

**Análise do Aquecimento de Transformadores Suprindo Carga Não-Linear –  
Análise Comparativa entre Teoria e Prática****Analysis of Transformer Heating Suppressing Non-Linear Load - Comparative  
Analysis between Theory and Practice**

DOI:10.34115/basrv4n5-037

Recebimento dos originais: 04/09/2020

Aceitação para publicação: 30/10/2020

**Isaias Santos Silvério Lino**

Graduação em Engenharia Elétrica

Instituição: ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Endereço: Rua Júlio Carmo, Cidade Nova

Rio de Janeiro - RJ, 20211-160

E-mail: isaiassslino@yahoo.com.br

**Renata Camilo Ramalho**

Graduação em Engenharia Elétrica

Instituição: Siemens Energy

Endereço: R. Gerson Benedito de Assis, 2-420 - Distrito Industrial, Jundiaí - SP, 13213-083

E-mail: renataramalho19@yahoo.com.br

**Alex Narimatsu Bernardi**

Graduação em Engenharia Elétrica

Instituição: Hitachi ABB Power Grids

Endereço: Av. Monteiro Lobato, 3411 - São Roque, Guarulhos - SP

E-mail: alexnarimatsu@yahoo.com

**Lucas Lugatto Emerencio**

Mestrado em Engenharia Elétrica

Instituição: Akka Technologies

Endereço: Uhlandstraße 28, 10719 Berlin, Alemanha

E-mail: lucaslugatto@gmail.com

**Marcel Fernando da Costa Parentoni**

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Itajubá

Endereço: Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, 37500-903

E-mail: parentoni@unifei.edu.br

**Fernando Nunes Belchior**

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Faculdade de Ciências e Tecnologia - R. Mucuri, s/n - St. Conde dos Arcos, Aparecida de  
Goiânia - GO, 74968-755

E-mail: fnbelchior@ufg.br

**RESUMO**

O objetivo desse artigo é mostrar, de forma prática, o desenvolvimento de cálculos relacionados às perdas elétricas em transformadores devido à circulação de correntes distorcidas, fazendo o uso da plataforma LabVIEW. Para tanto, são comparados resultados de 2 transformadores a seco (5kVA e 10kVA) e 1 transformador a óleo (10kVA), alimentados com carga linear e carga não-linear. As análises são realizadas a partir das formulações especificadas na norma IEEE C57.110–2008, a qual permite a obtenção do valor da corrente máxima suportada pelo transformador, sem que sua vida útil seja afetada. Em seguida é realizada uma avaliação do acréscimo de perdas elétricas nos transformadores, através da análise do acréscimo de perdas obtido experimentalmente, para a mesma condição de distorção harmônica, através da medição de uma grandeza física real e responsável direta pela vida útil do próprio transformador: a temperatura.

**Palavras-chave:** Distorção Harmônica, Perdas, Temperatura, Transformadores.

**ABSTRACT**

The objective of this article is to show, in a practical way, the development of calculations related to electrical losses in transformers due to the circulation of distorted currents, making use of the LabVIEW platform. For this purpose, results of 2 dry transformers (5kVA and 10kVA) and 1 oil transformer (10kVA) are compared, fed with linear and non-linear load. The analyses are carried out from the formulations specified in the IEEE C57.110-2008 standard, which allows obtaining the maximum current value supported by the transformer, without its useful life being affected. Then an evaluation is made of the increase of electrical losses in the transformers, through the analysis of the increase of losses obtained experimentally, for the same condition of harmonic distortion, through the measurement of a real physical magnitude and directly responsible for the useful life of the transformer itself: the temperature.

**Keywords:** Harmonic distortion, Losses, Temperature, Transformers.

**1 INTRODUÇÃO**

Dentre os itens que identificam a energia elétrica com perda de qualidade, as distorções harmônicas se mostram bem importantes. Em se tratando de transformadores alimentando cargas não-lineares, verifica-se uma diminuição da vida útil dos mesmos, devido à circulação de correntes distorcidas nos seus enrolamentos, provocando um aquecimento superior ao esperado [1].

A norma IEEE C57.110–2008 traz as formulações utilizadas para se chegar a valores máximos de correntes harmônicas as quais os transformadores (a seco e à óleo) devem suprir, de forma que a vida útil dos mesmos seja mantida tal como estabelecida pelo fabricante dos mesmos. Estas formulações são baseadas no espectro harmônico das tensões e correntes monitoradas [2, 3].

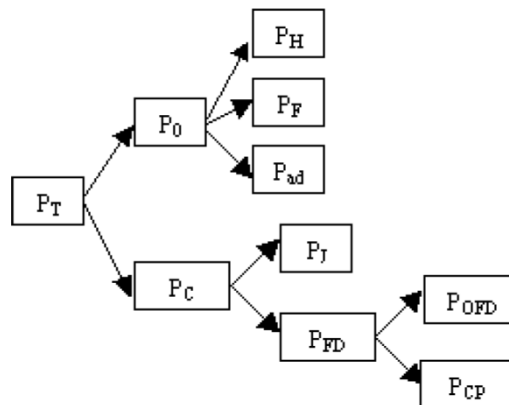
Diante deste contexto, o objetivo deste artigo é a comparação do aumento de perdas em transformadores a seco (5kVA e 10kVA) e a óleo (10kVA), através de cálculos oriundos da norma supracitada e monitoramento de temperatura em diferentes pontos destes transformadores. Para os 3 transformadores a comparação é realizada com estes alimentando carga linear (resistiva) e carga não-linear (retificador trifásico de 6 pulsos não-controlado, com carga RL).

Para a elaboração deste estudo foi utilizada a plataforma computacional LabVIEW e placas de aquisição de dados de tensão e corrente e também de temperatura, em diferentes pontos dos três transformadores.

## 2 PERDAS EM TRANSFORMADORES

Embora o transformador seja um equipamento que apresenta elevado rendimento, não se podem desprezar suas perdas, uma vez que estas são responsáveis pelo seu aquecimento, tornando-se fator limitador da sua capacidade de transferência de energia. Estas perdas podem ser divididas como mostra a Fig. 1 [4].

Fig. 1. Divisão das Perdas do Transformador.



Da Fig. 1 pode-se observar que as perdas totais do transformador ( $P_T$ ) são divididas em perdas a vazio ( $P_0$ ) e perdas em carga ( $P_C$ ).

As perdas a vazio, ou perdas no ferro são subdivididas em perdas por histerese magnética ( $P_H$ ), em perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo ( $P_F$ ) e em perdas adicionais ( $P_{ad}$ ), que são as perdas suplementares no ferro e devidos às dissipações em algumas partes construtivas do transformador. As equações que definem as perdas a vazio são indicadas em (1), (2) e (3) conforme [2].

$$P_{H-0} = K_H B_{\max}^{\sigma} f \quad (1)$$

Onde  $P_{H-0}$  são as perdas pelo efeito de histerese sem a presença de distorção, em watts por quilograma de núcleo;  $K_H$  é um coeficiente que depende do tipo de material usado no núcleo;  $B$  é a indução (valor máximo) no núcleo em  $\text{Wb/m}^2$ ;  $\sigma$  é o coeficiente de Steimmetz; e  $f$  é a frequência em Hz.

$$P_{F-0} = 2,2 f^2 B^2 d^2 10^{-3} \quad (2)$$

Onde  $P_{F-0}$  são as perdas por correntes parasitas sem a presença de distorção, em watts por quilograma de núcleo;  $f$  é a frequência em Hz;  $B$  é a indução máxima no núcleo em  $\text{Wb/m}^2$ ; e  $d$  é a espessura da chapa em milímetros. Finalmente, as perdas adicionais são:

$$P_{ad-0} = 15 \text{ a } 20\% \text{ de } (P_{H-0} + P_{F-0}) \quad (3)$$

Sendo assim as perdas a vazio sem a presença de distorção, está representada por (4).

$$P_{0-0} = P_{H-0} + P_{F-0} + P_{ad-0} \quad (4)$$

Por sua vez, as perdas em carga sem a presença de distorção ( $P_{C-0}$ ) podem ser subdivididas em perdas por efeito Joule ( $P_{J-0}$ ) nos enrolamentos primário e secundário, em virtude de resistência elétrica dos enrolamentos, e em perdas adicionais, como consequência do fluxo de dispersão ( $P_{FD-0}$ ). As perdas por fluxo de dispersão podem ser divididas em perdas por fluxo de dispersão nos enrolamentos ( $P_{CP-0}$ ) e perdas por fluxo de dispersão nos outros componentes ( $P_{OFD-0}$ ). Assim, as perdas em carga (sem distorção) podem ser definidas por (5):

$$P_{C-0} = P_{J-0} + P_{CP-0} + P_{OFD-0} \quad (5)$$

Observa-se que o valor da frequência altera significativamente algumas das perdas do transformador, portanto faz-se necessário um levantamento dos efeitos das distorções harmônicas de tensão e corrente nas mesmas.

A seguir é feita uma análise do efeito das perdas para transformador a seco e a óleo, de acordo com [2].

## 2.1 EFEITOS DA DISTORÇÃO EM TRANSFORMADORES A SECO

As perdas em transformadores são divididas em dois grupos: perdas a vazio, perdas em carga e perdas adicionais, referentes ao fluxo de dispersão, ao efeito pelicular e às correntes parasitas nos enrolamentos [4-7].

As perdas totais adicionais com carga sob condições nominais em Watts podem ser definidas por (6):

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K * [I_{1-R}^2 * R_1 + I_{2-R}^2 * R_2] \quad (6)$$

Sendo:

$P_{LL-R}$  as perdas com carga nominal;  $K$  uma constante que depende do número de fases do transformador (para 3 fases,  $K=1,5$ );  $I_{1-R}$  a corrente fundamental no enrolamento primário;  $I_{2-R}$  a corrente fundamental no enrolamento secundário;  $R_1$  a resistência dc medida entre os enrolamentos primários;  $R_2$  a resistência dc medida entre os enrolamentos secundários.

A equação (7) mostra as perdas pela circulação de correntes parasitas sob condições nominais em Watts:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} * 0,67 \quad (7)$$

A diferença entre  $P_{TSL-R}$  e  $P_{EC-R}$  revela o valor de outras perdas adicionais ( $P_{OSL-R}$ ) em Watts por dispersão do fluxo magnético que ocorrem no núcleo, nos *clamps* e nas demais partes estruturais do transformador e provocam o aquecimento do equipamento:

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad (8)$$

As perdas relacionadas à circulação de correntes parasitas são proporcionais ao valor quadrado da corrente de carga e à ordem harmônica. Essas perdas em Watts, fora de condições nominais, são mostradas em (9):

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 * h^2 \quad (9)$$

Sendo:

$I_h$  a corrente eficaz referente ao harmônico de ordem “ $h$ ”;  $I_R$  a corrente fundamental eficaz sob frequência e carga nominais;  $h$  a ordem harmônica;  $h_{\max}$  o maior harmônico.

A partir das componentes harmônicas é possível, através de (10), chegar ao fator de perda harmônico ( $F_{HL}$ ) devido às correntes parasitas nos enrolamentos:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2 * h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I}\right]^2} \quad (10)$$

Onde  $I$  é o valor rms da corrente fundamental.

Para se chegar às perdas em carga, é necessário conhecer a corrente em pu para valores nominais:

$$I_{p.u} = \sqrt{\sum [I_T^{th}]^2} \quad (11)$$

A partir do valor da corrente em pu, do  $F_{HL}$  e das perdas pela circulação de correntes parasitas em condições nominais e em pu ( $P_{EC-R(pu)}$ ), obtém-se o valor das perdas em carga em p.u ( $P_{LL-pu}$ ):

$$P_{LL(pu)} = I_{pu}^2 * (1 + F_{HL} * P_{EC-R(pu)}) \quad (12)$$

Para condições nominais e em pu, convencionando que as demais perdas por dispersão em condições nominais e em pu ( $P_{OSL-R(pu)}$ ) são desprezíveis, vem:

$$P_{LL-R(pu)} = 1 + P_{EC-R(pu)} + P_{OSL-R(pu)} \quad (13)$$

Através de (14) pode-se encontrar o valor da corrente de carga máxima não-senoidal permissível sob condições nominais que deve circular no transformador em pu:

$$I_{max(pu)} = \sqrt{\frac{P_{LL-R(pu)}}{1 + (F_{HL} * P_{EC-R(pu)})}} \quad (14)$$

## 2.2 EFEITOS DA DISTORÇÃO EM TRANSFORMADORES A ÓLEO

Os cálculos para transformadores a óleo são semelhantes aos dos transformadores do tipo seco, exceto pelo fato de que todas as perdas adicionais devem ser consideradas, conforme indicado pela norma IEEE C57.91 para a classe de resfriamento tipo ONAN.

Deve-se calcular o fator de perda harmônico para outras perdas adicionais ( $F_{HL-OS}$ ):

$$F_{HL-OS} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_T^h]^2 * h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_T^h]^2} \quad (15)$$

O acréscimo denotado topo de óleo em ( $^{\circ}C$ ) é proporcional ao total de perdas elevado ao expoente 0,8, como mostrado em (16):

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} * \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} \quad (16)$$

Sendo:

$\theta_{TO}$  o acréscimo topo de óleo além da temperatura ambiente;  $\theta_{TO-R}$  o acréscimo topo de óleo além da temperatura ambiente em condições nominais;  $P_{NL}$  as perdas em vazio.

O acréscimo do ponto mais quente do enrolamento ( $^{\circ}\text{C}$ ) também é proporcional às perdas em carga elevadas ao expoente 0,8, conforme mostrado em (17):

$$\theta_g = \theta_{g-R} * \left( \frac{P_{LL}(pu)}{P_{LL-R}(pu)} \right)^{0,8} \quad (17)$$

Onde:

$\theta_g$  é o acréscimo do ponto mais quente do enrolamento além da temperatura de topo de óleo ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta_{g-R}$  é o acréscimo do ponto mais quente do enrolamento além da temperatura topo de óleo em condições nominais ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Com os valores obtidos acima, pode-se encontrar, através de (18), o acréscimo do ponto mais quente do condutor em ( $^{\circ}\text{C}$ ), além da temperatura ambiente:

$$\theta = \theta_g + \theta_{T0} \quad (18)$$

### 3 ANÁLISE PRÁTICA DO ACRÉSCIMO DE PERDAS

Calculadas as perdas teóricas, surge a necessidade da comparação com as perdas reais, considerando a análise do acréscimo de perdas a partir da leitura de temperatura em diferentes pontos do transformador [8].

De posse do comportamento da temperatura em função do tempo para cada uma das duas situações ensaiadas (carga linear-situação 1 e carga não-linear-situação 2) e, admitindo-se a temperatura ambiente constante e idêntica durante os ensaios, podem-se estimar as perdas (19)

$$P_n = R_n \cdot i_n^2 = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

Onde:

n denota a situação em questão; m é a massa do resistor, c é o calor específico do mesmo, T é a temperatura e t é o tempo.

Admite-se para duas situações que:

$$m_1 \cdot c_1 = m_2 \cdot c_2 = k \quad (20)$$

Assim sendo, tem-se, para cada situação, a seguinte relação entre perdas e aquecimento:

$$P_f = k \cdot \frac{dT}{dt} \quad (21)$$

No entanto, não faz sentido uma avaliação isolada do quadro obtido quando do ensaio de cada situação, faz sentido sim a avaliação comparativa entre as duas situações em questão, ou seja, situação de linearidade frente à situação de não-linearidade. Tal avaliação pode ser feita da seguinte maneira:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\left(\frac{dT_2}{dt}\right)}{\left(\frac{dT_1}{dt}\right)} \quad (22)$$

Dessa maneira, a comparação das perdas causadas pela corrente da situação 2 (não-linear) em relação à corrente da situação 1 (linear), no instante de maior derivada (no instante 0), revela o acréscimo de perdas de uma situação para a outra.

Para tal análise, utilizaram-se 3 transformadores trifásicos (5kVA e 10kVA a seco e 10kVA a óleo). A tensão de alimentação dos mesmos foi de 220V<sub>FF</sub>. A tabela I traz as suas características construtivas.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

	1	2	3
Tipo	Seco	Seco	Óleo
Potência	10 [kVA]	5 [kVA]	10 [kVA]
V Primário	0,22 [kV]	0,22 [kV]	0,22 [kV]
V Secundário	220/127 [V]	220/127 [V]	220/127 [V]
I Primário	26,24 [A]	13,12 [A]	26,24 [A]
I Secundário	26,24 [A]	13,12 [A]	26,24 [A]
R primário	0,07 [Ω]	0,15 [Ω]	0,09 [Ω]
R secundário	0,0566 [Ω]	0,123 [Ω]	0,0738 [Ω]
Perdas	167 [W]	71 [W]	127 [W]

Fig. 2. Bancada e transformadores utilizados nos ensaios.





### 3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

O *software* LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) se trata de uma plataforma de desenvolvimento em linguagem visual. As limitações elétricas da placa de aquisição de sinais impuseram a necessidade de um condicionamento de sinais, tanto para a tensão como para a corrente.

Instalaram-se sensores PT-100 em diferentes regiões dos transformadores, como no núcleo, enrolamento da 1ª coluna, enrolamento da 2ª coluna, enrolamento da 3ª coluna, óleo, ambiente, a fim de captar os dados térmicos.

Os sensores PT-100 oferecem uma leitura precisa em uma faixa de temperatura de -200 à +800°C. O princípio de operação é a medição da resistência da platina ( $100\Omega$  a 0°C e  $138,4\Omega$  a 100°C).

A Fig. 3 mostra uma foto de um transformador construído com os sensores PT-100.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA NO LABVIEW PARA A ANÁLISE DAS PERDAS

O programa foi desenvolvido com o intuito de facilitar a análise dos dados, assim como garantir uma melhor organização dos mesmos. Todos os cálculos e procedimentos apresentados neste artigo foram retratados através de programação por diagramas de blocos.

Como ilustração, os gráficos da Fig. 4 mostram as formas de ondas das tensões e correntes no secundário do transformador de 10kVA a seco, para a carga linear e não-linear, enquanto que a Fig. 5 mostra os correspondentes valores calculados pelo programa desenvolvido.

Fig. 3. Transformador construído com os sensores PT-100.



Fig. 4. Formas de onda das tensões e correntes para carga linear e não-linear.

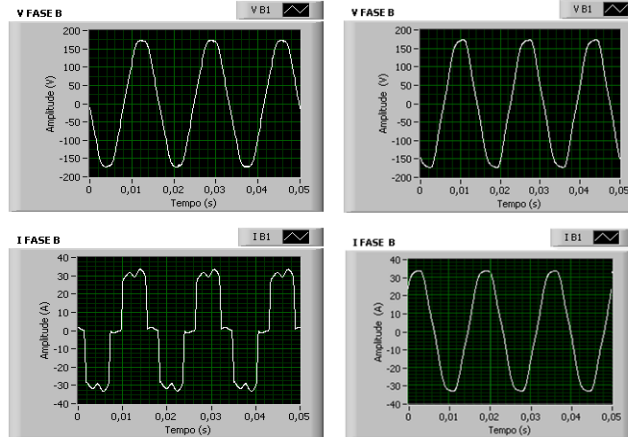
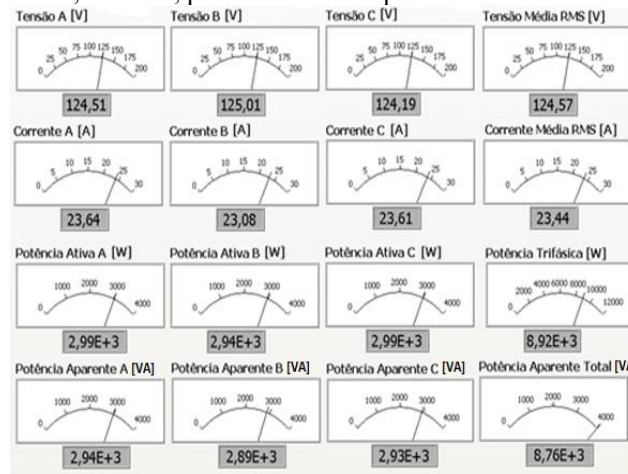


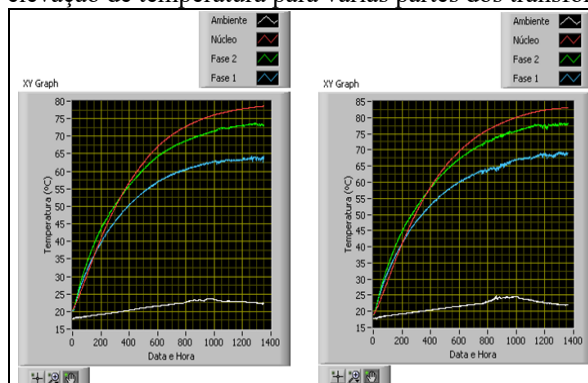
Fig. 5. Valores calculados de tensão, corrente, potências ativa e aparente monitoradas no transformador de 10kVA seco.



Analisando a forma de onda da tensão para a carga não-linear, percebe-se uma pequena distorção causada pela impedância da fonte. Porém essa distorção pode ser desprezada nas análises propostas neste trabalho e pode-se considerar a fonte como um barramento infinito.

Por fim, a análise do acréscimo de temperatura é realizada, através do monitoramento em diferentes pontos dos transformadores, como pode ser visto na Fig. 6.

Fig. 6. Tela com curvas de elevação de temperatura para várias partes dos transformadores ao longo do tempo.



3.3 TRANSFORMADOR 5KVA SECO

Com carregamento aproximado de 90%, analisou-se os resultados implementados no LabVIEW.

A fim de se obter o valor das perdas, utilizou-se a teoria da série de Fourier. O bloco utilizado para tal fim, no software LabVIEW, é o FFT.

Os resultados da análise podem ser visualizados através de gráficos de barras ou tabelas, onde é possível visualizar a amplitude (valor de pico) das diferentes ordens harmônicas das ondas de corrente e tensão, conforme Figs. 7 e 8:

Fig. 7. Visualização da distribuição harmônica em gráfico de barras.

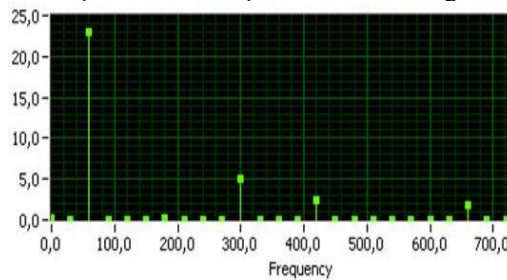


Fig. 8. Visualização da distribuição harmônica através de tabelas.

magnitude IA	IAh/IA1	(IAh/IA1)^2	((IAh/IA1)^2)*h^2
23,7315	1	1	1
0,0110451	0,000465421	2,16616E-7	8,66465E-7
0,0758427	0,00319587	1,02136E-5	9,1922E-5
0,0187229	0,000788948	6,2244E-7	9,95903E-6
5,11227	0,215421	0,0464063	1,16016
0,00840199	0,000354043	1,25347E-7	4,51248E-6
2,48206	0,104589	0,0109389	0,536006

Como forma de comparação entre os resultados oriundos do programa LabVIEW, utilizando as formulações da norma IEEE C57.110-2008, para cargas linear e não-linear, a tabela II apresenta alguns resultados obtidos. É válido destacar que, mesmo para a carga linear, há uma perda de vida útil do transformador, devido à tensão da rede elétrica não ser perfeitamente senoidal.

TABELA II. RESULTADOS OBTIDOS PARA O TRANSFORMADOR DE 5KVA

	Carga Linear	Carga Não-Linear
$P_{TSL-R}$ [W]	40,535	45,456
$P_{EC-R}$ [W]	27,158	30,456
$P_{OSL-R}$ [W]	13,376	15,000
$P_{EC}$ [W]	28,372	178,273
$F_{HL}$ [pu]	1,043	5,442
$I$ [pu]	1,001	1,037
$P_{LL}$ [pu]	4,156	28,561
$P_{LL-R}$ [pu]	4,019	5,696
$I_{max}$ [pu]	0,984	0,463

Avaliando a tabela II percebe-se, como já esperado, que as perdas para a carga não-linear são maiores que aquelas para a carga linear e que a corrente máxima, quando da situação não-linear considerada, deve ser de, no máximo, 47,2% da corrente nominal.

Complementarmente, as Figs. 9 e 10 mostram as curvas comparativas de acréscimo de temperatura dos enrolamentos primário e secundário e do núcleo, para a carga linear e não-linear, respectivamente:

Fig. 9. Curva de acréscimo de temperatura para carga linear.

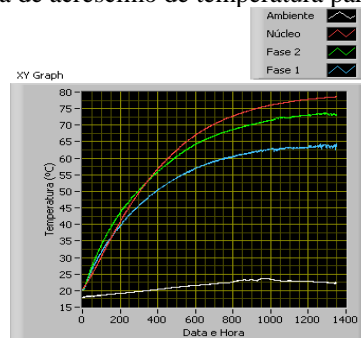
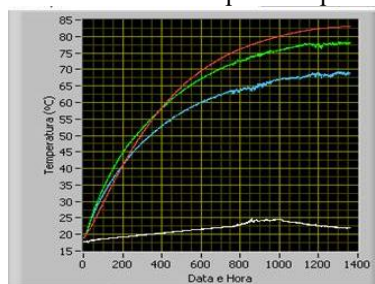


Fig. 10. Curva de acréscimo de temperatura para carga não-linear.



É válido destacar que o tempo de amostragem para todas as grandezas registradas foi de 30 segundos. Desta forma, as Figs. 9 e 10 revelam que o tempo de aquecimento do transformador foi de aproximadamente 12 horas. Observando estas figuras, é fácil perceber que, como esperado, as

temperaturas nos diferentes pontos monitorados se apresentam com valores superiores para a carga não-linear.

### 3.4 TRANSFORMADOR 10 KVA A SECO

A tabela III mostra os resultados fornecidos pelo LabVIEW para os ensaios realizados no transformador de 10kVA a seco:

TABELA III. RESULTADOS OBTIDOS PARA O TRANSFORMADOR SECO DE 10KVA

	Carga Linear	Carga Não-Linear
$P_{TSL-R}$ [W]	124,984	125,811
$P_{EC-R}$ [W]	83,739	84,293
$P_{OSL-R}$ [W]	41,244	41,518
$P_{EC}$ [W]	88,855	421,427
$F_{HL}$ [pu]	1,058	4,793
$I$ [pu]	1,001	1,035
$P_{LL}$ [pu]	8,304	32,938
$P_{LL-R}$ [pu]	7,882	7,201
$I_{max}$ [pu]	0,975	0,485

Neste caso, tal como aconteceu para o transformador de 5kVA seco, o cálculo de perdas e indicação de corrente máxima que o transformador deve suprir, considerando a carga retificadora de 6 pulsos não-controlada, é de aproximadamente 50%.

### 3.5 TRANSFORMADOR 10 KVA A ÓLEO

A tabela IV traz os resultados coletados do programa desenvolvido com as devidas considerações a respeito dos transformadores a óleo, no LabVIEW:

TABELA IV. RESULTADOS OBTIDOS PARA O TRANSFORMADOR A ÓLEO DE 10KVA

	Carga Linear	Carga Não-Linear
$P_{TSL-R}$ [W]	113,017	154,845
$P_{EC-R}$ [W]	75,721	103,746
$P_{OSL-R}$ [W]	37,296	51,099
$F_{HL-OS}$ [pu]	1,007	1,238
$F_{HL}$ [pu]	1,064	5,036
$I$ [pu]	1,001	1,034
$P_{LL}$ [pu]	0,564	0,601
$\theta_{TO}$ [°C]	52,955	53,589
$\theta_g$ [°C]	6,485	14,033
$\theta$ [°C]	59,44	67,622

Como esperado para o transformador a óleo, as perdas quando o mesmo alimenta carga não-linear aumentam, proporcionando um maior aquecimento do óleo (8°C).

#### 4 ANÁLISE TÉRMICA DOS TRANSFORMADORES

A seguir será feita a análise do acréscimo de perdas de acordo com resultados de medição de temperatura, obtidos através dos sensores Pt-100. Para todos os casos, a situação 1 contempla a carga linear, enquanto que a situação 2 é associada à carga não-linear. Em ambos os casos, a corrente foi ajustada de tal maneira a igualar a corrente eficaz registrada para a carga linear com a corrente fundamental da carga não-linear.

Os dados de temperatura foram coletados pela plataforma LabVIEW e trabalhados na forma de gráficos com interpolação, gerando polinômios de segundo grau a partir da utilização da plataforma MATLAB. Em seguida, foram calculados os fatores de acréscimo de perdas para cada transformador.

Os resultados são apresentados para os sensores de temperatura instalados no enrolamento da fase A (1), enrolamento da fase B (2) e núcleo.

##### 4.1 TRANSFORMADOR SECO DE 5KVA

Foram efetuados ensaios de aquecimento no transformador de 5kVA seco, como pode ser visto nas Figs. 11 a 13. É válido destacar que, nas 2 situações de carga, para os 3 transformadores, as temperaturas ambientes foram praticamente as mesmas.

Fig. 11. Temperaturas do núcleo para transformador a seco de 5kVA.

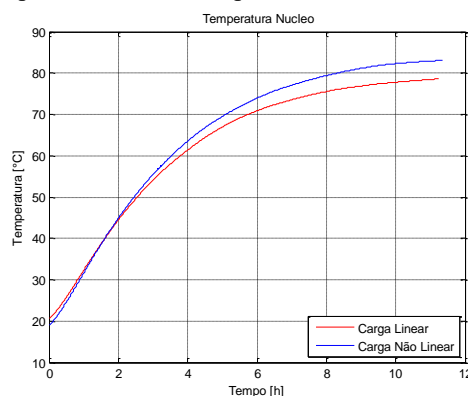


Fig. 12. Temperaturas do enrolamento 1 para transformador a seco de 5kVA.

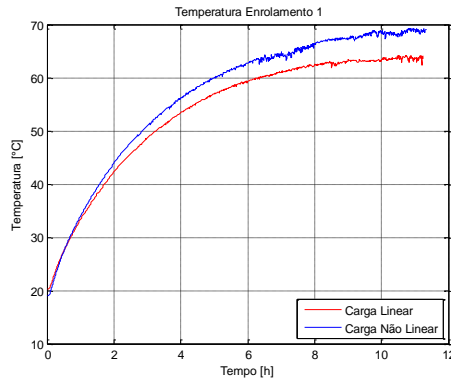
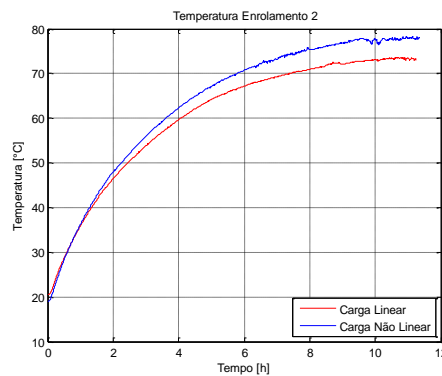


Fig. 13. Temperaturas do Enrolamento 2 para transformador a seco de 5kVA.



Os polinômios gerados para cada local monitorado são mostrados na tabela V.

TABELA V. POLINÔMIOS INTERPOLADOS PARA O TRANSFORMADOR A SECO DE 5KVA

Parte do Transformador Analisada	Polinômio Interpolado
Núcleo – Linear	$T = -0,6601.t^2 + 12,1914.t + 21,7920$
Núcleo - Não-Linear	$T = -0,7017.t^2 + 13,2093.t + 20,3079$
Enrolamento 1 - Linear	$T = -0,5013.t^2 + 8,8376.t + 24,9916$
Enrolamento 1 - Não Linear	$T = -0,5221.t^2 + 9,5223.t + 25,0367$
Enrolamento 2 - Linear	$T = -0,5768.t^2 + 10,4494.t + 25,9198$
Enrolamento 2 - Não Linear	$T = -0,6248.t^2 + 11,4606.t + 25,2434$

Através de (22), chega-se ao termo acréscimo de perdas, para cada parte do transformador analisada, como mostrado na tabela VI.

TABELA VI. ACRÉSCIMO DE PERDAS PARA TRANSFORMADOR A SECO DE 5KVA

1 PARTE	2 Acréscimo de Perdas(%)
Núcleo	8,350
Enrolamento 1	7,748
Enrolamento 2	9,677

A partir dos resultados da tabela VI pode-se concluir que o aquecimento proporcionado pela carga não-linear alimentada está em torno de 10%, simbolizando um acréscimo de perdas que pode ser

problemático para o transformador, embora esteja contrastando com o que foi obtido e está mostrado na tabela II.

#### 4.2 TRANSFORMADOR A SECO DE 10KVA

Diante da energização do transformador de 10kVA seco, para carga linear e carga não-linear, foram obtidas as curvas similares às mostradas para o transformador a seco de 5kVA, sendo estas, não mostradas neste artigo, por questão de espaço.

Como aconteceu para o transformador de 5kVA seco, polinômios foram gerados para cada local monitorado, gerando os dados encontrados na tabela VII.

TABELA VII. POLINÔMIOS INTERPOLADOS PARA O TRANSFORMADOR A SECO DE 10KVA

Parte do Transformador Analisada	Polinômio Interpolado
Núcleo - Linear	$T = -0,6063.t^2 + 12,2662.t + 19,2652$
Núcleo - Não-Linear	$T = -0,6160.t^2 + 12,5236.t + 19,7999$
Enrolamento 1 - Linear	$T = -0,8085.t^2 + 15,1615.t + 34,1480$
Enrolamento 1 - Não Linear	$T = -0,8309.t^2 + 15,6107.t + 35,1373$
Enrolamento 2 - Linear	$T = -0,8126.t^2 + 15,2893.t + 31,8855$
Enrolamento 2 - Não Linear	$T = -0,8374.t^2 + 15,7420.t + 33,3379$

Através de (22), chega-se ao termo acréscimo de perdas, para cada parte do transformador analisada, como mostrado na tabela VIII.

TABELA VIII. ACRÉSCIMO DE PERDAS PARA TRANSFORMADOR A SECO DE 10KVA

<i>PARTE</i>	<i>Acréscimo de Perdas(%)</i>
Núcleo	2,10
Enrolamento 1	2,96
Enrolamento 2	2,96

A partir dos resultados da tabela VIII pode-se concluir que o aquecimento proporcionado pela carga não-linear alimentada está em torno de 3%, simbolizando um acréscimo de perdas irrisório, contrastando com o que foi obtido e está mostrado na tabela III.

#### 4.3 TRANSFORMADOR A ÓLEO DE 10KVA

Finalizando as análises, agora para o transformador de 10kVA a óleo, o acréscimo de temperatura no núcleo, enrolamento 1 e enrolamento 2, para as mesmas temperaturas ambientes foi monitorado, tal como aconteceu para os outros transformadores.

Os polinômios gerados são mostrados na tabela IX.



TABELA IX. POLINÔMIOS INTERPOLADOS PARA O TRANSFORMADOR A ÓLEO DE 10KVA

Parte do Transformador Analisada	Polinômio Interpolado
Núcleo – Linear	$T = -0,3357.t^2 + 6,4410.t + 26,9032$
Núcleo - Não-Linear	$T = -0,3755.t^2 + 7,0329.t + 25,8752$
Enrolamento 1 - Linear	$T = -0,2784.t^2 + 5,5406.t + 27,5563$
Enrolamento 1 – Não-Linear	$T = -0,3145.t^2 + 6,0828.t + 26,2078$
Enrolamento 2 - Linear	$T = -0,2639.t^2 + 5,3870.t + 22,1122$
Enrolamento 2 – Não-Linear	$T = -0,3009.t^2 + 5,9436.t + 21,1820$

A tabela X apresenta os acréscimos de perdas obtidos para este transformador, obtidos tal como para os outros transformadores.

TABELA X. ACRÉSCIMO DE PERDAS PARA TRANSFORMADOR À ÓLEO DE 10KVA

<i>PARTE</i>	<i>Acréscimo de Perdas(%)</i>
Núcleo	9,189
Enrolamento 1	9,785
Enrolamento 2	10,333

Pode-se concluir que o aquecimento proporcionado pela carga não-linear alimentada está em torno de 10%, simbolizando um acréscimo de perdas que pode ser problemático para o transformador.

## 5 ANÁLISES COMPARATIVAS E CONCLUSÕES

Ao se estudar um efeito elétrico como o aumento de perdas de um transformador pela alimentação de uma carga não-linear, através de diferentes *softwares*, pode-se obter o conhecimento de diferentes técnicas de análises, como a captação em tempo real de dados (LabVIEW) e a análise matemática dos dados obtidos (MATLAB).

A análise comparativa entre os ensaios e os cálculos pela norma IEEE C57.110-2008 nos mostra que, para os ensaios aplicados, a norma é rígida com relação ao aumento de perdas, ou seja, o cálculo pela norma resulta em um aumento de perdas maior do que o aumento prático (temperatura). Desta forma, fabricantes de transformadores poderiam estar sobredimensionando os projetos dos mesmos, causando um encarecimento do produto.

Desta maneira, é importante questionar se realmente a melhor solução para a alimentação de tais cargas é o aumento da potência nominal do transformador. Questiona-se com base em dois argumentos, o primeiro a ser considerado para sistemas operantes e o segundo a ser avaliado em fase de projeto:

- Transformadores são fabricados para uma potência nominal de funcionamento a uma determinada temperatura ambiente. Se tal temperatura for diminuída, os transformadores são naturalmente capazes de admitir uma sobrecarga. Desta forma, dependendo das especificações dos equipamentos, seria possível obter uma sobrecarga suficiente para a alimentação de cargas não-lineares

através da instalação de sistemas de ventilação forçada no transformador ou até mesmo através da instalação de aparelhos de ar condicionado no ambiente de operação do mesmo;

- Os enrolamentos dos transformadores são projetados para suportar determinadas elevações de temperatura. Existem cinco classes de isolamento térmico, a saber: A - 105°C; E - 120°C; B - 130°C; F - 155°C; H - 180°C. Dessa maneira, também dependendo das características dos equipamentos, pode-se projetar um transformador para uma classe de isolamento térmico maior, de tal forma a compensar o aumento da temperatura, sem que haja a necessidade do aumento da potência nominal do transformador.

### **AGRADECIMENTOS**

Nosso reconhecimento e gratidão à FAPEMIG pelos recursos concedidos para o projeto de pesquisa e à CAPES pela bolsa de pós-graduação.

**REFERÊNCIAS**

- [1] A. C. DELAIBA; J. C. OLIVEIRA; A. L. A. VILAÇA; J. R. CARDOSO, “The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life”. 1996.
- [2] IEEE Std C57.110-2008. “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, 2008.
- [3] E. F. FUCHS, M. A. S. MASOUM, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, 1e, 638 pp, ISBN-13: 978-0-12-369536-9, Ed. Elsevier, USA, March 2008.
- [4] J. C. OLIVEIRA; J. R. COGO; J. P. G. ABREU, “Transformadores - Teoria e Ensaio”. 1984.
- [5] M. A. S. MASOUM, E. F. FUCHS, “Derating of anisotropic transformers under nonsinusoidal operating conditions”, *IEEE Transactions on Electrical Power Energy System*, vol. 25, pp. 1–12, 2003.
- [6] E. F. FUCHS, D. LIN, J. MARTYNAITIS, “Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 665–672, Apr. 2006.
- [7] E. F. FUCHS, D. LIN, “Real-Time Monitoring of Iron-Core and Copper Losses of Transformers Under (Non) Sinusoidal Operation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, July 2006
- [8] M. F. C. Parentoni, “Análise Experimental do Acréscimo de Perdas Elétricas devido à Circulação de Correntes Distorcidas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2010.