COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE PERDAS EM TRANSFORMADORES ALIMENTANDO CARGAS NÃO-LINEARES

GUIMARÃES, Magno de Bastos
EEEC/ UFG/ PEQ
magnobg@hotmail.com

LISITA, Luiz Roberto
EEEC/ UFG
lisita@eee.ufg.br

NERYS, José Wilson
EEEC/ UFG/ PEQ
jwilson@eee.ufg.br

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um grande crescimento no uso de equipamentos com dispositivos que utilizam semicondutores, como fontes chaveadas e retificadores. Com isto, alguns transformadores antes projetados para cargas lineares passaram a suprir cargas com conteúdo harmônico cada vez mais significativo. Com isto, começaram a ocorrer problemas sobreaquecimento em transformadores. Para que não seja necessário substituí-los, este problema é controlado através da utilização de uma potência menor que a nominal, de forma que o aquecimento no transformador seja o mesmo que ele teria alimentando carga linear nominal. Portanto, faz-se necessário calcular os valores das perdas que provocam o aquecimento para que o cálculo da potência máxima a fornecer seja adequado. Informações sobre o procedimento de cálculo para a estimação dessas perdas e o redimensionamento do transformador estão disponíveis nas normas UL 1561-1994, UL 1562-1994 e na recomendação IEEE Std C57.110-1998 [1][2][3]. Entretanto, alguns trabalhos publicados indicam [4][5][6] que estes métodos podem levar a um dimensionamento do transformador maior que o necessário.

Levando isto em conta, este trabalho visa comparar as perdas calculadas por estes métodos com perdas medidas, utilizando medições de correntes e tensões em dois transformadores conectados *back-to-back*.

II. MATERIAL

O protótipo montado para a pesquisa contém dois transformadores conectados *back-to-back* alimentando cargas lineares e não-lineares, conforme Fig. 1.

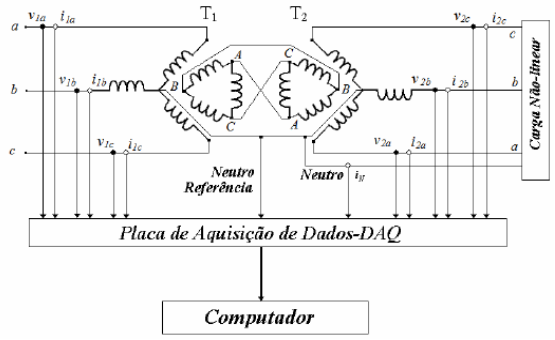

Fig. 1 - Protótipo utilizado.

As medições são realizadas pelos lados de tensão inferior, através de transdutores de tensão e de corrente ligados a um computador através da uma placa de aquisição de dados.

O sistema de aquisição e processamento dos dados de tensões e de correntes no domínio do tempo permite que se calculem, através do *modelo T* de circuito equivalente, as perdas diversas perdas medidas e calculadas pelos métodos utilizados.

III. METODOLOGIA

A. Determinação dos parâmetros

As equações para cálculos das perdas dependem do espectro harmônico da corrente de carga e das perdas sob condição de carga linear .

Ensaios em vazio e em curto-circuito são realizados para obtenção da perda em vazio e da perda em carga sob excitação senoidal, bem como os parâmetros para os modelos *L* e *T* do

transformador. Através destes parâmetros e dos dados de tensões e de correntes, são calculadas as perdas para condição de carga linear nominal [6].

Os cálculos de perdas pelos métodos do *Fator K* e do Fator de Perda Harmônica (F_{HL}) pressupõem que sejam conhecidos o espectro harmônico da corrente de carga, a corrente nominal (I_R), a perda fora dos enrolamentos para condição de carga linear nominal (P_{OSL-R}) e a perda por correntes parasitas nos enrolamentos na freqüência fundamental (P_{EC-O}).

Para a determinação desta, primeiramente devem ser encontradas as resistências equivalentes dos enrolamentos em *dc* (R_{dc}), através de medição direta, e em *ac* (R_{ac}), através do ensaio de curto-circuito.

A resistência que representa a perda por correntes parasitas nos enrolamentos (R_{EC}) é dada pela equação (1)[6].

$$R_{EC} = R_{ac} - R_{dc} \tag{1}$$

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos sob carga linear nominal (P_{EC-R}) é dada pela equação (2).

$$P_{EC-R} = 3 \cdot R_{EC} \cdot I_R^2 \tag{2}$$

Para o cálculo da perda por correntes parasitas nos enrolamentos sob freqüência fundamental em cada um dos transformadores, utiliza-se a equação (3).

$$P_{EC-O} = 3 \cdot R_{EC} \cdot I_{fund}^2 \tag{3}$$

Onde I_{fund} é o valor rms da componente fundamental da corrente.

Para carga não-linear, a circulação de correntes parasitas nos enrolamentos aumenta, resultando em uma maior resistência em *ac*, denominada resistência eficaz dos enrolamentos por fase (R_{acef}). Durante os ensaios com carga, esta resistência é obtida através da equação (4), reescrita na forma de potência conforme equação (5) [6].

$$v_{1i} - v_{2i} = R_{acefi} \cdot i_{1i} + L_{ac} \cdot \frac{di_{1i}}{dt} + R_{acefi} \cdot i_{2i} + L_{ac} \cdot \frac{di_{2i}}{dt} \tag{4}$$

$$R_{acefi} = \frac{\int_0^T (v_{1i} - v_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt - L_{ac} \cdot \int_0^T \frac{d(i_{1i} + i_{2i})}{dt} \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt}{\int_0^T (i_{1i} + i_{2i}) \cdot (i_{1i} + i_{2i}) \cdot dt} \tag{5}$$

De forma análoga à equação (1), obtém-se a resistência por correntes parasitas eficaz por fase (R_{ECefi}), obtendo-se a resistência equivalente por fase, sendo que para o modelo equivalente monofásico calcula-se a média das três.

B. Cálculo das perdas

Os métodos referenciados apresentam, para cálculo das perdas, as equações de (6) a (8)[1].

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \tag{6}$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \tag{7}$$

$$FatorK = \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \tag{8}$$

Onde h_{max} é a ordem da maior harmônica de potência significativa, que é igual a 50 para este trabalho.

Com os espectros harmônicos das correntes medidas, determinam-se as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos calculadas pelo *Fator K* (P_{EC-K}) e pelo F_{HL} (P_{EC-FHL}), conforme equações (9) e (10)[1][2][3].

$$P_{EC-K} = FatorK \cdot P_{EC-O} \tag{9}$$

$$P_{EC-F_{HL}} = F_{HL} \cdot P_{EC-O} \tag{10}$$

A perda em *dc* nos enrolamentos (P_{dc}) é dada pela equação (11).

$$P_{dc} = 3 \cdot R_{dc} \cdot I^2 \tag{11}$$

Onde *I* é o valor rms da corrente no lado de tensão inferior do transformador.

Somando-se as perdas em *dc* com a perda por correntes parasitas obtém-se a perda nos enrolamentos. A perda fora dos enrolamentos para condição de carga linear (P_{OSL-R}) é obtida através do ensaio em vazio.

C. Perdas medidas

A perda medida total é dada pela diferença entre as potências de entrada no transformador T_1 e de saída no transformador T_2.

As diversas perdas por transformador são medidas de forma indireta, através da implantação das equações do *modelo T* de circuito equivalente monofásico no domínio do tempo.

Para o cálculo da perda por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}), utilizam-se as resistências por correntes parasitas nos enrolamentos por fase inferior ($R_{ECef\ Infi}$) e superior ($R_{ECef\ Supi}$), cada uma considerada como sendo a metade da resistência por correntes parasitas por fase (R_{ECefi})[6]. Esta perda é calculada pela equação (12).

$$P_{EC} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{T} \int_0^T [R_{ECef\ Infi} \cdot i_i^2 + R_{ECef\ Supi} \cdot \left(\frac{i_{1i} + i_{2i}}{2} \right)^2] \cdot dt \qquad (12)$$

Onde i_i é a corrente no lado de tensão inferior do transformador.

A perda nos enrolamentos é calculada através da soma da perda por correntes parasitas nos enrolamentos com a perda em *dc*.

A perda fora dos enrolamentos (P_{OSL}) é calculada utilizando-se a tensão de excitação (v_{oi}) e as correntes por fase nos enrolamentos de tensão inferior de T_1 (i_{1i}) e de T_2 (i_{2i}), conforme equação (13).

$$P_{OSL} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{2T} \int_0^T v_{oi} \cdot (i_{1i} - i_{2i}) \cdot dt \qquad (13)$$

D. Corrente e potência máximas

A corrente máxima que o transformador deve alimentar ($I_{máx}$) deve ser tal que a perda no transformador seja a mesma que ele teria alimentando carga linear nominal. A equação (14) apresenta esta igualdade, que pode ser reescrita conforme a equação (15).

$$P_{OSL-R} + P_{W-R} = 3 \cdot R_{acef} \cdot I_{máx}^2 + P_{OSL} \qquad (14)$$

$$I_{máx} = \sqrt{\frac{P_{OSL-R} + P_{W-R} - P_{OSL}}{3 \cdot R_{acef}}} \qquad (15)$$

Onde P_{W-R} é a perda total nos enrolamentos sob condição de carga linear nominal [6].

A potência máxima que o transformador deve alimentar é determinada através do valor em *pu* desta corrente.

IV. RESULTADOS

No procedimento experimental, primeiramente são determinados os parâmetros do transformador, através do ensaio de resistência em *dc* dos enrolamentos, do ensaio em curto-circuito e do ensaio em vazio. Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos transformadores

Parâmetro	Valor
R_{ac}	0,22031 Ω
R_{dc}	0,19938 Ω
R_{EC}	0,02093 Ω
$R_{dc\ inf}$	0,08917 Ω
$R'_{dc\ sup}$	145,350 Ω
$P_{OSL-R\ (T1)}$	110,18 W
$P_{OSL-R\ (T2)}$	103,99 W
Lac	513,7 µH

Uma vez determinados os parâmetros, são medidas as tensões e as correntes e calculadas as diversas perdas para cada tipo de carga. Os tipos de cargas utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de cargas utilizados

Carga	Descrição
C1	Carga linear (resistências)
C2	Retificador trifásico de onda completa
C3	Retificador trifásico de onda completa com filtro capacitivo de 540 μF na saída
C4	Retificador trifásico de meia onda
C5	Retificador trifásico de meia onda com filtro capacitivo de 330 μF na saída
C6	Retificador trifásico de meia onda com filtro capacitivo de 660 μF na saída
C7	Retificador trifásico de meia onda com filtro capacitivo de 990 μF na saída

A perda por correntes parasitas nos enrolamentos, a perda total nos enrolamentos, a perda no núcleo e a perda total no transformador são obtidas através dos diversos métodos: o modelo *Adotado*, que é descrito na metodologia deste trabalho; o modelo *Linear*, que ignora o efeito das freqüências harmônicas na perda; o F_{HL}, proposto pelo IEEE e o *Fator K*, proposto pelo UL.

As perdas por correntes parasitas nos enrolamentos estão apresentadas na Fig. 2.

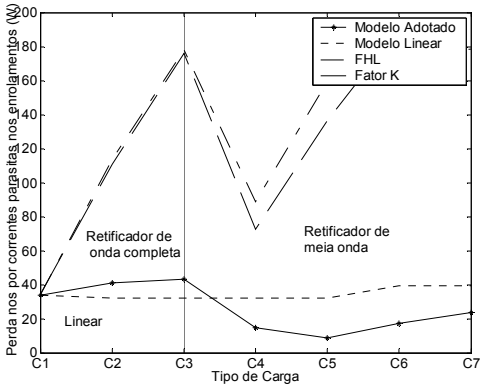

Fig. 2 - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos.

Pelo modelo adotado, observa-se que a perda por correntes parasitas nos enrolamentos é maior quando há mais componentes harmônicas na corrente de carga. Porém, o aumento é bem menor do que o previsto pelos métodos referenciados.

A Fig. 3 apresenta os valores das perdas nos enrolamentos.

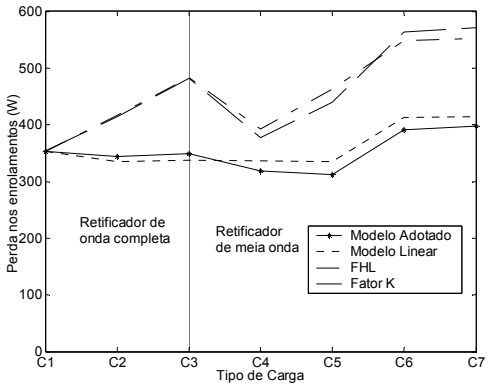

Fig. 3 - Perdas nos enrolamentos.

Nos resultados com retificador de meia onda, as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos são menores. Isto ocorre devido à componente *dc* na corrente de entrada do retificador de meia onda não influir nestas perdas.

A Fig. 4 apresenta as perdas no núcleo obtidas pelos diversos métodos.

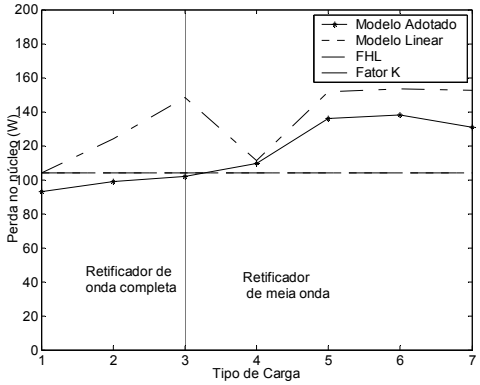

Fig. 4 - Perdas no núcleo.

As curvas de perda no núcleo para o modelo *Linear* e para o *Fator K* se sobrepõem e são constantes, uma vez que ambos o desconsideram a variação de perda no núcleo devido às freqüências das harmônicas. Porém, percebe-se que a perda no núcleo medida varia de acordo com o conteúdo harmônico da carga. A curva obtida pelo método do F_{HL} está acima da curva de perda medida.

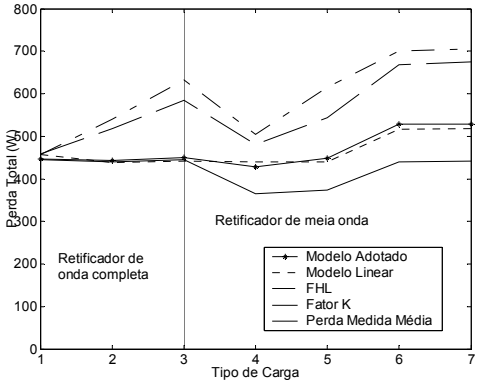

Fig. 5 - Perdas totais por transformador.

A curva que mais se aproxima do *modelo T* adotado é a obtida pelo modelo *Linear*. No entanto, sabe-se que ela não deve ser obedecida, pois isto provocaria sobreaquecimento no transformador. As curvas obtidas pelos métodos *Fator K* e F_{HL} superestimam as perdas.

V. CONCLUSÃO

Pelas curvas analisadas, nota-se que sob carga linear a perda é praticamente idêntica para qualquer um dos métodos, uma vez que os fatores de multiplicação são iguais a 1. Quando há mais harmônicas, as perdas aumentam. Porém, o aumento não é tão grande quanto o previsto pelos métodos *Fator K* e F_{HL}. Isto indica que eles superdimensionam as perdas, podendo levar um projetista a especificar um transformador maior que o necessário.

VI. ANEXO - DADOS NOMINAIS DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores utilizados são Δ-Y, de distribuição, do tipo imerso em óleo mineral e apresentam números de série 6266 (T_1) e 6267 (T_2), do mesmo lote de fabricação. A potência nominal é de 1*5 kVA* e as tensões dos lados superior e inferior são respectivamente 13,8 *kV* e 380 *V*. A freqüência e a temperatura de operação são de 60 Hz e 50º C, respectivamente. A corrente nominal é de 22,8 *A* para o lado de tensão inferior e de 0,63 *A* para o lado de tensão superior.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE C57.110/D7, “Recommended Practice for Establishing Transfonner Capability when Supplying non-sinusoidal Load Currents”, *IEEE*, New York, USA, Febrary 1998.

[2] UL 1561, “Dry-Type General Purpose and Power Transformer”, 1994.

[3] UL 1562, “Transformers, Distribution, Dry-Type – Over 600 Volts”, 1994.

[4] S.N. Makarov, A.E. Emanuel, “Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents”, *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power - Proceedings*, vol. 1, no. ,pp. 87-90, October 2000.

[5] E.F. Fuchs, D.J. Roesler, M.A.S. Masoum, “Are Harmonic Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive?” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1775-1786, October 2004.

[6] L.R.Lisita, “Determinação de Perdas, Eficiência e Potência Máxima de Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares”, *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás,* Fevereiro 2004.