

# Recomendaciones Prácticas para la Evaluación de la Carga de un Transformador Sometido a Corrientes No Sinusoidales\*

## Transformer Assessment Practices Under Non-Sinusoidal Load Currents

Artículo de Investigación Científica.- Fecha de Recepción: 20 de febrero de 2014 - Fecha de Aceptación: 22 de mayo de 2014

Rafael Enrique Fragozo Díaz

Ingeniero electricista. XM S.A. E.S.P. Medellín (Colombia). rfragozo@xm.com.co

Gabriel Alexis Malagón Carvajal

Magíster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). gabriel.malagon@correo.uis.edu.co

Julio Cesar Chacón Velasco

Magíster en Potencia Eléctrica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). cchacon@uis.edu.co

Gabriel Ordoñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). gaby@uis.edu.co

Wilson Giraldo Picón

Magíster en Potencia Eléctrica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). wgiraldop@uis.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

R. E. Fragozo Díaz, G. A. Malagón Carvajal, J. C. Chacón Velasco, G. Ordoñez Plata, and W. Giraldo Picón, "Recomendaciones Prácticas para la Evaluación de la Carga de un Transformador Sometido a Corrientes No Sinusoidales," *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 63–74, 2014.

**Resumen:** Este trabajo presenta las prácticas recomendadas por el estándar IEEE C57.110™-2008 para la determinación de las condiciones óptimas de operación de transformadores sometidos a corrientes no sinusoidales. Se analizan los principales efectos de la distorsión armónica sobre los componentes internos del transformador, así como las variaciones en el comportamiento del flujo magnético, clases y tipos de pérdidas, al igual que las recomendaciones prácticas para la evaluación del máximo valor eficaz de corriente de carga no sinusoidal, tanto para transformadores tipo seco como inmersos en líquido. Con estos valores de carga estimados se logra proteger al transformador, asegurando que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales fue diseñado, evitando, de esta forma, los efectos de fenómenos ocasionados por la presencia de corrientes no sinusoidales.

**Palabras clave:** Compatibilidad electromagnética (CEM), Armónicos, Transformadores, Pérdidas adicionales, Distorsión Armónica, Desclasificación.

**Abstract:** This paper sets forth IEEE Std C57.110™-2008 recommended practices for determining the optimum operating conditions for a transformer under non-sinusoidal load currents. An analysis on the main harmonic distortion effects of transformer's internal components, magnetic flux behavior variations, and types of loss was accomplished. Likewise, practical recommendations to assess maximum efficiency values of non-sinusoidal load currents is also completed for both dry-type and liquid-immersed distribution transformers. With these estimated load values, transformers can be protected, ensuring that the highest loss value does not exceed the loss value for which it was designed, thus, avoiding the effects of non-sinusoidal currents phenomena.

**Keywords:** Electromagnetic compatibility (EMC), Harmonics, Transformers, Additional loss, Harmonic distortion, Derating.

\* Artículo de Investigación científica derivado del proyecto de investigación DIF VIE-5566 "Fortalecimiento de grupos de Investigación: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros CEM", Grupo de Investigación GISEL de la Universidad Industrial de Santander durante la vigencia 2011-2013.

## I. INTRODUCCIÓN

El flujo de corrientes con alto contenido armónico genera calentamientos adicionales de los devanados del transformador y, por consiguiente, un aumento de pérdidas por efecto joule durante la exposición a variaciones de frecuencia de la corriente circulante distorsionada [1]. Bajo estas condiciones, para garantizar que las temperaturas máximas de operación no superen los límites, el transformador se debe operar por debajo de sus valores nominales de corriente. La referencia [2] propone un factor de reducción para la corriente de carga cuando esta contiene una distorsión armónica dada. Al aplicar estos procedimientos se puede asegurar que las pérdidas en el transformador no sobrepasen el valor para las cuales fue diseñado.

A lo largo de este artículo se presentan algunas prácticas identificadas a partir del procedimiento propuesto por [2]; este procedimiento solo debe aplicarse a transformadores de dos devanados cubiertos por los estándares [3], [4], [5]; asimismo, en la sección II se presentan los principales efectos de la distorsión armónica en el interior de los componentes internos de los transformadores durante la operación, tales como el comportamiento del flujo magnético, clases y tipos de pérdidas. En la sección III se expone el procedimiento para la evaluación del máximo valor eficaz de carga no sinusoidal de corriente tanto para transformadores tipo seco como inmersos en líquido; para ello se presentan dos metodologías: por un lado, mediante el cálculo del factor armónico de pérdidas (numeral III.A) y, por otro, mediante la utilización de pruebas o ensayos de rutina realizados al transformador (numeral III.B). Ambos procedimientos se relacionan como prácticas recomendadas para la desclasificación de transformadores sometidos a corriente no sinusoidal. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones obtenidas durante el análisis de los procedimientos recomendados en este artículo.

## II. EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES

La influencia de los armónicos en transformadores se puede analizar tomando como punto de partida una corriente continua (c.c.) “I” que pasa a través de los conductores del devanado. Por efecto Joule se producen pérdidas  $I^2R$ , donde es la resistencia de corriente continua del devanado. Sin embargo, si una corriente alterna (a.c.) con valor eficaz igual a la “I” de corriente continua se hace pasar a través de los conductores del devanado, además de las pérdidas  $I^2R$  se producen unas pérdidas adicionales. Esto se debe a que cuando los devanados del transformador transportan la corriente alterna, cada conductor está rodeado por un campo electromagnético alterno cuya fuerza es directamente proporcional a la magnitud de la corriente [6].

Una imagen del campo producido por la corriente de carga nominal que fluye a través de todos los conductores del devanado se muestra en la Fig. 1, en la cual se presenta una vista de la sección transversal del núcleo, devanados, abrazaderas, el tanque de un transformador y el campo electromagnético inducido por la corriente.

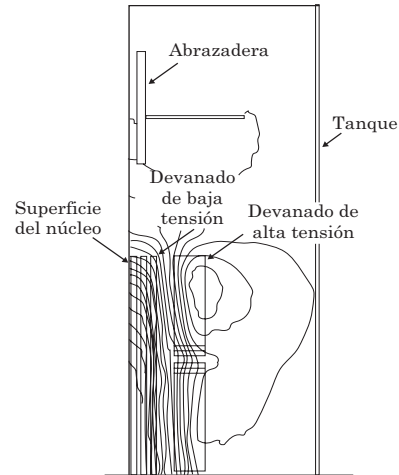


Fig. 1. Campo Electromagnético producido por la corriente de carga [2]

Cada conductor metálico experimenta una tensión inducida interna, que provoca el flujo de corrientes parásitas sobre ese conductor (pérdidas provocadas por las corrientes de Foucault; también conocidas como “corrientes torbellino” o “eddy currents” en inglés). Estas corrientes, a su vez, producen pérdidas que se disipan en forma de calor, ocasionando un aumento de temperatura adicional en el conductor sobre su entorno. Este tipo de pérdidas adicionales (diferentes a las pérdidas  $I^2R$ ) se conocen como *pérdidas por dispersión*. Aunque todas las pérdidas adicionales son ocasionadas por corrientes parásitas, las que ocurren en los devanados se suelen llamar *pérdidas por corrientes parásitas en los devanados* ( $P_{EC}$ ) y las que ocurren en otras partes estructurales externas a los devanados, tales como fijaciones depósitos, etc., se llaman *otras pérdidas por dispersión* ( $P_{OSL}$ ) [2].

Las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados tienden a ser proporcionales al cuadrado de la intensidad del campo electromagnético (o el cuadrado de la corriente de carga que produce el campo) y aproximadamente proporcionales al cuadrado de la frecuencia de corriente alterna [7], [8], [9], [10] y pueden ser definidas mediante la siguiente expresión:

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

Donde

- $P_{EC}$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.
- $P_{EC,R}$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal.
- $h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- $I_h$  Corriente del h-ésimo armónico, en Ampere.
- $I_R$  Corriente nominal, en Ampere.

De acuerdo con (1), al tener un aumento de corrientes de carga no sinusoidales en los devanados, también se pueden tener un aumento considerable de pérdidas por corrientes parásitas y, del mismo modo, un aumento de las temperaturas en los mismos.

Por otra parte, las pérdidas por dispersión son generalmente proporcionales a la corriente elevada a una potencia ligeramente inferior a 1, debido a que la profundidad de penetración del flujo electromagnético en las otras partes metálicas (fijaciones, depósitos, etc.), por lo general de acero, varía con la intensidad de campo, por lo tanto, estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán en el aumento de temperatura del devanado. Por lo tanto, en presencia de corrientes armónicas de muy alta frecuencia, el flujo electromagnético no puede penetrar totalmente los conductores del devanado. En este sentido, es conservador suponer que las pérdidas por dispersión son proporcionales al cuadrado de la frecuencia de la corriente armónica, tal cual se puede presentar mediante la siguiente ecuación [2], [3]:

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

Donde:

- $P_{OSL}$  Pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos.
- $P_{OSL,R}$  Pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc., a corriente y frecuencia nominales.
- $P_{EC}$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.
- $h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- $I_h$  Corriente del h-ésimo armónico, en Ampere.
- $I_R$  Corriente nominal, en Ampere.

Adicional al escenario antes descrito, donde existen pérdidas por dispersión, se puede presentar el caso en que algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga; esta corriente continua aumenta las pérdidas en el núcleo ligeramente e incrementa substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible [3].

En instalaciones donde existen transformadores con conexión delta-estrella, muy comunes en sistemas de distribución tetrafilares, y que alimentan cargas no lineales monofásicas, como en el caso de fuentes reguladas por conmutación, los armónicos "triple-n" (múltiplos de 3 de la frecuencia fundamental) circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta, ya que quedan atrapados en esta, produciendo sobrecalentamiento y, a su vez, pérdidas en los devanados [11].

En resumen, cuando un transformador es sometido a una corriente de carga que tiene un contenido armónico significativo, las pérdidas adicionales de corriente inducida en los conductores de los devanados y en las estructuras metálicas elevan la temperatura de esas partes por encima de la temperatura normal de funcionamiento en condiciones nominales. La experiencia ha demostrado que los conductores de los devanados son las partes más críticas cuando se quiere determinar una temperatura de funcionamiento aceptable.

Por lo tanto, el objetivo debe ser evitar que las pérdidas en los devanados bajo condiciones de cargas con contenido armónico sean superiores a las pérdidas en condiciones nominales de operación.

Los devanados internos (normalmente de baja tensión) de un transformador tienen típicamente mayores pérdidas por corrientes que los devanados externos. Esto se debe a que el flujo electromagnético tiende a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, en las que se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo. Además, las mayores pérdidas por corrientes parásitas ocurren generalmente en los conductores de los extremos del devanado interior. Esto es resultado del hecho que esta es la región de mayor densidad de flujo electromagnético radial (ver Fig. 2) y el flujo radial pasa a través del ancho del conductor rectangular del devanado.

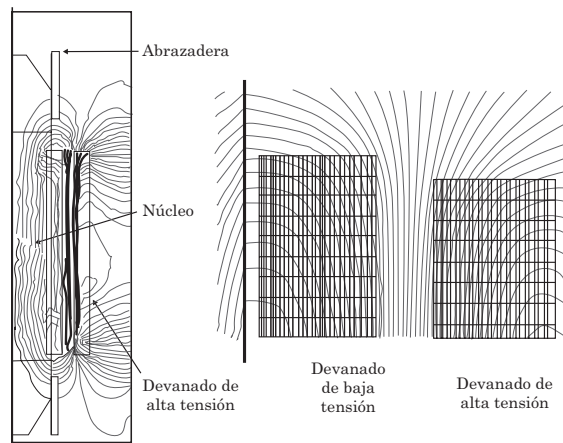


Fig. 2. Campo Electromagnético en el devanado producido por la corriente de carga [2]

Dado que el ancho de un conductor es típicamente tres a cinco veces su grosor y las pérdidas por corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la dimensión, las pérdidas más altas se producen en los conductores de los extremos [2].

Las recomendaciones para la determinación de las condiciones óptimas de operación descritas en [2] se basan, entonces, en el cálculo de una capacidad equivalente del transformador, que establece un factor de reducción de la corriente de carga que contiene una composición armónica dada.

La ecuación (3) proporciona un cálculo del máximo valor eficaz de una carga no sinusoidal de corriente en por unidad (p.u.), tomando como base la corriente de carga nominal, que asegurará que las pérdidas en la región del devanado con la densidad de pérdidas más alta no superen el valor de las pérdidas para las cuales fue diseñado el transformador (condiciones nominales de operación).

Las corrientes armónicas que fluyen a través de la impedancia de dispersión del transformador y de la impedancia del sistema también pueden producir una pequeña distorsión armónica en la forma de onda de tensión en los bornes del transformador. Tales armónicos de tensión pueden causar pérdidas adicionales en el núcleo del transformador. Sin embargo, la experiencia operativa no ha indicado que el aumento de la temperatura en el núcleo sea el parámetro determinante para determinar la magnitud de las corrientes de cargas no sinusoidales seguras.

### III. PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA EVALUAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE UN TRANSFORMADOR

#### A. Cálculo de la Capacidad Equivalente del Transformador Mediante el Cálculo del Factor Armónico de Pérdidas

##### 1) Cálculos típicos para transformador tipo seco [2]

El valor en por unidad tomando como base la corriente de carga no sinusoidal, que hará que las pérdidas de carga sean iguales al valor de la mayor densidad de pérdidas posibles en condiciones nominales, es decir, el valor de las pérdidas máximo permitido para las fue diseñado cuales el transformador, está dado por (3):

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)}} [pu] \quad (3)$$

Donde

$I_{m\acute{a}x}(pu)$  Valor eficaz de la corriente de carga máxima permitida en condiciones nominales.

$P_{LL-R}(pu)$  Pérdidas de carga en por unidad en condiciones nominales.

$F_{HL}$  Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.

$P_{EC-R}(pu)$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados en por unidad a condiciones nominales.

El Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados ( $F_{HL}$ ) es un factor de proporcionalidad aplicable a las pérdidas parásitas en los devanados que permite evaluar el calentamiento producido por las corrientes armónicas de la carga, y se puede expresar en forma de ecuación así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (4)$$

Donde:

$F_{HL}$  Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.

$h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

$I_h$  Corriente del h-ésimo armónico, en Ampere.

$I_1$  Corriente nominal, en Ampere.

a) Ejemplo: Para las corrientes de carga no sinusoidal dadas en p.u. y con la distribución armónica mostrada en la tabla I, determinar la máxima corriente no sinusoidal admitida para un transformador IEEE estándar, con una corriente a plena carga 1200 A.

Se considera que las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados en condiciones nominales ( $P_{EC-R}$ ) en el punto de mayor densidad de pérdidas es el 15 % de las pérdidas  $I^2R$ .

TABLA I. ESPECTRO ARMÓNICO PARA LA CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA [2]

h	1	5	7	11	13	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,23	0,11	0,042	0,027	0,013	0,008

Las pérdidas de carga en por unidad para las condiciones de corriente y frecuencia nominal se calculan de acuerdo con

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (5)$$

Donde

$P_{LL-R}(pu)$  Pérdidas de carga en por unidad.

- $P_{OSL-R}(pu)$  Pérdidas por dispersión bajo carga en por unidad para condiciones nominales.
- $PEC-R(pu)$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados en por unidad a condiciones nominales.

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + 0,15 = 1,15 [pu]$$

El factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados ( $F_{HL}$ ) viene dado por (6), cuyos variables se calculan y se tabulan en la tabla II.  $F_{HL}$  Será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{3,324}{1,068} = 3,11 \quad (6)$$

TABLA II. CÁLCULOS DEL FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS [2]

h	$I_h/I_1$	$[I_h/I_1]^2$	$h^2$	$[I_h/I_1]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,23	0,053	25	1,32
7	0,11	0,012	49	0,59
11	0,042	0,0018	121	0,21
13	0,027	0,00073	169	0,12
17	0,013	0,00017	289	0,049
19	0,008	0,000064	361	0,023
$\Sigma$		<b>1,068</b>		<b>3,324</b>

Una vez calculado el factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados, se verifica que las pérdidas de carga en por unidad para la corriente de carga no sinusoidal, sean menores que las pérdidas de carga en por unidad para las condiciones de corriente y frecuencia nominal:

$$P_{LL}(pu) = I(pu)^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))) \quad (7)$$

$$P_{LL}(pu) = 1,068 \times (1 + 3,11 \times 0,15) = 1,57 [pu]$$

Al realizar la comparación se encuentra que las pérdidas son mayores que las pérdidas . Esto indica que se debe calcular la máxima corriente de carga, para la cual, considerando la composición armónica dada, las pérdidas no superen las pérdidas .

La ecuación (8) permite calcular la corriente máxima deseada, así:

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} \quad (8)$$

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{1,15}{1 + (3,11 \times 0,15)}} = 0,89[pu]$$

La corriente máxima de carga no sinusoidal admitida para la composición armónica dada es entonces

$$I_{m\acute{a}x} = 0,89 \times 1200 [A] = 1068 [A]$$

Por lo tanto, la capacidad de carga del transformador resulta un 89 % de su capacidad de corriente sin contenido armónico, o simplemente 1068 A.

## 2) Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [2]

Los cálculos para los transformadores inmersos en líquido son similares a los de transformadores tipo seco, excepto que aquí se considera el efecto de las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

Como lo establece la [12], para un transformador autorefrigerado tipo ONAN (Refrigeración de aceite natural (ON)-Refrigeración de aire natural, radiadores (AN)), la elevación de temperatura de la capa superior del aceite respecto al ambiente es proporcional a las pérdidas armónicas elevadas a la 0,8 potencia. Se toma como base la carga nominal y las pérdidas nominales, tal como se proponen en (9) y (10).

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (9)$$

Donde

- $\theta_{TO}$  Elevación de temperatura de la capa superior del aceite.
- $\theta_{TO-R}$  Elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones nominales.
- $P_{NL}$  Pérdidas en vacío o ajenas a la carga.
- $P_{LL}$  Pérdidas bajo carga.
- $P_{LL-R}$  Pérdidas bajo carga para las condiciones nominales.

$$P_{LL} = I^2 R + (F_{HL} \times P_{EC}) + (F_{HL-STR} \times P_{OSL}) \quad (10)$$

Donde

- $I^2 R$  Pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c. de los devanados.
- $F_{HL}$  Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.
- $P_{EC}$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.
- $F_{HL-STR}$  Factor armónico para las pérdidas por dispersión.
- $P_{OSL}$  Otras pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

Una relación similar al factor armónico para las pérdidas parásitas en los devanados existe para las pérdidas por dispersión en un transformador (ver (11)) y se desarrolla de manera análoga al factor  $F_{HL}$ .

Sin embargo, las pérdidas debidas a las conexiones, piezas estructurales, el tanque, etc., según [2], son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia armónica elevada a la 0,8 potencia.

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (11)$$

Donde

- $F_{HL-STR}$  Factor armónico de pérdidas por dispersión.
- $h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- $h_{max}$  Mayor orden de armónico que se va a considerar
- $I_h$  Valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.
- $I_1$  Valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

La elevación de temperatura del punto caliente de los devanados también es proporcional a las pérdidas de carga elevadas a la 0,8 potencia, y puede ser calculada como en (12):

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left( \frac{P_{LL}(pu)}{P_{LL-R}(pu)} \right)^{0,8} \quad [^{\circ}C] \quad (12)$$

Donde

- $\theta_g$  Máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite.
- $\theta_{g-R}$  Máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite para las condiciones nominales.
- $P_{LL}(pu)$  Pérdidas de carga en por unidad.
- $P_{LL-R}(pu)$  Pérdidas de carga en por unidad bajo condiciones nominales.

Esto puede ser escrito entonces como se muestra en (13):

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left( \frac{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8} \quad [^{\circ}C] \quad (13)$$

Donde

- $F_{HL}$  Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.

$P_{EC-R}(pu)$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados (p.u) en condiciones nominales.

a) Ejemplo: Se tiene un transformador en aceite, diseñado para un contenido armónico específico de corriente, se considera una elevación media de temperatura de los devanados de 65 y 80°C en el punto caliente de los devanados. Después de la instalación se midieron las corrientes armónicas reales, y estos valores se suministraron al fabricante con objeto de verificar las elevaciones de temperatura. En condiciones de carga nominal y en una operación a 60 Hz, las pérdidas medidas se muestran en la tabla III.

TABLA III. PÉRDIDAS MEDIDAS EN CONDICIONES NOMINALES [2]

Pérdidas nominales	Potencia [W]
Sin carga	4 072
I <sup>2</sup> R	27 821
Pérdidas parásitas y por dispersión	4 060
Pérdidas totales (P <sub>LL-R</sub> + P <sub>NL</sub> )	35 953

TABLA IV. ELEVACIONES DE TEMPERATURA RESPECTO A LA TEMPERATURA AMBIENTE [2]

Elevaciones de T respecto a la T ambiente	T [°C]
Elevación media en el lado de alta	48,1
Elevación media en el lado de baja	47,6
Elevación en la capa superior del aceite	47,2
Elevación de la zona caliente de los arrollamientos	55,3

La distribución armónica de la carga fue aproximadamente el 100 % de la magnitud de la corriente fundamental; se suministra en la tabla V.

TABLA V. DISTRIBUCIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA [2]

h	1	3	5	7	9	11
I <sub>b</sub> /I <sub>1</sub>	1,00	0,35	0,17	0,12	0,092	0,071
h	13	15	17	19	23	25
I <sub>b</sub> /I <sub>1</sub>	0,051	0,043	0,040	0,039	0,032	0,029

Donde

- $h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- $I_h$  Valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.
- $I_1$  Valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Los cálculos para el factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados y para las pérdidas por dispersión se muestran en la tabla VI.

TABLA VI. CÁLCULOS DEL FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS [2]

h	I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub>	[I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub> ] <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>	[I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub> ] <sup>2</sup> h <sup>2</sup>	h <sup>0,8</sup>	[I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub> ] <sup>2</sup> h <sup>0,8</sup>
1	1	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,35	0,12	9	1,08	2,41	0,29
5	0,17	0,029	25	0,73	3,62	0,11
7	0,12	0,014	49	0,69	4,74	0,066
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,04	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
23	0,032	0,0010	529	0,53	12,29	0,012
25	0,029	0,00084	625	0,53	13,13	0,011
Σ		1,19		7,71		1,64

El resultado de la sumatoria de la tercera columna es 1,19. La raíz cuadrada de 1,19 (Tabla VI), corresponde al valor eficaz de la corriente en p.u. y lpu es igual a 1,09. El F<sub>HL</sub>, según (14), está dado por la división de la sumatoria de la quinta columna entre la sumatoria de la tercera columna, dando como resultado 6,48.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{7,71}{1,19} = 6,48 \quad (14)$$

Así mismo la división de la sumatoria de la séptima columna entre la sumatoria de la tercera columna, de acuerdo con (15), es el F<sub>HL</sub>, para las pérdidas por dispersión, el cual es igual a 1,38.

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{1,64}{1,19} = 1,38 \quad (15)$$

Una buena aproximación consiste en asumir las pérdidas por dispersión en aproximadamente 92 % y las pérdidas por corrientes parásitas alrededor del 8 %, así:

TABLA VII. PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN [2]

Pérdidas por dispersión	Potencia [W]
Pérdidas parásitas en los devanados	316
Pérdidas por dispersión	3 744
Total pérdidas parásitas y por dispersión	4 060

Para determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se

deben corregir teniendo en cuenta el valor eficaz más alto de la corriente por encima de la corriente nominal, y también los efectos del contenido armónico.

$$P_{LL} (pu) = P_{LL-R} (pu) \times (lpu)^2 \quad (16)$$

El cálculo de las pérdidas totales corregidas debido a la carga armónica utilizando (16), de donde a continuación se muestran los resultados en la tabla VIII.

La elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones de carga especificadas se puede calcular mediante (17):

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} \quad (17)$$

$$\theta_{TO} = 47,2 \times \left( \frac{45\ 671}{35\ 953} \right)^{0,8} = 57,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

TABLA VIII. CORRECCIÓN DE LAS PÉRDIDAS [2]

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]*	F <sub>HL</sub>	Pérdidas corregidas
P <sub>NL</sub>	4 072	4 072		4 072
I <sup>2</sup> R	27 821	33 034		33 034
P <sub>EC</sub>	316	375	6,48	2 430
P <sub>OSL</sub>	3 744	4 446	1,38	6 135
P <sub>T</sub>	35 953	41 927		45 671

\* Las pérdidas de carga son calculadas a partir de las pérdidas nominales multiplicadas por (lpu) al cuadrado

Las pérdidas máximas en por unidad en los devanados ocurrieron en el devanado de alta tensión y se estiman en un promedio del 2 % de las pérdidas óhmicas. Suponiendo que las máximas pérdidas por dispersión en los devanados en la zona correspondiente al punto más caliente son cuatro veces el promedio de las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados, estas resultan del 8 %.

La elevación de temperatura del punto más caliente respecto al a la temperatura de la capa superior del aceite puede ser calculada utilizando la expresión (18):

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left( \frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8} \quad (18)$$

$$= (55,3 - 47,2) \times \left( \frac{1 + (6,48 \times 0,08)}{1 + 0,08} \right)^{0,8} = 12,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto al ambiente es igual a θ<sub>g</sub> y θ<sub>TO</sub>

$$57,2 + 12,2 = 69,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Finalmente, se debe verificar que las temperaturas calculadas (θ<sub>g</sub> y θ<sub>TO</sub>) no excedan los límites térmicos para los cuales fue diseñado el transformador.

C. Cálculo de la Capacidad Equivalente del Transformador Utilizando los Datos de las Pruebas de Rutina

1) Consideraciones preliminares

Con el fin de realizar cálculos con datos limitados, es necesario hacer ciertas suposiciones que se consideran conservadoras. Estos supuestos pueden modificarse en función de la orientación proporcionada por el fabricante para un transformador en particular de la siguiente manera [2]:

- a) El certificado de pruebas incluye todos los datos exigidos por [3] o [12].
- b) Una porción de las pérdidas por dispersión, determinada por los factores listados como 1) y 2) de este literal, y que se supone que son pérdidas por corrientes parásitas en los devanados. Esta es una hipótesis conservadora y no se debe utilizar en caso de contar con mejores datos:
  - El 67 % de las pérdidas totales por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes parásitas en los devanados para los transformadores tipo seco.
  - El 33 % de las pérdidas totales por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes parásitas en los devanados para transformadores inmersos en líquido.
- c) Las pérdidas se supone que se distribuyen uniformemente en cada devanado.
- d) La división de las pérdidas por corrientes parásitas entre los devanados se supone así:
  - El 60 % en el devanado interior y el 40 % en el devanado exterior para todos los transformadores auto-refrigerados con corriente nominal menor de 1000 A (independientemente de la relación de vueltas).
  - El 60 % en el devanado interior y el 40 % en el devanado exterior para todos los transformadores que tienen una relación de vueltas de 4:1 o menos.
  - El 70 % en el devanado interior y el 30 % en el devanado exterior para todos los transformadores que tienen una relación de vueltas mayor de 4:1 y auto-refrigerados con corriente nominal mayor a 1000 A.
- e) La distribución de pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se supone no uniforme.
- f) Las máximas pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se supone que es en la región del punto más caliente del devanado y es igual al 400 % de la densidad promedio de pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.

Según lo establecido en [12] y [13], el componente de pérdidas por dispersión de las pérdidas de carga se calcula restando las pérdidas  $I^2R$  del transformador de las pérdidas de carga medidas como se muestra en (19). Muchos informes de pruebas de transformadores trifásicos muestran

la resistencia de las tres fases en serie. Los valores para  $R_1$  y  $R_2$  se pueden calcular para la Conexión Delta:  $R_1$  o  $R_2 = 2/9$  de la resistencia trifásica, y para la Conexión Estrella:  $R_1$  o  $R_2 = 2/3$  de la resistencia trifásica.

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \times [(I_{1-R}^2 \times R_1) + (I_{2-R}^2 \times R_2)] [W] \quad (19)$$

Donde

$P_{TSL-R}$	Pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales.
$I_{1-R}$	Valor eficaz de la corriente en el lado de alta (HV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.
$I_{2-R}$	Valor eficaz de la corriente en el lado de baja (LV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.
$R_1$	Resistencia dc entre los terminales de alta.
$R_2$	Resistencia dc entre los terminales de baja.
$K$	Constante que depende del número de fases, 1,0 para transformadores $1\Phi$ , 1,5 para transformadores $3\Phi$ .
$P_{LL}$	Pérdidas en vacío.

Teniendo en cuenta el literal b), una porción de las pérdidas por dispersión se toma como pérdidas por corrientes parásitas en los devanados. Para transformadores tipo seco, las pérdidas por corrientes parásitas se asumen como se muestra en (20):

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,67 [W] \quad (20)$$

Para transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se asumen como se muestra en (21):

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,33 [W] \quad (21)$$

Las pérdidas por dispersión en las fijaciones, depósitos, etc., son calculadas como muestra en (22):

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} [W] \quad (22)$$

Las pérdidas por dispersión en los devanados de baja tensión se pueden calcular a partir del valor  $P_{EC-R}$  de determinado a partir de (20) o (21), ya sea como  $0,6 \times P_{EC-R} [W]$  o como  $0,7 \times P_{EC-R} [W]$ , dependiendo del transformador, la relación de vueltas y la corriente nominal. Teniendo en cuenta el supuesto presentado en el literal c), las pérdidas  $I^2R$  se suponen que se distribuyen uniformemente dentro de la bobina, y con el inciso e), la máxima densidad de pérdidas por corrientes parásitas



se supone que es el 400 % del valor medio. Las máximas pérdidas por corrientes parásitas de los devanados (p.u.) en términos de las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas  $I^2R$  se pueden obtener utilizando (23) o (24):

$$\text{Máx } P_{EC-R}(pu) = \frac{0,6 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} [pu] \quad (23)$$

o

$$\text{Máx } P_{EC-R}(pu) = \frac{0,7 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} [pu] \quad (24)$$

Las pérdidas por dispersión en los devanados de alta tensión pueden ser calculadas de forma similar a lo expuesto para las pérdidas por dispersión en los devanados de baja tensión.

Para los transformadores inmersos en líquido (13) se aplica como se muestra en (25) y (26):

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left( \frac{1 + (2,4 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + (2,4 \times P_{EC-R}(pu))} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (25)$$

o

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left( \frac{1 + (2,8 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + (2,8 \times P_{EC-R}(pu))} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (26)$$

Donde

$\theta_{g1}$  Máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite.

$\theta_{g1-R}$  Máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite para condiciones nominales.

$F_{HL}$  Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.

$P_{EC-R}(pu)$  Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados en por unidad para condiciones nominales.

## 2) Cálculos típicos en transformadores de tipo seco [2]

Los cálculos típicos para transformadores tipo seco se mostrarán a través del ejemplo relacionado a continuación.

a) *Ejemplo:* para una corriente de carga no sinusoidal con una distribución armónica como la mostrada en la tabla IX.

TABLA IX. DISTRIBUCIÓN ARMÓNICA CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA [2]

h	1	2	3	4	5	6	7
$I_h/I_1$	1,00	0,044	0,092	0,022	0,41	0,018	0,2
h	8	9	10	11	12	13	
$I_h/I_1$	0,010	0,018	0,015	0,046	0,010	0,048	

Donde

$h$  Orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

$I_h$  Valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

$I_1$  Valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Determinar la corriente de carga máxima admitida por un transformador tipo seco, con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión: 13.8 [kV] conexión:  $\Delta$ - Resistencia = 2,0679 [ $\Omega$ ] a 100 [ $^{\circ}C$ ]
- Devanado de baja tensión: 480 [V] conexión: Y - Resistencia = 0,000589 [ $\Omega$ ] a 100 [ $^{\circ}C$ ]
- Capacidad nominal: 2 500 [kVA] – Trifásico-80 $^{\circ}C$  de elevación. Refrigeración Tipo AA
- Pérdidas en vacío ( $P_{LL}$ ) a 100 [ $^{\circ}C$ ]: 15 723 [W]
- Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se pueden determinar utilizando la nota 1 en III.B:  
 $R_1=0,4595$  [ $\Omega$ ] ,  $R_2=0,000393$ [ $\Omega$ ]
- Los valores para  $I_{1-R}$  e  $I_{2-R}$  son calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión como sigue:  $I_{1-R}=104,6$  [A],  $I_{2-R}=3007$  [A]
- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se pueden calcular de (19) así:  
 $P_{TSL-R}=15723-1,5 \times [(104,6^2 \times 0,4595) + (3007^2 \times 0,000393)]$   
 $P_{TSL-R}=15723-1,5 \times [5027+3554]=$   
 $P_{TSL-R}=15723-12872=2851$  [W]
- Las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en B y la ecuación (21):

$$P_{EC-R} = 2\ 851 \times 0,67 = 1\ 910$$
 [W]

Dado que la relación de transformación del transformador es mayor que 4:1 y que la corriente secundaria es mayor que 1000 A, las pérdidas por corrientes parásitas en el devanado de baja tensión es 0,7 veces las  $P_{EC-R}$  y las Max  $P_{EC-R}$  pueden ser calculadas a partir de (23) como sigue:

$$\text{Max } P_{EC-R}(pu) = \frac{0,7 \times 4 \times 1910}{1,5 \times 3554} = 1,00$$
 [pu]

Como en el ejemplo anterior, los valores para  $I_h(pu)^2$ ,  $h^2$  y  $I_h(pu)^2 h^2$  son necesarios para el cálculo de  $P_{LL}(pu)$ . Estos valores se calculan y se tabulan en la tabla X.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CARGA DE UN TRANSFORMADOR SOMETIDO A CORRIENTES NO SINUSOIDALES

TABLA X. CÁLCULOS DEL FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS [2]

h	I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub>	[I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub> ] <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>	[I <sub>h</sub> /I <sub>1</sub> ] <sup>2</sup> h <sup>2</sup>
1	1,00	1,00	1	1,00
2	0,044	0,0019	4	0,0076
3	0,092	0,0085	9	0,077
4	0,022	0,00048	16	0,0077
5	0,41	0,17	25	4,25
6	0,018	0,00032	36	0,012
7	0,2	0,040	49	1,96
8	0,01	0,00010	64	0,0064
9	0,018	0,00032	81	0,026
10	0,015	0,00023	100	0,023
11	0,046	0,0021	121	0,25
12	0,01	0,00010	144	0,014
13	0,048	0,0023	169	0,39
Σ		<b>1,23</b>		<b>8,02</b>

Donde la raíz cuadrada de la sumatoria de la tercera columna da como resultado un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,11 p.u. La sumatoria de la quinta columna dividida por la sumatoria de la tercera columna da como resultado el factor armónico de pérdidas igual a 6,52.

La densidad de pérdidas locales producidas por la corriente de carga no sinusoidal en la región de mayores pérdidas por corrientes parásitas en los devanados es como sigue en la siguiente ecuación:

$$P_{LL}(\text{pu}) = I(\text{pu})^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))) \quad (7)$$

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1,23 \times (1 + (6,52 \times 1,00)) = 9,25 [\text{pu}]$$

Así, el valor RMS de la corriente de carga no sinusoidal máxima admisible con la composición armónica dada se calcula con (3), como sigue:

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))}}$$

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{2,00}{1 + (6,52 \times 1,00)}} = 0,52[\text{pu}]$$

En este caso, la capacidad del transformador con la composición armónica de la corriente no sinusoidal dada es aproximadamente el 52 % de su capacidad corriente nominal.

### 3) Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [2]

a) *Ejemplo:* El ejemplo ilustra los cálculos de la elevación de la temperatura para un transformador inmerso en líquido [3], con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión: 34.5 [kV] Conexión Delta-Resistencia = 18,207 [Ω] a 75 [°C]
- Devanado de baja tensión: 2.4 [kV] Conexión Y-Resistencia = 0,02491 [Ω] a 75 [°C]
- Capacidad nominal: 2500 [kVA]-Trifásico-Refrigeración tipo ONAN.  
55 [°C] elevación promedio en los devanados  
65 [°C] elevación en el punto más caliente
- Pérdidas en vacío: 5 100 [W]-Pérdidas en vacío a 75 [°C]: 21 941 [W]
- Los valores de R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub> se pueden determinar utilizando la nota 1 en III.B  
R<sub>1</sub>=4,046 [Ω], R<sub>2</sub>=0,01661[Ω]
- Los valores para I<sub>1-R</sub> e I<sub>2-R</sub> calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión da como resultado:  
I<sub>1-R</sub>=41,8 [A], I<sub>2-R</sub>=601,4 [A]
- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se puede calcular de (19), como sigue:

$$P_{TSL-R} = 21941 - 1,5 \times [(41,8)^2 \times 4,046 + (601,4)^2 \times 0,01661]$$

$$P_{TSL-R} = 21941 - 1,5 \times [7\ 069 + 6\ 008]$$

$$P_{TSL-R} = 21941 - 19\ 615 = 2\ 326 [\text{W}]$$

- Las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en B y (20):

$$P_{EC-R} = 2\ 326 \times 0,33 = 767 [\text{W}]$$

- De la expresión (22), las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc., son las siguientes:

$$P_{OSL-R} = 2326 - 767 = 1\ 559 [\text{W}]$$

A partir de los datos de la prueba se pueden obtener las siguientes tablas:

TABLA XI. PÉRDIDAS MEDIDAS [2]

Pérdidas medidas	Potencia [W]
Pérdidas sin carga	5 100
Pérdidas	19 615
Pérdidas parásitas en los devanados	2 326
Pérdidas totales	27 041

TABLA XII. ELEVACIONES DE TEMPERATURA [2]

Elevaciones de T por encima de la T ambiente	T° [°C]
Elevación promedio en AT y BT	55
Elevación de la capa superior del aceite	55
Elevación en el punto más caliente del conductor	65

TABLA XIII. PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS Y DISPERSIÓN [2]

Pérdidas por corrientes parásitas y por dispersión	Potencia [W]
Pérdidas parásitas en los devanados	767
Pérdidas por dispersión	1 559
Pérdidas totales	2 326

La distribución armónica se determinó para una carga que era aproximadamente el 75% de la magnitud de la corriente fundamental. La distribución normalizada a la fundamental se muestra en la tabla XIV. Así mismo los cálculos para determinar el factor armónico de pérdidas y las pérdidas por dispersión se tabulan en la tabla XV.

TABLA XIV. DISTRIBUCIÓN ARMÓNICA CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA [2]

h	1	3	5	7	9
$I_h/I_1$	1,00	0,45	0,27	0,19	0,092
<b>h</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>19</b>
$I_h/I_1$	0,071	0,051	0,043	0,040	0,039

Donde

- $h$  Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- $I_h$  Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.
- $I_1$  Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

TABLA XV. CÁLCULOS DEL FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS [2]

h	$I_h/I_1$	$[I_h/I_1]^2$	$h^2$	$[I_h/I_1]^2 h^2$	$h^{0.8}$	$[I_h/I_1]^2 h^{0.8}$
1	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,45	0,20	9	1,80	2,41	0,48
5	0,27	0,073	25	1,83	3,62	0,26
7	0,19	0,036	49	1,76	4,74	0,17
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,040	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
$\Sigma$		<b>1,33</b>		<b>9,54</b>		<b>2,06</b>

La suma de la tercera columna es 1,33. La raíz cuadrada de esto resulta un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,15 (p.u.). La sumatoria de la quinta columna dividida por la sumatoria de la tercera columna, da como resultado un factor armónico de pérdidas (para las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados) igual a 7,17. La sumatoria de

la séptima columna dividida por la sumatoria de la tercera columna da como resultado un factor armónico de pérdidas por dispersión igual a 1,55 (estos valores aparecen relacionados en la tabla XVI).

Con el propósito de determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se deben corregir para reflejar la menor corriente eficaz por debajo de la corriente nominal y también los efectos del contenido armónico. Se considera el 75 % de la corriente de carga para determinar las pérdidas bajo las condiciones especificadas:

$$P_{LL} \text{ (pu)} = 1,15^2 \times 0,75^2 = 0,74$$

Los datos producto de la aplicación(10) se relacionan en la tabla XVI.

TABLA XVI. CORRECCIÓN DE LAS PÉRDIDAS [2]

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]	$F_{HL}$	Pérdidas corregidas
$P_{NL}$	5 100	5 100		5 100
$I^2R$	19 615	14 592		14 592
$P_{EC}$	767	571	7,17	4 094
$P_{OSL}$	15 59	1 160	1,55	1 798
$P_T$	27 041	21 423		25 584

El aumento de la parte superior de aceite ahora se puede calcular con (17), como sigue:

$$\theta_{TO} = 55 \times \left( \frac{25584}{27041} \right)^{0.8} = 52,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Las pérdidas nominales en el interior o en el devanado de baja tensión se pueden calcular de la siguiente manera:

$$I_{2-R}^2 R = 1,5 \times 601,4^2 \times 0,01661 = 9011 \text{ [W]}$$

Las pérdidas bajo las condiciones de carga especificadas son las siguientes:

$$I_{2-R}^2 R = 9011 \times (1,15 \times 0,75)^2 = 6 704 \text{ [W]}$$

Por el supuesto propuesto en el literal d) en B, debido a que las corrientes son menores de 1000 [A], se supone que el 60 % de las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados ocurre en el devanado de baja tensión.

Las pérdidas máximas por corrientes parásitas en la región del punto más caliente son cuatro veces el promedio de pérdidas por corrientes parásitas. La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto a la temperatura de la capa superior del aceite puede ser calculada con (12) y (18), utilizando watts en lugar de valores en por unidad.

$$\theta_g = (65 - 55) \times \left( \frac{6704 + 4060 \times 2,4}{9011 + 767 \times 2,4} \right)^{0,8}$$

$$\theta_g = 10 \times \left( \frac{6704 + 9744}{9011 + 1841} \right)^{0,8} = 13,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor por encima de la temperatura ambiente es como sigue:

$$52,6 + 13,9 = 66,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde se aprecia que esta elevación de temperatura calculada excede el límite nominal de 65 [°C].

#### IV. CONCLUSIONES

Las corrientes no sinusoidales producen calentamientos adicionales en los transformadores debido al incremento de las pérdidas, especialmente de las pérdidas debidas a las corrientes parásitas. Cuando se utilicen transformadores existentes o estándares para alimentar cargas no lineales, estos deberán ser desclasificados de una forma adecuada a su construcción.

El estándar IEEE C57.110<sup>TM</sup>-2008, "Recomendaciones prácticas de la IEEE para el establecimiento de la capacidad de transformadores de distribución tipo seco y sumergidos en líquido cuando la alimentación de corrientes de cargas no es sinusoidal", establece un factor de reducción de la corriente de carga que contiene una composición de armónica dada que permite proteger al transformador de los fenómenos ocasionados por la presencia de corrientes no sinusoidales, entre ellos el sobrecalentamiento de los arrollamientos.

El cálculo de la corriente máxima permitida descrito en el estándar IEEE C57.110<sup>TM</sup>-2008 logra asegurar que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales el transformador fue diseñado considerando que el transformador opera en condiciones normales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander por su apoyo a este trabajo de investigación a través del proyecto DIF VIE-5566 "Fortalecimiento de grupos de Investigación: Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros CEM", durante la vigencia 2011-2013.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Desmet y G. Delaere, "Armónicos - Selección y Clasificación de los Transformadores", en *Guía de Calidad de la Energía*, European Cooper Institute, 2005.
- [2] IEEE Std C57.110, "Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.
- [3] IEEE Std C57.12.00, Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [4] IEEE Std C57.12.01, Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those With Solid-Cast And/Or Resin Encapsulated Windings, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [5] National Electrical Manufacturers Association, NEMA ST 20: Dry-Type Transformers for General Applications, NEMA, 1992.
- [6] L. F. Blume, *Transformer engineering: a treatise on the theory, operation, and application of transformers*. Wiley, 1951, p. 500.
- [7] L. W. Pierce, "Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, n° 3, pp. 633 - 645, 1996.
- [8] S. Crepaz, "Eddy-Current Losses in Rectifier Transformers", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, n° 7, pp. 1651-1656, Sep. 1970.
- [9] M. Bishop and C. Gilker, "Harmonic caused transformer heating evaluated by a portable PC", papers presented at the 37<sup>th</sup> Annual Conference Rural Electric Power Conference, 1993.
- [10] J. Driesen, T. Van Craenenbroeck, B. Brouwers, K. Hameyer, and R. Belmans, "Practical method to determine additional load losses due to harmonic currents in transformers with wire and foil windings", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 2306 - 2311, 2000.
- [11] A. Llamas y A. Tejada, "Transformador delta estrella con cargas no lineales monofásicas", artículo de divulgación del Programa de Graduados en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Eléctrica, ITESM, 1996.
- [12] IEEE Std C57.12.91, Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012.
- [13] IEEE Std C57.12.90, Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineer, 2010.