



GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES SUPRINDO
CARGAS NÃO LINEARES UTILIZANDO MODELOS TÉRMICOS**

Marcelo Carvalho Alvares*

Milton Itsuo Samesima

Antonio Carlos Delaiba

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

RESUMO

Este artigo estuda os efeitos da distorção harmônica nas temperaturas de operação e na redução de vida útil de transformadores. Um novo modelo térmico, baseado em um circuito térmico de quinta ordem, é utilizado para estimar elevações de temperatura no transformador e os resultados são comparados com o modelo térmico clássico de primeira ordem, normalmente utilizado nas normas de carregamento existentes. Com o objetivo principal de validar as modelagens térmicas, ensaios térmicos são realizados a partir de um transformador monofásico refrigerado a óleo, especialmente construído para a realização de testes de temperatura, com sensores térmicos localizados em vários pontos do equipamento.

PALAVRAS-CHAVE

Aquecimento de transformadores, harmônicos, vida útil, modelos térmicos

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 estudar alternativas que contemplem o aproveitamento ótimo de equipamentos que fazem parte do sistema elétrico, seja a nível de geração, transmissão ou distribuição de energia. Dentre os equipamentos existentes no sistema elétrico, o transformador apresenta-se com grande destaque.

Dentro deste contexto, este trabalho se propõe a estudar o comportamento térmico de transformadores suprindo cargas não-lineares, utilizando-se modelos térmicos para determinar elevações de temperatura e perda de vida útil do equipamento. Como os transformadores são equipamentos que geralmente servem de interface entre o sistema de potência e a carga geradora de harmônicos, torna-se necessário um estudo cuidadoso destes equipamentos quando submetidos a níveis significativos de distorções harmônicas, tendo em vista que o principal efeito será a elevação das temperaturas de operação e a consequente redução de vida útil.

Dois modelos térmicos serão utilizados para se calcular as elevações de temperaturas do transformador: o modelo térmico de primeira ordem e o modelo térmico de quinta ordem. O primeiro é bastante utilizado e difundido, constituindo a base de análise para a maioria das normas de carregamento de transformadores (1-2). Por outro lado, o modelo térmico de quinta ordem ainda não é suficientemente difundido, pouco se sabendo sobre sua potencialidade e confiabilidade, aspectos estes que serão elucidados neste trabalho.

Objetivando-se validar as modelagens térmicas, testes experimentais foram realizados com um transformador monofásico refrigerado a óleo, especialmente projetado e construído para a execução de ensaios térmicos. Desta forma, vários sensores foram instalados em regiões estratégicas do equipamento, permitindo medições das temperaturas de operação do transformador e a comparação destes valores com aqueles obtidos pelos modelos térmicos.

* UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Situações de carregamento com cargas não lineares foram simuladas, analisando-se os efeitos da distorção harmônica da corrente e a influência das perdas suplementares (“Stray Load Loss”) na redução da vida útil do transformador.

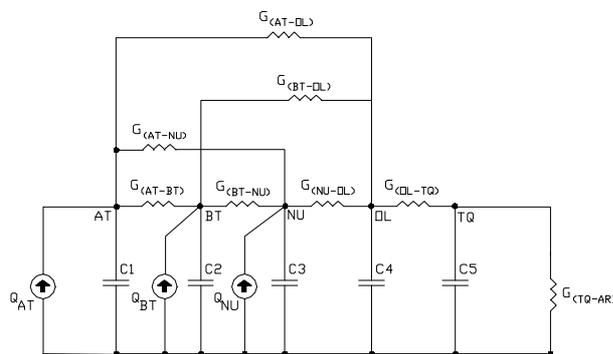
Destacam-se como principais contribuições deste artigo:

- Apresentação, análise e implementação do modelo térmico de quinta ordem, que ainda é pouco conhecido e difundido;
- Comparação entre os valores de temperatura obtidos por simulações computacionais com aqueles obtidos por medições em laboratório, avaliando-se assim a precisão e eficiência dos modelos térmicos;
- Avaliação do impacto das distorções harmônicas e das perdas suplementares sobre o aquecimento do transformador e sua expectativa de vida útil.

2.0 – O MODELO TÉRMICO DE QUINTA ORDEM

A Figura 1 mostra o modelo térmico de um transformador monofásico refrigerado a óleo, originalmente proposto por Lindsay (3), representado pelo circuito térmico de quinta ordem que fornece as equações térmicas do transformador. A transferência de calor entre as regiões que apresentam diferença de temperatura é representada pelas condutâncias térmicas entre os nós de cada parte específica do transformador. Observa-se ainda na Figura 1 as regiões onde há fontes próprias de geração de calor: os enrolamentos de alta e baixa tensão e o núcleo.

As expressões 1 e 2 a seguir representam as equações térmicas do modelo para as condições de regime transitório e regime permanente, respectivamente.



AT. Enrolamento de alta tensão OL. Óleo
 BT. Enrolamento de baixa tensão TQ. Tanque
 NU. Núcleo

FIGURA 1 – MODELO TÉRMICO DE QUINTA ORDEM

$$\mathbf{C} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{dt} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{Q} \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Q} \quad (2)$$

onde: \mathbf{T} = vetor elevação de temperatura para cada parte do transformador;

\mathbf{C} = matriz das capacitâncias térmicas;

\mathbf{G} = matriz das condutâncias térmicas;

\mathbf{Z} = matriz de impedâncias térmicas;

\mathbf{Q} = vetor da fonte de calor de cada parte do transformador

Para resolver a equação 1 é necessário, primeiramente, determinar os parâmetros do modelo. O vetor \mathbf{Q} é um dado de entrada, podendo ser representado em função da carga que o transformador está suprindo, enquanto o vetor \mathbf{T} representa os valores de elevação de temperatura em cada parte específica do transformador associados a uma determinada carga suprida. Desta forma, há duas variáveis a serem determinadas: as matrizes de capacitâncias térmicas (\mathbf{C}) e condutâncias térmicas (\mathbf{G}). A matriz \mathbf{C} é obtida multiplicando-se a massa de cada parte do transformador pelo calor específico do material correspondente. Os valores da matriz \mathbf{G} são obtidos experimentalmente através da realização de testes térmicos. Analisando-se a equação 2, observa-se que, a princípio, basta injetar um valor conhecido de fonte de calor em uma parte específica do transformador e medir a elevação de temperatura nas demais partes, determinando-se assim a matriz de impedâncias térmicas \mathbf{Z} e, através da inversão de \mathbf{Z} , obtendo-se então a matriz \mathbf{G} . Um aspecto importante a ser ressaltado é que os valores de condutâncias térmicas variam com a temperatura, sendo necessário determinar uma função que estabeleça esta variação.

Os valores de condutâncias térmicas dependem das características construtivas do transformador. Assim, antes de se detalhar o processo para a obtenção dos parâmetros do modelo, será apresentado primeiramente o transformador utilizado neste trabalho.

2.1 – Características básicas do transformador

Para a realização de ensaios experimentais e análise das modelagens térmicas utilizou-se um transformador monofásico refrigerado a óleo, com resfriamento do tipo ONAN, potência nominal de 5 kVA e tensão nominal igual a 220/110V. A Figura 2 mostra a configuração geométrica do equipamento e a disposição dos sensores térmicos nas principais regiões do mesmo. Os enrolamentos de alta e baixa tensão são concêntricos entre si, sendo a baixa tensão o enrolamento mais interno.

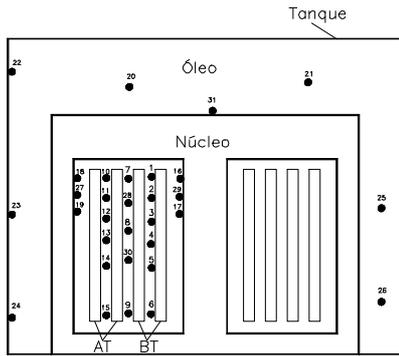


FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES NO TRANSFORMADOR

A Tabela 1 a seguir apresenta os principais parâmetros do transformador, obtidos através de testes experimentais preliminares. Estes valores serão úteis na simulação computacional dos modelos térmicos.

TABELA 1
PRINCIPAIS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

Resistência percentual	4,8%
Perdas nominais a vazio	20 W
Perdas nominais nos enrolamentos	240 W
Elevação da temperatura do topo do óleo sobre a ambiente sob carga nominal	27,9 °C
Elevação da temperatura do ponto mais quente sobre a do topo do óleo sob carga nominal	17,5 °C
Constante de tempo de aquecimento do óleo	4 hs.
Constante de tempo de aquecimento do enrolamento	0,125 hs.

2.2 – Obtenção dos parâmetros do modelo térmico de quinta ordem

2.2.1 – Matriz G

A equação 3 a seguir mostra a matriz de impedâncias térmicas obtidas a partir do circuito da Figura 1.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{G}^{-1} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{AT} & \text{BT} & \text{NU} & \text{OL} & \text{TQ} \\ \begin{bmatrix} Z1 & Z2 & Z3 & Z4 & Z5 \\ Z2 & Z6 & Z7 & Z4 & Z5 \\ Z3 & Z7 & Z8 & Z4 & Z5 \\ Z4 & Z4 & Z4 & Z4 & Z5 \\ Z5 & Z5 & Z5 & Z5 & Z5 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \text{AT} \\ \text{BT} \\ \text{NU} \\ \text{OL} \\ \text{TQ} \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

Os elementos da diagonal da matriz \mathbf{Z} representam as impedâncias próprias de cada parte do transformador e os demais elementos representam as impedâncias de transferência entre as regiões que apresentam gradientes de temperatura. A primeira e a segunda coluna da matriz são obtidas energizando-se os enrolamentos de alta e baixa tensão (as fontes de calor Q_{AT} e Q_{BT} , respectivamente). Isto é feito injetando-se corrente contínua em cada um dos enrolamentos para diferentes níveis de perdas. O teste térmico para determinar a terceira coluna não é realizado, devido à dificuldade de se injetar uma perda somente no núcleo (Q_{NU}) sem que haja influência das perdas nos enrolamentos. Assim, realiza-se um ensaio a vazio com tensão nominal para medir a elevação de temperatura no núcleo nestas condições. A elevação de temperatura do núcleo para outros níveis de perdas pode ser obtida, de acordo com a referência (4), pela seguinte relação:

$$T_{NU} = T_{NUN}[Q_{NU}/Q_{3NUN}]^{0,8} \quad (4)$$

onde: T_{NUN} = elevação de temperatura do núcleo para as perdas nominais a vazio Q_{NUN}

A Tabela 2 apresenta as expressões de elevação de temperatura obtidas dos testes térmicos realizados com o transformador, determinadas em função das fontes de calor dos enrolamentos e do núcleo.

TABELA 2
ELEVAÇÕES DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DAS FONTES DE CALOR DO TRANSFORMADOR

Alta tensão	Baixa tensão	Núcleo
$T_{AT} = 0,59. Q_{AT}^{0,8}$ $T_{BT} = 0,44. Q_{AT}^{0,8}$ $T_{NU} = 0,36. Q_{AT}^{0,8}$ $T_{OL} = 0,34. Q_{AT}^{0,8}$ $T_{TQ} = 0,30. Q_{AT}^{0,8}$	$T_{AT} = 0,40. Q_{BT}^{0,8}$ $T_{BT} = 0,67. Q_{BT}^{0,8}$ $T_{NU} = 0,36. Q_{BT}^{0,8}$ $T_{OL} = 0,19. Q_{BT}^{0,8}$ $T_{TQ} = 0,10. Q_{BT}^{0,8}$	$T_{NU} = 4,6x \left(\frac{Q_{NU}}{20} \right)^{0,8}$

Recorrendo-se a equação 2, verifica-se que para se obter valores de G basta conhecer os valores de elevação de temperatura T correspondente ao valor das perdas Q . Como o calor é transferido principalmente por convecção do óleo, pode-se estabelecer uma dependência entre as condutâncias térmicas e a elevação da temperatura do óleo T_{OL} , representando a variação deste parâmetro com a temperatura (3). Desta forma, necessita-se do conhecimento prévio da elevação de temperatura do óleo para diferentes níveis de perdas. Baseado em valores medidos experimentalmente, a expressão seguinte apresenta a elevação da temperatura do óleo em função das perdas totais do transformador:

$$T_{OL} = 0,32 x Q_T^{0,8} \quad (5)$$

onde: $Q_T = Q_{AT} + Q_{BT} + Q_{NU}$

Portanto, para qualquer valor de T_{OL} é conhecido o valor das perdas correspondentes. Utilizando-se este valor de perdas nas expressões da Tabela 2, a equação (3) pode ser resolvida e os valores de condutâncias térmicas para diferentes valores de T_{OL} são determinados, obtendo-se uma função que estabelece a correlação entre estas duas variáveis. Seguindo esta metodologia, obtém-se experimentalmente as seguintes expressões de condutâncias térmicas para o transformador ensaiado:

$$G_{AT-BT} = 2,71 + 0,053.T_{OL} \quad (6)$$

$$G_{BT-NU} = 1,04 + 0,028.T_{OL} \quad (7)$$

$$G_{NU-OL} = 21,26 + 0,563.T_{OL} \quad (8)$$

$$G_{AT-NU} = 1,61 + 0,043.T_{OL} \quad (9)$$

$$G_{BT-OL} = 3,11 + 0,060.T_{OL} \quad (10)$$

$$G_{AT-OL} = 4,80 + 0,091.T_{OL} \quad (11)$$

$$G_{OL-TQ} = 52,18 + 0,85.T_{OL} \quad (12)$$

$$G_{TQ-AR} = 6,60 + 0,135.T_{OL} \quad (13)$$

2.2.2 – Matriz C

A matriz de capacitâncias térmicas é independente da temperatura e, desde que se tenha os valores da massa de cada parte do transformador, a sua obtenção se realiza com razoável precisão. Utilizando-se valores típicos de calor específico para os materiais associados às principais regiões do transformador, encontra-se a matriz C:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,428 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,342 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,95 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,55 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Uma vez conhecidos todos os parâmetros do modelo, a equação 1 pode ser reescrita na forma de equação de estado, conforme mostrado na expressão seguinte, de forma que esteja pronta para a simulação computacional através da utilização de métodos de integração numérica. Conhecendo-se os valores nominais das perdas, a equação diferencial do modelo pode ser resolvida para qualquer valor de carregamento do transformador.

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = -\mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} T_{AT} \\ T_{BT} \\ T_{NU} \\ T_{OL} \\ T_{TQ} \end{bmatrix} + \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} Q_{ATN}k^2 \\ Q_{BTN}k^2 \\ Q_{NUN} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde: Q_{ATN} , Q_{BTN} , Q_{NUN} = perda nominal no enrolamento da alta tensão, perda nominal no enrolamento da baixa tensão e perda nominal no núcleo, respectivamente;

k = carga do transformador, em pu;

$\mathbf{G} =$

$$\begin{bmatrix} G_{AT-BT} + & -G_{AT-BT} & -G_{AT-NU} & -G_{AT-OL} & 0 \\ G_{AT-NU} + G_{AT-OL} & G_{AT-BT} + & -G_{BT-NU} & -G_{BT-OL} & 0 \\ -G_{AT-BT} & G_{AT-NU} + G_{AT-OL} & G_{BT-NU} + & -G_{NU-OL} & 0 \\ -G_{AT-NU} & -G_{BT-NU} & G_{BT-OL} + G_{AT-NU} & G_{NU-OL} + G_{BT-OL} & 0 \\ -G_{AT-OL} & -G_{BT-OL} & -G_{NU-OL} & +G_{AT-OL} + G_{OL-TQ} & -G_{OL-TQ} \\ 0 & 0 & 0 & -G_{OL-TQ} & G_{OL-TQ} + G_{TQ-AR} \end{bmatrix}$$

3.0 – ANÁLISE TÉRMICA DO TRANSFORMADOR SUPRINDO CARGAS NÃO-LINEARES

Os modelos térmicos utilizados para calcular elevações de temperatura em transformadores suprimindo cargas não-lineares devem levar em conta o acréscimo das perdas devido à presença de distorções harmônicas. Sendo assim, para simular a equação 15 do modelo térmico de quinta ordem, o vetor \mathbf{Q} , que representa as perdas do transformador, deve ser escrito da seguinte forma:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{AT-JN}F_J(n) + Q_{AT-ECN}F_{ECN}(n) \\ Q_{BT-JN}F_J(n) + Q_{BT-ECN}F_{ECN}(n) \\ Q_{NUN}F_O(n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde: Q_{AT-JN} ; Q_{BT-JN} = perdas nominais por efeito Joule nos enrolamentos de alta e baixa tensão, respectivamente

Q_{AT-ECN} ; Q_{BT-ECN} = perdas nominais por correntes parasitas nos enrolamentos de alta e baixa tensão, respectivamente.

As funções $F_J(n)$, $F_{EC}(n)$ e $F_O(n)$ dependem do espectro harmônico causado pela carga não-linear. $F_J(n)$ e $F_{EC}(n)$ representam, respectivamente, o acréscimo das perdas por efeito Joule e das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos causado pelas distorções harmônicas de corrente, enquanto a função $F_O(n)$ representa o acréscimo das perdas no núcleo causado pelas distorções harmônicas de tensão. Estas funções são definidas nas referências (5-6).

A equação 5, que estabelece a relação entre a elevação de temperatura do óleo e as perdas totais do transformador, deve ser reescrita de tal forma que o acréscimo nas perdas causado pelas distorções harmônicas seja levado em consideração:

$$T_{OL} = 0,32x [Q_{JN}x F_J(n) + Q_{ECN}x F_{ECN}(n) + Q_{ON}x F_O(n)] \quad (20)$$

3.1 – Simulações computacionais

A Tabela 3 mostra a influência da distorção harmônica de corrente (DHI) no aquecimento do transformador.

Os valores de temperatura são obtidos através da simulação dos modelos térmicos de 1ª e 5ª ordem. A vida útil foi calculada através da equação proposta na referência (1), considerado-se uma temperatura ambiente igual a 30°C. Analisando os dados da Tabela verifica-se que os modelos fornecem resultados similares, observando-se uma maior discrepância para valores maiores de distorção harmônica (níveis mais elevados de perdas no transformador). Observa-se ainda nesta Tabela a influência da distorção harmônica da corrente na vida útil do transformador. Para um DHI de 20% (correspondente a um acréscimo nas perdas por efeito Joule de 4%) já se tem uma redução de 15% na vida útil do equipamento (considerando a operação contínua ao longo do período diário).

TABELA 3
INFLUÊNCIA DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE NO AQUECIMENTO DO TRANSFORMADOR

DHI [%]	Temperatura do ponto mais quente (°C)		Vida útil (pu)	
	Mod. de 1ª ordem	Mod. de 5ª ordem	Mod. de 1ª ordem	Mod. de 5ª ordem
0	75,3	75,5	1,00	1,00
10	75,7	75,8	0,95	0,96
20	76,6	76,7	0,85	0,86
30	78,2	78,2	0,70	0,72
40	80,4	80,3	0,54	0,56
50	83,2	82,8	0,38	0,41
60	86,6	85,8	0,26	0,29
70	90,5	89,2	0,17	0,20
80	94,9	92,9	0,10	0,13

A Tabela 4 mostra a influência das perdas suplementares (P_{EC}) no aquecimento do transformador. O valor destas perdas é estabelecido como uma porcentagem das perdas totais em carga (P_C). O acréscimo das perdas suplementares devido à presença de distorções harmônicas, além de ser diretamente proporcional ao quadrado da corrente harmônica (como acontece com as perdas por efeito Joule), varia também com o quadrado da ordem harmônica, fazendo com que as perdas totais em carga possam ter seu valor substancialmente aumentado, elevando as temperaturas internas de operação. A análise é feita para duas cargas não-lineares, com seus valores típicos de distorção harmônica. Observa-se pela Tabela 4 que uma maior porcentagem de perdas suplementares em relação às perdas totais em carga significa temperaturas de operação maiores. Este efeito será mais crítico à medida que se aumenta a distorção harmônica de corrente da carga. Assim, para uma carga cuja distorção harmônica corresponde a 77%, verifica-se que a cada 1% de P_{EC} tem-se um aumento na

temperatura do ponto mais quente em torno de 3 a 3,5°C, o que corresponde a uma redução de quase pela metade na vida útil do transformador. Portanto, mesmo quando o transformador possui um baixo valor de perdas suplementares, deve-se ter cuidado ao desprezar esta componente nas análises térmicas, principalmente quando se alimenta cargas com alto conteúdo harmônico. Comparando-se os resultados obtidos pelos dois modelos, verifica-se novamente que as temperaturas calculadas apresentam maiores diferenças para níveis mais elevados de perdas.

TABELA 4
INFLUÊNCIA DAS PERDAS SUPLEMENTARES NO AQUECIMENTO DO TRANSFORMADOR

P_{ECN}/P_{CN}	Temperatura do ponto mais quente acima da temperatura ambiente (°C)			
	DHI=36%		DHI=77%	
	Mod. de 1ª ordem	Mod. de 5ª ordem	Mod. de 1ª ordem	Mod. de 5ª ordem
0,00	49,51	49,40	63,49	61,69
0,01	49,89	49,86	67,21	64,92
0,02	50,45	50,32	70,88	68,00
0,03	50,91	50,77	74,50	70,96
0,04	51,38	51,22	78,07	73,80
0,05	51,84	51,67	81,60	76,52

3.2 – Validações experimentais

A realização de testes experimentais permite avaliar a precisão e confiabilidade dos modelos térmicos, comparando os valores de temperatura obtidos por simulação com aqueles obtidos por medições em laboratório. A título de ilustração, a Tabela 5 apresenta valores de temperaturas obtidos para diferentes níveis de carregamento, considerando-se formas de ondas de tensão e corrente senoidais. Os valores evidenciam a precisão dos modelos para esta condição de carregamento.

TABELA 5
VALIDAÇÃO DOS MODELOS TÉRMICOS PARA A CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO SENOIDAL

Carga (%)	Temperatura do topo do óleo sobre a ambiente (°C)			Temperatura do ponto mais quente sobre a ambiente (°C)		
	Medi-do	Mod. 1ª ordem	Mod. 5ª ordem	Medi-do	Mod. 1ª ordem	Mod. 5ª ordem
37,0	6,8	6,7	7,8	12,8	12,7	11,1
54,0	10,9	10,8	12,4	20,0	19,8	18,7
68,0	15,3	15,1	16,9	27,2	26,7	26,2
88,5	23,0	22,8	24,2	38,3	38,2	38,4
100,0	27,9	27,9	28,5	45,4	45,4	45,5

Com a finalidade de verificar a precisão dos modelos para a condição de carregamento não-senoidal, valores de elevação de temperatura foram medidos com o transformador alimentando uma determinada carga não-linear. As características desta carga são mostradas na Tabela 6. A tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as condições de carregamento linear e não-linear. Para as duas situações de carregamento, a corrente fundamental suprida pelo transformador é a mesma. Verifica-se, para esta carga particular analisada, um acréscimo de aproximadamente 4°C na temperatura do ponto mais quente do transformador causado pelo conteúdo harmônico da carga, provocando, por sua vez, uma redução de aproximadamente 40% na expectativa de vida útil do equipamento. Comparando-se os valores obtidos por simulação com aqueles obtidos experimentalmente, pode-se concluir que os valores de temperatura calculados pelos modelos são confiáveis e precisos.

TABELA 6
CARACTERÍSTICAS DA CARGA NÃO-LINEAR

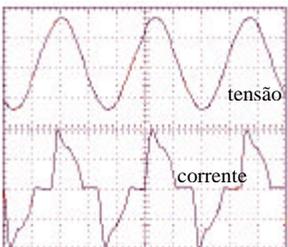
Tensão eficaz	213 V (0.97 pu)
Corrente eficaz	20,6 A (0.90 pu)
Corrente fundamental	18,8 A (0.83 pu)
Distorção Harmônica de Corrente	41,2 %
Distorção Harmônica de Tensão	2,4%
Formas de onda de Tensão e Corrente	

TABELA 7
VALIDAÇÃO DOS MODELOS PARA A
CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO NÃO-LINEAR

	Temperatura do ponto mais quente (°C) *			Expectativa de vida útil (pu)	
	Carga Linear	Carga Não-Linear	Acréscimo	Carga Linear	Carga Não-linear
Valores Experimentais	70,1	74,1	4,0	1,9	1,2
Mod. de 1ª ordem	69,8	73,7	3,9	2,0	1,2
Mod. de 5ª ordem	69,9	73,9	4,0	2,0	1,2

* Temperatura ambiente = 35°C

4.0 - CONCLUSÕES

O modelo térmico de quinta ordem mostrou-se confiável e consistente no cálculo das temperaturas do transformador. A precisão deste modelo depende da precisão na realização dos testes térmicos para a determinação das condutâncias térmicas. Observou-se que para níveis maiores de perdas, o modelo térmico de quinta ordem possui a tendência de fornecer temperaturas menores que o modelo de primeira ordem. Isto significa que as condutâncias térmicas determinadas experimentalmente não são inteiramente consistentes para níveis mais elevados de perdas, reconhecendo-se a dificuldade para a realização dos testes nestas condições. Devido à dificuldade para a obtenção da matriz **G**, a utilização do modelo de quinta ordem se justifica apenas quando o modelo de primeira ordem não consegue descrever com exatidão os processos de transferência de calor nas estruturas internas do transformador.

A análise do carregamento não-linear demonstrou a grande influência da distorção harmônica da corrente e das perdas suplementares no aquecimento do transformador. Com relação às perdas suplementares, verificou-se que seu efeito será tanto mais crítico quanto maior for o nível de distorção harmônica da corrente suprida pelo transformador, ratificando a importância em se considerar esta parcela de perda nas análises térmicas.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) IEEE. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers. IEEE Std C57.91-1995.
- (2) ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aplicação de cargas em transformadores de potência - NBR 5416. Dezembro/1981.
- (3) J. F. LINDSAY. Temperature rise of an oil-filled transformer with varying load. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no.9, Setembro/1984.
- (4) HWANG M. D., GRADY W. M., SANDERS H. W. Calculation of winding temperatures in distribution transformers subjected to harmonic currents. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no.3, Julho/1988.
- (5) A. E. EMANUEL, X. WANG. Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no.3, Março/1985.
- (6) IEEE-PES TRANSFORMER COMMITTEE. Recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal load currents - C57.110. 1986.