

# VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES OPERANDO SOB CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS

**Antônio C. Delaiba (Dr)**  
**Olívio C. N. Souto (MSc)**

Universidade Federal de Uberlândia  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Cep. 38400-900 - Tel/Fax: (034) - 236-5099

**José C. de Oliveira (PhD)**  
**José R. Cardoso (Dr)\***

\* Universidade de São Paulo - USP  
Escola Politécnica - EPUSP  
Departamento de Energia e Automação Elétrica

**Resumo** - Este artigo apresenta e analisa os resultados de investigações teóricas e experimentais do comportamento térmico dos transformadores sob condições distorcidas de tensão e/ou corrente. Utilizando-se dessas situações não convencionais superpostas à frequência fundamental, as condições térmicas são estimadas usando a técnica no domínio da frequência. De forma a comprovar os procedimentos teóricos e/ou computacionais, estudos experimentais são conduzidos em um protótipo de transformador trifásico estrela/estrela, 15kVA, alimentando um retificador não controlado de 6 pulsos. Este procedimento viabiliza a comparação entre resultados computacionais e experimentais, com vistas a validação da proposta de cálculo fundamentada no domínio da frequência e método da superposição.

**Palavras-Chaves** - Distorções harmônicas, Transformadores, Comportamento Térmico

**Abstract** - This paper is focused in the direction of practical and theoretical aspects of thermal performance of transformers under distorted operating conditions. Using the superposition method, the thermal conditions are estimated through the frequency domain technique. To validate the theoretical results, practical measurements are made using a 15 kVA transformer prototype supplying a 6 pulse rectifier. The results are then used to validate the proposed method to investigate transformer thermal behaviour.

**Keywords** - Power Transformers, harmonic distortion, thermal behaviour, power quality.

## 1. Introdução

Sabe-se que os transformadores de distribuição e de força são projetados e construídos com isolamento consistindo, geralmente, de materiais orgânicos e/ou inorgânicos como o óleo mineral e o papel. A degradação de algumas propriedades do isolante está, via de regra, associada a ação individual e/ou conjunta das seguintes possibilidades: calor (reações químicas aceleradas), contaminação, umidade, acidez, vibrações, etc. Vários estudos tem sido feitos para analisar as condições térmicas de transformadores em condições de alimentação senoidal. Dentre estes, destacam-se as referências [1], [2] e [3]. Por outro lado, há de se reconhecer que, nos dias atuais, os suprimentos elétricos para muitas situações se apresentam com expressivos níveis de perda de qualidade. Neste sentido surge a questão da geração, propagação e efeitos de harmônicos nas redes elétricas de potência. Muitos pesquisadores têm investigado o impacto de harmônicos em transformadores. Em [4] tem-se o efeito das tensões e/ou correntes harmônicas nas perdas, e apresenta-se um método tradicional para avaliar a vida útil deste componente suprindo cargas não lineares. Na referência [5] tem-se uma comparação entre os cálculos das perdas nos enrolamentos obtidas através do "método dos elementos finitos", com aqueles oriundos de ensaios

experimentais em transformadores de distribuição monofásicos. Já a referência [6] apresenta um modelo termoelétrico que permite calcular o comportamento térmico do transformador, sendo os resultados teóricos comparados com os obtidos experimentalmente a partir de uma unidade de distribuição monofásica. A referência [7] relata ensaios experimentais que permitem estudar a influência de cargas não lineares na elevação de temperatura nos transformadores monofásicos. Os ensaios foram conduzidos em uma unidade de 50 kVA e em duas de 25kVA. Dentro deste contexto, e considerando que o transformador está, usualmente, na "interface" entre as fontes de energia e muitas cargas não lineares, o efeito dos harmônicos no comportamento térmico deste componente representa um assunto de grande relevância. Assim, este artigo tem como objetivo descrever os resultados de pesquisas complementares sobre os efeitos das distorções harmônicas de tensão e/ou corrente no comportamento térmico do transformador. Através da superposição de condições não convencionais, superpostas à operação na frequência fundamental, as condições térmicas são estimadas, utilizando-se a técnica no domínio da frequência. Além destes aspectos teóricos, o artigo apresenta e discute os resultados de medições conduzidas em um protótipo de uma unidade trifásica de 15kVA, com vistas a

comparação dos resultados computacionais com os experimentais e subsequente validação dos procedimentos teóricos.

## 2. Considerações Teóricas

### Perdas por Histerese

As perdas associadas ao fenômeno da histerese, sob condições não senoidais, são calculadas pela equação (1), conforme [4].

$$\frac{P_{Hn}}{P_{H1}} = \left[ 1 + \left( \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{V_n}{V_1} \cos j_n \right)^s \right] \quad (1)$$

onde:

- $P_{Hn}$  - perdas totais por histerese para um suprimento distorcido;
- $P_{H1}$  - perdas por histerese para frequência fundamental;
- $n$  - ordem harmônica;
- $V_n$  - tensão eficaz do n-ésimo harmônico;
- $V_1$  - tensão eficaz da fundamental;
- $j_n$  - ângulo de fase do n-ésimo harmônico;
- $s$  - coeficiente de "Steinmetz".

### Perdas por Correntes Parasitas no Núcleo

As perdas totais associadas ao efeito das correntes de "Foucault" no núcleo, sob condições não senoidais, podem ser expressas pela equação (2), também extraída da referência [4].

$$\frac{P_{Fn}}{P_{F1}} = \left[ 1 + \sum_{n \neq 1}^{\infty} \left( \frac{V_n}{V_1} \right)^2 C_{en} \right] \quad (2)$$

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

$$C_{en} = \frac{3}{x}, x > 3,6 \quad (4)$$

$$x = \Delta \sqrt{pmgf} \quad (5)$$

onde:

- $P_{Fn}$  - perdas totais por correntes parasitas para um suprimento distorcido;
- $P_{F1}$  - perdas por correntes parasitas para a frequência fundamental;
- $\Delta$  - espessura da chapa do núcleo magnético;
- $m$  - permeabilidade magnética do núcleo;
- $g$  - condutividade elétrica do núcleo magnético
- $n$  - ordem harmônica da tensão;
- $f$  - frequência.

### Perdas nos Enrolamentos

As perdas totais nos enrolamentos, sob condições não senoidais, podem ser calculadas, aplicando-se o princípio da superposição.

$$P_{jn} = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(p) \cdot I_n^2(p) + \sum_{n=0}^{\infty} R_n(s) \cdot I_n^2(s) + P_{EC} + P_{OSL} \quad (6)$$

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;
- $P_{EC}$  - Perdas por correntes parasitas nos enrolamentos para condições não senoidais;
- $P_{OSL}$  - Perdas suplementares (adicionais) nas partes metálicas (núcleo, paredes do tanque, etc) para condições não senoidais.

Deve-se salientar que as perdas foram desdobradas para que seja possível investigar quatro efeitos a saber:

- perdas devido ao efeito "SKIN";
- perdas devido ao efeito da proximidade;
- perdas adicionais ("eddy current losses");
- perdas devido a uma possível circulação da corrente contínua, imposta na equação (6), para  $n=0$ .

### Elevação da temperatura do topo do óleo em relação a temperatura ambiente

A elevação da temperatura final do óleo operando em regime permanente, com um ciclo de carga constante e genérico, pode ser avaliada pela seguinte expressão [4]:

$$q_{0F} = q_{01} \left[ \frac{(P_{Hn} + P_{Fn} + P_{Jn})}{P_{01} + P_{j1}} \right]^{m1} \quad (7)$$

Para atingir a elevação final da temperatura do óleo, o comportamento transitório pode ser expresso pela seguinte equação:

$$q_0 = q_{0F} \left( 1 - e^{-\frac{-\Delta t}{T_0}} \right) + q_{t0} e^{-\frac{-\Delta t}{T_0}} \quad (8)$$

onde:

- $q_{01}$  - elevação de temperatura do topo do óleo sobre o ambiente com carga linear e nominal[°C];
- $m_1$  - expoente que varia de 0,8 (transf. Com refrigeração natural) a 1,0 (transf. Com circulação forçada de óleo);
- $P_{Hn}$  - perdas por histerese para condição não senoidal;
- $P_{Fn}$  - perdas por correntes parasitas no núcleo para condição não-senoidal;
- $P_{jn}$  - perdas nos enrolamentos para condição não senoidal;

- $P_{01}$  -perdas no núcleo para condição senoidal ( $P_{H1}+P_{F1}$ );
- $P_{j1}$  -perdas nos enrolamentos para condição senoidal;
- $n$  -ordem harmônica;
- $T_0$  -constante de tempo de aquecimento do óleo;
- $q_{i0}$  -elevação da temperatura do óleo no início do intervalo  $\Delta t$ .

### Elevação da temperatura do enrolamento sobre o topo do óleo.

A elevação da temperatura final do enrolamento no seu ponto mais quente em relação a temperatura do óleo, pode ser avaliada pela seguinte expressão[4]:

$$q_{eF} = q_{e1} \left[ \frac{P_{jn}}{P_{j1}} \right]^{m2} \quad (9)$$

O comportamento transitório térmico pode ser calculado pela expressão (10) extraída de [ 4 ] :

$$q_e = q_{ef} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_e}} \right) + q_{ie} e^{-\frac{\Delta t}{T_e}} \quad (10)$$

onde:

- $q_{ef}$  -elevação de temperatura do enrolamento, após a sua estabilização;
- $T_e$  -constante de tempo térmica do enrolamento do transformador;
- $q_{ie}$  -elevação de temperatura do enrolamento no início do intervalo  $\Delta t$ ;
- $q_{e1}$  -elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre o topo do óleo, em carga linear e nominal ;

Deve-se salientar que uma análise completa sobre os aspectos teóricos/computacionais citados podem ser encontrados na ref. [8]. Nesta referência, apresenta-se um programa computacional desenvolvido e, a partir das características nominais de um transformador típico, vários estudos são realizados e os principais resultados discutidos.

### 3. Análise Experimental

As análises precedentes fundamentaram-se em formulações teóricas sobre o aquecimento de transformadores. Objetivando validar a metodologia apresentada, procede-se a seguir a discussão dos principais aspectos térmicos relacionados com os estudos experimentais conduzidos em um protótipo. Deve-se ressaltar que o transformador foi especialmente construído e testado sob condições semelhantes àquelas simuladas computacionalmente.

### Equipamentos utilizados

O transformador utilizado é de 15kVA, 220/220 V, trifásico, Y/Y, isolado com óleo mineral, e foi especialmente construído para permitir a medição da temperatura do óleo e dos enrolamentos. Desta forma, as bobinas foram montadas de maneira a permitir que sensores de temperatura fossem instalados na face externa dos enrolamentos e, conseqüentemente, possibilitar a determinação do perfil de temperatura da alta e baixa tensão em qualquer ponto ao longo da altura das bobinas. A medição da temperatura do óleo foi realizada com dois termopares do tipo J, instalados à 5cm do nível do óleo. A determinação da temperatura dos enrolamentos foi realizada com um sensor do tipo bulbo de resistência do tipo Pt - 100. Para as medições das correntes e tensões harmônicas, utilizou-se o “Harmonalyzer - HA 2000”.

### Execução dos Ensaios

A figura 1 mostra a montagem experimental e a característica da carga não linear, no caso, composta de um retificador a diodos de seis pulsos. Os principais parâmetros associados ao ensaio são também fornecidos na figura

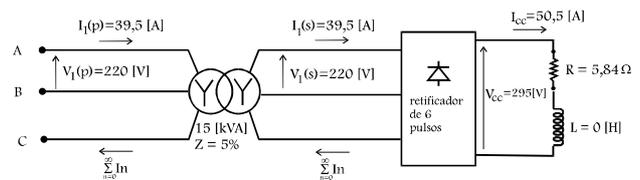


Figura 1 - Montagem Experimental - Carga Não Linear.

### 4. Resultados Experimentais

Uma vez realizada a montagem, com o transformador suprindo uma carga não linear, obteve-se as grandezas elétricas (potências ativa, reativa, aparente, fator de potência e etc.), e as formas de onda das tensões e/ou correntes no primário e secundário, e os seus respectivos conteúdos harmônicos. As figuras de 2 a 7 ilustram parte dos resultados elétricos obtidos. Muito embora apresenta-se somente o registro das formas de onda na fase A e em um determinado instante de tempo, as grandezas elétricas foram monitoradas nas três fases, e durante todo o tempo de execução do teste.

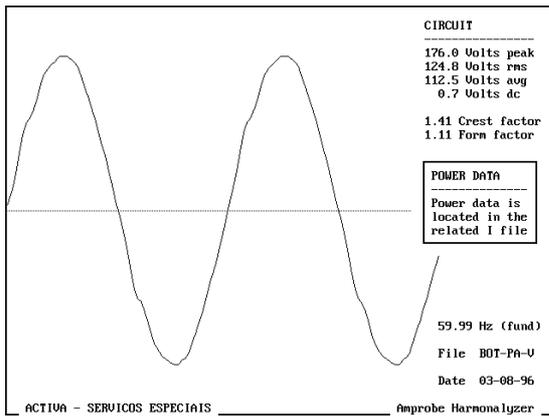


Figura 2 - Forma de onda da tensão fase-neutro no primário do transformador - Fase A

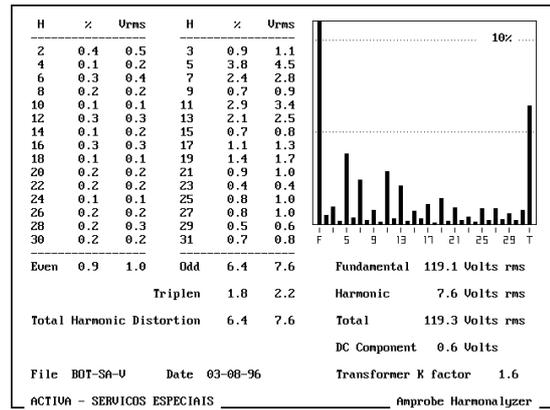


Figura 5 - Espectro harmônico da tensão no secundário do transformador - Fase A

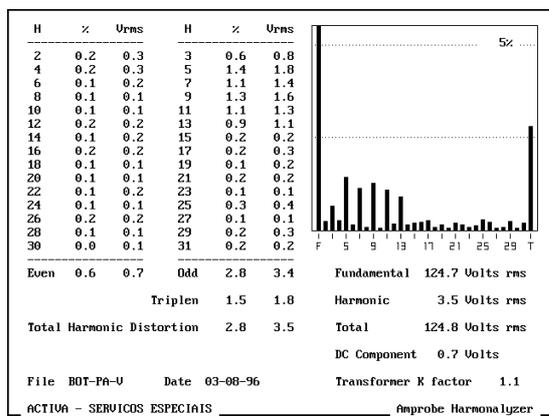


Figura 3 - Espectro harmônico da tensão no primário do transformador - Fase A

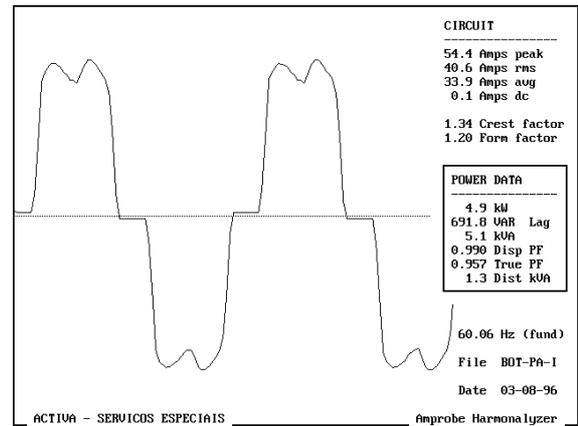


Figura 6 - Forma de onda da corrente de linha no primário do transformador - Fase A

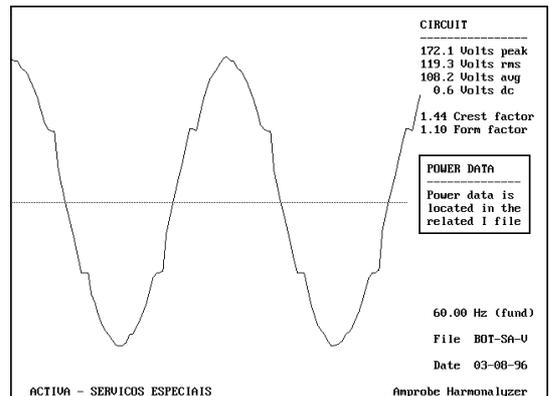


Figura 4 - Forma de onda da tensão fase-neutro no secundário do transformador - Fase A

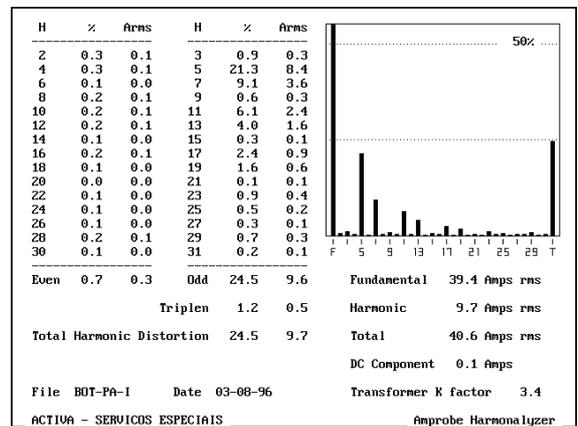


Figura 7 - Espectro harmônico da corrente de linha no primário do transformador - Fase A

As figuras evidenciam, uma vez mais, que as formas de onda das correntes e das tensões e os seus respectivos harmônicos são compatíveis com as previsões teóricas para um conversor de seis pulsos. Quanto aos níveis harmônicos individuais da corrente de fase, aquelas de ordem 5, 7, 11 e 13, são os mais significativos, destacando-se o quinto com uma distorção de aproximadamente de 22%. A distorção total de corrente foi de 25 %. Por outro

lado, pode-se constatar, que no primário a distorção harmônica total de tensão foi de 2,8%, destacando-se os harmônicos de ordem 5, 7, 11 e 13. Do lado secundário a distorção total de tensão foi de 6,4% e as ordens harmônicas individuais mais significativas são as mesmas citadas anteriormente. As temperaturas monitoradas pelos sensores correspondem aquelas até que o transformador atingisse o seu equilíbrio térmico. A temperatura ambiente foi medida segundo a norma brasileira [9]. Os resultados das medições térmicas estão fornecidos nas figuras 8, 9 e 10, as quais fornecem as elevações de temperatura do óleo e dos enrolamentos de AT e BT, em função do tempo de funcionamento e das quatro posições dos sensores de temperatura ao longo da altura das bobinas.

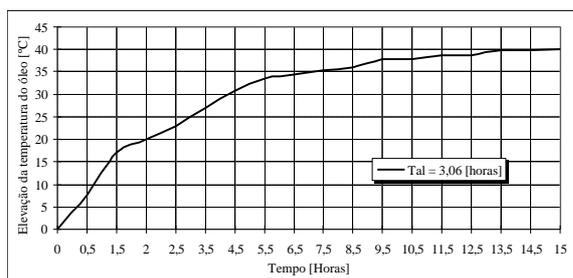


Figura 8 - Elevação da temperatura do óleo.

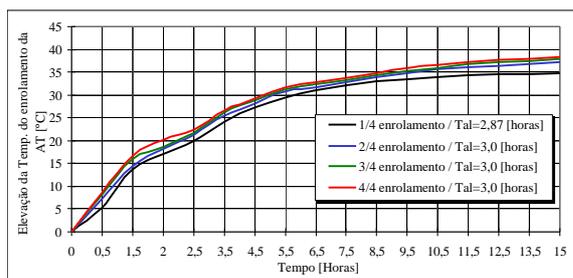


Figura 9 - Elevação da temperatura da bobina da AT.

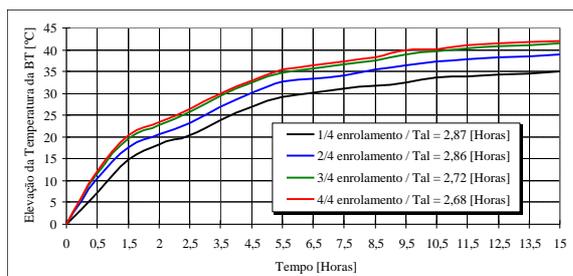


Figura 10 - Elevação da temperatura da bobina da BT.

As elevações de temperatura do óleo e dos enrolamentos da AT e BT no ponto mais quente atingiram em regime permanente, respectivamente, 40°C, 38,5°C e 42° C. A título de ilustração e comparação, mostra-se nas figuras 11 e 12, os resultados das medições de temperatura com carga não linear (apresentados anteriormente) e aqueles obtidos a partir do ensaio com carga linear. Deve-se mencionar que, o ensaio com carga linear, foi realizado com o transformador alimentando uma carga constituída de três resistências ligadas em

estrêla. Os valores das resistências foram tais que resultassem na corrente nominal do equipamento.

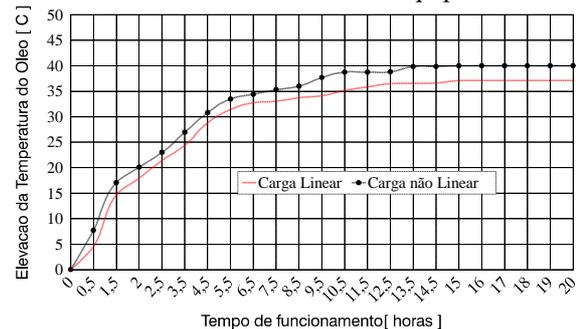


Figura 11 - Comparações entre as elevações da temp. do óleo.

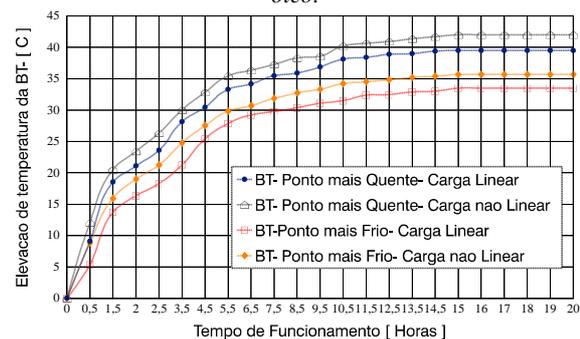


Figura 12 - Comparação das elevações da temp. da BT ntre o ponto mais quente e um ponto localizado a 1/4 do enrolamento.

A temperatura no ponto localizado à ¼ do enrolamento, com carga linear, foi de 33° C, enquanto que no ponto mais quente, para carga não linear, foi de 42° C. A tabela 1 compara os valores finais das elevações internas de temperatura do transformador, considerando o seu funcionamento com carregamentos linear e não linear. Adicionalmente, apresenta-se também os resultados atingidos através da metodologia clássica empregada para o ensaio de aquecimento, qual seja, o método do curto circuito. Este, como se vê, conduziu a menores temperaturas.

Ensaio	Ensaio com Carga Linear	Ensaio com Carga Não Linear (THD = 25%)	Ensaio de Curto Circuito (Mét. Tradicional)
Elevação da Temp. do Óleo [°C]	37	40	32
Elevação da Temp. do Enrol. da AT [°C]	35,7	38,5	31,7
Elevação da Temp. do Enrol. da BT [°C]	39,5	42	35

Tabela I - Comparação experimental entre os valores das temperaturas internas.

### Comparação entre os resultados experimentais e computacionais.

Com o objetivo de verificar a validade da modelagem desenvolvida, mostra-se nas figuras 13 e

14 os gráficos comparativos entre os valores calculados via simulação com aqueles obtidos experimentalmente. Cabe aqui ressaltar que os valores derivados da simulação foram obtidos através de um programa computacional desenvolvido com base nas equações anteriormente fornecidas.

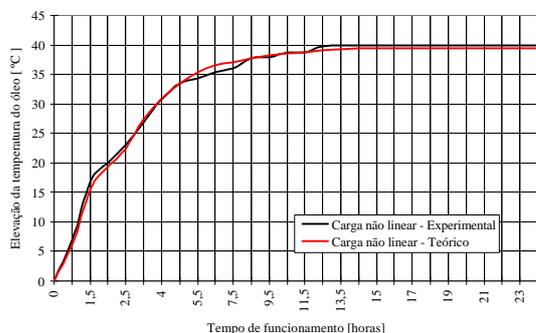


Figura 13 - Elevação da temp. do óleo acima do ambiente.

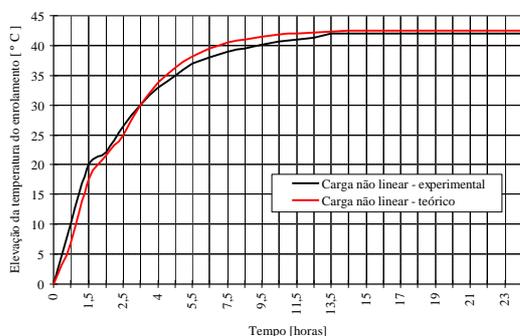


Figura 14 - Elevação da temp. no ponto mais quente da BT em relação a temp. ambiente.

Uma simples observação das figuras, permite concluir que há uma boa correlação entre os mesmos. Desta forma, pode-se afirmar que a análise experimental, comprovou que a modelagem matemática adotada atende os propósitos do estudo que se pretendeu desenvolver.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo principal a validação dos procedimentos computacionais fundamentados na modelagem clássica no domínio da frequência, com aplicação do princípio da superposição, para a análise do comportamento térmico de transformadores. Neste sentido procedeu-se à apresentação dos resultados de elevações de temperatura em diferentes 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, especialmente construído de forma a possibilitar a medição de temperatura nos mais diversos pontos do seu interior. A carga linear consistiu em um arranjo de resistências e para o carregamento não-linear

utilizou uma ponte conversora de seis pulsos. Os resultados computacionais e experimentais foram suficientemente próximos para se concluir que a metodologia teórica apresentada se mostra apropriada aos objetivos pretendidos. Esta afirmativa se fundamenta nos resultados obtidos para os mais diferentes pontos, do qual o denominado "ponto mais quente" não é exceção tanto no que tange a valores como também em relação a sua localização física. 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. Finalmente, cabe ressaltar que a metodologia clássica para ensaios de temperatura, qual seja, a do curto-circuito, conduziu à menores temperaturas. Isto, sem dúvida, poderá acarretar em estimativas otimistas para a vida útil de transformadores.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o mais profundo reconhecimento à empresa W.T.W. Transformadores - Fernandópolis -SP, na pessoa da Sra. Dalila e corpo técnico, pela doação do transformador utilizado nos ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência", NBR 5416, Dezembro, 1981.
- [2] Brandão Jr, A.F., "Aspectos Econômicos e Probabilísticos com Estudos de Instalação de Transformadores", tese de doutorado, EPUSP, São Paulo, 1980.
- [3] Ahn, Se Un., "Política de Carregamento Econômico dos Transformadores de Distribuição", Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1993
- [4] Emanuel E. Alexander and Wang Xiaoming., "Estimation of loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power apparatus and Systems, vol. PAS- 104, nº 3, March 1985.
- [5] Hwang M. S., Grady W.M., and Sanders H. W., "Distribution Transformer Winding Losses Due to Nonsinusoidal Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD-2, nº 1, January 1987.
- [6] Hwang M.S., Grady W. M., and Sanders H. W., "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, nº 3, July 1988.
- [7] Galli A.W., and Cox M.D., "Temperature Rise of Small Oil-Filled Distribution Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, nº 1, January, 1996
- [8] Delaiba, Antonio C., "Comportamento de Transformadores com Cargas Não Lineares. Uma Abordagem: Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos". Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1997.
- [9] ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, EB 91 e MB 128, "Especificação e Métodos de Ensaio para Transformadores para Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica"