

# Estudo de Avaliação do Impacto de Distorções Harmônicas sobre Transformadores do Tipo Seco

Robson R. Sguaçabia

Avenida Tiradentes, 1388, Centro, Jaboticabal – SP

Marcelo M. Carvalho

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz – Avenida Almirante Gago Coutinho, 500, Bairro Rios, Barretos - SP

Thiago Lunardi

Avenida 13, 1304, Rio Claro - SP

**Resumo** — O objetivo deste trabalho é apresentar a técnica utilizada para avaliar o impacto de distorções harmônicas de corrente na operação de um transformador a seco, instalado em um sistema elétrico industrial. O desenvolvimento e aplicação desta técnica se deram após a verificação de sobreaquecimento excessivo do transformador sob análise, cuja causa era indicada como a presença de harmônicos no sistema elétrico. Os resultados evidenciaram a exatidão e utilidade da técnica apresentada, a qual, por sua vez apontou outra causa para o problema observado e que veio a ser confirmado depois pelo fabricante do equipamento.

**Palavras-chave** — transformador a seco, distorção harmônica, sobreaquecimento.

## I. INTRODUÇÃO

Sempre que cargas não lineares são conectadas ao sistema de fornecimento de energia elétrica, mesmo que sejam alimentadas por tensão senoidal, são geradas correntes não senoidais. A presença de correntes harmônicas no sistema pode causar muitos problemas.

Em transformadores de potência, conforme citado em [1], a principal consequência das correntes harmônicas é um aumento nas perdas, principalmente nos enrolamentos, por causa da deformação dos campos de dispersão. Perdas mais elevadas significam que mais calor é gerado no transformador, de forma que a temperatura de operação aumenta, resultando numa deterioração da isolamento e uma redução potencial na vida útil. Em consequência, é necessário reduzir a carga máxima no transformador (uma prática que utiliza fatores de redução) ou tomar um cuidado extra no projeto do mesmo para reduzir essas perdas.

Neste contexto, expõe-se neste trabalho um estudo de caso em que se buscou o diagnóstico de sobreaquecimento excessivo verificado em um transformador a seco de 2500 kVA.

Robson R. Sguaçabia, sguacabia@ig.com.br, Tel. +55-16-3202-4420; Marcelo M. Carvalho, mmc Carvalho@cpfl.com.br, Tel. +55-17-3322-7447; Thiago Lunardi, trlunardi@yahoo.com.br.  
Este trabalho contou com a colaboração do Prof. Dr. José Carlos de Melo Viera Júnior, jcarlos@sc.usp.br, Tel. +55-16-3373-8707.

Duas linhas principais de investigação foram adotadas: a primeira considera a presença de harmônicos no sistema

elétrico, e a segunda, erros no dimensionamento do núcleo do transformador. Como o fabricante descartou a segunda linha de investigação, buscou-se desenvolver um estudo detalhado para investigar a influência dos harmônicos no transformador a seco. Assim, este trabalho visa apresentar em detalhes o procedimento adotado.

A técnica se baseia em duas abordagens distintas. A primeira permite determinar a redução da potência do transformador em função da máxima corrente de carga não senoidal permitida, obtida por meio da análise do espectro harmônico da corrente e das características nominais do transformador. Já a segunda, elaborada por fabricantes de transformadores junto com a *Underwriters Laboratories* nos Estados Unidos e conhecida como *K-factor* permite classificar a capacidade do transformador em suportar as correntes harmônicas.

Os resultados permitiram concluir que o sobreaquecimento do transformador não foi causado por harmônicos e, nas seções seguintes, a descrição do estudo realizado é apresentada em detalhes.

## II. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo [2], a IEEE Std C57.12.90 e IEEE Std C57.12.91 classificam as perdas no transformador como perda em vazio, perda em carga e perdas totais (soma das perdas em vazio com as perdas em carga). A perda em carga é subdividida em perda  $I^2R$  e perda por dispersão. A perda por dispersão é determinada subtraindo a perda  $I^2R$  (obtida medindo a resistência dos enrolamentos em corrente contínua e calculando-se a perda resultante utilizando-se as correntes de plena carga) da perda em carga medida.

A perda por dispersão pode ser definida como a perda devido à dispersão do fluxo eletromagnético no enrolamento, no núcleo, abraçadeiras do núcleo, blindagens magnéticas, gabinetes ou tanques, etc. Assim, a perda por dispersão é subdividida em perda por dispersão no enrolamento e perda por dispersão nos outros componentes diferentes do enrolamento ( $P_{OSL}$ ). A perda por dispersão no enrolamento inclui a perda por corrente parasita no condutor e a perda devido às correntes circulantes entre encordoamentos ou circuitos de enrolamentos paralelos. Todas estas perdas podem ser consideradas como sendo perdas por correntes parasitas no enrolamento ( $P_{EC}$ ). A perda total em carga pode então ser calculada conforme apresentado na equação (1).

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad W \quad (1)$$

Na qual:

$P_{LL}$	Perda em carga (watts)
$P$	Porção $I^2R$ da perda em carga (watts)
$P_{EC}$	Perda por correntes parasitas no enrolamento (watts)
$P_{OSL}$	Perdas por dispersão em abraçadeiras, tanques, etc (watts)

Em pu (valores por unidade) e sob condições nominais de operação do transformador, considerando a corrente de base como sendo a corrente nominal e a densidade de perda de base como sendo  $I^2R$ , (1) pode ser escrita da seguinte forma:

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

Na qual:

$P_{LL,R}$	Perda em carga sob condições nominais (pu)
$P_{EC,R}$	Perda por correntes parasitas no enrolamento sob condições nominais (pu)
$P_{OSL,R}$	Perdas por dispersão em abraçadeiras, tanques, sob condições nominais (pu)

#### A. Efeito das correntes harmônicas sobre as perdas

1) *Efeito da corrente harmônica sobre a perda  $I^2R$* : Se o valor eficaz da corrente de carga sofrer um aumento devido às componentes harmônicas, a perda  $I^2R$ , também sofrerá um acréscimo proporcional ao quadrado dessa corrente. Entretanto, ela é independente da frequência.

2) *Efeito da corrente harmônica sobre a perda por correntes parasitas no enrolamento*: A perda por correntes parasitas no enrolamento ( $P_{EC}$ ), considerando a frequência fundamental e harmônicas associadas, tende a ser proporcional ao quadrado da corrente de carga e ao quadrado da frequência, conforme mostrado na expressão (3) [2]:

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

Na qual:

$h$	Ordem da harmônica, 1, 2, 3, etc
$h_{max}$	A maior ordem de harmônica a ser considerada
$I_h$	Corrente da harmônica de ordem $h$ (ampères)
$I_R$	Corrente nominal (ampères)
$P_{EC,R}$	Perda por correntes parasitas em corrente e frequência nominais (watts)

É essa característica que pode causar perda excessiva no enrolamento, causando aumento anormal de temperatura no mesmo e pontos quentes no transformador [1]. Não há nenhum método de teste disponível para determinar a perda individual por correntes parasitas nos enrolamentos ou para separar a perda por dispersão da perda por correntes parasitas. A perda total por correntes parasitas (nos enrolamentos), ou correntes de Foucault é obtida junto com a

perda por dispersão, subtraindo a perda ôhmica da perda de carga total.

É conveniente definir um número que possa ser usado para determinar a capacidade de um transformador de fornecer potência para uma carga considerando as perdas por correntes parasitas no enrolamento. Este número é conhecido como  $F_{HL}$  (fator de perda harmônica) e é definido segundo a equação (4) [2]:

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

Na qual:

$F_{HL}$	Fator de perda harmônica por correntes parasitas no enrolamento
$h$	Ordem da harmônica
$h_{max}$	Número da maior harmônica significativa
$I_h$	Corrente rms de cada harmônica “ $h$ ” (ampères)
$I$	Corrente rms de carga (ampères)

3) *Efeito da corrente harmônica sobre a perda por dispersão em abraçadeiras, tanques, etc*: A perda por dispersão ( $P_{OSL}$ ) no núcleo, abraçadeiras e partes estruturais também aumenta com o quadrado da corrente de carga. Entretanto, essas perdas não aumentam com o quadrado da frequência, como as perdas por correntes parasitas no enrolamento.

Estudos feitos por fabricantes e pesquisadores têm demonstrado que as perdas por correntes parasitas em barramentos, conexões e partes estruturais aumentam com um fator de expoente harmônico de 0,8 ou menos [2]. O aumento de temperatura nessas regiões não contribui para o aumento de temperatura em pontos quentes nos enrolamentos em transformadores do tipo seco.

4) *Componentes CC da corrente de carga*: Correntes de carga harmônica são geralmente acompanhadas por uma componente cc, a qual aumenta levemente as perdas no núcleo do transformador, porém aumenta substancialmente a corrente de magnetização e o nível do som audível emitido pelo transformador em funcionamento. Espera-se que componentes cc relativamente pequenas (até a ordem do valor eficaz da corrente de excitação do transformador na tensão nominal) não tenham efeito sobre a capacidade de carregamento do transformador, porém níveis de componentes cc mais altos podem afetar a capacidade do transformador.

#### B. Abordagens para avaliação do impacto de harmônicas sobre transformadores do tipo seco

1) *Primeira abordagem segundo [2]*: Conforme estabelecido pela IEEE Std C57.12.90 e IEEE Std C57.12.91, a componente perda por dispersão das perdas em carga é calculada subtraindo a perda ôhmica  $I^2R$  do transformador, da perda em carga medida. De acordo com a equação (5):

$$P_{TSL,R} = P_{LL,R} - K \cdot \left[ (I_{1,R})^2 \cdot R_1 + (I_{2,R})^2 \cdot R_2 \right] W \quad (5)$$

Na qual:

$P_{TSL,R}$	Perda por dispersão total sob condições nominais (watts)
$P_{LL,R}$	Perda em carga sob condições nominais (watts)
$I_{1,R}$	Corrente eficaz de linha no lado de alta tensão (AT), sob frequência e condições nominais de carga (ampères)
$I_{2,R}$	Corrente eficaz de linha no lado de baixa tensão (BT), sob frequência e condições nominais de carga (ampères)
$R_1$	Resistência medida entre dois terminais de AT (ohms)
$R_2$	Resistência medida entre dois terminais de BT (ohms)

Como o objetivo é obter valores limites, algumas considerações conservativas poderão ser feitas.

A primeira consideração para transformadores do tipo seco é que 67% das perdas totais por dispersão podem ser admitidas como sendo perdas por correntes parasitas no enrolamento, conforme definido na equação (6) [2]:

$$P_{EC,R} = P_{TSL,R} \cdot 0,67 W \quad (6)$$

Na qual:

$P_{EC,R}$	Perda por correntes parasitas no enrolamento sob condições nominais (watts)
$P_{TSL,R}$	Perda por dispersão total sob condições nominais (watts)

A segunda consideração a ser feita é que a divisão da perda por correntes parasitas entre os enrolamentos poderá ser da seguinte forma [2]:

- 60% no enrolamento interno e 40% no enrolamento externo para todos os transformadores auto-resfriados com corrente nominal menor que 1000 A (independente da relação de transformação).
- 60% no enrolamento interno e 40% no enrolamento externo para todos os transformadores com relação de transformação de 4:1 ou menor.
- 70% no enrolamento interno e 30% no enrolamento externo para todos os transformadores com relação de transformação maior que 4:1 e com um ou mais enrolamentos auto-resfriados com corrente nominal maior que 1000 A.

Assim, para um transformador com relação de transformação maior que 4:1 e com um ou mais enrolamentos com corrente maior que 1000 A, tem-se:

$$\text{Max } P_{EC,R}(\text{pu}) = \frac{0,7 \cdot 4 \cdot P_{EC,R}}{K \cdot (I_{2,R})^2 \cdot R_2} \text{ pu} \quad (7)$$

Na qual:

$P_{EC,R}(\text{pu})$	Perda por corrente parasita no enrolamento por unidade sob condições nominais.
-----------------------	--

$P_{EC,R}$	Perda por corrente parasita no enrolamento sob condições nominais (watts).
$I_{2,R}$	Corrente de linha (valor eficaz) da fundamental no lado BT sob frequência nominal e condições de carga nominal (ampères)
$R_2$	Resistência medida entre dois terminais de BT (ohm)
$K$	Constante que depende do número de fases, sendo 1 para transformadores monofásicos e 1,5 para transformadores trifásicos

Segundo [2], a densidade de perda em pu na região de maior perda por correntes parasitas pode ser calculada aplicando a equação (8):

$$P_{LL}(\text{pu}) = I(\text{pu})^2 \cdot [1 + F_{HL} \cdot P_{EC,R}(\text{pu})] \text{ pu} \quad (8)$$

Na qual:

$P_{LL}(\text{pu})$	Perda em carga em pu
$I(\text{pu})$	Corrente eficaz em pu
$F_{HL}$	Fator de perda harmônica para correntes parasitas no enrolamento
$P_{EC,R}(\text{pu})$	Perda por correntes parasitas no enrolamento em pu sob condições nominais

Portanto, para calcular o valor máximo eficaz da corrente de carga não senoidal permitida, aplica-se a equação (9):

$$I_{\text{max}}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL,R}(\text{pu})}{1 + F_{HL} \cdot P_{EC,R}(\text{pu})}} \text{ pu} \quad (9)$$

Na qual:

$I_{\text{max}}(\text{pu})$	Máximo valor de corrente não senoidal em rms permitido sob condições nominais
$P_{LL,R}(\text{pu})$	Perda em carga em pu sob condições nominais
$F_{HL}$	Fator de perda harmônica devido às correntes parasitas no enrolamento
$P_{EC,R}(\text{pu})$	Perda por correntes parasitas no enrolamento em pu sob condições nominais

Finalmente, para obter a corrente máxima não senoidal que poderá ser fornecida pelo transformador, multiplica-se o valor encontrado de  $I_{\text{max}}(\text{pu})$  pela corrente de base, que será a corrente nominal no secundário do transformador.

2) *Segunda abordagem conforme [3]:* Desenvolvida por fabricantes de transformadores em conjunto com a *Underwrites Laboratories*, ela consiste em calcular um fator que considera o aumento das perdas por correntes parasitas e especificar um transformador projetado para operar dentro destas condições. Este fator é conhecido como *K-factor* e é definido segundo a equação (10):

$$K\text{-factor} = \sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (10)$$

Na qual:

$h$	Ordem da harmônica
$h_{\text{max}}$	Número da maior harmônica significante

$I_h$  Corrente rms de cada harmônica “h” (ampères)  
 $I_R$  Corrente rms fundamental sob condições de frequência e carga nominal (ampères)

O *K-factor* é padronizado e até o presente está classificado em K-1, K-4, K-9, K-13, K-20, K-30 e K-40.

K-1 é a classificação para todo transformador convencional, projetado para suportar somente os efeitos de aquecimento das perdas normais e das perdas adicionais por correntes parasitas resultantes de 60 Hz.

K-4 é a classificação para um transformador operar sem sobreaquecer, com uma carga constituída de 100% de frequência normal de 60 Hz, mais 16% da fundamental com a 3ª harmônica, 10% da fundamental com a 5ª harmônica, 7% da fundamental com a 7ª harmônica, 5,5% da fundamental com a 9ª harmônica e porcentagens menores até a 25ª harmônica. O número 4 indica sua habilidade de suportar quatro vezes as perdas por correntes parasitas em relação a um transformador K-1.

O *K-factor* quando traduzido para o português é conhecido como fator K e pode causar confusão com o *factor - K*, definido segundo a norma inglesa BS 7821 Part 4, o qual estima quanto um transformador comum deveria reduzir sua potência nominal de forma que as perdas devido às cargas harmônicas não ultrapassem as perdas fundamentais projetadas. Entretanto, essa norma trata apenas de transformadores imersos em óleo.

### III. ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão apresentadas as medições realizadas, evidenciando as condições operacionais do transformador a seco sob análise, para em seguida apresentar os cálculos realizados, a fim de quantificar o impacto causado pelas correntes harmônicas.

#### A. Dados Obtidos

Para verificação da temperatura de operação do transformador e comparação com a temperatura registrada no medidor de temperatura instalado no transformador (Multimedidor PCPT-3, Pextron), foi realizada uma análise termográfica, conforme mostrado na Fig.1, evidenciando grande aquecimento proveniente do núcleo do transformador.

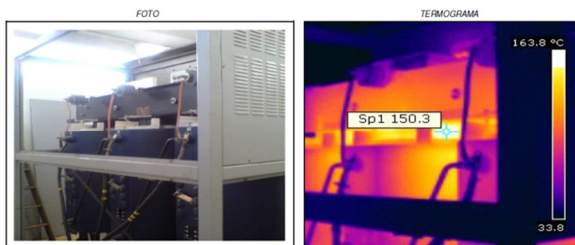


Fig. 1. Análise termográfica do transformador

Durante o período de um ciclo de carga, neste caso em especial, 24 horas, foram monitoradas a temperatura ambiente e a temperatura do transformador, através de um termômetro instalado dentro da sala e do medidor de temperatura do

transformador. A temperatura ambiente média registrada durante o período de medição foi 25,38°C, enquanto que a temperatura média do transformador indicada no medidor de temperatura do transformador foi 159,9°C.

Também foi monitorada a potência fornecida pelo transformador, o fator de potência, as tensões e as correntes nas três fases, bem como, a distorção harmônica total (THD) e o espectro harmônico nas correntes e nas tensões. Para realizar essas medições foi utilizado um analisador de rede (AR-5, Circutor).

As correntes das três fases apresentaram valores bastante próximos, que praticamente se sobrepõem, conforme pode ser observado na Fig.2

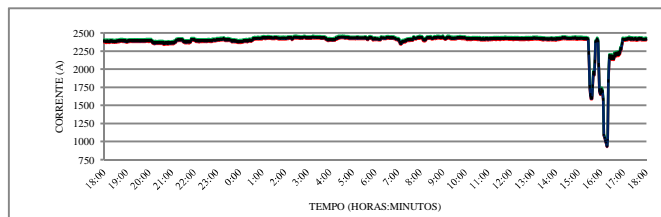


Fig. 2. Variação da corrente nas três fases ao longo do tempo

A fase S foi a que apresentou maior distorção harmônica de corrente, durante todo o período de medição, indicado na Fig.3. De forma geral recomenda-se que para transformadores submetidos à THD de corrente maior que 5%, deverão ser tomados cuidados extras, tais como a limitação de sua potência frente à carga [4].

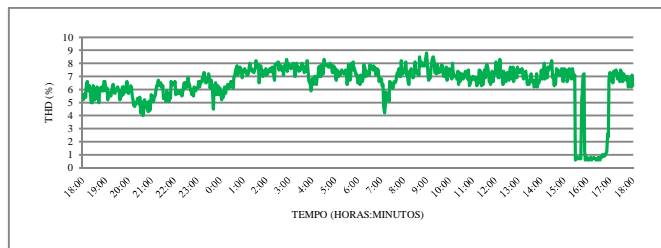


Fig. 3. Variação do THD na corrente da fase S ao longo do tempo

O espectro das componentes harmônicas da corrente da fase S está apresentado na Fig. 4.

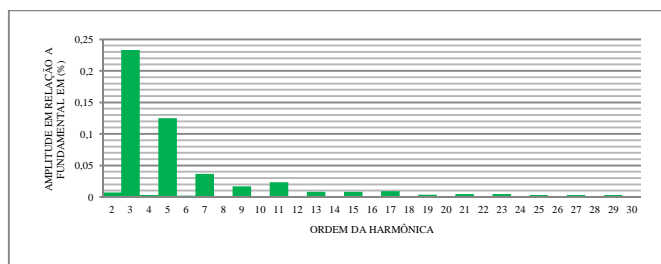


Fig. 4. Espectro de harmônicas na corrente da fase S

Através do relatório de ensaios de rotina do transformador e da placa foram obtidos os seguintes dados:

Potência – 2500 kVA

Tensão primária – 14490/ 14145/ 13800/ 13455/ 13110 V  
Tensão secundária – 460 V  
Sistema de resfriamento – AN (ar natural)  
Elevação de temperatura do enrolamento - 105°C  
Material isolante - 155°C  
Impedância – 9,34% a 115°C em 13800 V  
Diagrama Fasorial – Dyn1  
Perdas em Vazio a 115°C – 4353 W  
Perdas em Carga a 115°C – 29237 W  
Resistência ôhmica a 24°C, fases H1H2 – 0,5632 Ω  
Resistência ôhmica a 24°C, fases X1X2 – 0,591 mΩ  
Material do enrolamento – Alumínio

Para referir o valor da resistência ôhmica dos enrolamentos acima citados a 115°C, será utilizada a equação (11), conforme definido em [5].

$$\theta = \frac{R_{\theta}}{R_0} (K_{\theta} + \theta_0) - K_{\theta} \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

Sendo:

- $\theta$  A temperatura correspondente a R (°C)
- $\theta_0$  A temperatura correspondente a R<sub>0</sub> (°C)
- R<sub>θ</sub> A resistência a quente (Ω)
- R<sub>0</sub> A resistência a frio (Ω)
- K<sub>θ</sub> Constante igual a 225 para o alumínio

#### B. Cálculos Realizados de Acordo com a Primeira Abordagem

Como a fase S foi a que apresentou a maior distorção harmônica total e coincidentemente a maior magnitude de corrente, conforme pode ser verificado na Fig.2, na qual a linha verde representa a corrente da fase S, todos os cálculos serão realizados com base nos valores obtidos nesta fase, a fim de se obter os resultados para a pior situação em relação à solicitação de carga do transformador.

A segunda coluna da Tabela I apresenta a média aritmética da contribuição de cada componente harmônica, identificada na primeira coluna, registrada durante todo o período de medição com os respectivos cálculos parciais para aplicação de (8). O símbolo Σ apresentado na última linha corresponde à somatória dos valores obtidos nas respectivas colunas.

TABELA I. CONTRIBUIÇÃO DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA COM RESPECTIVOS CÁLCULOS PELA PRIMEIRA ABORDAGEM

$h$	$I_{h \text{ rms}}$ (A)	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \cdot h^2$
1	2398,87	1,00	1,00	1	1
2	0,17	7,09e-05	5,03e-9	4	2,01e-8
3	5,60	2,33e-03	5,43e-6	9	4,89e-8
4	0,08	3,33e-5	1,11e-9	16	1,78e-8
5	2,99	1,25e-3	1,56e-6	25	3,90e-5
6	0,04	1,67e-5	2,79e-10	36	1,00e-8
7	0,88	3,67e-4	1,34e-7	49	6,56e-6
8	0,04	1,67e-5	2,79e-10	64	1,79e-8
9	0,41	1,71e-4	2,92e-8	81	2,36e-6
10	0,04	1,79e-6	3,20e-12	100	3,20e-10
11	0,56	2,33e-4	5,43e-8	121	6,57e-6
12	0,03	1,25e-5	1,56e-10	144	2,25e-8
13	0,19	7,92e-5	6,27e-9	169	1,06e-6

14	0,03	1,25e-5	1,56e-10	196	3,06e-8
15	0,20	8,34e-5	6,96e-9	225	1,57e-6
16	0,03	1,15e-5	1,32e-10	256	3,38e-8
17	0,23	9,59e-5	9,20e-09	289	2,66e-6
18	0,02	8,34e-6	6,96e-9	324	2,25e-8
19	0,09	3,75e-5	1,41e-9	361	5,09e-7
20	0,02	8,34e-6	6,96e-11	400	2,78e-8
21	0,12	5,00e-5	2,50e-9	441	1,10e-6
22	0,02	8,34e-6	6,96e-11	484	3,37e-8
23	0,11	4,58e-5	2,10e-9	529	1,11e-6
24	0,02	8,34e-6	6,96e-11	576	4,01e-8
25	0,07	2,92e-5	8,53e-10	625	5,33e-7
26	0,02	8,34e-6	6,96e-11	679	4,73e-8
27	0,08	3,33e-5	1,11e-9	729	8,09e-7
28	0,02	8,34e-6	6,96e-11	784	5,46e-8
29	0,07	2,92e-5	8,53e-10	841	7,17e-7
30	0,02	8,34e-6	6,96e-11	900	6,26e-8
Σ			1,00		1,00

Aplicando (5) para o cálculo da perda total por dispersão com os valores de resistência já referidos a 115°C e com o transformador operando com a tensão de 13800 V no respectivo tap, tem-se:

$$P_{TSL,R} = 29237 - 1,5 \cdot [(104,59^2 \cdot 0,769 + 3137,77^2 \cdot 0,000807)]$$

$$P_{TSL,R} = 4700,68 \text{ W}$$

A perda por correntes parasitas no enrolamento é obtida através de (6).

$$P_{EC,R} = 4700,68 \cdot 0,67 = 3149,46 \text{ W}$$

Como o transformador possui relação de transformação maior que 4:1 e a corrente no secundário excede 1000 A, a perda por correntes parasitas no enrolamento de baixa tensão é 0,7 vezes P<sub>EC,R</sub>, portanto a Max P<sub>EC,R</sub> é calcula segundo (7).

$$\text{Max } P_{EC,R} (\text{pu}) = \frac{0,7 \cdot 4 \cdot 3149,46}{1,5 \cdot 3137,77^2 \cdot 0,000807}$$

$$\text{Max } P_{EC,R} (\text{pu}) = 0,74 \text{ pu}$$

Aplicando (8), a raiz quadrada da somatória da terceira coluna fornece o valor eficaz em pu da corrente de carga não senoidal, igual a 1. A somatória da quinta coluna dividida pela somatória da terceira coluna resulta no fator de perda harmônica F<sub>HL</sub>, igual a 1. Finalmente tem-se que:

$$P_{LL} (\text{pu}) = 1^2 \cdot (1 + 1,0,74) = 1,74 \text{ pu}$$

Desta forma, a máxima corrente eficaz não senoidal de carga com a composição harmônica apresentada na Tabela I é obtida pela aplicação de (9).

$$I_{\text{max}} (\text{pu}) = \sqrt{\frac{1,74}{1 + 1,0,74}} = 1 \text{ pu}$$

Neste caso, a capacidade do transformador com a composição harmônica da corrente de carga não senoidal

dada é de 100% de sua capacidade com corrente de carga senoidal.

$$I_{\max} = 1.3137,77 = 3137,77 \text{ A}$$

O valor obtido acima demonstra que o transformador deveria operar em plena carga com os níveis de correntes harmônicas encontradas sem causar qualquer sobreaquecimento.

### C. Cálculos Realizados de Acordo com a Segunda Abordagem

Os valores apresentados na Tabela II são os mesmos valores da Tabela I, no que diz respeito à distribuição de cada componente harmônica registrada, no entanto, os cálculos apresentados a partir da quinta coluna são referentes aos cálculos preliminares para aplicação de (10).

O valor de  $I$  é obtido pela raiz quadrada da somatória de  $I_h^2$ , distribuído conforme apresentado na segunda coluna da Tabela II, assim  $I = 2398,88 \text{ A}$ .

TABELA II. CONTRIBUIÇÃO DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA COM RESPECTIVOS CÁLCULOS PELA SEGUNDA ABORDAGEM

$h$	$I_h$ rms (A)	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2$
1	2398,87	1,00	1,00	1,0	1,0	1,0
2	0,17	7,09e-05	5,03e-9	7,09e-05	5,02e-09	2,01e-08
3	5,60	2,33e-03	5,43e-6	2,33e-03	5,45e-06	4,90e-05
4	0,08	3,33e-5	1,11e-9	3,33e-05	1,11e-09	1,78e-08
5	2,99	1,25e-3	1,56e-6	1,25e-03	1,55e-06	3,88e-05
6	0,04	1,67e-5	2,79e-10	1,67e-05	2,78e-10	1,00e-08
7	0,88	3,67e-4	1,34e-7	3,67e-04	1,35e-07	6,59e-06
8	0,04	1,67e-5	2,79e-10	1,67e-05	2,78e-10	1,78e-08
9	0,41	1,71e-4	2,92e-8	1,71e-04	2,92e-08	2,37e-06
10	0,04	1,79e-6	3,20e-12	1,67e-05	2,78e-10	2,78e-08
11	0,56	2,33e-4	5,43e-8	2,33e-04	5,45e-08	6,59e-06
12	0,03	1,25e-5	1,56e-10	1,25e-05	1,56e-10	2,25e-08
13	0,19	7,92e-5	6,27e-9	7,92e-05	6,27e-09	1,06e-06
14	0,03	1,25e-5	1,56e-10	1,25e-05	1,56e-10	3,07e-08
15	0,20	8,34e-5	6,96e-9	8,34e-05	6,95e-09	1,56e-06
16	0,03	1,15e-5	1,32e-10	1,25e-05	1,56e-10	4,00e-08
17	0,23	9,59e-5	9,20e-09	9,59e-05	9,19e-09	2,66e-06
18	0,02	8,34e-6	6,96e-9	8,34e-06	6,95e-11	2,25e-08
19	0,09	3,75e-5	1,41e-9	3,75e-05	1,41e-09	5,08e-07
20	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	2,78e-08
21	0,12	5,00e-5	2,50e-9	5,00e-05	2,50e-09	1,10e-06
22	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	3,36e-08
23	0,11	4,58e-5	2,10e-9	4,59e-05	2,10e-09	1,11e-06
24	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	4,00e-08
25	0,07	2,92e-5	8,53e-10	2,92e-05	8,51e-10	5,32e-07
26	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	4,70e-08
27	0,08	3,33e-5	1,11e-9	3,33e-05	1,11e-09	8,11e-07
28	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	5,45e-08
29	0,07	2,92e-5	8,53e-10	2,92e-05	8,51e-10	7,16e-07
30	0,02	8,34e-6	6,96e-11	8,34e-06	6,95e-11	6,26e-08
						1,0

Σ

De (10) pode-se concluir que o  $K$ -factor é igual a 1, obtido da somatória da sétima coluna, demonstrando que o  $K$ -factor do transformador solicitado ao fabricante havia sido especificado corretamente para as condições de operação do transformador.

## IV. CONCLUSÕES

Conforme mencionado anteriormente sobre os efeitos das correntes harmônicas sobre transformadores, os pontos com maior aquecimento deveriam estar localizados na região dos enrolamentos do transformador, diferentemente do mostrado na Fig.1, na qual se pode observar que a região com maior aquecimento é a do núcleo do transformador.

Ademais, o transformador encontrava-se operando com corrente de carga em torno de 2375 A, ou seja, aproximadamente 75% da capacidade nominal. Esses fatos instigaram a investigação sobre se as correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares alimentadas pelo transformador estariam causando o problema de sobreaquecimento e principalmente se o problema deveria ou não ser coberto pela garantia do transformador dada pelo fabricante.

A análise apresentada através da primeira abordagem do problema mostrou que os níveis de correntes harmônicas encontradas não afetam a capacidade de carga do transformador, ou seja, o transformador deveria operar em condições normais de temperatura fornecendo 100% de sua potência nominal.

A análise feita através da segunda abordagem objetivou verificar se realmente o transformador havia sido especificado de forma errada, como afirmava o fabricante, de forma a evitar a repetição do problema nos próximos transformadores a ser eventualmente adquiridos para alimentar cargas bastante semelhantes. A análise mostrou que mesmo com os níveis de harmônicas encontrados, o  $K$ -factor a ser especificado ainda deveria ser 1.

O transformador analisado queimou uma semana após a realização das análises, as quais mostraram ao fabricante que o problema não estava relacionado com os níveis de correntes harmônicas encontrados, ainda que o THD nas correntes fosse maior que 5%, provando que o defeito deveria ser coberto pela garantia.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Desmet and G. Delaere, "Harmônicas Seleção e Dimensionamento de Transformadores", Guia de Aplicação de Qualidade de Energia, no. 3.5.2, 2005.
- [2] IEEE Std C57.110-2008, "IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Press, 2008.
- [3] Copper Development Association, "Harmonics, Transformers and K-Factors" CDA Publication 144, Sep. 2000.
- [4] R. C. Creppe, Apostila do curso "Introdução ao Estudo da Qualidade de Energia", Unesp – Faculdade de Engenharia de Bauru, 2008.
- [5] J. C. Oliveira; J. R. Cogo e J. P. G. Abreu, "Transformadores – Teoria e Ensaios", 1984.