

# MEDIÇÕES DAS PERDAS E DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA COM NÚCLEO DE LIGA AMORFA: ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE OXIDAÇÃO

B. A. Luciano<sup>1</sup>, T. C. Batista<sup>1</sup>, R. C. S. Freire<sup>1</sup>, W. B. de Castro<sup>1</sup> e M. A. G. Camacho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande - PB. E-mail: benedito@dee.ufcg.edu.br

<sup>2</sup>Grupo Industrial João Santos, Recife - PE. E-mail: mariocamacho@nassau.com.br

**Resumo:** Neste trabalho são apresentadas algumas considerações sobre estudos, teóricos e experimentais, relativos à medição das perdas ativas e da corrente de excitação em transformadores monofásicos de baixa potência (100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz): um com núcleo de FeSi e outro com núcleo de liga amorfa, antes e depois do processo de oxidação.

**Palavras chave:** técnicas de medição, ligas amorfas, transformadores, eficiência energética.

## 1. INTRODUÇÃO

Diferentemente dos conversores eletromagnéticos rotativos ou lineares, que apresentam perdas adicionais ocasionadas por atrito e ventilação, nos transformadores, por serem conversores estáticos, essas perdas estão circunscritas aos circuitos elétricos, e magnéticos e ao dielétrico.

No tocante ao circuito elétrico, as perdas preponderantes variam com o quadrado da corrente elétrica exigida pela carga, podendo ser adicionadas as perdas causadas por correntes parasitas devido ao fluxo magnético de dispersão. Idealmente, o material elétrico que reduz essas perdas ao mínimo é o supercondutor. Em 1997, na revista IEEE Spectrum, em seu número 34, foram apresentados alguns exemplos do uso da supercondutividade em sistemas elétricos, com destaque para o emprego de materiais supercondutores nas bobinas do circuito elétrico de transformadores [1].

As perdas no circuito magnético dependem do material ferromagnético com o qual o núcleo é confeccionado. Embora essas perdas ocorram de forma simultânea, para efeito de análise elas são divididas em perdas por histerese, perdas por correntes de Foucault e perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo através de materiais metálicos empregados na montagem eletromecânica, como grampos e parafusos. Para diminuir essas perdas, os materiais magnéticos a serem empregados no núcleo devem possuir permeabilidade magnética elevada, baixa força coerciva e resistividade elétrica elevada.

Os materiais ferromagnéticos empregados em núcleos de transformadores de baixas e de altas potências que reúnem

essas propriedades são as ligas amorfas do sistema ternário ferro-boro-silício (Fe-B-Si) [2].

Neste trabalho são apresentadas algumas considerações sobre estudos teóricos e experimentais relativos aos métodos de medição das perdas eletromagnéticas e da corrente de excitação em transformadores monofásicos de baixa potência: um de 100 VA e outro de 1 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz. Para fins de estudos comparativos, os núcleos desses transformadores são constituídos por diferentes materiais magneticamente moles: chapas de FeSi e liga amorfa Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub>.

Na fundamentação teórica parte-se do modelo representativo do transformador, incluindo todos os seus parâmetros refletidos ao primário.

Os métodos e ensaios experimentais foram realizados tomando como base as recomendações da NBR 5380 [3].

Fundamentalmente, o que se procura investigar neste trabalho é a hipótese que a liga amorfa do núcleo de um transformador exposta ao meio ambiente, sofrendo o processo natural de oxidação, ao longo do tempo, pode resultar no aumento das perdas em vazio e no valor da intensidade da corrente de excitação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Comparação entre FeSi GO e ligas amorfas

FeSi de grãos orientados (GO) e ligas amorfas são obtidos por tecnologias diferentes. Os primeiros mediante processo de laminação a frio e os segundos por técnicas de solidificação rápida. O teor de silício nas chapas de grãos orientados varia na faixa de 3% a 3,5% e a resistividade de 10 a 47  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ; já a liga amorfa Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub> possui resistividade cerca de três vezes maior: 135  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ . As espessuras das chapas de FeSi GO empregadas em núcleos de transformadores de distribuição variam de 0,23 a 0,30 mm. As espessuras das fitas de liga amorfa geralmente variam entre 0,0025 e 0,035 mm.

As ligas amorfas e as chapas de FeSi GO distinguem-se, também, no que diz respeito à estrutura atômica. O FeSi GO

tem estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado (CCC). Já as ligas amorfas se caracterizam por não apresentarem ordenação a curta distância. Essa diferença na estrutura atômica faz com que as ligas amorfas apresentem baixa força coerciva e área do laço de histerese mais reduzida.

Em termos comparativos, as ligas amorfas apresentam indução de saturação ( $B_s$ ) mais reduzida que as ligas de FeSi GO. No caso específico da liga  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ , o valor de  $B_s$  é 1,56 T e para o Fe-3,2%Si, 60 Hz, o valor de  $B_s$  é 1,85 T.

Estudos sobre o desenvolvimento de ligas amorfas com valores mais elevados de  $B_s$  foram realizados por Ogawa et al., [4].

## 2.2. Modelamento do transformador

Para a análise e o levantamento de um modelo representativo de um transformador, todas as suas imperfeições devem ser levadas em conta. Neste sentido, podem ser empregados dois métodos:

1. Um modelo de circuito equivalente, baseado em princípios físicos, ou;
2. Um modelo matemático, baseado na teoria clássica dos circuitos acoplados magneticamente [5].

Ambos os métodos podem servir para o estudo do desempenho do transformador. Entretanto, o modelo do circuito equivalente é o que fornece um melhor entendimento do fenômeno físico envolvido.

Assim, adotando como base o modelo do circuito equivalente para o transformador ideal e adicionando-se as representações das resistências dos enrolamentos, reatâncias de dispersão, reatância de magnetização e uma resistência que represente as perdas no núcleo, o transformador real pode ser representado pelo circuito equivalente conforme ilustrado na Fig. 1.

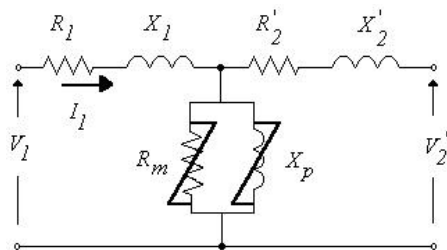


Fig. 1 Circuito equivalente refletido ao primário.

Na Fig. 1:  $V_1$  é a tensão de alimentação do primário;  $R_1$  é a resistência do enrolamento primário;  $X_1$  é a reatância de dispersão do primário;  $R_m$  é a resistência representativa das perdas ativas no núcleo;  $X_p$  é a reatância de magnetização;  $R'_2$  é a resistência do enrolamento secundário, refletido ao primário;  $X'_2$  é a reatância de dispersão do secundário, refletida ao primário; e  $V'_2$  é a tensão do secundário, refletida ao primário.

Neste modelo, os parâmetros resistências e reatâncias de dispersão são lineares, enquanto os parâmetros  $X_p$  e  $R_m$  são não-lineares e representam as perdas eletromagnéticas decorrentes do processo cíclico de magnetização e desmagnetização do núcleo. Fisicamente, a reatância de magnetização  $X_p$  é diretamente proporcional à permeabilidade magnética do material do núcleo e  $R_m$  é diretamente proporcional à resistividade desse material.

Assim, quanto mais elevadas forem a permeabilidade magnética e a resistividade do material magnético do núcleo, menor será a intensidade da corrente de excitação e, por consequência, menores serão as perdas no núcleo.

Importante ressaltar que as impedâncias representadas no circuito equivalente estão relacionadas com as componentes de tensão e corrente na frequência fundamental e, por isso, a corrente  $I_1$  deve ser representativa desta componente. Contudo, há de se considerar que a corrente de excitação possui duas componentes: uma em fase com a tensão e outra em quadratura que, em função da não linearidade magnética do núcleo, possui componentes harmônicas, sendo a de ordem três a mais significativa. Esta observação é importante na medição das perdas e na medição desta corrente, pois se o valor eficaz desses harmônicos atingir 50% da componente fundamental, o valor eficaz da corrente de entrada será  $(1+0,52)/2 = 1,12$  vezes o valor da componente fundamental [6].

Uma das vantagens em se determinar um modelo equivalente para o transformador, é a possibilidade do estudo antecipado de seu comportamento, a partir de técnicas de análise de circuito ou empregando técnicas computacionais (identificação e estimação de parâmetros), incluindo a não-linearidade [7].

A inclusão da não-linearidade é importante, pois os transformadores funcionam com variações temporais de fluxo que colocam, às vezes, o ponto de operação um pouco acima do joelho da curva de saturação.

A determinação de parâmetros elétricos e magnéticos de transformadores pode ser conseguida mediante o emprego de instrumentos de medição (amperímetros, voltmímetro e wattímetros) ou por um sistema de aquisição, no qual os sinais analógicos são amostrados e convertidos para a forma digital e processados em microcomputador, caracterizando um Instrumento Virtual [8-9].

Procedimentos relativos aos testes experimentais para a determinação das características dinâmicas das liga amorfa diferem do emprego tradicional do quadro de Epstein. Nesse sentido, um método alternativo é proposto por Boglietti et al. [10].

## 2.3. Erros de medição das perdas no núcleo

No caso de medição direta das perdas no núcleo de transformadores o erro relativo pode ser estimado a partir das próprias grandezas envolvidas na medição das perdas  $P$  no núcleo: a tensão  $V$ , a corrente  $I$ , e o ângulo de fase  $\phi$  entre elas.

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial P}{\partial \phi} \Delta \phi. \quad (1)$$

Assim, desde que a tensão e a corrente possam ser medidas por voltmímetro ou amperímetro com classes de exatidão suficientemente baixas, os erros absolutos  $\Delta V$  e  $\Delta I$  podem ser considerados praticamente nulos, o que torna o incremento da potência simplificado e dependente do erro de fase  $\Delta \phi$ .

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \phi} \Delta \phi \quad (2)$$

A equação (2) representa o erro absoluto. Porém, uma expressão mais rica em informações pode ser obtida, algebricamente, a partir do erro relativo:

$$\left| \frac{\Delta P}{P} \right| = | -\tan \phi \Delta \phi | = | \tan \phi | |\Delta \phi| \quad (3)$$

De acordo com a equação (3), na medida em que  $\phi$  se aproxima de  $90^\circ$ ,  $|\tan \phi|$  aproxima-se de infinito. Portanto,  $\Delta \phi$  deve ir para zero, de modo a permitir que o erro relativo seja o menor possível.

Na Tabela 1 são apresentados diversos valores de erros para diferentes valores de  $\phi$ . É interessante notar que o erro cresce muito rapidamente na medida em que  $\phi$  se aproxima de  $90^\circ$ .

Tabela 1. Erros relativos na medição das perdas no núcleo [11].

$\phi$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$	$85^\circ$	$87^\circ$	$88^\circ$
$\Delta P/P$ (%)	9,1	14,4	29,7	59,8	99,8	149,9

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ensaios com transformadores de 100 VA

Na realização dos ensaios experimentais foi utilizada uma bancada de testes, conforme mostrada na Fig. 2, na qual podem ser vistos, em primeiro plano, os dois transformadores monofásicos de baixa potência (100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz): no centro o transformador com núcleo de FeSi e à direita o protótipo de transformador com núcleo de liga  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  amorfa, no segundo plano podem ser vistos um autotransformador e um osciloscópio.

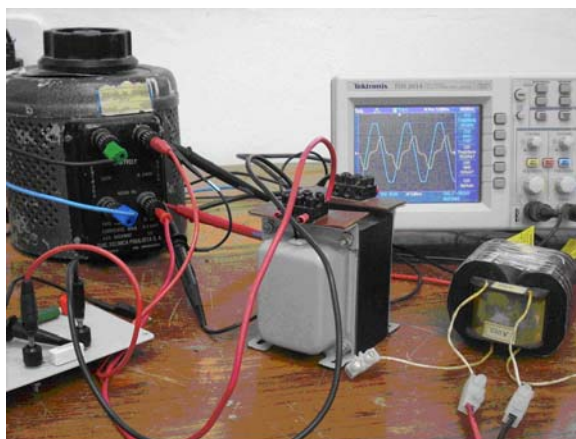


Fig. 2. Configuração da montagem experimental.

Um estudo comparativo sobre o desempenho desses transformadores foi apresentado por B. A. Luciano, em 1995 [2]. Nos ensaios experimentais realizados nesse estudo foram utilizados: uma fonte de tensão senoidal, um medidor de grandezas elétricas (Digital Power Meter, classe 0,1), um multímetro digital True RMS (classe 0,1), um amperímetro analógico (classe 0,5) e um voltímetro analógico (classe 0,5).

Treze anos depois, em 2008, o primeiro autor deste trabalho e seus colaboradores realizaram novos estudos, buscando, desta vez, identificar os possíveis efeitos do envelhecimento magnético dos materiais dos núcleos sobre as perdas e correntes de excitação desses equipamentos.

As formas de ondas das correntes de excitação dos respectivos transformadores são apresentadas nas figuras 3 e 4.

Conforme pode ser observado, essas formas de onda diferem da forma de onda senoidal da tensão de excitação devido à não-linearidade da característica magnética do material do núcleo.

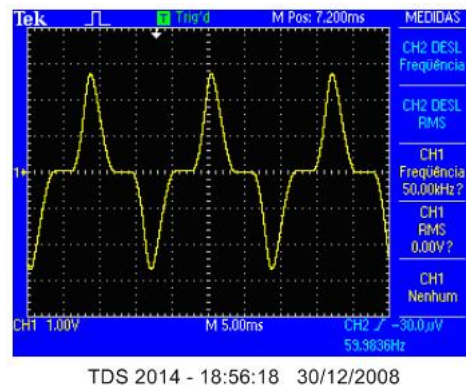


Fig. 3. Forma de onda da corrente de excitação do transformador com núcleo de liga amorfa.

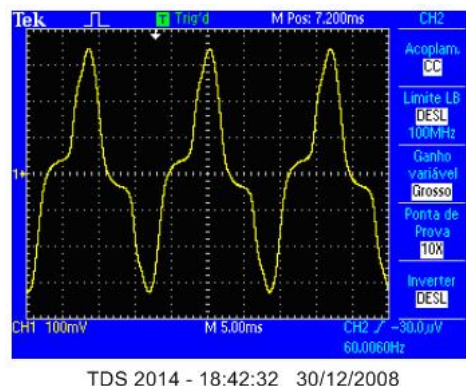


Fig. 4. Forma de onda da corrente de excitação do transformador com núcleo de FeSi.

Na Tabela 2 é apresentado o resultado comparativo das correntes de excitação em função dos materiais dos núcleos.

Tabela 2. Corrente de excitação em função do material magnético do núcleo e do tempo.

Material do núcleo	Corrente de excitação (A)	
	Mai/1995	Dezembro/2008
Liga amorfa	0,05	1,37
Ferro-Silício	0,13	0,13

Conforme se pode perceber, a partir dos valores apresentados na Tabela 2, que enquanto o valor da corrente de excitação do transformador com núcleo de FeSi se manteve inalterado, houve um significativo aumento no valor da intensidade da corrente de excitação do transformador com núcleo de liga amorfa. Esse aumento é um forte indicador da degradação da permeabilidade magnética da liga amorfa devido ao processo de oxidação a que ela foi submetida ao longo do tempo: maio/1995 a dezembro/2008.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados comparativos das perdas nos núcleos, realizados em maio/1995, imediatamente depois de a liga amorfa ter sido

submetida ao tratamento magnetotérmico [12] e o transformador com núcleo de FeSi ter sido fabricado.

Tabela 3. Perdas no núcleo em função do material magnético.

Material do núcleo	Perdas ativas (W)
Maio/1995	
Liga amorfa	0,72
Ferro-Silício	5,01
Dezembro/2008	
Liga amorfa	8,30
Ferro-Silício	4,35

Pode-se perceber, a partir dos valores apresentados na Tabela 3, relativos a maio de 1995, que no transformador com núcleo de liga amorfa houve uma redução de 85,62% nas perdas ativas (W) com relação ao transformador com núcleo de FeSi.

Ainda na Tabela 3 são apresentados os resultados comparativos das perdas nos núcleos em dezembro/2008. O que fica evidenciado é que desta feita houve uma inversão de desempenho: um valor mais elevado das perdas no transformador com núcleo de liga amorfa com relação ao transformador com núcleo de FeSi. Essa inversão reforça a hipótese levantada no último parágrafo deste artigo de que o processo de oxidação resulta na degradação da permeabilidade magnética da liga amorfa, refletindo no aumento das perdas no núcleo.

Como as chapas de FeSi são recobertas por uma fina camada de material isolante, que as protegem do processo de oxidação, não ocorreu aumento das perdas. A pequena diferença, para menos, entre os valores medidos em maio/1995 e dezembro/2008 justifica-se pelo emprego de instrumentos de medição de potência ativa com diferentes classes de exatidão.

### 3.2. Ensaios com transformadores de 1 kVA

Na Fig. 5 é apresentado o protótipo de transformador com núcleo de liga amorfa de 1 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz em segundo plano, e no primeiro plano o instrumento utilizado para medição das perdas em vazio (perdas ativas no núcleo).



Fig. 5. Transformador com núcleo de liga amorfa de 1 kVA (200 V/110 V, 60 Hz).

É oportuno assinalar que diferentemente do protótipo de 100 VA, o núcleo do protótipo de 1 kVA, antes de ser envolvido pelas bobinas do primário e do secundário, foi submetido a uma pintura que o mantém protegido contra o processo de oxidação.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais comparativos entre o transformador com núcleo de liga amorfa e o transformador com núcleo de FeSi.

Tabela 4. Perdas ativas e correntes de excitação dos transformadores de 1 kVA.

Material do núcleo	Perdas ativas (W)	Corrente de excitação (A)
Maio/1995		
Liga amorfa	2,50	0,14
Ferro-Silício	19,00	0,24
Dezembro/2008		
Liga amorfa	2,76	0,12
Ferro-Silício		

Conforme se pode observar, as características do transformador com núcleo de liga amorfa se mantiveram praticamente inalteradas. Tal fato se deve a proteção do núcleo com a pintura contra oxidação. Os ensaios com o transformador com núcleo de FeSi em 2008 não foram realizados, pois o foco do interesse estava centrado no desempenho do núcleo de liga amorfa.

## 4. CONCLUSÃO

Na medição direta das perdas ativas no núcleo de transformadores monofásicos de baixa tensão, na frequência de 60 Hz, mediante o emprego de amperímetro, voltímetro e wattímetro, há um erro relativo que depende do ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Esse erro cresce rapidamente na medida em que o ângulo se aproxima de 90°, comportamento típico dos materiais magneticamente moles de alta permeabilidade magnética, como as ligas amorfas e as ligas nanocristalinas.

De acordo com os ensaios experimentais apresentados neste trabalho, os valores da corrente de excitação e, conseqüentemente das perdas ativas em transformadores com núcleo de liga amorfa aumentam na medida em que esses materiais ficam submetidos ao processo de oxidação. Entretanto, para que se tenha uma comprovação mais efetiva desses efeitos, ensaios mais exaustivos devem ser realizados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Revista IEEE Spectrum, número 34, julho de 1997.
- [2] B. A. Luciano, "Estudo de aplicações da liga Fe78B13Si9 amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência". Campina Grande, 115 p. Tese (Doutorado) – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5880, "Transformadores de potência. Método de ensaio". Rio de Janeiro, maio 1993, 59 p.

- [4] Y. Ogawa, M. Naoe, Y. Yoshizawa e R. Hasegawa, "Magnetic properties of high Bs Fe-based amorphous material". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 304, pp. 675-677, 2006.
- [5] G. R. Slemon e A. Straughen, "Electrical machines". Philippines: Addison-Wesley Publishing Company, 1982, 575 p.
- [6] G. R. Slemon, "Equipamentos magnetelétricos", Vol. 1. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1974, 240 p.
- [7] L. M. Neto, D. Bispo e F. A. Simoni, "Single-phase transformers: a non-linear analysis", Florianópolis: Anais do Brazilian Power Electronics Conference, SOBRAEP/UFSC, pp. 327-332, 1991.
- [8] E. Carminati e A. Ferrero, "A virtual instrument for the measurement of the characteristics of magnetic materials". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, NO. 6, pp. 1005-1009, dec. 1992.
- [9] B. A. Luciano, M. E. Morais, M. A. G. Camacho e L. E. B. Silva, "Um instrumento virtual para a realização de ensaios de circuito aberto em transformadores monofásicos", Anais do II Semetro, pp. 197-201, Curitiba, Brasil, setembro de 1996.
- [10] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari e F. Profumo, "Amorphous metal alloys wound cores test procedure". *Industrial Applications Society Annual Meeting*, pp. 30-36, 1990.
- [11] D. F. Tan, J. F. Vollin e S. M. Cuk, "Effective control of error in a direct measurement of core-loss power". *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. MAG-31, NO. 3, pp. 2280-2284, 1995.
- [12] B. A. Luciano e C. S. Kiminami, "Transformador com núcleo de material amorfo: efeito do tratamento magnetotérmico". Anais do 50º Congresso Anual da ABM, pp. 1-4, São Pedro Brasil, agosto 1995.