

ANÁLISE E MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM CORREÇÃO DE HARMÔNICOS

ILTON A. PEREIRA JR., MARCELLO MEZAROA

Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (nPEE)

Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)

Centro de Ciências Tecnológicas (CCT)

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Joinville, SC – Brasil

SÉRGIO HAFFNER, LUÍS ALBERTO PEREIRA

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS – Brasil

Emails: ilton.pereira@gmail.com, slhaffner@gmail.com,

mezaroba@joinville.udesc.br, lpereira1963@gmail.com

Abstract— This article presents a study on the influence of frequency variation in the magnetic properties of materials. Tests are performed in the Epstein frame, the measurements are being obtained through a data acquisition system PC-based, which is controlled by software developed in LabVIEW. The results are the curves of magnetization and specific losses for various frequencies preset, and evaluated the current and voltage harmonic distortion during the tests. At the end, it's presented a methodology capable of performing the harmonics cancellation, generated by the steel saturation, through a voltage source with adjustable harmonics.

Keywords— Epstein frame or Epstein square, industrial automation, LabVIEW, magnetic quantities, virtual instruments.

Resumo— Este artigo apresenta um estudo sobre a influência da variação da frequência nas propriedades magnéticas dos materiais. Os ensaios são realizados em quadro de Epstein, sendo as medições obtidas através de um sistema de aquisição de dados baseado em PC, o qual é controlado por um software desenvolvido em LabVIEW. Como resultados têm-se as curvas de magnetização e de perdas específicas para diversas frequências pré-selecionadas, sendo avaliadas as distorções harmônicas de tensão e de corrente, durante os ensaios. Ao final é apresentada uma metodologia capaz de realizar o cancelamento das harmônicas, geradas pela saturação do aço, através de uma fonte de tensão com ajuste de harmônicos.

Palavras-chave— Automação industrial, grandezas magnéticas, instrumentação virtual, LabVIEW, quadro de Epstein.

1 Introdução

A utilização de materiais magnéticos vem aumentando ao longo dos anos em função do crescimento das economias mundiais. Tais materiais são aplicados principalmente na fabricação de motores e transformadores que por sua vez são utilizados na maioria dos aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos de nosso dia a dia.

De forma geral, todo material utilizado no processo de fabricação (Zeid, 1991; Casarotto Filho, 1999) de produtos implica custos diretos ou indiretos para o consumidor. Desta forma, surge a necessidade de se buscar a redução de custos ao longo desse processo. Isto normalmente ocorre com a utilização de materiais mais baratos, mais eficientes e com a própria redução do tamanho dos equipamentos. Quando se trabalha com materiais magnéticos a realidade continua a mesma, sendo realizados diversos estudos para avaliar e melhorar a qualidade das ligas metálicas.

Pode-se obter a curva de magnetização do material e as perdas magnéticas pelo teste de Epstein, pelo Toróide e através do Teste de Lâmina Única (*Single Sheet Tester*, SST). O teste de Epstein é o mais utilizado e o SST é o mais simples operacionalmente (Mthombeni & Pillay, 2004). O

teste de Epstein foi escolhido para a análise aqui apresentada devido à sua grande utilização na indústria e no meio acadêmico.

O procedimento para realização do teste de Epstein é padronizado pela norma brasileira NBR 6151 (NBR 6151, 1996) e conduz a resultados equivalentes às principais normas internacionais: norma americana ASTM A343 (ASTM A343, 1997), japonesa JIS C2550 (JIS C 2550, 2000) e pela norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2 (IEC 404-2, 1996), pois se assemelham no processo e também nos cálculos (Mendes, 2004). Esta metodologia é amplamente utilizada na indústria, sendo normalmente realizados ensaios em frequências padrões (50 Hz e 60 Hz), os quais atendem à maioria das aplicações.

No entanto, há uma necessidade crescente do mercado industrial em analisar as propriedades magnéticas dos materiais em frequências diferentes dos padrões. Isto ocorre devido à existência de diversos equipamentos que operam com frequências maiores que 60 Hz. Muitas vezes os parâmetros de projeto são estimados, através de fórmulas aproximadas, com base em ensaios realizados nas frequências padrões. Este procedimento não garante resultados precisos e dificultam as buscas por melhorias em projetos. As principais aplicações da indústria estão relacionadas ao uso de inversores de

frequência no controle dos motores e compressores. Estes equipamentos apresentam melhor eficiência que os convencionais (o pico de corrente de partida dos compressores convencionais é o principal responsável pelo alto consumo de refrigeradores, devido às manobras de liga e desliga, provocando ainda a inserção de harmônicos na rede de energia elétrica), possuindo partida suave, controle de velocidade e garantindo a redução do consumo de energia, pois é capaz de operar em diferentes condições de acordo com a necessidade (Altus, 2007; Weg, 2007).

Este artigo está organizado da seguinte forma. Inicialmente são descritas as características do quadro de Epstein e a metodologia para realização de ensaios. A seguir apresenta-se o sistema utilizado na realização de ensaios. Na seção seguinte são apresentados os resultados do estudo, obtendo as curvas de indução magnética *versus* campo magnético (curva B-H) (Soares, 2008) e de perdas magnéticas *versus* indução magnética para diferentes frequências, além da curva de perdas magnéticas *versus* frequência (para diferentes induções magnéticas). Analisa-se também o comportamento das componentes harmônicas e a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) das formas de onda de tensão e corrente ao longo dos ensaios. São apresentados, então, procedimentos para cancelamento dos harmônicos causados pela saturação do material. Para finalizar são apresentadas as conclusões.

2 Ensaios padronizados

A estimativa das características de magnetização dos materiais e obtenção das perdas magnéticas pode ser realizada através do teste de Epstein, procedimento padronizado pela norma brasileira (NBR 6151, 1996). Nesta sessão são apresentados o quadro de Epstein e o procedimento de ensaio.

2.1 O quadro de Epstein

O quadro de Epstein assemelha-se a um transformador constituído por dois enrolamentos: primário e secundário. As amostras de teste formam o núcleo magnético do transformador. O quadro de Epstein apresenta ainda um “indutor mútuo” para compensar o fluxo disperso no interior das bobinas, localizado no centro do espaço formado pelos enrolamentos. Os enrolamentos apresentam um total de 700 espiras e são recomendados para teste num intervalo de frequência de 25 a 400 Hz. Excita-se o enrolamento primário e mede-se a tensão secundária. O comprimento efetivo para o caminho magnético é adotado convencionalmente como 0,94 m, para o quadro de 25 cm (NBR 6151, 1996). A Figura 1 apresenta o quadro de Epstein, fabricado pela empresa Yokogawa, utilizado durante os ensaios.

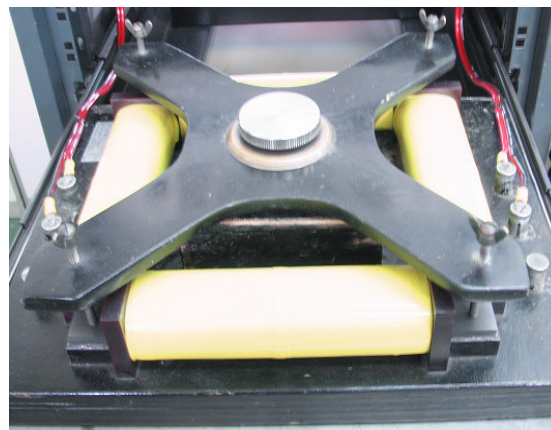


Figura 1. Quadro de Epstein.

2.2 Procedimento para o ensaio

Inicialmente, mede-se a massa da amostra com exatidão de $\pm 0,1\%$ através de uma balança de precisão. Em seguida inserem-se as lâminas no quadro de Epstein formando juntas duplamente sobrepostas nos cantos. Se metade das lâminas for cortada na direção da laminação e as restantes perpendiculares a esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro de Epstein e as últimas nos braços restantes. É necessário que os braços tenham o mesmo número de lâminas (NBR 6151, 1996; Mendes, 2004).

A fonte de tensão é ajustada de tal modo que o valor de tensão eficaz no secundário esteja de acordo com a equação (1), a qual é deduzida a partir da Lei de Faraday. Assim, a amplitude da indução desejada (ou valor de crista de indução) (Mendes, 2004) pode ser obtida pela aplicação da seguinte expressão:

$$U_2 = 4,44 f N_2 AB, \quad (1)$$

sendo U_2 a tensão eficaz medida no secundário do quadro de Epstein; f a frequência; N_2 o número de espiras; A a área da secção transversal do corpo de prova, B a indução magnética e o fator 4,44 está relacionado com o valor RMS da tensão senoidal.

Para se obter a curva B-H (Sadiku, 2004; Paul, 2006) é necessário o valor instantâneo da indução magnética, dado por:

$$B(t) = \frac{-1}{N_2 A} \int U(t) dt, \quad (2)$$

e o valor instantâneo do campo magnético, originado da aplicação da lei de Ampère,

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l}, \quad (3)$$

onde $I(t)$ é a corrente do primário e l é o comprimento do caminho magnético.

Após ajustada a tensão no secundário, mede-se a tensão no secundário e a corrente no primário. Estes valores são utilizados para o cálculo da tensão eficaz, tensão média, potência, corrente de pico, perdas magnéticas e a permeabilidade (NBR 6151, 1996). Outra relação importante é a razão entre a tensão eficaz e tensão média (válido para sinal senoidal

retificada em onda completa), conhecido como fator de forma (FF), parâmetro utilizado na correção das perdas devido à inserção de harmônicos (NBR 6151, 1996), como mostra a equação (4):

$$FF = \frac{U_2}{\bar{U}_2}, \quad (4)$$

onde $\bar{U}_2$ é a tensão média medida no secundário. As perdas magnéticas corrigidas do material são dadas por:

$$P_c = \frac{P_t}{K_H + K_P \left(\frac{FF}{1,1107} \right)^2}, \quad (5)$$

sendo P_t as perdas totais, calculadas a partir dos valores medidos de corrente no primário e tensão no secundário, K_H e K_P são coeficientes obtidos no processo de separação das perdas totais em histerésicas e Foucault (NBR 6151, 1996) e 1,1107 corresponde ao fator de forma de uma função senoidal. As perdas específicas (perdas magnéticas) são obtidas dividindo-se as perdas totais da expressão (5) pela massa efetiva da amostra (NBR 6151, 1996).

3 Sistema desenvolvido

O sistema é composto por uma bancada, um painel elétrico, um quadro de Epstein e um computador pessoal (PC), conforme ilustrado na Figura 2. No painel elétrico ficam os transdutores de corrente e de tensão, a fonte de alimentação e o quadro de Epstein. No PC está a placa de aquisição de dados (NI-6220) e o software desenvolvido em LabVIEW (National Instruments, 2009a), o qual faz a aquisição e o processamento dos sinais. Esta arquitetura de aquisição baseada em PC é chamada de instrumentação virtual, tendo como vantagem a flexibilidade e o baixo custo (National Instruments, 2009b).

Durante os ensaios foram utilizadas duas fontes de tensão. A primeira, uma fonte de tensão CA linear

com variação em amplitude e em frequência. A outra, uma fonte CA chaveada com variação em amplitude, frequência e com ajuste de harmônicos.

Podem-se realizar ensaios entre 45 a 400 Hz, para uma tabela de indução previamente configurada, variando de 0 a 1,7 T. Sendo necessário respeitar os limites dos transdutores (corrente – 10 A e tensão – 100 V), e do próprio quadro de Epstein (capacidade de 10 A).

Após o ensaio ser programado, o software configura automaticamente a fonte CA para acionar a saída de tensão de acordo com a equação (1), sendo o sinal realimentado em função da diferença entre a referência e a leitura do transdutor de tensão.

Os parâmetros da aquisição de dados são configurados no software *Measurement and Automation Explore* (MAX) (National Instruments, 2009c), através de canais virtuais, onde são atribuídas ao tipo de sensor as respectivas escalas, a associação dos canais físicos da placa e a forma de leitura dos canais. Sendo utilizados na aplicação dois canais simultâneos, a uma taxa de aquisição de 20.000 amostras por segundo, em modo contínuo e leitura diferencial. O esquemático de ligação entre o transdutor (saída V_s) e a entrada da placa (analog input, AI+ e AI-) é apresentado na Figura 3.

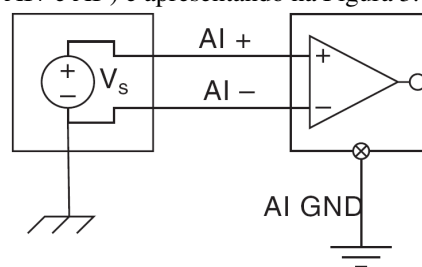


Figura 3. Diagrama esquemático de ligação entre o transdutor e a placa de aquisição.

A aquisição de dados no LabVIEW é realizada através dos VIs (programa ou chamada de função do LabVIEW) da biblioteca DAQMX, os quais executam as tarefas (*Task*) pré-configurada. O

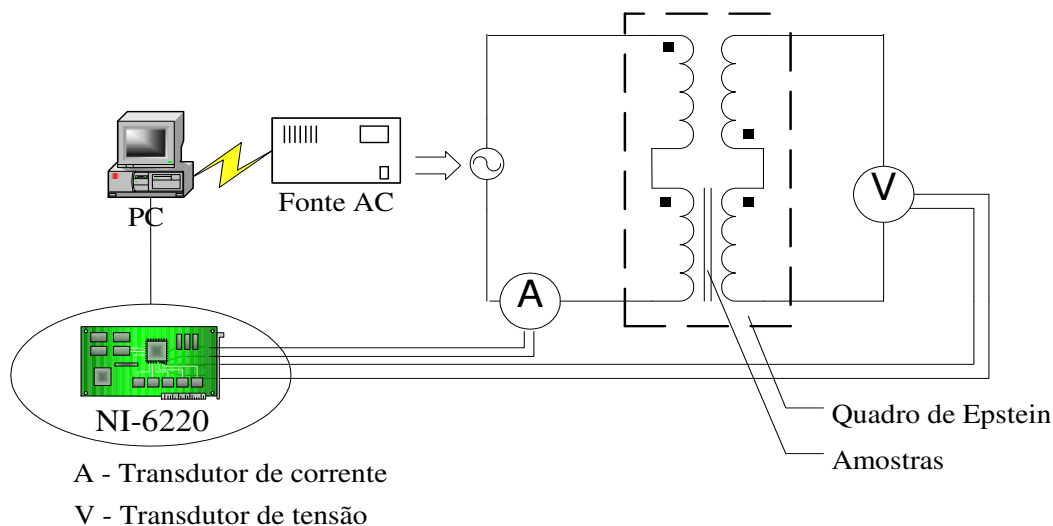


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema proposto para teste de Epstein.

processamento destes sinais é feito através dos respectivos VIs:

- *Extract Single Tone Information.vi* – Calcula a frequência da medição de tensão;
- *Basic Averaged DC-RMS.vi* – Cálculo de tensão RMS, corrente RMS e a potência através do nível CC do produto (ponto a ponto) entre corrente e tensão;
- *Waveform Peak Detection.vi* – Detecção de picos, usado no cálculo da corrente de pico, a qual é utilizada para a obtenção do pico de H (equação (3)).
- *Integral $x(t)$.vi* – Utilizado no cálculo de B, em função do sinal de tensão (equação (2)).
- *Harmonic Distortion Analyzer.vi* – Fornece informações dos harmônicos e da THD, para sinais de tensão e corrente.

Dessa forma, podem-se obter os respectivos resultados ao longo do ensaio, pré-configurado com frequências fixas e indução variável:

- Curva B–H;
- Curva de magnetização – formada pelos picos de B e H;
- Curva de perdas específicas – formada pelas perdas em função da B;
- THD de corrente e de tensão.

Outra forma de realização de ensaio é através de variação da frequência para induções fixas ao longo do ensaio, tendo como resultados:

- Curva B–H;
- Curva de H *versus* frequência;
- Curva de perdas específicas *versus* frequência;
- THD de corrente e de tensão.

Sabe-se que durante a saturação do aço, provocado pelo aumento da indução, ocorre a distorção da forma de onda de tensão no secundário. Isto acontece a partir do joelho da curva de magnetização. Dessa forma, o fluxo nas amostras deixa de ser puramente senoidal devido à presença de harmônicos. A norma NBR 6151 recomenda a correção dos harmônicos, quando possível. O estudo apresentado por Batistela (2001) contempla a

correção de harmônicos, realizado através do projeto de inversor de tensão com filtro, incluindo uma malha de realimentação. Apesar das vantagens do projeto proposto, o mesmo não está disponível comercialmente, sendo de difícil implementação e requerendo um conhecimento avançado na área de controle e eletrônica.

Neste artigo é apresentada uma metodologia mais simples que utiliza equipamentos comerciais e se baseia na utilização de uma fonte com variação em amplitude, em frequência e com ajuste de harmônicos. Desta forma, as faixas de indução e de frequência de interesse são necessários para a especificação da fonte de alimentação a ser utilizada. Os sinais são adquiridos, processados e realimentados através da comunicação com a fonte de tensão. O sistema tem como referência uma amplitude e uma frequência a serem seguidas. Quando existe a presença de harmônicos, estes são defasados de 180° e somados a referência, provocando o cancelando de cada harmônica no secundário. Um diagrama esquemático da metodologia de controle proposta é apresentado na

Figura 4.

4 Resultados

Respeitando o limite de indução de 1,7 T, podem-se obter resultados para uma faixa de frequência de 45 a 200 Hz. Observa-se na Figura 5 os resultados de um ensaio realizado de forma sequencial para as frequências de 50, 100, 150 e 180 Hz, utilizando a amostra E230-Acesita, com grão não-orientado e tratamento, corte longitudinal e transversal, densidade de $7,8 \text{ g/cm}^3$, massa de 786,8 g, comprimento de 28 cm e espessura de 0,6 mm. Para estes ensaios foram pré-definidos 12 valores de indução (entre 0,6 e 1,7 T) sendo a fonte de tensão, que alimenta o circuito primário, automaticamente ajustado para obter os valores programados com uma tolerância de $\pm 0,1 \text{ V}$. A Figura 5(a) mostra a tradicional curva de magnetização do material e a Figura 5(b), a curva de perdas específicas, ambas realizadas para diferentes frequências.

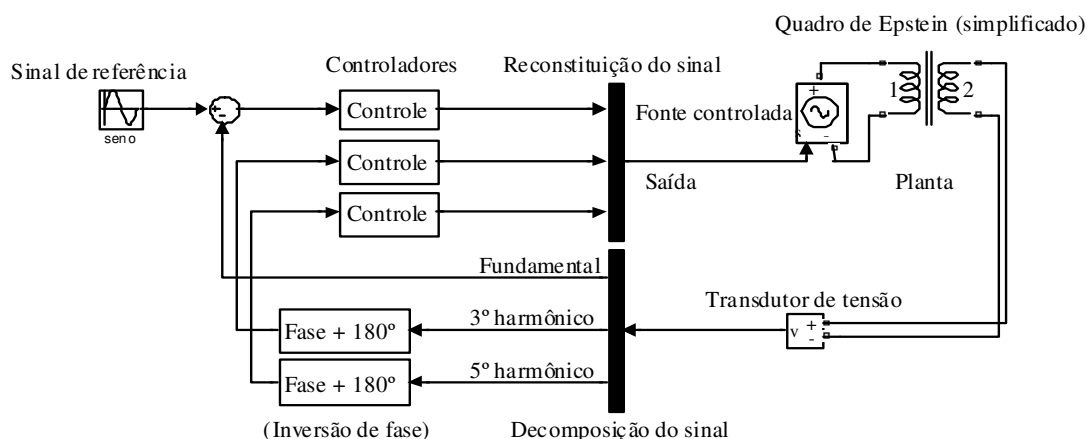
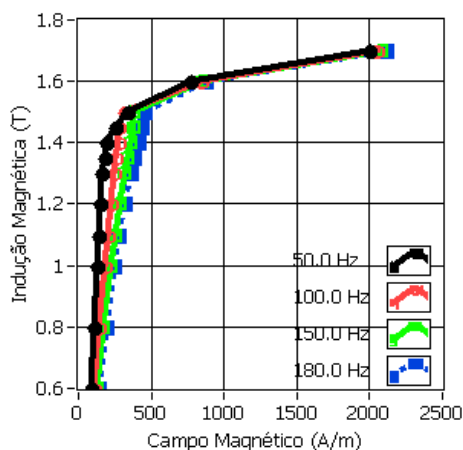


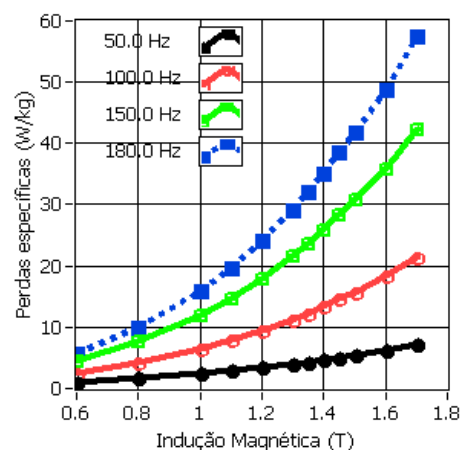
Figura 4. Diagrama da topologia de controle para correção de harmônicos.

Para um mesmo material, observa-se que o comportamento das curvas de magnetização da Figura 5(a) não é alterado de forma significativa com a variação da frequência. Com o aumento da frequência, embora ocorra uma redução na permeabilidade do material (comprovada pela variação na declividade das curvas de magnetização no intervalo de 0 a 500 A/m), verifica-se que ocorre um deslocamento no joelho da curva, fazendo com que a saturação ocorra em valores mais elevados de H e B . Esta característica foi também observada em outras amostras de diferentes materiais ferromagnéticos ensaiadas segundo mesmo procedimento.

No gráfico de perdas específicas, Figura 5(b), é possível verificar o conhecido aumento das perdas com relação variação da indução magnética e também um expressivo aumento das perdas com o crescimento da frequência. Observar que para frequências menores (até 60 Hz), o crescimento é quase linear enquanto que para frequências a partir de 150 Hz assume uma forma aproximadamente quadrática.

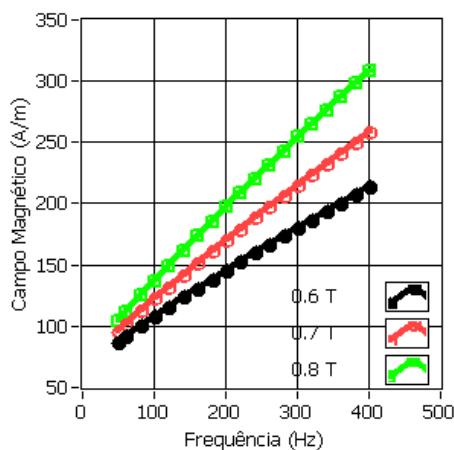


(a)

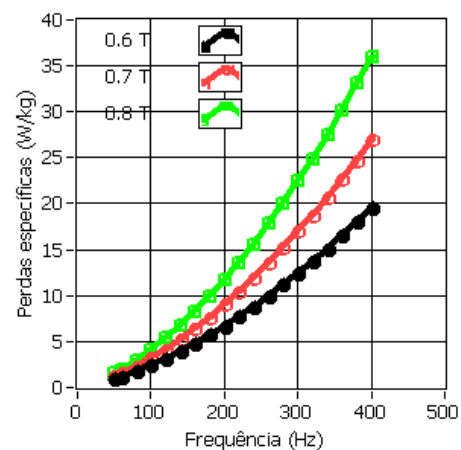


(b)

Figura 5. Ensaio sequencial para frequências fixas e induções variáveis. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas específicas.



(a)



(b)

Figura 6. Ensaio sequencial para induções fixas e frequências variáveis ao longo do ensaio. Tendo em (a) H versus frequência e em (b) as perdas específicas versus a frequência.

400 Hz, é necessário um campo de cerca de 310 A/m.

Na Figura 6(b) observa-se de forma bastante explícita o crescimento das perdas específicas com relação ao aumento da frequência, para valores definidos de indução magnética. Nota-se um comportamento polinomial, com expoentes crescentes à medida que a indução aumenta. Observar que as informações apresentadas na Figura 6(b) complementam aquelas mostradas na Figura 5(b), na qual a frequência varia apenas até 180 Hz.

Outro comportamento interessante é a distorção da forma de onda da corrente do primário e da tensão induzida no secundário, provocado pela saturação do material ao longo dos ensaios. A quantificação desta distorção foi realizada através da THD da corrente primária e da tensão secundária, obtidas diretamente pelo processamento dos sinais adquiridos nos ensaios.

A Figura 7 mostra o aumento da THD de corrente e de tensão quando o campo e a indução magnética são variados, sendo mantida a frequência. Observa-se que a THD da corrente de magnetização na Figura 7(a) e 7(b) mostram uma acentuada distorção e que esta apresenta redução com o

aumento da frequência. Por outro lado, a THD da tensão secundária da Figura 7(c) e 7(d) é bastante reduzida, sendo inferior a 6%, mantendo a redução com o aumento da frequência. Ainda, pode ser verificado que existe semelhança entre o comportamento da THD da corrente e da tensão, com relação à variação do campo e da indução.

Verificou-se durante os ensaios que a partir de 1,5 T, conforme já ilustrado na Figura 5(a) no joelho da curva de magnetização, existe a necessidade de corrigir os harmônicos de tensão do secundário. A metodologia proposta segue o diagrama da

Figura 4, tendo como resposta uma grande redução na THD de tensão do secundário. Uma comparação entre os valores calculados para a fonte de tensão sem correção de harmônicos (correção feita através de metodologia proposta pela norma NBR 6151 em função do FF conforme equação (5), sendo válido para sinal senoidal) e os resultados da metodologia que utiliza a fonte com correção de harmônicos (dispensando correções) pode ser observado na Figura 9. Porém tal diferença de valores só se verifica quando há distorção da tensão, do contrário os resultados são idênticos.

A partir dos resultados obtidos na indução de

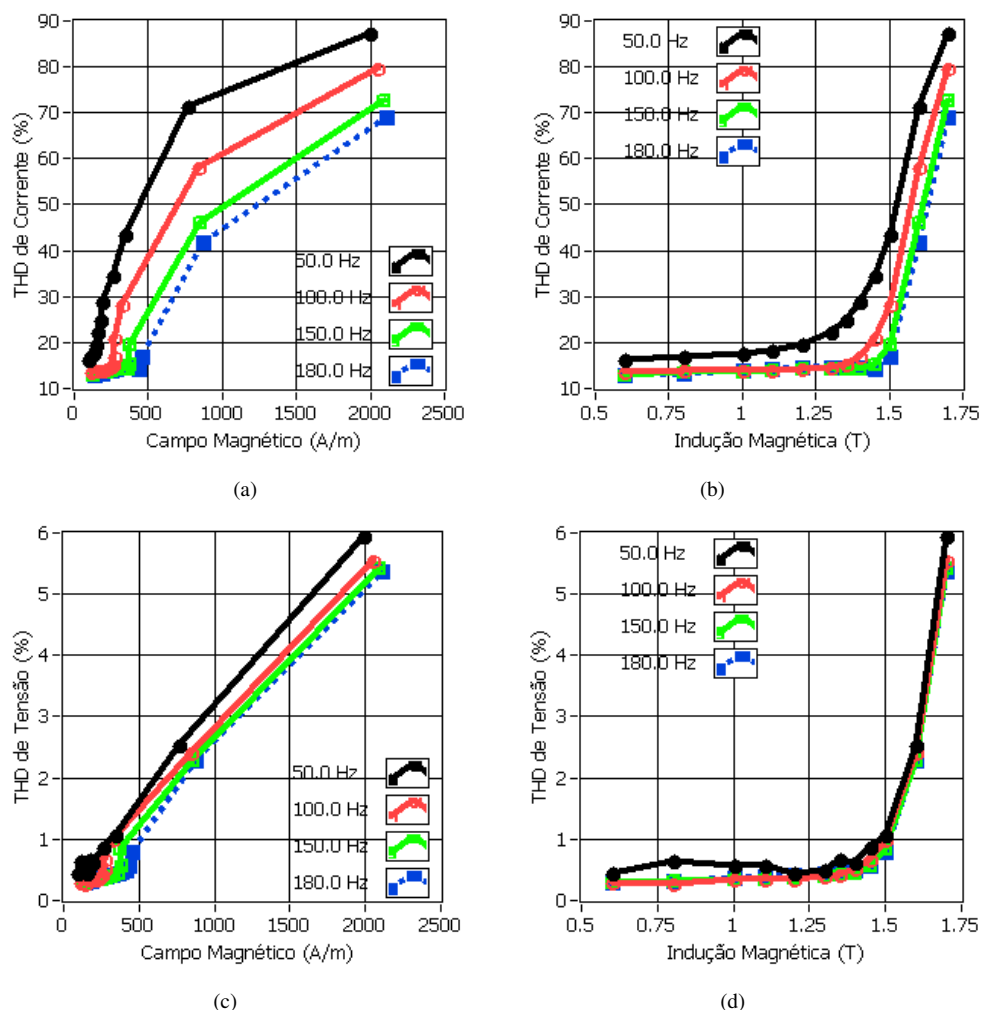


Figura 7. Avaliação da THD ao longo de ensaio sequencial em frequências fixas e induções variáveis. Sendo apresentadas em (a) a THD de corrente *versus* H, em (b) a THD de corrente *versus* B, em (c) a THD de tensão *versus* H e em (d) a THD de tensão *versus* B.

1,7 T, tem-se a THD de tensão igual 8% e para 1,75 T a THD fica em torno de 12%. Depois de aplicada a correção de harmônicos, a THD de tensão ficou abaixo dos 3%, conforme apresentado na Figura 8.

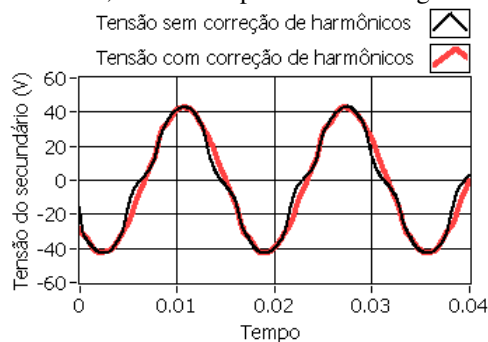


Figura 8. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos.

Outra abordagem que poderia ser implementada, consiste de calcular as perdas utilizando somente a estimativa da fundamental da tensão do secundário. Dessa forma, supõe-se que há diversas potências na saída, sendo a de interesse a potência gerada pela primeira harmônica. Dessa forma o processo de correção também deixa de ser utilizado. A comparação entre os 3 métodos é apresentada na Figura 9.

De forma a complementar a análise, apresenta-se na Figura 10 o comportamento do fator de forma com o aumento da indução, no qual se verifica que o erro percentual em relação a 1,1107 a partir de 1,5 T.

Observa-se que em 1,5 T (ou abaixo) não há necessidade de correção de harmônicos, o que resulta em resultados idênticos, no entanto a partir de 1,6 T, existe uma diferença considerável entre os resultados. Por exemplo, em 1,7 T a diferença entre as perdas com e sem harmônicos chega a quase 1 W/kg. Pode-se verificar que o método proposto,

através da estimativa da fundamental, apresenta resultados muito próximos do método com correção de harmônicos, mostrando que ambos estão coerentes e que a correção proposta pela norma NBR 6151 não é suficiente para garantir a precisão dos resultados na faixa acima de 1,5 T.

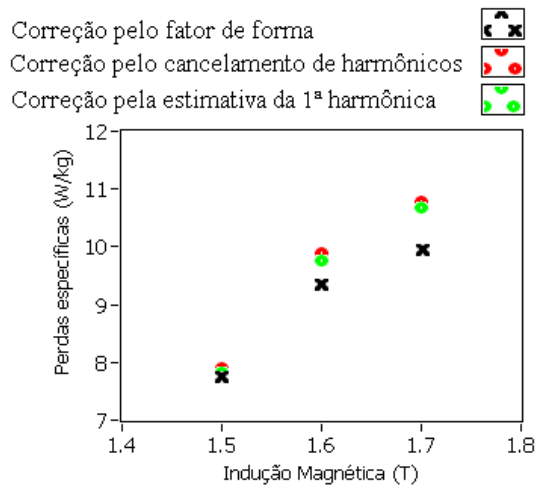


Figura 9. Comparação entre métodos de cálculo das perdas específicas

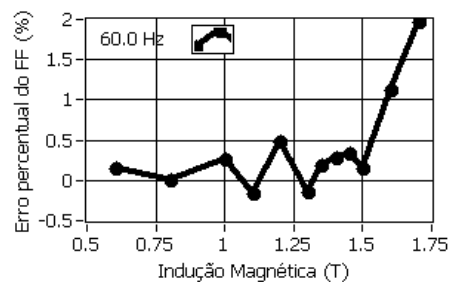


Figura 10. Evolução do erro percentual do FF com o aumento de H.

Os resultados obtidos durante todos os ensaios

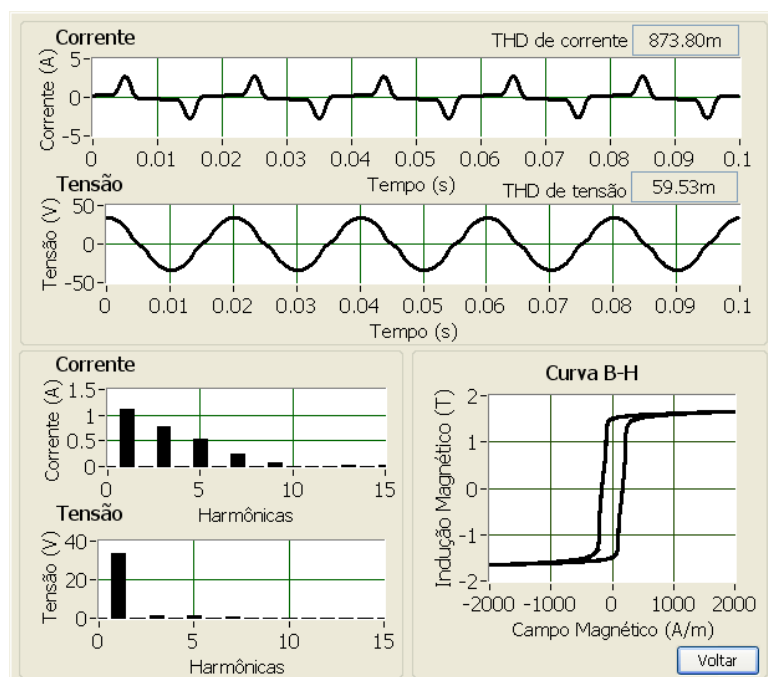


Figura 11. Tela do software para acompanhamento de ensaios. Sendo medido na indução de 1,7 T.

são acompanhados e analisados em tempo real. Uma das telas do software desenvolvido é apresentada na Figura 11. Observa-se na primeira curva, a corrente de magnetização, com alto nível de distorção, conforme ilustrado no primeiro gráfico de barras, o qual mostra as componentes harmônicas da corrente, sendo o primeiro termo o nível CC, o qual é zero, seguida pela harmônica fundamental e tendo grandes parcelas da 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, por outro lado, as componentes pares são nulas. No segundo gráfico, tem-se a curva de tensão no secundário, no qual se verifica a distorção da forma de onda de tensão, onde se observam no segundo gráfico de barras a harmônica fundamental e pequenas parcelas da 3ª e 5ª harmônicas. É apresentada também a curva B-H, para uma indução de 1,7 T calculada instantaneamente em função da corrente e da tensão medidas.

5 Conclusão

A solução proposta apresentou resultados coerentes com padrões do mercado, tendo como vantagem a grande faixa de variação em frequência. Outro importante resultado é possibilidade de geração das curvas de magnetização, a curva de perdas e a curva B-H. Podem ser realizados vários ensaios de forma sequencial para uma mesma amostra, podendo-se optar por um conjunto de curvas em diferentes frequências ou induções, facilitando a análise da região de interesse.

É importante ressaltar que durante a realização de ensaios em frequências superiores a 60 Hz, a tensão imposta para manter a indução requerida é elevada. Por outro lado, em baixas frequências, a corrente cresce e o limite do quadro necessita ser observado. Desta forma, a instrumentação empregada na aquisição da tensão e da corrente deve ser adequada para toda a faixa de interesse. Neste trabalho a tensão do secundário ficou limitada ao transdutor de 100 V, apresentando resultados coerentes na faixa de 0 a 1,7 T e 45 a 200 Hz. Optando-se por induções menores, de 0 a 0,8 T, pode-se chegar a variações na frequência de 0 a 400 Hz.

Outro resultado importante foi encontrado durante a comparação entre o método de correção das perdas em função do fator de forma e pelo método de correção das perdas pelo cancelamento de harmônicos. Verificou-se que a partir de 1,5 T a correção pelo fator de forma não é suficiente e que uma possibilidade para correção seria através do cálculo das perdas pela estimativa da fundamental.

6 Referências Bibliográficas

- Altus. (2007). *Inversores de Frequência*. Fonte: Altus: http://altus.com.br/ftp/Public/Portugues/Altus%20Institucional/Informativo_I&A/I&a63.pdf
- ASTM A343. (1997). America Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter- Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame*.
- Batistela, N. J. (2001). *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Casarotto Filho, N. (1999). *Gerência de projetos/engenharia simultânea*. São Paulo: Atlas.
- IEC 404-2. (1996). International Electrotechnical Commission. *Magnetic Materials - Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame*.
- JIS C 2550. (2000). Japanese Industrial Standard. *Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip*.
- Mendes, F. B. (2004). *Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas*. Dissertação (Mestre em Engenharia). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Mthombeni, L. T., & Pillay, P. (2004). Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation. 40.
- National Instruments. (2009a). *NI LabVIEW*. Acesso em 10 de Junho de 2009, disponível em National Instruments: <http://www.ni.com/labview/>
- National Instrumets. (2009b). *Virtual Instrumentation*. Acesso em 10 de junho de 2009, disponível em NI Developer Zone: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4752>
- National Instruments. (2009c). *NI DAQ Software Features and Technologies*. Acessado em 01 de março de 2010, disponível em NI Developer Zone: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8243>
- NBR 6151. (1996). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Paul, C. R. (2006). *Introduction to Eletromagnetic Compatibility*. New Jersey: Wiley.
- Sadiku, M. N. (2004). *Elementos de eletromagnetismo*. Porto Alegre: Bookman.
- Soares, M. A. (2008). *Eleticidade e eletromagnetismo*. Acesso em 10 de Junho de 2008, disponível em MSPC - Artigos e informações técnicas: <http://www.mspc.eng.br/elemag>
- Weg. (2007). *Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG*. Fonte: Weg Equipamentos Elétricos: <http://www.weg.net/files/products/2-2207.pdf>
- Zeid, I. (1991). *CAD/CAM theory and practice*. New York: McGraw-Hill.