

ANÁLISE DE RENDIMENTO DE TRANSFORMADORES QUE ALIMENTAM CARGAS TIPO LINEAR E NÃO LINEAR

Giliard Paganini*
Marconi Januário**

Resumo

Este trabalho apresentou os resultados de medições efetuadas no primário e no secundário de um transformador quando submetido a cargas tipo linear e não linear. Estas cargas foram de média potência e potência próxima à nominal do transformador. Por intermédio dos experimentos, foram gerados resultados ilustrativos, por meio de gráficos de formas de onda e de espectros, e numéricos, mediante a determinação da potência medida no primário e no secundário de quatro casos. Os dados obtidos nas medições foram utilizados em rotinas do programa MATLAB, de maneira a comprovar a potência medida no osciloscópio, e para manipulá-las de modo a determinar a perda de potência, bem como efetuar os cálculos para a determinação do Fator K e do *Derating* do transformador.

Palavras-chave: Transformadores. Harmônicas. Perdas. Fator K. *Derating*.

1 INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são equipamentos essenciais no sistema elétrico nacional. A garantia da continuidade de energia elétrica em qualquer sistema está ligada diretamente à confiabilidade e à qualidade destes equipamentos. Isso induz a um constante aperfeiçoamento de suas características, aumentando sua confiabilidade, melhorando sua eficiência e diminuindo seu tamanho e, conseqüentemente, o seu custo (GODOY, 2006; SCARPIM, 2013).

Quando cargas lineares são conectadas ao sistema elétrico e se elas recebem sinais senoidais puros de tensão, como consequência, tem-se formas de onda de corrente com a frequência fundamental da rede. Estes sinais, sem deformação, fazem com que o transformador opere condições satisfatórias, evitando que aumentem as perdas pertinentes a ele. Quando cargas do tipo não linear são conectadas a essa máquina, correntes múltiplas da sua fundamental são geradas, denominadas correntes harmônicas. O somatório destas correntes gera uma deformação na onda, e essa resultante traz inúmeros problemas ao transformador, como o aumento do aquecimento e das perdas, a redução da capacidade de conversão de potência e a redução da vida útil desta máquina (MOHAMMAD et al., 2008; MATTOS, 2011).

O presente trabalho contempla o estudo sobre ensaios em transformadores, frequências harmônicas e problemas relacionados ao comportamento dos transformadores quando submetidos às cargas não lineares. São descritos os principais equacionamentos, medições e determinação das perdas do transformador quando submetido a cargas do tipo linear e não linear, bem como o *Derating* e o Fator K.

Biricik e Ozerdem (2011) apresentam um estudo similar a este. Nele, os autores apresentam os ensaios para a parametrização do transformador, e, posteriormente, submetem essa máquina elétrica a três tipos de cargas: linear (puramente resistiva); não linear com característica indutiva e não linear com característica capacitiva. Nos casos, são abordados três níveis de potência e comparados às grandezas elétricas, entre outras medições. O principal item analisado é a taxa de distorção harmônica de corrente, deixando de lado o cálculo do *Derating* e do Fator K.

* Graduando em Engenharia Elétrica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; giliardpaganini.eng@gmail.com

** Mestre e doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor na Universidade do Oeste de Santa Catarina; Rua Getúlio Vargas, 2125, Flor da Serra, 89600000, Joaçaba, SC; marconi.januario@unoesc.edu.br

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

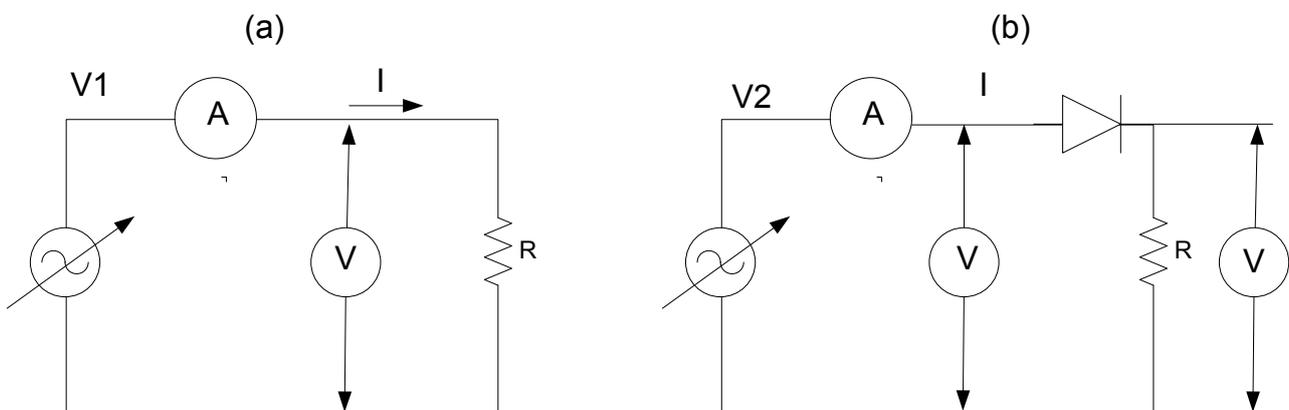
2.1 ORIGEM DAS HARMÔNICAS NOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE

O uso de cargas que não apresentam uma relação linear entre tensão e corrente caracteriza estas cargas como não lineares. Outra causa importante de não linearidade são as discontinuidades em decorrência do chaveamento das correntes em pontes retificadoras, compensadores estáticos e conversores eletrônicos (DECKMANN; POMILIO, 2010).

As correntes harmônicas podem ser geradas pelas cargas não lineares conectadas à rede. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas por meio das impedâncias da rede, e então, uma deformação da tensão de alimentação (SCHNEIDER, 2003).

Nos circuitos apresentados na Figura 1(a) é representada uma fonte senoidal, com frequência de 60 Hz, alimentando um resistor, e na Figura 1 (b), esta fonte é apresentada alimentando um diodo e uma série com um resistor.

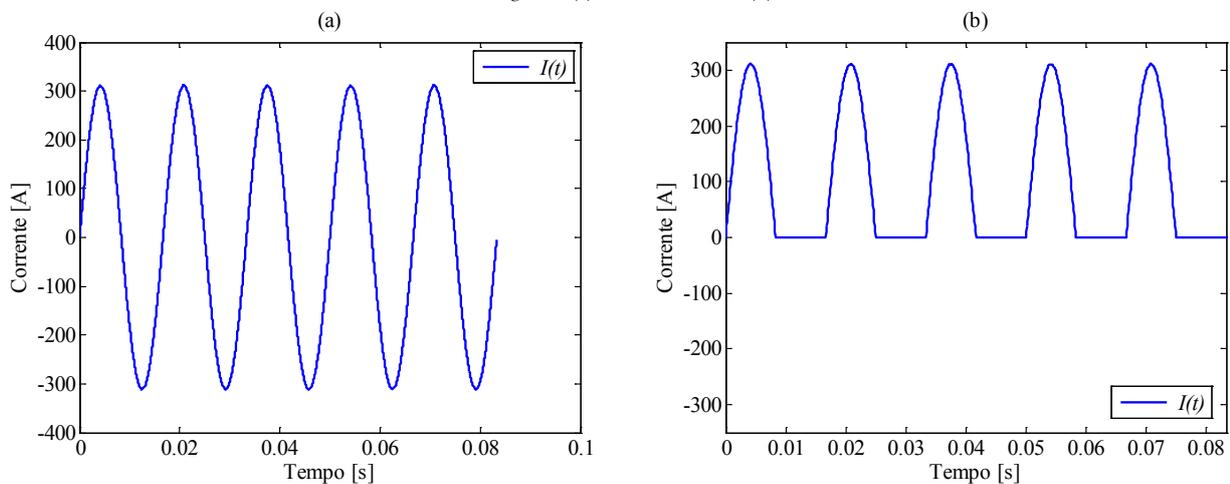
Figura 1 – Fonte de tensão ideal: (a) carga linear e (b) carga não linear (diodo mais resistor)



Fonte: os autores.

A ilustração da Figura 2(a) apresenta o sinal de corrente indicado na Figura 1(a) para a carga linear. Na Figura 2(b), é apresentada a forma de onda de corrente ilustrada na Figura 1(b). A forma de onda da corrente do circuito linear, que é resistivo, mostrada no Gráfico 1(a), é um reflexo da forma de onda senoidal da tensão, ou seja, apresenta o mesmo comportamento ao longo do tempo, diferente apenas em amplitude. Nota-se que a forma de onda da corrente apresentada na Figura 2(b), para o circuito não linear, não é puramente senoidal como o sinal da tensão.

Gráfico 1 – Formas de onda de corrente dos circuitos da Figura 2 (a), circuito linear e (b), circuito não linear



Fonte: os autores.

2.2 EFEITO DAS HARMÔNICAS EM TRANSFORMADORES E NO SISTEMA INDUSTRIAL

Os principais problemas visíveis em transformadores quando relacionados às harmônicas é o aquecimento e o ruído audível. Quando transformadores são submetidos a harmônicas de tensão, aumentam-se as perdas no ferro. Quando submetidos a harmônicas de corrente, são geradas perdas no cobre e em partes estruturais do transformador (KASSICK, 2008).

A circulação de harmônicas tríplens (múltiplas ímpares de três) pode levar à sobrecarga de enrolamentos conectados em delta, caso esse tipo de harmônicas não tenha sido considerado no projeto deste transformador. No restante do sistema, as correntes harmônicas podem causar disparo anormal de chaves e disjuntores, medição incorreta por equipamentos e ressonância de banco de capacitores (LISITA, 2004; KASSICK, 2008).

2.3 FATOR K

É possível quantificar o efeito térmico causado por cada ordem harmônica da corrente, cujo efeito é acumulativo. Assim, o Fator K representa, de forma simplificada, o efeito total, em p.u., produzido no transformador pela corrente distorcida acima do efeito produzido pela corrente senoidal nominal (MOHAMMAD et al., 2008). Este fator indica alguns processos de fabricação que devem ser alterados, como isolamento térmica, blindagem eletrostática, dimensionamento dos condutores, etc. (MATOS, 2011).

Há diferentes abordagens em relação à consideração das perdas adicionais quando se faz a seleção de um transformador. O equacionamento utilizado neste trabalho foi desenvolvido por fabricantes de transformadores com a *Underwriters Laboratories* nos Estados Unidos; consiste em calcular um fator que considera o aumento das perdas parasitas e especificar um transformador projetado para lidar com esse fato; isso é conhecido como *k-factor* (DESMET; DELAERE, 2005) e pode ser observado na Equação 1, sendo K o somatório do número da harmônica ao quadrado vezes a intensidade da corrente harmônica ao quadrado.

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} [h^2 \cdot (I_{h(pu)})^2] \quad (1)$$

Onde:

h : número de harmônicas;

I_h : a fração da corrente total de carga RMS na harmônica de número h .

2.4 DERATING

O *Derating* determina o superdimensionamento da potência do transformador convencional mediante a alimentação de cargas do tipo não linear. Os procedimentos a serem tomados para o cálculo são informados pelo IEEE C57110, e determinados por meio de equações. A Equação 2 é utilizada para determinar a corrente máxima na frequência fundamental que será drenada, obtendo a raiz quadrada da soma de todas as correntes harmônicas, em p.u., elevadas ao quadrado (FUCHS et al., 2000). A Equação 3 determina o percentual de potência extra que o transformador deve fornecer para alimentar uma carga não linear (KASSICK, 2008).

$$I_{\max(pu)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h(pu)}^2}}{I_{\text{nominal}}} \quad (2)$$

Onde:

h : ordem harmônica;

$I_{h(pu)}$: Valor em p.u. (relativo à fundamental) da componente harmônica I_h da corrente.

$$\text{Derating} = \frac{1}{I_{\max(pu)}} \quad (3)$$

3 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Com o objetivo de definir as perdas no transformador quando submetido a cargas lineares e não lineares, formadas por componentes resistivos, indutivos e capacitivos, foi escolhido um transformador monofásico de 550 VA, 220/24 V. Duas cargas não lineares foram definidas, uma de média potência e uma de potência próxima à nominal. Com potências similares a estas, foram montadas duas cargas lineares, a fim de comparar os resultados.

Os valores das formas de onda de tensão e de corrente no primário e no secundário do transformador, para ambas as cargas, foram adquiridos com a utilização do osciloscópio Fluke 196C. Os dados foram exportados para o programa Matlab. Foram extraídos 1999 pontos em 12 períodos do sinal. Considerando uma frequência fundamental de 60 Hz, gerou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) desses sinais. Foi utilizado o lado positivo do espectro de tensão e do conjugado do espectro de corrente. A potência total S , expressa na Equação 4, é obtida por meio do somatório da multiplicação: duas vezes a tensão vezes a corrente, de cada vetor. O valor 999 equivale à metade do número de pontos extraídos.

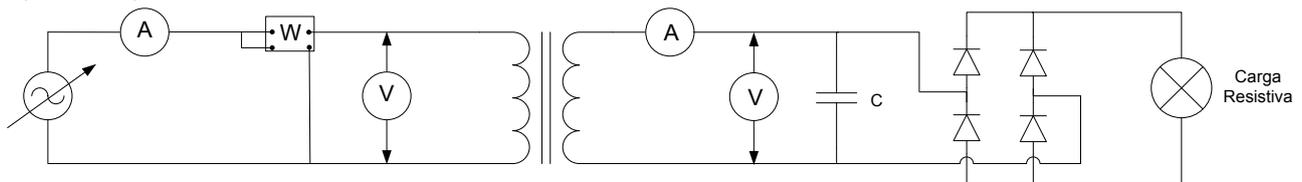
$$S = \sum_{j=1}^{j \rightarrow 999} 2.V_j.I_j^* . \quad (4)$$

Com os dados dos espectros lidos, rotinas foram criadas para determinar o Fator K e o *Derating* para o caso não linear de potência próxima à nominal.

3.1 CARGA NÃO LINEAR

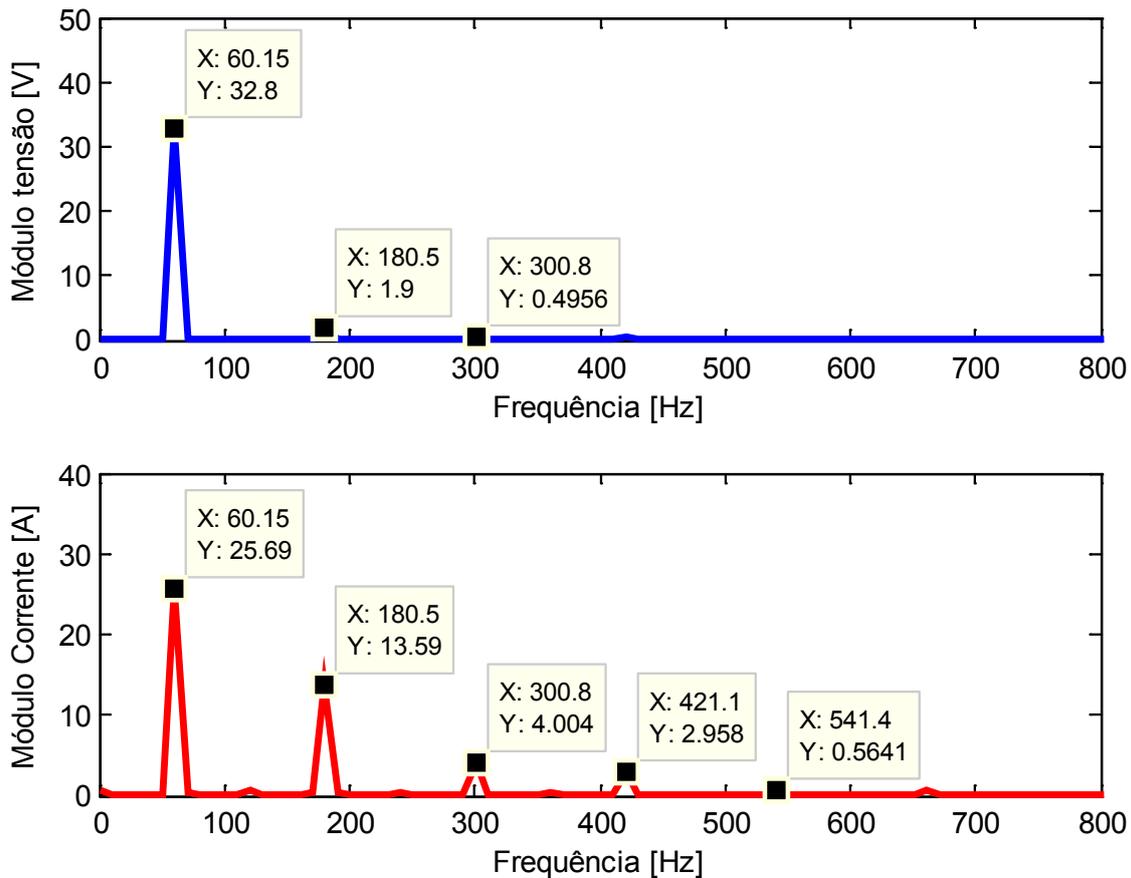
Com a carga não linear conectada ao secundário do transformador, conforme apresentado na Figura 2, este foi alimentado com a tensão da rede de 220 V e as medições foram feitas inicialmente no lado do transformador, ou seja, onde é alimentado pela rede. Posteriormente, as medições foram repetidas, porém, do lado secundário do transformador. Através do programa Matlab, utilizando as respostas de tensão e corrente, medidas pelo osciloscópio, determinaram-se a tensão e a corrente para os casos de média e alta potências.

Figura 2 – Carga não linear



Fonte: os autores.

Gráfico 2 – Espectros de tensão e corrente gerados no Matlab do secundário do transformador – carga não linear



Fonte: os autores.

No Gráfico 2, são mostrados os resultados dos espectros de corrente e tensão da carga não linear com potência próxima à nominal do transformador. Nota-se a alta amplitude de corrente nas frequências múltiplas da fundamental, onde as harmônicas de ordem 3 (180 Hz), 5 (300 Hz) e 7 (420 Hz) estão acima das recomendações de 4%, informada pela IEEE 519. A distorção harmônica de tensão apresenta valores insignificantes, abaixo dos limites tolerados, de acordo com as recomendações.

3.2 CARGA LINEAR

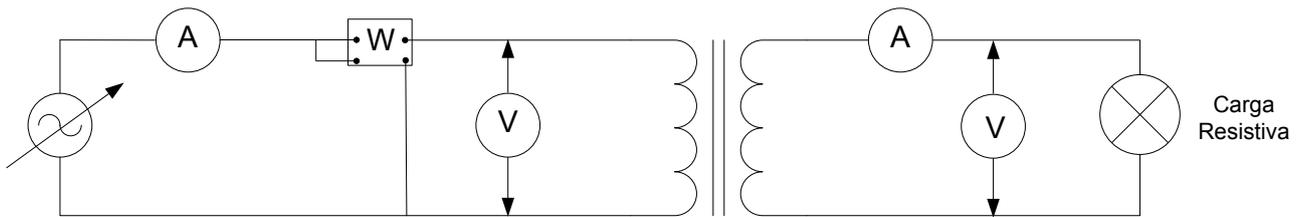
Por intermédio da potência total consumida pela carga não linear, no valor de 403,67 W para o caso de alta potência, calculada no Matlab, definiu-se uma carga resistiva pura, ou seja, sem retificação, conforme ilustração da Figura 3.

Foi montada uma carga resistiva (associação de lâmpadas incandescentes), cujo somatório de potência foi próximo ao valor exigido. Calculou-se, então, por meio da Equação 5, o valor da corrente a ser drenada por uma carga resistiva pura, para que a potência consumida por esta carga linear fosse igual à carga não linear.

$$I = \frac{403,67}{24} = 16,81 A \quad (5)$$

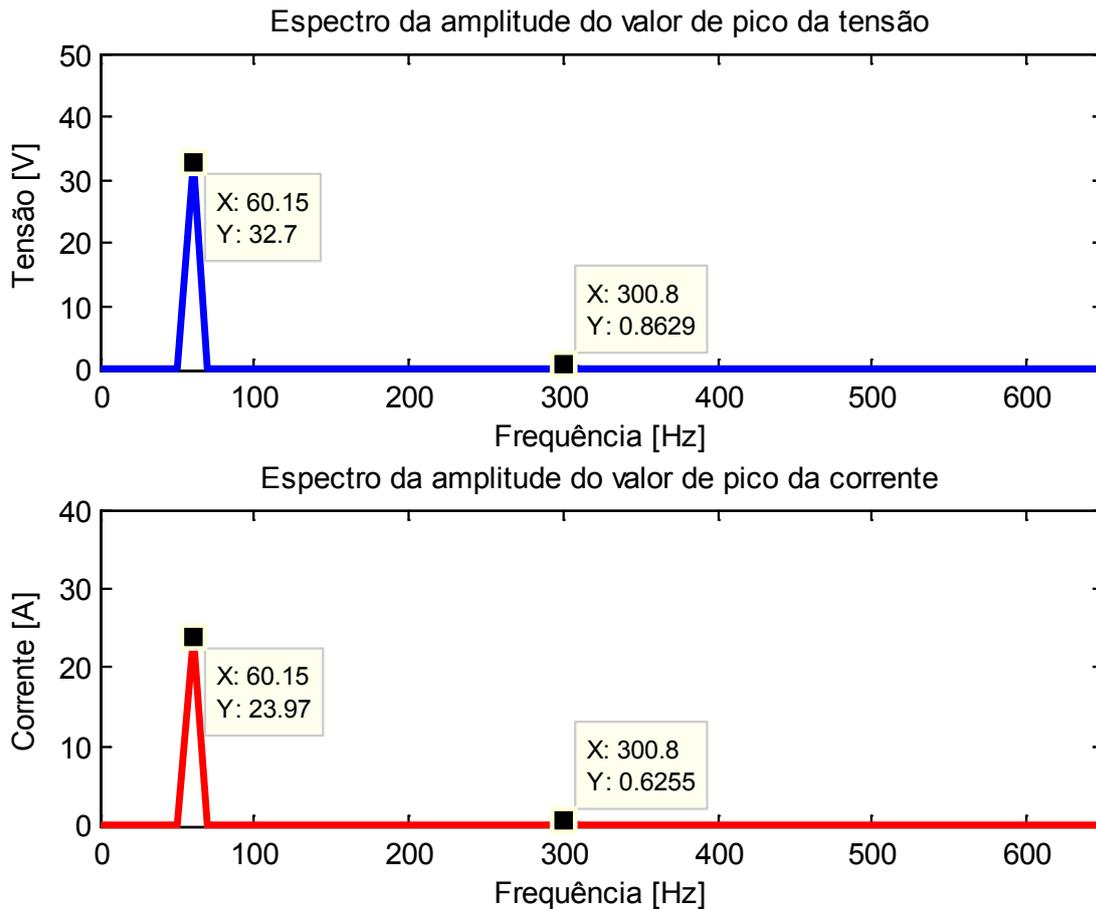
As medições foram feitas ao lado do primário e do secundário do transformador. No Gráfico 6 são apresentados os resultados dos espectros de tensão e corrente da carga linear próxima à nominal do transformador. Podem ser verificados os baixos níveis de distorções harmônicas de tensão e de corrente, apresentando uma pequena amplitude na quinta harmônica.

Figura 3 – Carga linear



Fonte: os autores.

Gráfico 3 – Espectros de tensão e corrente gerados no Matlab do secundário do transformador alimentando a carga linear



Fonte: os autores.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS NO TRANSFORMADOR PARA TODAS AS CARGAS CONSIDERANDO OS CASOS ESTUDADOS

Visando à demonstração objetiva e numérica das perdas do transformador estudado, na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos nos quatro casos estudados: média carga linear; média carga não linear; carga próxima à nominal linear e carga próxima à nominal não linear. Na Tabela 1 são descritas a potência consumida por cada carga, com valores medidos no primário e no secundário do transformador e as perdas totais internas do transformador. Ainda, é também apresentado o percentual de perdas em relação à carga.

Por meio dos dados apresentados na Tabela 1, nota-se que as perdas internas do transformador variam quando submetidas a cargas lineares e não lineares. Para o caso de média potência, as perdas percentuais no transformador, quando submetido à carga linear, têm uma variação percentual de 3,45% menor do que no caso em que a carga é não linear. Para a carga próxima à nominal, as perdas relacionadas à carga não linear têm um valor percentual de 2,84%

maior quando comparadas ao caso em que cargas do tipo lineares são submetidas ao transformador. O rendimento do transformador, quando submetido ao caso não linear, diminui pouco mais de 2% para os dois níveis de carga.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios

	Potência consumida alta (W)	Potência consumida baixa (W)	Perdas (W)	Perdas em relação à carga (%)	Rendimento (%)
Média carga					
Não linear	136,06	115,68	20,38	17,61	85,02
Linear	132,52	116,08	16,44	14,16	87,59
Carga próxima à nominal					
Não linear	447,24	403,67	43,57	10,79	90,25
Linear	423,37	392,19	31,18	7,95	92,63

Fonte: os autores.

3.4 DETERMINAÇÃO DO *DERATING* E DO FATOR K PARA A CARGA NÃO LINEAR PRÓXIMA À NOMINAL

Por meio das medições realizadas no caso não linear com potência próxima à nominal, conforme resultados apresentados na Figura 4, os cálculos da determinação do *Derating* e do Fator K foram realizados. Esse caso, com alta potência, é o mais indicado para a obtenção de resultados satisfatórios na determinação dos fatores K e *Derating*, tendo em vista o alto nível harmônico, e as correntes muito próximas à nominal do transformador.

O cálculo do *Derating* implica o redimensionamento dos componentes baseado na corrente suprida, ou na nova corrente máxima aceita pelo transformador. O cálculo deste, com o do Fator K, foi realizado no programa Matlab.

Para obter o *Derating*, utilizam-se as Equações 3 e 4. O valor calculado de $I_{m\acute{a}x(pu)}$ é apresentado na Equação 6 e do *Derating* na 7. O valor máximo em p.u. da corrente fundamental da carga deve ser 0,91, conforme apresentado na Equação 6. De forma análoga, outra opção seria o redimensionamento do transformador para uma potência 9,89% maior, para suportar a mesma carga, conforme Equação 7.

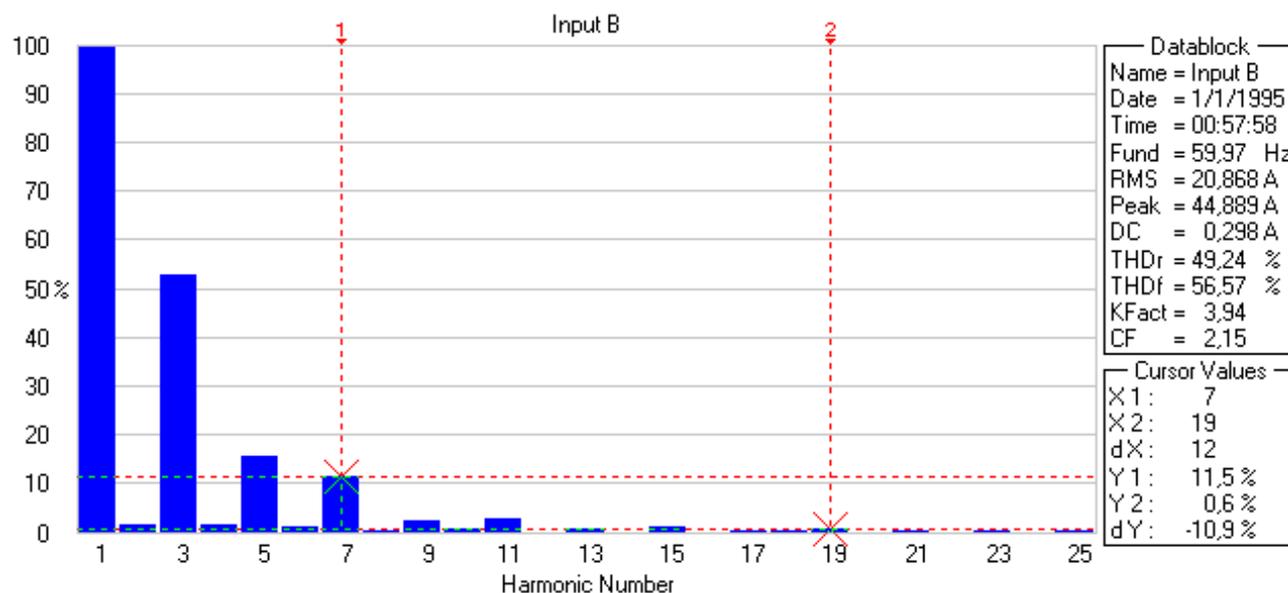
$$I_{m\acute{a}x(pu)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h(pu)}^2}}{I_{no\ min\ al}} = 0,91 \quad (6)$$

$$Derating = \frac{1}{I_{m\acute{a}x(pu)}} = 1,0989 \quad (7)$$

O termo K, expresso na Equação 1, mostra o Fator K, que, no caso de potência próxima à nominal e carga não linear, conforme a Equação 8, foi de 5,001. Esse valor quantifica o efeito térmico causado por cada ordem harmônica da corrente, cujo efeito é acumulativo. O osciloscópio, para a carga de potência próxima da nominal, informou um valor de K equivalente a 3,94, conforme apresentado no Gráfico 4.

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} [h^2 \cdot (I_{h(pu)})^2] = 5,001 \quad (8)$$

Gráfico 4 – Espectros de tensão e corrente gerados no osciloscópio do secundário do transformador para carga não linear com potência próxima à nominal



Fonte: os autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de este ser um assunto que vem tendo maior visibilidade no sistema elétrico nacional, ainda requer muito estudo das instituições de ensino e das instituições regulamentadoras, visando a um maior entendimento e leis que determinem índices específicos de, por exemplo, níveis de correntes harmônicas.

Apesar de transformadores serem máquinas elétricas muito eficientes, possuem perdas, que são acentuadas com a inserção de cargas não lineares. Como estas cargas não lineares não podem ser evitadas na indústria, uma solução viável seria o redimensionamento da carga, reduzindo a corrente máxima drenada, para que a vida útil do transformador não seja afetada. Outra solução é a construção de transformadores especialmente projetados para esses tipos de cargas, denominadas por meio de fatores, como o Fator K. Esse processo visa alterar a isolamento térmica, a blindagem eletrostática e o dimensionamento dos condutores do transformador. O equacionamento utilizado para a determinação do *Derating* se mostrou eficaz, prevendo uma redução significativa da corrente total máxima para 0,91 p.u. ao caso de carga não linear com potência próxima à nominal, e Fator K com índice 5, prevendo alterações construtivas.

Durante as medições, observou-se que as perdas percentuais internas do transformador reduzem com o aumento da carga, conforme esta se aproxima da nominal. Quando comparados os dois tipos de cargas, além de conterem índices elevados de correntes harmônicas nas cargas não lineares, elas promovem um acréscimo considerável nas perdas internas do transformador. Em relação à temperatura do enrolamento, um dos principais problemas ocasionados por correntes harmônicas, não foi detectado, neste experimento, alguma variação significativa, principalmente em razão do pequeno porte da máquina elétrica.

REFERÊNCIAS

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Curso Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: Unicamp, 2010.

DESMET, J.; HOGESCHOOL OESTE-VLAANDEREN; DELAERE, G. **Harmônicas – Seleção e Dimensionamento de Transformadores**. Guia de aplicação de Qualidade de Energia. Leonardo da Vinci Education and Culture. Nov. 2005. Disponível em: <www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2009/06/352-selecao-trnsn-formadores.pdf>. Acesso em: 20 out. 2013.

FUCHS, E. F. et al. Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient P_{EC-R} , Derating of Single-Phase Transformer, and Comparison with K-Factor Approach. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 15, n. 1, Jan. 2000.

GODOY, M. V. **Transformadores de Potência**. Curso de combate ao desperdício de energia. Recife: Escola Politécnica de Pernambuco, 2006.

KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistema industriais de baixa tensão**. Florianópolis: Inep –EEL: UFSC, set. 2008.

LISITA, L. R. **Determinação de perdas, eficiência e potência máxima de transformadores de distribuição alimentando cargas não lineares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação)–Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2004.

MATTOS, M. M. **Estudo do Fator K em transformadores a seco**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MOHAMMAD, A. S. et al. Derating of Asymmetric Three-Phase Transformers Serving Unbalanced Nonlinear Loads. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 23, n. 4, Oct. 2008.

SCARPIM, W. L. **Estudo de implementação de filtros de harmônicas**. Joaçaba: Unoesc, 2013.

SCHNEIDER ELETRIC. **Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Qualidade de energia – Harmônicas. Mar. 2003. Disponível em: <www.schneider-eletric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>. Acesso em: out. 2013.

