845	0.116535	0.271914
0.738053	1.398417	6.17634	7.730136	0.038845	0.116535	0.194225
0.582674	0.854588	6.02096	6.487099	0	0.116535	0.233069
0.388449	0.621518	6.720169	8.040895	0	0.116535	0.233069
0.388449	0.660363	7.652447	8.040895	0.038845	0.116535	0.271914
0.388449	0.582674	7.613602	7.963206	0	0.116535	0.310759
0.349604	0.504984	7.768981	8.15743	0	0.116535	0.310759
0.310759	0.543829	7.691291	8.273965	0.038845	0.116535	0.271914
0.310759	0.543829	7.885516	8.390499	0.038845	0.15538	0.194225
0.349604	0.582674	7.963206	8.545879	0.038845	0.116535	0.310759
0.388449	0.621518	7.691291	8.31281	0	0.116535	0.233069
0.349604	0.582674	7.458222	8.040895	0	0.07769	0.233069
0.310759	0.543829	7.458222	7.846671	0.038845	0.116535	0.194225
0.349604	0.466139	7.652447	8.118586	0.038845	0.116535	0.194225
0.388449	0.621518	8.079741	8.584724	0	0.116535	0.233069
0.349604	0.543829	8.118586	8.70126	0.038845	0.116535	0.233069
0.349604	0.582674	7.458222	9.012018	0	0.07769	0.116535
0.310759	1.592641	7.263997	7.768981	0	0.15538	0.15538
0.310759	0.543829	7.069773	7.846671	0.038845	0.116535	0.233069
0.388449	0.543829	6.759014	7.963206	0	0.07769	0.310759
0.349604	0.504984	6.487099	7.458222	0.038845	0.07769	0.388449
0.388449	0.621518	6.448255	6.836704	0	0.07769	0.15538
0.388449	0.621518	6.720169	7.341687	0	0.07769	0.233069
0.310759	0.699208	7.108618	7.574757	0.038845	0.15538	0.194225
0.388449	0.660363	7.380532	7.768981	0.038845	0.116535	0.349604
0.427294	0.699208	6.953238	7.458222	0	0.07769	0.388449
0.349604	0.582674	6.642479	7.030928	0	0.07769	0.310759
0.349604	0.504984	6.681324	6.914393	0	0.116535	0.271914
0.349604	0.815743	6.487099	6.953238	0.038845	0.116535	0.271914
0.349604	0.504984	6.720169	7.030928	0.038845	0.15538	0.466139
0.349604	0.504984	7.069773	8.662415	0.038845	0.15538	0.543829
0.116535	2.253005	6.137495	9.672381	0.038845	0.466139	0.388449
0.038845	0.271914	5.943271	6.33172	0.038845	0.07769	0.349604
0.038845	0.194225	5.865581	6.33172	0.038845	0.116535	0.310759
0.07769	0.233069	5.671356	6.09865	0.038845	0.116535	0.271914
0.038845	0.15538	5.515976	5.904426	0.038845	0.116535	0.388449
0.038845	0.15538	5.554821	6.02096	0.038845	0.116535	0.466139
0.038845	0.194225	5.632512	5.943271	0.038845	0.07769	0.504984
0.07769	0.233069	5.632512	6.09865	0.038845	0.116535	0.543829
0.116535	0.233069	5.593667	5.943271	0	0.07769	0.582674

Max	Harmonic: 8		Harmonic: 9		Harmonic: 10	
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
0.854588	0.038845	0.233069	0	0.07769	0	0.038845
0.854588	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.699208	0.038845	0.116535	0	0.038845	0	0.038845
0.776898	0.038845	0.15538	0	0.07769	0	0.038845
0.893433	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.893433	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.738053	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.776898	0.038845	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.660363	0.038845	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.466139	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.07769
0.621518	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.07769
0.388449	0.07769	0.116535	0	0.038845	0	0.038845
0.427294	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.388449	0.038845	0.07769	0	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.07769
0.466139	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.07769
0.388449	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.07769
0.466139	0.07769	0.116535	0	0.038845	0	0.038845
0.388449	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.07769
0.388449	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.038845
0.349604	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.038845
0.349604	0.07769	0.15538	0	0.038845	0	0.07769
0.349604	0.07769	0.116535	0	0.07769	0	0.07769
0.349604	0.07769	0.116535	0	0.038845	0	0.038845
0.271914	0.07769	0.15538	0	0.038845	0	0.038845
0.310759	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.116535
0.349604	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.07769
0.543829	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.504984	0.038845	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.349604	0.07769	0.15538	0	0.07769	0	0.038845
0.388449	0.038845	0.116535	0	0.07769	0	0.038845
0.466139	0.038845	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.07769
0.504984	0.07769	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.504984	0.07769	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.466139	0.038845	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.07769	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.07769	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.621518	0.038845	0.15538	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.660363	0.07769	0.116535	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.738053	0.116535	0.543829	0.038845	0.349604	0	0.271914
0.427294	0.15538	0.271914	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.427294	0.194225	0.233069	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.388449	0.194225	0.233069	0.038845	0.07769	0	0.07769
0.543829	0.194225	0.233069	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.543829	0.194225	0.233069	0	0.07769	0	0.038845
0.621518	0.15538	0.194225	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.621518	0.15538	0.194225	0.038845	0.07769	0	0.038845
0.660363	0.15538	0.194225	0.038845	0.07769	0	0.038845



Harmonic: 11		Harmonic: 12		Harmonic: 13		Harmonic: 14	
Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	
0.271914	0.349604	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.233069	0.349604	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.233069	0.349604	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.194225	0.271914	0	0.038845	0.116535	0.233069	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.194225	0.310759	0	0.038845	0.07769	0.233069	0	
0.194225	0.271914	0	0.038845	0.038845	0.15538	0	
0.15538	0.233069	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.15538	0.271914	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.038845	0.233069	0	0.038845	0.116535	0.194225	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.038845	0.116535	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.233069	0	0.038845	0.07769	0.233069	0	
0.116535	0.233069	0	0.038845	0.07769	0.233069	0	
0.038845	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.15538	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.07769	0.116535	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0	0.116535	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.116535	0.233069	0	
0.15538	0.233069	0	0.038845	0.194225	0.271914	0	
0.15538	0.271914	0	0.07769	0.194225	0.271914	0	
0.15538	0.233069	0	0.038845	0.194225	0.271914	0	
0.15538	0.233069	0	0.038845	0.194225	0.271914	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.15538	0.271914	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.15538	0.233069	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.194225	0.233069	0	
0.233069	0.271914	0	0.038845	0.194225	0.271914	0	
0.233069	0.310759	0	0.038845	0.194225	0.233069	0	
0.194225	0.310759	0	0.038845	0.194225	0.233069	0	
0.07769	0.233069	0	0.038845	0.116535	0.233069	0	
0.038845	0.15538	0	0.038845	0.07769	0.194225	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.07769	0.15538	0	
0.116535	0.233069	0	0.038845	0.07769	0.271914	0	
0.038845	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.194225	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.07769	0	
0.07769	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.07769	0	
0.116535	0.349604	0	0.233069	0.038845	0.194225	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.116535	0.194225	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.07769	0.15538	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.07769	0	
0.038845	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	
0.038845	0.07769	0	0.038845	0.038845	0.116535	0	

















Harmonic: 36		Harmonic: 37		Harmonic: 38	
Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.07769	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.116535	0	0.116535	0	0.15538	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.038845	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0
0.07769	0	0.038845	0	0.038845	0









Harmonic: 50		Harmonic: 51		Harmonic: 52		
Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
0.116535	0	0.116535	0	0.15538	0.038845	0.116535
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0.038845	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.116535	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.15538	0	0.15538
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.15538	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0.038845	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.15538	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.15538
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.07769
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.310759	0	0.271914	0	0.233069	0	0.310759
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.07769	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.07769
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.07769	0	0.116535	0	0.116535
0.116535	0	0.116535	0	0.116535	0	0.116535
0.07769	0	0.116535	0	0.07769	0	0.116535









**Max**

0.233069  
0.233069  
0.194225  
0.15538  
0.15538  
0.15538  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.233069  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.233069  
0.194225  
0.233069  
0.194225  
0.233069  
0.194225  
0.233069  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.15538  
0.15538  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.15538  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.233069  
0.271914  
0.543829  
0.15538  
0.15538  
0.15538  
0.15538  
0.194225  
0.194225  
0.194225  
0.194225

**Transformador N°1 (lado 60 KV) ;TR1**

**Cálculo del factor K Máximo (Corrientes Armónicas Mínimas)  
Phase A**

<b>h</b>	<b>Ih</b>	<b>Ih2</b>	<b>(h*Ih)2</b>	<b>Fh</b>	<b>Fh2</b>	<b>(h*Fh)2</b>
1	53.878	2902.839	2902.839	1.483429	2.200562	2.200562
2	0.5438	0.295718	1.182874	0.014973	0.000224	0.000897
3	0.233	0.054289	0.488601	0.006415	4.12E-05	0.00037
4	0.3107	0.096534	1.544552	0.008555	7.32E-05	0.001171
5	6.0598	36.72118	918.0294	0.166845	0.027837	0.695933
6	0.1942	0.037714	1.357691	0.005347	2.86E-05	0.001029
7	0.5826	0.339423	16.63172	0.016041	0.000257	0.012608
8	0.1165	0.013572	0.868624	0.003208	1.03E-05	0.000658
9	0.1165	0.013572	1.099352	0.003208	1.03E-05	0.000833
10	0.0388	0.001505	0.150544	0.001068	1.14E-06	0.000114
11	0.1165	0.013572	1.642242	0.003208	1.03E-05	0.001245
12	0.0388	0.001505	0.216783	0.001068	1.14E-06	0.000164
13	0.1165	0.013572	2.29371	0.003208	1.03E-05	0.001739
14	0.0388	0.001505	0.295066	0.001068	1.14E-06	0.000224
15	0.0388	0.001505	0.338724	0.001068	1.14E-06	0.000257
16	0.0388	0.001505	0.385393	0.001068	1.14E-06	0.000292
17	0.0388	0.001505	0.435072	0.001068	1.14E-06	0.00033
18	0.0388	0.001505	0.487763	0.001068	1.14E-06	0.00037
19	0.0388	0.001505	0.543464	0.001068	1.14E-06	0.000412
20	0.0388	0.001505	0.602176	0.001068	1.14E-06	0.000456
21	0.0388	0.001505	0.663899	0.001068	1.14E-06	0.000503
22	0.0388	0.001505	0.728633	0.001068	1.14E-06	0.000552
23	0.0388	0.001505	0.796378	0.001068	1.14E-06	0.000604
24	0.0388	0.001505	0.867133	0.001068	1.14E-06	0.000657
25	0.0388	0.001505	0.9409	0.001068	1.14E-06	0.000713
26	0.0388	0.001505	1.017677	0.001068	1.14E-06	0.000771
27	0.0388	0.001505	1.097466	0.001068	1.14E-06	0.000832
28	0.0388	0.001505	1.180265	0.001068	1.14E-06	0.000895
29	0.0388	0.001505	1.266075	0.001068	1.14E-06	0.00096
30	0.0388	0.001505	1.354896	0.001068	1.14E-06	0.001027
31	0.0388	0.001505	1.446728	0.001068	1.14E-06	0.001097
32	0.0388	0.001505	1.541571	0.001068	1.14E-06	0.001169
33	0.0388	0.001505	1.639424	0.001068	1.14E-06	0.001243
34	0.0388	0.001505	1.740289	0.001068	1.14E-06	0.001319
35	0.0776	0.006022	7.376656	0.002137	4.56E-06	0.005592
36	0.388	0.150544	195.105	0.010683	0.000114	0.147904
37	0.388	0.150544	206.0947	0.010683	0.000114	0.156235
38	0.388	0.150544	217.3855	0.010683	0.000114	0.164794
39	0.388	0.150544	228.9774	0.010683	0.000114	0.173581
40	0.076	0.005776	9.2416	0.002093	4.38E-06	0.007006
41	0.0388	0.001505	2.530645	0.001068	1.14E-06	0.001918
42	0.0776	0.006022	10.62238	0.002137	4.56E-06	0.008053
43	0.155	0.024025	44.42223	0.004268	1.82E-05	0.033675
44	0.155	0.024025	46.5124	0.004268	1.82E-05	0.03526
45	0.155	0.024025	48.65063	0.004268	1.82E-05	0.036881
46	0.155	0.024025	50.8369	0.004268	1.82E-05	0.038538
47	0.155	0.024025	53.07123	0.004268	1.82E-05	0.040232
48	0.1165	0.013572	31.27046	0.003208	1.03E-05	0.023705



49	0.0776	0.006022	14.45825	0.002137	4.56E-06	0.01096
50	0.1165	0.013572	33.93063	0.003208	1.03E-05	0.025722
51	0.0776	0.006022	15.6626	0.002137	4.56E-06	0.011873
52	0.1553	0.024118	65.21532	0.004276	1.83E-05	0.049438
53	0.1553	0.024118	67.74771	0.004276	1.83E-05	0.051358
54	0.1165	0.013572	39.57668	0.003208	1.03E-05	0.030002
55	0.1942	0.037714	114.0838	0.005347	2.86E-05	0.086484
56	0.1553	0.024118	75.63433	0.004276	1.83E-05	0.057336
57	0.1553	0.024118	78.35967	0.004276	1.83E-05	0.059402
58	0.1553	0.024118	81.13325	0.004276	1.83E-05	0.061505
59	0.1553	0.024118	83.95507	0.004276	1.83E-05	0.063644
60	0.233	0.054289	195.4404	0.006415	4.12E-05	0.148158
61	0.1942	0.037714	140.3325	0.005347	2.86E-05	0.106382
62	0.1942	0.037714	144.9712	0.005347	2.86E-05	0.109899
63	0.1942	0.037714	149.6854	0.005347	2.86E-05	0.113472
<hr/>			2941.617	6319.999	2.229959	4.791017

**Factor K= 2.148478**

**Factor de carga = 21.64%**

## Transformador N°1 (LADO 60KV) ; TR1

### Cálculo del factor K Phase A

h	lh	lh2	(h*lh)2	Fh	Fh2	(h*Fh)2
1	168.8	28493.44	28493.44	4.64759	21.60009	21.60009
2	0.6215	0.386262	1.545049	0.017112	0.000293	0.001171
3	1.2818	1.643011	14.7871	0.035292	0.001246	0.01121
4	0.3884	0.150855	2.413673	0.010694	0.000114	0.00183
5	9.788	95.80494	2395.124	0.269494	0.072627	1.815677
6	0.3107	0.096534	3.475242	0.008555	7.32E-05	0.002634
7	0.9322	0.868997	42.58085	0.025666	0.000659	0.032279
8	0.1165	0.013572	0.868624	0.003208	1.03E-05	0.000658
9	0.1553	0.024118	1.953565	0.004276	1.83E-05	0.001481
10	0.1165	0.013572	1.357225	0.003208	1.03E-05	0.001029
11	0.3884	0.150855	18.2534	0.010694	0.000114	0.013837
12	0.077	0.005929	0.853776	0.00212	4.49E-06	0.000647
13	0.3496	0.12222	20.65521	0.009626	9.27E-05	0.015658
14	0.77	0.5929	116.2084	0.0212	0.000449	0.088094
15	0.1165	0.013572	3.053756	0.003208	1.03E-05	0.002315
16	0.038	0.001444	0.369664	0.001046	1.09E-06	0.00028
17	0.1165	0.013572	3.92238	0.003208	1.03E-05	0.002973
18	0.038	0.001444	0.467856	0.001046	1.09E-06	0.000355
19	0.1165	0.013572	4.899582	0.003208	1.03E-05	0.003714
20	0.038	0.001444	0.5776	0.001046	1.09E-06	0.000438
21	0.077	0.005929	2.614689	0.00212	4.49E-06	0.001982
22	0.038	0.001444	0.698896	0.001046	1.09E-06	0.00053
23	0.077	0.005929	3.136441	0.00212	4.49E-06	0.002378
24	0.0388	0.001505	0.867133	0.001068	1.14E-06	0.000657
25	0.1165	0.013572	8.482656	0.003208	1.03E-05	0.00643
26	0.077	0.005929	4.008004	0.00212	4.49E-06	0.003038
27	0.0388	0.001505	1.097466	0.001068	1.14E-06	0.000832
28	0.0388	0.001505	1.180265	0.001068	1.14E-06	0.000895
29	0.077	0.005929	4.986289	0.00212	4.49E-06	0.00378
30	0.038	0.001444	1.2996	0.001046	1.09E-06	0.000985
31	0.077	0.005929	5.697769	0.00212	4.49E-06	0.004319
32	0.038	0.001444	1.478656	0.001046	1.09E-06	0.001121
33	0.077	0.005929	6.456681	0.00212	4.49E-06	0.004895
34	0.077	0.005929	6.853924	0.00212	4.49E-06	0.005196
35	0.077	0.005929	7.263025	0.00212	4.49E-06	0.005506
36	0.077	0.005929	7.683984	0.00212	4.49E-06	0.005825
37	0.1165	0.013572	18.58041	0.003208	1.03E-05	0.014085
38	0.077	0.005929	8.561476	0.00212	4.49E-06	0.00649
39	0.1165	0.013572	20.64339	0.003208	1.03E-05	0.015649
40	0.077	0.005929	9.4864	0.00212	4.49E-06	0.007191
41	0.1165	0.013572	22.81495	0.003208	1.03E-05	0.017295
42	0.1165	0.013572	23.94145	0.003208	1.03E-05	0.018149
43	0.155	0.024025	44.42223	0.004268	1.82E-05	0.033675
44	0.1165	0.013572	26.27588	0.003208	1.03E-05	0.019919
45	0.1165	0.013572	27.48381	0.003208	1.03E-05	0.020835
46	0.1165	0.013572	28.71888	0.003208	1.03E-05	0.021771
47	0.077	0.005929	13.09716	0.00212	4.49E-06	0.009929
48	0.077	0.005929	13.66042	0.00212	4.49E-06	0.010356

49	0.155	0.024025	57.68403	0.004268	1.82E-05	0.043729
50	0.155	0.024025	60.0625	0.004268	1.82E-05	0.045532
51	0.233	0.054289	141.2057	0.006415	4.12E-05	0.107044
52	0.153	0.023409	63.29794	0.004213	1.77E-05	0.047984
53	0.233	0.054289	152.4978	0.006415	4.12E-05	0.115604
54	0.7719	0.59583	1737.439	0.021253	0.000452	1.317105
55	0.2719	0.07393	223.6371	0.007486	5.6E-05	0.169533
56	0.1942	0.037714	118.27	0.005347	2.86E-05	0.089657
57	0.3107	0.096534	313.6406	0.008555	7.32E-05	0.237762
58	0.233	0.054289	182.6282	0.006415	4.12E-05	0.138445
59	0.3496	0.12222	425.4484	0.009626	9.27E-05	0.322521
60	0.2719	0.07393	266.1466	0.007486	5.6E-05	0.201758
61	0.3496	0.12222	454.7812	0.009626	9.27E-05	0.344757
62	0.2719	0.07393	284.1854	0.007486	5.6E-05	0.215433
63	0.4243	0.18003	714.541	0.011682	0.000136	0.541674
		28595.19	36643.76		21.67722	27.77863

**Factor K= 1.281466**

**Factor de carga = 67.01%**

**Transformador N° 1 (Lado 60 KV) ; TR1**

**Cálculo del factor K  
Phase C**

<b>h</b>	<b>lh</b>	<b>lh2</b>	<b>(h*lh)2</b>	<b>Fh</b>	<b>Fh2</b>	<b>(h*Fh)2</b>
1	96.3353	9280.49	9280.49	2.652411	7.035284	7.035284
2	1.1653	1.357924	5.431696	0.032084	0.001029	0.004118
3	0.9711	0.943035	8.487317	0.026737	0.000715	0.006434
4	0.7769	0.603574	9.657178	0.02139	0.000458	0.007321
5	2.7191	7.393505	184.8376	0.074865	0.005605	0.14012
6	0.1942	0.037714	1.357691	0.005347	2.86E-05	0.001029
7	0.7769	0.603574	29.57511	0.02139	0.000458	0.02242
8	0.1942	0.037714	2.413673	0.005347	2.86E-05	0.00183
9	0.1942	0.037714	3.054805	0.005347	2.86E-05	0.002316
10	0.1942	0.037714	3.771364	0.005347	2.86E-05	0.002859
11	0.1942	0.037714	4.56335	0.005347	2.86E-05	0.003459
12	0.1942	0.037714	5.430764	0.005347	2.86E-05	0.004117
13	0.3885	0.150932	25.50755	0.010697	0.000114	0.019337
14	0.1942	0.037714	7.391873	0.005347	2.86E-05	0.005604
15	0.1942	0.037714	8.485569	0.005347	2.86E-05	0.006433
16	0.1942	0.037714	9.654692	0.005347	2.86E-05	0.007319
17	0.1942	0.037714	10.89924	0.005347	2.86E-05	0.008262
18	0	0	0	0	0	0
19	0.1942	0.037714	13.61462	0.005347	2.86E-05	0.010321
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0.1942	0.037714	19.95052	0.005347	2.86E-05	0.015124
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0.1942	0.037714	31.71717	0.005347	2.86E-05	0.024044
30	0.1942	0.037714	33.94228	0.005347	2.86E-05	0.025731
31	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0
34	0.1942	0.037714	43.59697	0.005347	2.86E-05	0.03305
35	0.1942	0.037714	46.19921	0.005347	2.86E-05	0.035022
36	0.1942	0.037714	48.87688	0.005347	2.86E-05	0.037052
37	0.1942	0.037714	51.62997	0.005347	2.86E-05	0.039139
38	0.1942	0.037714	54.4585	0.005347	2.86E-05	0.041283
39	0.1942	0.037714	57.36245	0.005347	2.86E-05	0.043485
40	0.1942	0.037714	60.34182	0.005347	2.86E-05	0.045743
41	0.1942	0.037714	63.39663	0.005347	2.86E-05	0.048059
42	0.1942	0.037714	66.52686	0.005347	2.86E-05	0.050432
43	0.1942	0.037714	69.73252	0.005347	2.86E-05	0.052862
44	0.1942	0.037714	73.01361	0.005347	2.86E-05	0.05535
45	0.1942	0.037714	76.37012	0.005347	2.86E-05	0.057894
46	0.1942	0.037714	79.80206	0.005347	2.86E-05	0.060496
47	0.1942	0.037714	83.30943	0.005347	2.86E-05	0.063155
48	0.1942	0.037714	86.89223	0.005347	2.86E-05	0.065871

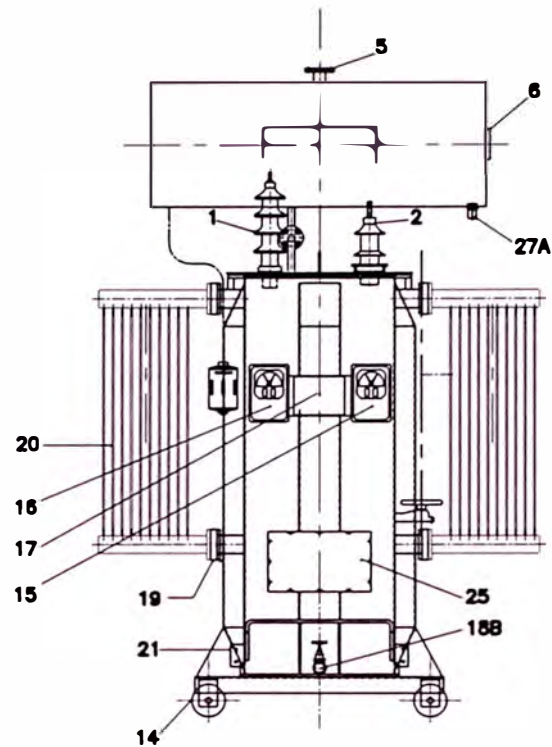
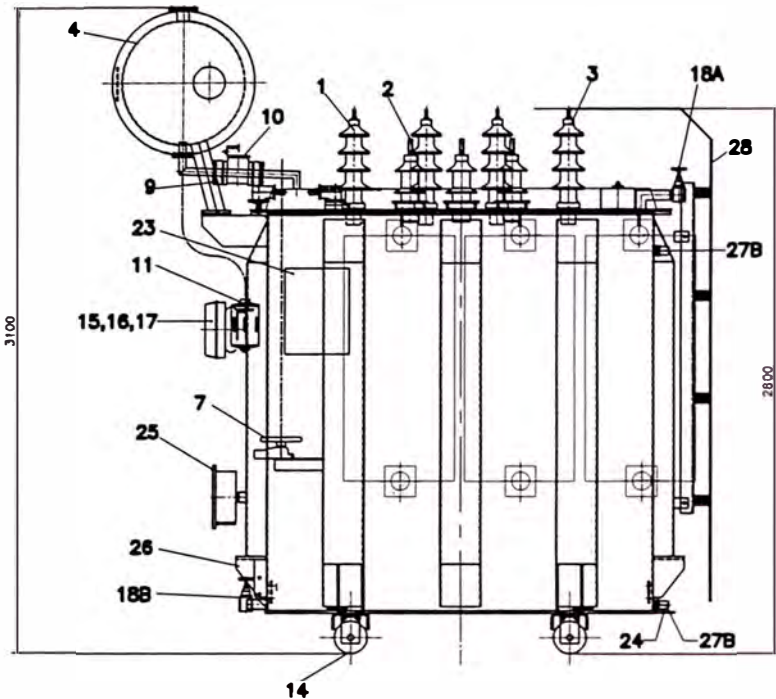
49	0.1942	0.037714	90.55045	0.005347	2.86E-05	0.068644
50	0.1942	0.037714	94.2841	0.005347	2.86E-05	0.071474
51	0.1942	0.037714	98.09318	0.005347	2.86E-05	0.074362
52	0.3885	0.150932	408.1208	0.010697	0.000114	0.309385
53	0.3885	0.150932	423.9687	0.010697	0.000114	0.321399
54	0.3885	0.150932	440.1184	0.010697	0.000114	0.333642
55	0.3885	0.150932	456.5701	0.010697	0.000114	0.346113
56	0.3885	0.150932	473.3235	0.010697	0.000114	0.358814
57	0.3885	0.150932	490.3789	0.010697	0.000114	0.371743
58	0.3885	0.150932	507.7361	0.010697	0.000114	0.384901
59	0.3885	0.150932	525.3952	0.010697	0.000114	0.398288
60	0.3885	0.150932	543.3561	0.010697	0.000114	0.411903
61	0.3885	0.150932	561.6189	0.010697	0.000114	0.425748
62	0.3885	0.150932	580.1836	0.010697	0.000114	0.439821
63	0.5827	0.339539	1347.631	0.016044	0.000257	1.021602
			9294.749	17703.07	7.046093	13.42021

**Factor K= 1.904632**

**Factor de carga = 40.05%**

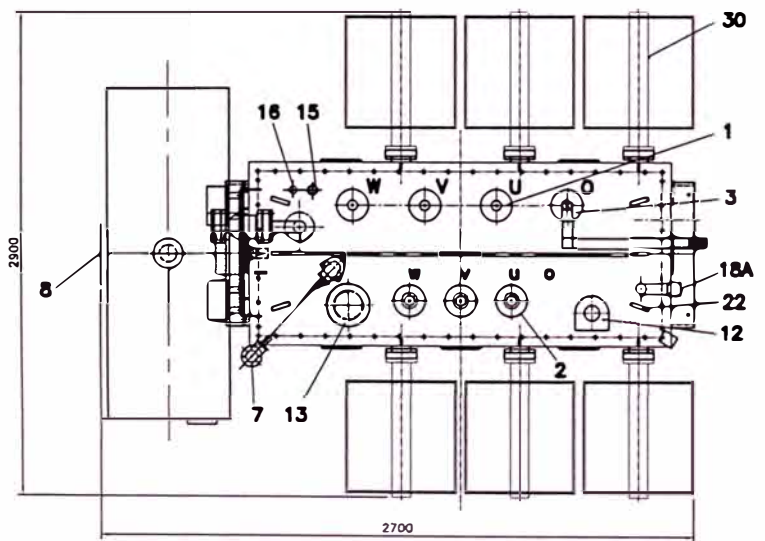
**ANEXO D**  
**CROQUIS DE DIMENSIONES**



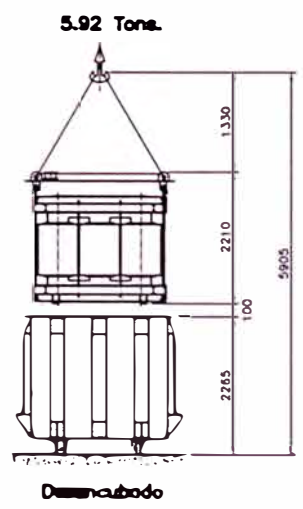


**TRANSFORMADOR TRIFASICO EN ACEITE**

Pos.	Descripción
1	Borne Alta Tensión 30 kV/250 A
2	Borne Baja Tensión 20 kV/630 A
3	Borne Neutra Alta Tensión 30 kV/250 A
4	Conservador de Aceite
5	Abertura para llenado de Aceite
6	Indicador de Nivel de Aceite
7	Manda del Conmutador
8	Placa de Firma
9	Válvula Mariposa
10	Rele Buchholz
11	Desecador de Aire
12	Válvula de Seguridad
13	Cúpula para transformador de corr. BT (fase w)
14	Ruedas
15	Termómetro
16	Rele de Imagen Térmica
17	Unidad de Compensación PIT
18	Válvula de filtrado de Aceite C2- {A.- Entrada
19	Válvula para Radiador {B.- Salida
20	Radiador
21	Puesta a tierra.
22	Oreja de Suspensión: parte activa a transformador
23	Placa de Características
24	Oreja de Tracción
25	Caja de Bornes
26	Asiento para elevación del transformador
27	Perno de prueba de aceite {A.- Conservador
	{B.- Transformador
28	Platina de puesta a tierra neutra de B.T.(Cu 5x50)



**LADO DE B.T.**

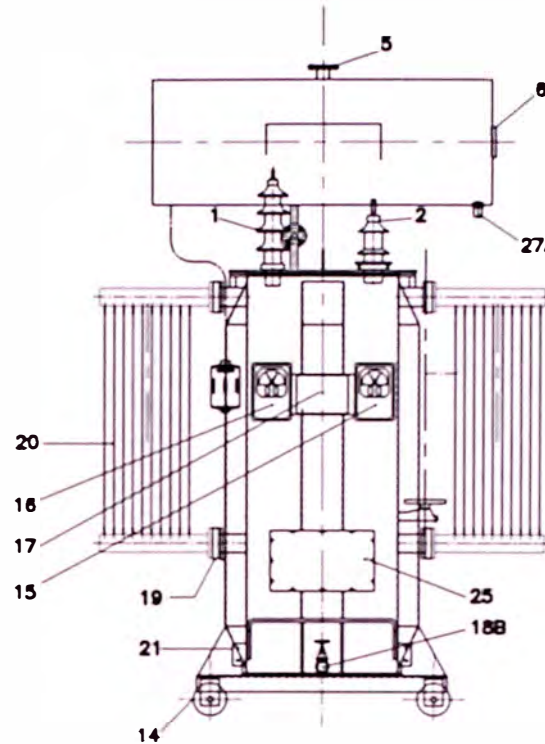
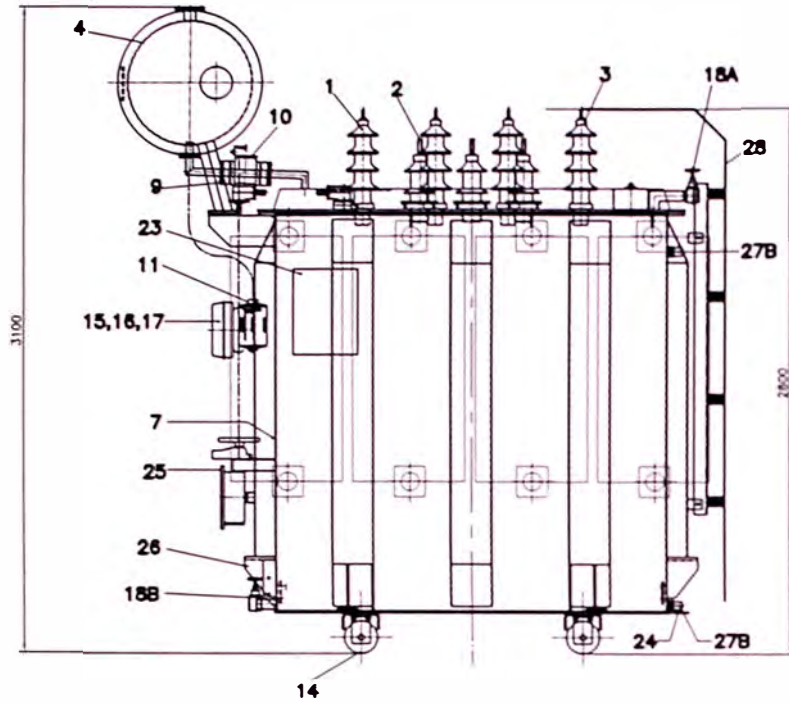


**PESOS ESTIMADOS**

Parte Activa	5920 Kgs.
Aceite	1900 Kgs.
Peso Total	11000 Kgs.

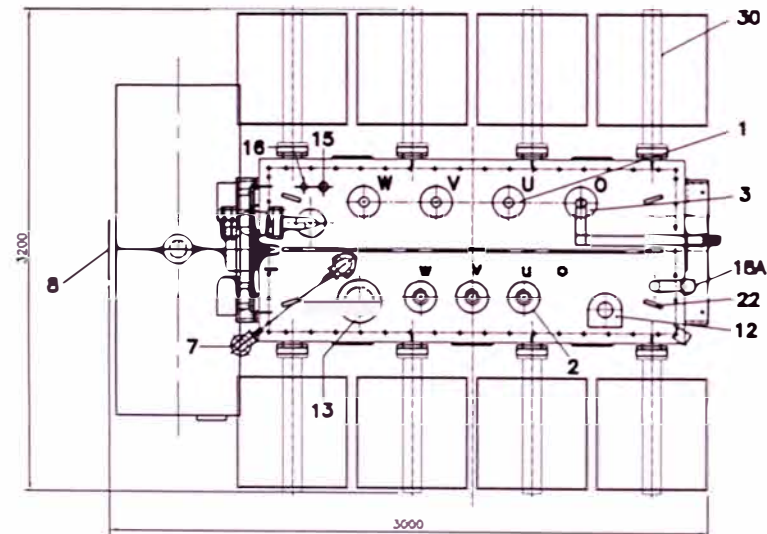
Medidas dadas en mm.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA			
Dibujado	No Registro	Título	Esc.
Revisado	Fecha	Croquis de Dimensiones	%
Aprobado		Transformador Trifasico	
Modificación		6.8 MVA - K=1	
		22.9/10.0 kV - 60 Hz	
		PREDISERO 1	Pag. 1
			Cant. 1



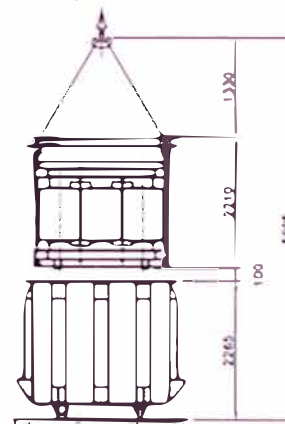
### TRANSFORMADOR TRIFASICO EN ACEITE

No.	Descripción
1	Borne Alta Tensión 30 kV/250 A
2	Borne Baja Tensión 20 kV/530 A
3	Borne Neutro Alta Tensión 30 kV/250 A
4	Conservador de Aceite
5	Abertura para llenado de Aceite
6	Indicador de Nivel de Aceite
7	Mando del Conmutador
8	Placa de Firma
9	Válvula Mariposa
10	Rele Buchholz
11	Desecador de Aire
12	Válvula de Seguridad
13	Cópuia para transformador de corr. BT (fase w)
14	Ruedas
15	Termómetro
16	Rele de Imagen Térmica
17	Unidad de Compensación RIT
18	Válvula de filtrado de Aceite G2 (A.- Entrada B.- Salida)
19	Válvula para Radiador
20	Radiador
21	Puesta a tierra
22	Oreja de Suspensión: parte activa a transformador
23	Placa de Características
24	Oreja de Tracción
25	Caja de Borne
26	Asiento para elevación del transformador
27	Perno de prueba de aceite (A.- Conservador B.- Transformador)
28	Platina de puesta a tierra neutro de B.T. (Cu 5x50)



LADO DE B.T.

7,05 Tons.



Desencubado

### PESOS ESTIMADOS

Parte Activa	7050 Kgs.
Aceite	2500 Kgs.
Peso Total	13000 Kgs.

Medidas dadas en mm.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA			
Dibujado	No Registro	PLA	Esc. 1:1
Revisado	Opco. responsable	Croquis de Dimensiones Transformador Trifasico 6.0 MVA K=18 22.9/10.0 kV - 60 Hz	
Aprobado			
Modificación		PREDISEÑO 2	Prop. 1
			Cont. 1



**ANEXO E**  
**PLACA DE CARACTERISTICAS**

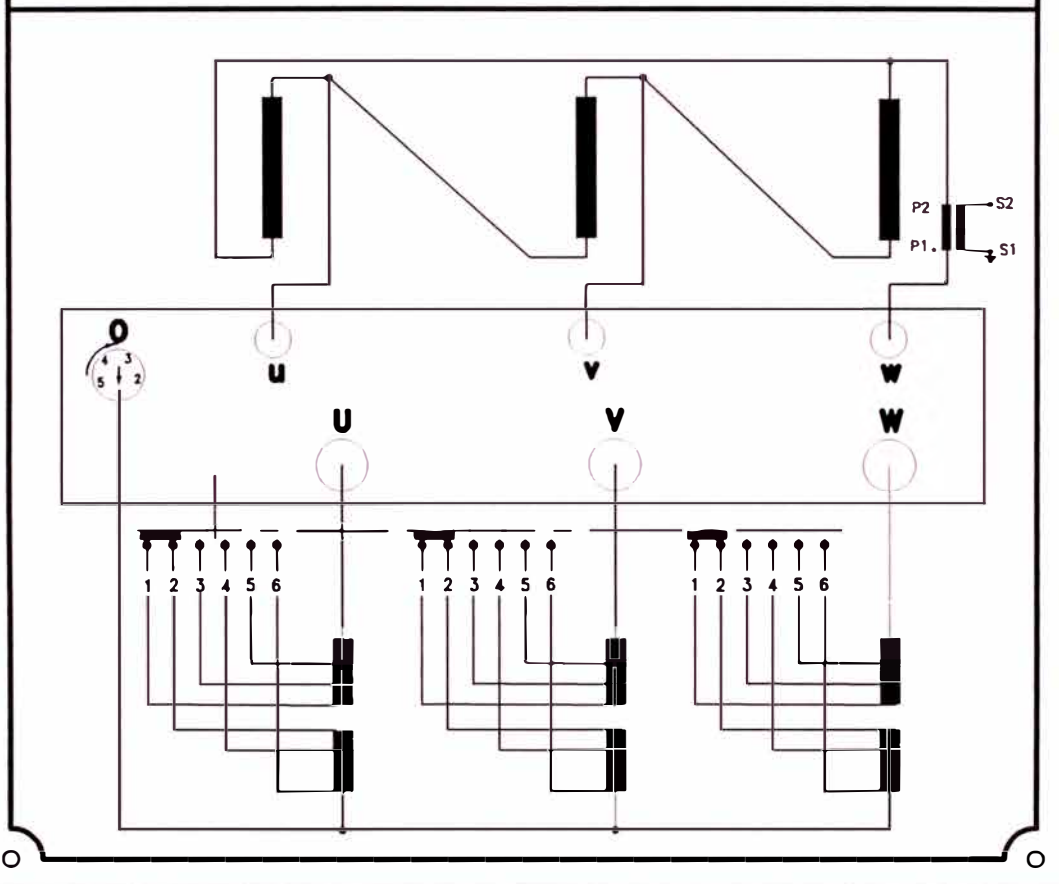
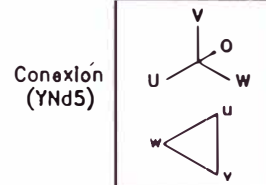
<b>TRANSFORMADOR</b>		Fases <b>3</b> Frec. <b>60 Hz.</b>	Año de Fab. <b>2003</b>
Nr. <input type="text"/>		Tipo <input type="text"/>	T.c.c. <b>6 %</b>
KVA <b>6000</b>		Enfriamiento <b>ONAN</b>	Norma <b>CEI Pub. 76</b>
Volt. <b>22900</b> <b>10000</b>		Calentamiento <b>60 / 65 °C</b>	Altitud Max. <b>1000 m.s.n.m.</b>
Amp. <b>151,27</b> <b>346,41</b>		Tensión de Prueba / BIL <b>A.T. 50/125 kV</b> <b>B.T. 28/75 kV</b>	Aceite <b>MINERAL</b>
			Parte Activa <b>5920 Kg.</b>
			Peso Aceite <b>1900 Kg.</b>
			Peso Total <b>11000 Kg.</b>

ALTA TENSION				BAJA TENSION	
Bornes	Pos.	Conmutador	Volt.	Bornes	Volt.
<b>OUVW</b>	1	1 - 2	24045	<b>UVW</b>	10000
	2	2 - 3	23473		
	3	3 - 4	22900		
	4	4 - 5	22328		
	5	5 - 6	21755		

Armonicos de corriente **FACTOR K=1.**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

Referencia	No Registro	<b>PLACA DE CARACTERISTICAS Y ESQUEMA DE CONEXIONES TRANSFORMADOR TRIFASICO 6 MVA K=1</b>	<b>PREDISEÑO 1</b>	Cont.
Dibujado	Dpto. responsable			
Aprobado				
Modificacion				

**TRANSFORMADOR**

Nr.

KVA

Volt.

Amp.

Fases  Frec.

Tipo

Enfriamiento

Calentamiento

Tensión de Prueba / BIL

Año de Fab.

T.c.c.

Norma

Altitud Max.

Aceite

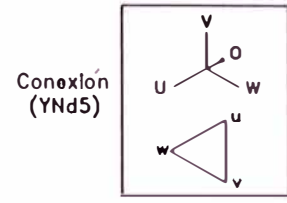
Parte Activa

Peso Aceite

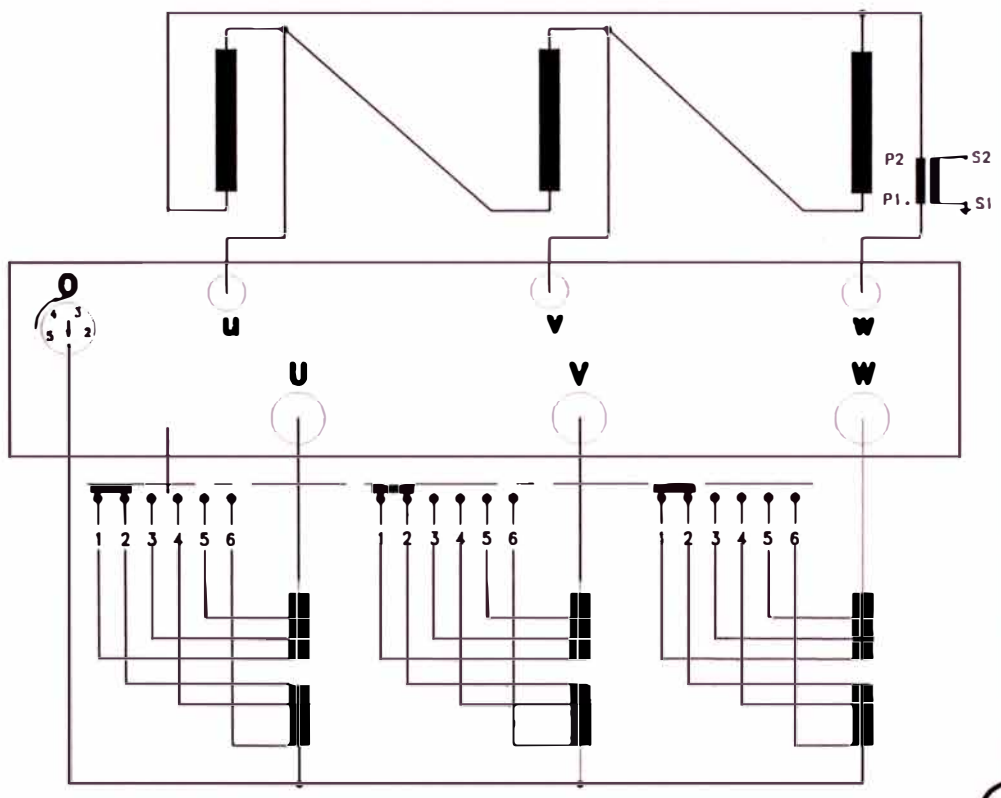
Peso Total

ALTA TENSION			
Bornes	Pos.	Conmutador	Volt.
<b>O U V W</b>	1	1 - 2	24045
	2	2 - 3	23473
	3	3 - 4	22900
	4	4 - 5	22328
	5	5 - 6	21755

BAJA TENSION	
Bornes	Volt.
<b>u v w</b>	10000



Armonicos de corriente



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

Referencia	No Registro	<p align="center"><b>PLACA DE CARACTERISTICAS Y ESQUEMA DE CONEXIONES TRANSFORMADOR TRIFASICO 6 MVA K=16</b></p>	<p align="center"><b>PREDISEÑO 2</b></p>
Dibujado	Dpto. responsable		
Aprobado			
Modificacion			
		Cont.	

## BIBLIOGRAFÍA

1. Juan Corrales Martín, "Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas" Tomo II Editorial Marcombo, 1984.
2. Raphael Feinberg , "Modern Power Transformer Practice" The Macmillan Press LTD, 1980
3. Francisco Gonzales "Fundamentos Teóricos sobre Armónicos" Ciudad de Guatemala, Guatemala, C.A., 1996
4. J.Arrillaga, L.I. Eguiluz " Armónicos en Sistemas de Potencia" Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1994
5. J.Arrillaga, L.I. Eguiluz " Circuitos en Régimen No Sinusoidal" Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1995
6. "K-Factor Transformers and Non-Linear Loads" Technical Papers, Liebert Corporation, Enero 1996
7. A.E. Fitzgerald – Charles Kingsley – Alexander Kusko "Teoria y Análisis de las Máquinas Eléctricas, Editorial Hispano Europea, 1975
8. Alexander S. Langsdorf "Teoria de las Máquinas de Corriente Alterna" MacGraw – Hill, 1971
9. M.P. Kostenko – I.M. Piotrovsky "Maquinas Eléctricas I" Editorial MIR-Moscu, 1975
10. Manuel Carranza "Corrientes Parásitas en Transformadores" Publicación pagina Web de ABB, 2001
11. ANSI/IEEE C57.110-1986  
IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents.