



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7713
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES A SECO ALIMENTANDO CARGAS NÃO LINEARES

JELSON M. DE
CAMARGO

FEB

OLÍVIO CARLOS N.
SOUTO

FEB

CLÁUDIO ROBERTO
PACHECO

FEB

ALEXANDRE O. DE
LIMA

FEB

GUILHERME S. BUSNARDO

FEB

PAULO CESAR GOMES

FEB

ANTÔNIO CARLOS DELAIBA

UFU

RESUMO

Este artigo apresenta e analisa os resultados de investigações teóricas e experimentais do comportamento térmico de transformadores a seco, isolados a resina epóxi, sob condições não senoidais de tensão e/ou corrente. Um modelo térmico é utilizado para estimar as elevações de temperatura no transformador. Com o objetivo principal de avaliar o comportamento térmico do transformador, estudos experimentais são conduzidos em um protótipo de um transformador trifásico a seco, isolado com resina epóxi, delta/estrela, 5 kVA especialmente construído para realização de testes de temperatura, com sensores térmicos localizados em vários pontos do equipamento. Este procedimento viabiliza a comparação entre os resultados computacionais e experimentais com vistas à validação da proposta da modelagem térmica de primeira ordem.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores a seco, modelagem térmica, distorções harmônicas, qualidade da energia.

1.0 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações do setor elétrico nos dias de hoje, é a utilização da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e

otimizada, reconhecendo-se a dificuldade que o setor enfrenta para expandir a oferta de energia, uma vez que os recursos financeiros estão escassos. Surge, portanto, a necessidade de se utilizar alternativas que contemplem o aproveitamento ótimo de equipamentos que perfazem parte do sistema elétrico, seja em nível de geração, transmissão ou distribuição de energia. Dentre os dispositivos existentes no sistema elétrico, o transformador apresenta-se com grande destaque. Geralmente, estes equipamentos estão na interface entre os sistemas elétricos e a carga geradora de harmônicos, tornando-se necessário um estudo cuidadoso quando submetidos a níveis significativos de distorções harmônicas, tendo em vista que o principal efeito será a elevação das temperaturas de operação e a conseqüente redução de vida útil.

Vários estudos têm sido feitos para analisar as condições térmicas de transformadores a óleo em condições de alimentação não senoidal. Dentre estes, destacam-se as referências [1-4].

Todavia, nos últimos anos têm-se utilizado, em escala cada vez maior, nas instalações industriais e comerciais os transformadores a seco. Estes, se justificam por serem seguros, confiáveis, custo de manutenção e perigo de incêndio baixo. Suas principais aplicações estão em hospitais, escolas, edifícios, plantas químicas, etc [5].

Dentro deste contexto, este trabalho se propõe

a estudar o comportamento térmico de transformadores a seco isolados com resina epóxi [6]. Os estudos teóricos são baseados no modelo térmico de primeira ordem, já bastante utilizado e difundido para os transformadores a óleo, sendo inclusive a base para normas de carregamento de transformadores a óleo. Desta forma, neste artigo esta metodologia será adaptada para os transformadores a seco.

Objetivando validar a modelagem térmica, serão realizados ensaios experimentais em um protótipo trifásico isolado com resina epóxi, especialmente projetado e construído para a execução dos ensaios térmicos. Deve-se salientar, que vários sensores foram instalados em regiões estratégicas do equipamento, permitindo medições das temperaturas de operação e a comparação destes valores com aqueles obtidos pela modelagem térmica.

2.0 MODELO TÉRMICO CLÁSSICO

Para investigar os acréscimos de temperatura de um transformador a seco sob condições não ideais de suprimento e carregamento, propõe-se, a seguir, um modelo térmico monofásico, onde o transformador é visto como sendo um corpo homogêneo. Neste sentido, tem-se o modelo térmico clássico. Este é também conhecido como um sistema de primeira ordem, por ser regido por uma única equação diferencial. Tal estratégia permite avaliar a elevação da temperatura do enrolamento em relação à temperatura ambiente. A figura 1 mostra o circuito térmico empregado para estimativa das temperaturas internas.

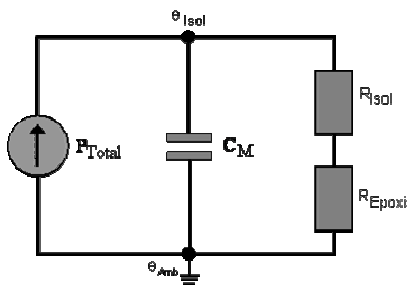


Figura 1 – Circuito térmico de primeira ordem (clássico) do transformador.

Ao examinar a figura constata-se que a elevação da temperatura do enrolamento é consequência da transferência de calor gerado internamente ao transformador para o ambiente. Em outras palavras, o transformador é visto como sendo um corpo homogêneo, tendo a mesma temperatura em todas as suas partes. A equação diferencial que rege este fenômeno é dada pela equação (1). As demais expressões definem a

capacitância e resistência térmica do material isolante do equipamento enfocado. Vale observar que para o cálculo da resistência térmica da resina epóxi, considera-se que a isolação possua uma geometria cilíndrica.

$$P = C_{th} \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \frac{\Delta\theta_E}{R_{th}} \quad (1)$$

$$C_{thEQ} = m.c \quad (2)$$

$$G_{thEpoxi} = \frac{2\pi.k_1}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} = \frac{1}{R_{thEpoxi}} \quad (3)$$

$$R_{thIsol} = \frac{\Delta\theta_{Isol}}{P} \quad (4)$$

onde:

- P - perdas totais;
- C_{thEQ} - capacitância térmica equivalente do transformador;
- R_{thIsol} - resistência térmica do isolante;
- $R_{thEpoxi}$ - resistência térmica do epóxi;
- $\Delta\theta_E$ - elevação da temperatura do enrolamento em relação a ambiente;
- $\Delta\theta_{Isol}$ - elevação da temperatura do isolante do enrolamento em função da classe de isolamento;
- m - massa equivalente do transformador;
- k_1 - condutividade térmica do epóxi;
- a - Raio interno do isolamento epóxi;
- b - Raio externo do isolamento epóxi;

É importante observar que a capacitância térmica equivalente do transformador refere-se à soma das capacitâncias térmicas do enrolamento, do núcleo e do epóxi. Estas podem ser calculadas empregando-se equação semelhante a (2), porém, com os respectivos valores para a massa e o calor específico do material. A solução da equação diferencial (1) conduz a expressão fornecida pela equação (5).

$$\Delta\theta_E = P.R_{th} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{th}C_{thEQ}}} \right) + \Delta\theta_0 \left(e^{-\frac{\Delta t}{R_{th}C_{thEQ}}} \right) \quad (5)$$

onde:

- $\Delta\theta_0$ - elevação da temperatura inicial em relação a ambiente;

Quanto às fontes de calor, estas estão associadas às perdas elétricas que ocorrem nos enrolamentos do primário e secundário, bem como aquelas que ocorrem no núcleo magnético do transformador.

3.0 FONTES DE AQUECIMENTO

As perdas totais em transformadores são constituídas basicamente por duas parcelas: perdas a vazio (perdas no núcleo) e perdas nos enrolamentos. As perdas a vazio se dividem em perdas por histerese e as perdas por correntes de Foucault, as quais são calculadas pelas equações (6) e (7) [3], dadas a seguir:

3.1 Perdas por histerese

As perdas associadas ao fenômeno da histerese magnética, sob condições não senoidais, são calculadas pela equação (6):

$$\frac{P_{Hn}}{P_{HN}} = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_N} \cos \Phi_n \right]^s \quad (6)$$

onde:

- P_{HN} - perdas por histerese para a carga nominal e senoidal;
- P_{Hn} - perdas por histerese para uma carga não-linear, ou seja para uma ordem harmônica "n";
- s - coeficiente de Steinmetz, que assume valores típicos entre 1,5 e 2,5;
- V_n - tensão eficaz para a ordem "n";
- Φ_n - ângulo de fase da tensão harmônica de ordem "n".

3.2 Perdas por corrente de Foucault

Para a condição operacional com tensões não senoidais, estas perdas podem ser obtidas a partir das equações de (7) a (10):

$$\frac{P_{Fn}}{P_{FN}} = \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{V_n}{V_1} \right]^2 C_{en} \right] \quad (7)$$

$$C_{en} = 1 - 0,0017 \xi^{3,61}, \quad \xi < 3,6 \quad (8)$$

$$C_{en} = \frac{3}{\xi}, \quad \xi > 3,6 \quad (9)$$

$$\xi = \Delta \sqrt{\pi \mu \gamma n f} \quad (10)$$

onde:

- P_{Fn} - perdas por correntes de Foucault em condições não-senoidais;
- P_{FN} - perdas por correntes de Foucault em condições senoidais e nominais;
- V_1 - componente fundamental da tensão não-senoidal;
- Δ - espessura da chapa do núcleo magnético;
- μ - permeabilidade magnética do núcleo;

- γ - condutividade térmica do núcleo magnético;
- n - ordem harmônica da tensão;
- f - frequência fundamental.

3.3 Perdas nos enrolamentos

As perdas em carga se dividem em perdas por efeito Joule nos enrolamentos (perdas $R I^2$) e perdas do tipo "stray load loss", também denominadas por perdas suplementares ou adicionais.

3.3.1 Perdas Joule

As perdas joule são calculadas conforme a equação (11).

$$P_{jn} = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(p) I_n^2(p) + \sum_{n=1}^{\infty} R_n(s) I_n^2(s) \quad (11)$$

onde:

- $R_n(p)$ - resistência do enrolamento primário para o n-ésimo harmônico;
- $R_n(s)$ - resistência do enrolamento secundário para o n-ésimo harmônico;
- $I_n(p)$ - valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do primário;
- $I_n(s)$ - valor eficaz da n-ésima corrente harmônica do secundário;
- n - ordem harmônica da corrente.

3.3.2 Perdas adicionais ou suplementares

As perdas suplementares são aquelas devido à dispersão de fluxo eletromagnético nos enrolamentos. Estas perdas podem ser divididas em perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e perdas suplementares nas demais partes do transformador. Desta forma, essa parcela de perdas pode ser expressa pela equação (12).

$$P_{SL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (12)$$

onde:

- P_{SL} - perdas suplementares totais;
- P_{EC} - perdas por correntes parasitas nos enrolamentos ("eddy current loss");
- P_{OSL} - perdas suplementares nas demais partes do transformador.

Vale salientar que as perdas suplementares nas demais regiões do transformador são desprezadas, uma vez que apresentam valores muito baixo em relação às demais perdas.

No tocante às perdas por correntes parasitas (“eddy current loss”) que ocorrem nos enrolamentos, existem, basicamente, duas metodologias de cálculo. Uma, proposta pela norma [2] a qual leva em consideração somente as ordens harmônicas das correntes e uma segunda estratégia, mais elaborada, que considera a geometria do transformador [1].

a) Perdas por Correntes Parasitas Convencionais (Norma)[2]

Tomando-se como base que o transformador está submetido a um carregamento não linear, as perdas por correntes parasitas podem ser calculadas segundo a referência [2], aqui reescrita pela equação (13).

$$P_{ECconv.} = P_{ECN} \sum_{n=1} n^2 \left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \quad (13)$$

onde:

- $P_{ECconv.}$ - perdas por correntes parasitas nos enrolamentos na condição não senoidal;
- P_{ECN} - perdas para a condição linear e nominal;
- n - ordem harmônica;
- I_n - valor rms da corrente harmônica de ordem “n”;
- I_N - corrente nominal do transformador.

b) Perdas por Correntes Parasitas Corrigido[1]

A expressão dada anteriormente não leva em consideração a geometria do transformador e ainda pode conduzir a uma sobreestimativa do cálculo das perdas, sobretudo para ordens harmônicas elevadas. Neste sentido, a equação (14) apresenta o cálculo das mesmas perdas, contudo levando-se em consideração as características físicas, magnéticas e geométricas do transformador.

$$P_{ECcorrigido} = P_{ECN} \frac{\sum_{n=1} F(\xi_n) n I_n^2}{F(\xi_N) I_N^2} \quad (14)$$

onde:

$$F(\xi_n) = \frac{1}{\xi} \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \quad (15)$$

$$\xi = \frac{\tau}{\delta} \quad (16)$$

$$\delta = \delta_N \sqrt{n} \quad (17)$$

$$\delta = \delta_N \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f}} \quad (18)$$

Nas expressões anteriores, definem-se os seguintes termos:

- δ -profundidade de penetração na frequência n.f;
- δ_N -profundidade de penetração na frequência fundamental;
- ρ -resistividade do condutor;
- τ -largura do condutor;

4.0 ANÁLISE EXPERIMENTAL

As análises precedentes fundamentaram-se em formulações teóricas sobre o aquecimento de transformadores. Objetivando validar a metodologia, procede-se a seguir a discussão dos aspectos térmicos relacionados com os estudos experimentais conduzidos em um protótipo.

4.1 Equipamentos utilizados

O transformador utilizado é de 5 kVA, trifásico, delta/estrela, relação de transformação 1:1, 220V/220V, impedância percentual de 2,23% e isolado a seco com resina epóxi, o qual foi especialmente construído para permitir a medição da temperatura dos enrolamentos e do núcleo. Para tanto, as bobinas foram construídas de maneira a permitir que sensores de temperatura do tipo PT100 fossem instalados interiormente nos enrolamentos. Os valores de temperatura obtidos via sensores, foram enviados a um micro-computador através de um sistema de aquisição de dados. Para as medições das tensões e das correntes, utilizou-se o medidor RMS MARH21.

4.2 Execução do ensaio

A título de ilustração, a figura 2 detalha a montagem experimental utilizada para os procedimentos laboratoriais. Com a finalidade de analisar a operação térmica do equipamento, optou-se por realizar os ensaios sob duas condições. A primeira compreendeu o transformador a seco alimentando cargas lineares e nominais, constituídas por três cargas ligadas em estrela composta por lâmpadas incandescentes. A segunda foi semelhante a anterior, porém substituindo-se a carga linear por uma carga não linear, empregando-se para isso, um retificador de 6 pulsos a diodos.

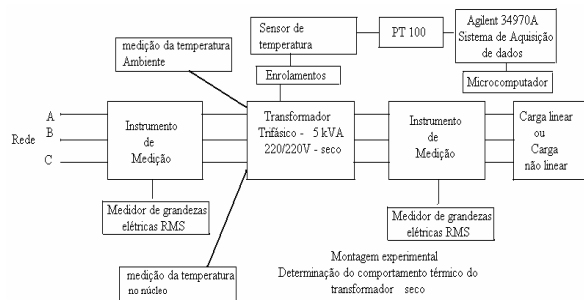


Figura 2 – Montagem experimental.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Aspectos elétricos

Empregando-se os equipamentos anteriormente descritos, obtiveram-se diversas grandezas elétricas, por exemplo: formas de onda de tensões e correntes, decomposição harmônica, etc. A figura 3 mostra a forma de onda da corrente no secundário do transformador, para suprimento da carga não linear. Deve-se ressaltar que por questões de limitação de espaço, optou-se por apresentar somente os resultados da fase A para a carga não linear. Embora, todas as grandezas elétricas foram monitoradas nas três fases e durante todo o tempo de execução dos ensaios.

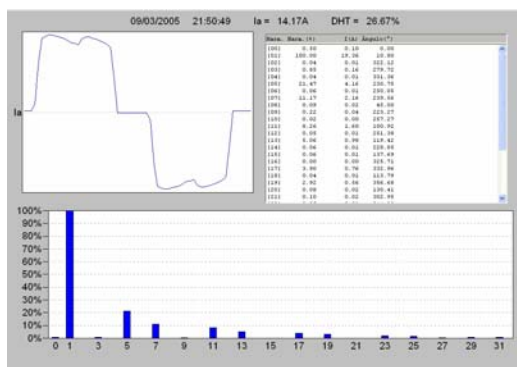


Figura 3 - Forma de onda e espectro harmônico da corrente no secundário do transformador – fase A.

A figura evidencia que a forma de onda da corrente e o seu respectivo espectro harmônico é compatível com as previsões teóricas para um conversor de 6 pulsos. Quanto aos níveis harmônicos individuais da corrente aquelas de ordem 5, 7, 11 e 13, são os mais significativos, obtendo-se uma distorção harmônica total de aproximadamente 26.67%.

5.2 Aspectos térmicos

A figura 4 apresenta os resultados obtidos para a elevação de temperatura do enrolamento do secundário (bobina interna), quando do suprimento com carga linear e não linear.

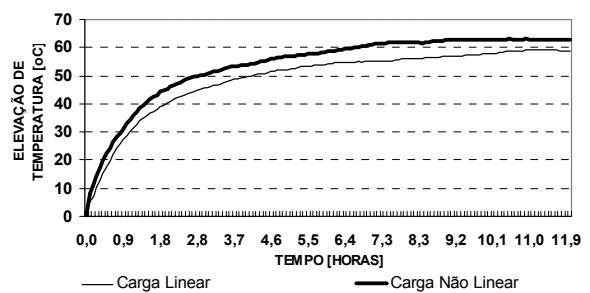


Figura 4 – Elevação da temperatura do enrolamento secundário (interna) - Linear x Não Linear.

Comparando ambas as medições, observa-se que houve um acréscimo da ordem de 4,3 °C. Resultado esperado tendo em vista os efeitos das distorções harmônicas no aquecimento do transformador. É importante ressaltar que nos ensaios experimentais garantiu-se que as componentes fundamentais da corrente absorvida tanto pela carga linear quanto pela não linear, apresentassem praticamente o mesmo valor nominal, ou seja, 13,6 [A]. Quanto a temperatura ambiente, esta foi medida segundo recomendações da norma brasileira [3].

Ainda com vistas a melhor ilustrar os resultados obtidos em laboratório, a figura 5 apresenta as elevações de temperatura dos enrolamentos do primário e secundário, bem como aquela associada ao núcleo magnético, para um suprimento com carga não linear.

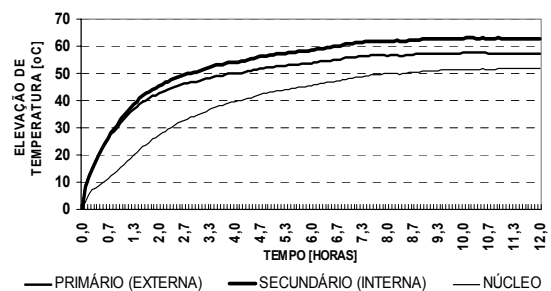


Figura 5 - Elevação da temperatura no núcleo e nos enrolamentos internos e externos.

As elevações da temperatura no núcleo e nos enrolamentos do primário e do secundário no ponto mais quente atingiram em regime permanente, respectivamente, 51,6, 57,3 e 62,9 °C.

5.3 Comparação entre os resultados experimentais e computacionais.

Com o objetivo de verificar a validade da metodologia desenvolvida, mostra-se na figura 6 o gráfico comparativo entre os valores determinados via simulação computacional e

aqueles obtidos experimentalmente. As condições operacionais para o gráfico consistem no suprimento de carga não linear com medição de temperatura no enrolamento secundário (interno). Quanto a simulação computacional, esta foi realizada empregando a metodologia sugerida pelas normas no tocante ao cálculo das perdas “eddy current”.

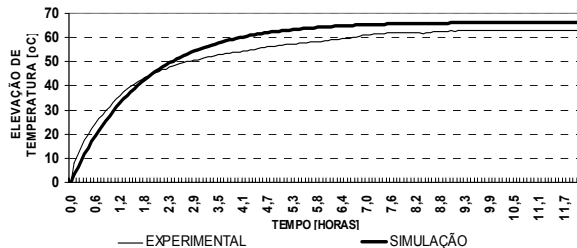


Figura 6 - Comparação da elevação da temperatura para as condições experimentais e computacionais – Secundário.

Uma simples observação da figura permite concluir que há uma boa correlação entre os mesmos. Os valores em regime permanente para a simulação computacional e experimental atingiram, respectivamente, 64.3 e 62.9 °C.

Conforme citado anteriormente, duas estratégias se fazem presentes para o cálculo das perdas por correntes parasitas ou “eddy current losses”. Uma estabelecida a partir dos procedimentos constantes em normas internacionais e outra, mais exata, a qual é baseada na geometria dos condutores que perfazem os enrolamentos do primário e secundário. Neste sentido, a figura 7, que se segue, apresenta as elevações de temperatura no enrolamento secundário empregando-se as duas metodologias de cálculo.

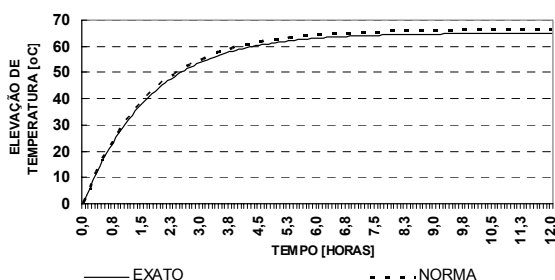


Figura 7 – Elevação de temperatura enrolamento secundário (interno) – Simulação - Pec Norma x Pec Exato.

Observa-se na figura que as temperaturas atingiram valores da ordem de 64.9 e 66.3 °C. Fica comprovado que os valores obtidos via normas disponíveis levam a resultados conservadores.

Finalmente, a tabela 1, apresenta a título de comparação, os valores obtidos através de simulações computacionais, bem como aqueles

medidos em laboratório.

Tabela 1 – Resumo dos resultados para o enrolamento secundário (interno).

Tipo de carga	Experimental [°C]	Simulação P _{ECNorma} [°C]	Simulação P _{ECExato} [°C]
Não Linear	62,9	66,25	64,93
Linear	58,6	62,02	62,02
Diferença	4,3	4,23	2,91

A tabela evidencia, uma vez mais, a ótima correlação entre os valores obtidos via simulação computacional com os resultados experimentais.

6.0 CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo a validação dos procedimentos computacionais fundamentados na modelagem clássica no domínio da frequência. Neste sentido, procedeu-se a apresentação dos resultados de elevações de temperatura em diversos pontos do transformador considerando condições lineares e não lineares de funcionamento, a partir de simulações computacionais e experimentais. Os ensaios foram conduzidos em um transformador trifásico a seco, isolado com resina epóxi, especialmente construído de forma a possibilitar a medição de temperatura nas mais diversas partes do transformador. Os resultados computacionais e experimentais foram suficientemente próximos para se concluir que a metodologia teórica (modelagem térmica) apresentada se mostra apropriada aos objetivos pretendidos. Os resultados indicaram também que, como seria esperado, o carregamento não linear é mais crítico, conduzindo a temperaturas mais elevadas. Este efeito, como é conhecido, resulta em substanciais diminuições da vida útil do equipamento.

7.0 AGRADECIMENTOS

Nosso reconhecimento e gratidão à empresa TRA Eletromecânica Ltda. pela doação do transformador utilizado neste trabalho.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. E. Emanuel, S.N. Makarov, “Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, 2000/IEEE.
- [2] ANSI/IEEE C57.110/D7, “Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-sinusoidal Load Currents”, IEEE, NY, /febr. 1998.

- [3] A. C. Delaiba, "Comportamento de Transformadores com Cargas Não Lineares: Uma Abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos", Tese de Doutorado, USP, SP, 1997.
- [4] Garcia, Devair R., "Gerenciamento de Transformadores de Distribuição Operando em Ambientes Não Senoidais", Dissertação de Mestrado, UNESP – Ilha Solteira, 2000.
- [5] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Transformadores de Potência Secos, Especificação", NBR 10295, maio/1988.
- [6] Linden W. Pierce, "Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, no 4, July/August 1994.

