

INSTRUMENTO VIRTUAL PARA CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE NÚCLEOS TOROIDAIS MAGNETICAMENTE MOLES

Thiago de Carvalho Batista¹, Benedito Antonio Luciano², Raimundo Carlos Silvério Freire³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, thiago.batista@ee.ufcg.edu.br

² Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, benedito@dee.ufcg.edu.br

³ Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, rcsfreire@dee.ufcg.edu.br

Resumo: Neste trabalho são apresentados estudos teóricos e experimentais sobre a caracterização de materiais magneticamente moles, sob a forma de núcleos toroidais. Nos estudos experimentais foi projetado um instrumento virtual, baseado em microcontrolador, capaz de adquirir, digitalizar e processar os sinais analógicos de tensões proporcionais aos valores da excitação magnética e da indução magnética, determinando desse modo os valores da permeabilidade relativa e da força coerciva. A partir desses resultados foi verificado que as propriedades magnéticas das ligas nanocristalinas são superiores em relação às ligas FeSi HiB e ferrite MnZn.

Palavras chaves: materiais magneticamente moles, instrumentação virtual, processamento digital de sinais.

1. INTRODUÇÃO

A instrumentação virtual constitui uma ferramenta capaz de conferir maior simplicidade, rapidez e precisão aos ensaios, além de redução de custo. Um instrumento virtual consiste na associação de elementos de *hardware* e de *software* para aplicações nos campos de medição e controle. O *hardware* é composto por uma placa de aquisição de dados com entradas que convertem as grandezas analógicas em grandezas digitais, de modo simultâneo ou multiplexado, além de um computador pessoal portátil ou de mesa. O *software* consiste em linguagens de programação de propósito geral, como C/C++, ou linguagens direcionadas à aquisição de dados, como LabVIEW ou EPICS.

No campo da medição de grandezas elétricas e magnéticas, os instrumentos virtuais apresentam vantagens em relação aos instrumentos convencionais, podendo-se citar o baixo custo de aquisição de computadores pessoais, quando comparado a um instrumento de uso específico. A facilidade de personalização desses instrumentos de acordo com as necessidades de cada aplicação evita a compra de *hardware* de alto custo, cuja configuração é definida pelo fabricante. O emprego de placas de aquisição de dados em aplicações mais elaboradas torna ainda mais simples o desenvolvimento, mesmo para usuários pouco experientes.

Com o avanço da tecnologia da ciência dos materiais, e por consequência o surgimento de novos materiais magnéticos, como por exemplo as ligas amorfas e as ligas nanocristalinas [1-2], torna-se necessário caracterizá-los. A caracterização magnética é fundamental para determinar em

que aplicação eletroeletrônica tal material sob estudo é apropriado.

Neste trabalho, para efeito de estudos experimentais, foi projetado um instrumento virtual, baseado em microcontrolador, capaz de adquirir, digitalizar e processar os sinais analógicos de tensões proporcionais aos valores da excitação magnética e da indução magnética. Esse equipamento foi utilizado para determinar os valores da permeabilidade relativa, da força coerciva, da densidade de fluxo magnético e da intensidade de campo magnético para os materiais investigados: FeSi HiB, ferrite MnZn e ligas nanocristalinas à base de Fe-Zr-(Cu)-B-(Si). A partir dos resultados, observou-se as propriedades magnéticas superiores das ligas nanocristalinas face às ligas FeSi HiB e ferrite MnZn.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Determinação do laço B versus H utilizando integração analógica

Uma possibilidade para a determinação experimental do laço B versus H do material magnético de um núcleo toroidal é a utilização do circuito apresentado na Fig. 1.

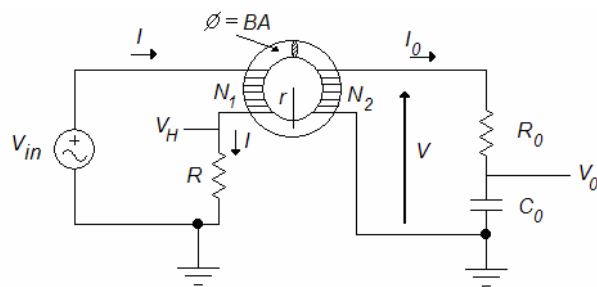


Fig. 1 – Circuito para determinação do laço B versus H com integração analógica

No circuito apresentado na Fig. 1, o sinal V_{in} é senoidal e obtido a partir de um gerador de funções. A amplitude de V_{in} é variada para cada experimento, com a finalidade de se obter a família dos laços de histerese. O sinal V_H , correspondente à corrente de excitação (lei de Ampère), é aplicado no canal horizontal do osciloscópio e o sinal V_0 , obtido a partir da integração do sinal na saída do

transformador, correspondente à tensão induzida (lei de Faraday), é aplicado no canal vertical. Operando o osciloscópio no modo XY, são exibidos os gráficos V_0 versus V_H . Tais gráficos correspondem aos laços de histerese (B versus H), pois os valores de densidade de fluxo magnético (B) e intensidade de campo magnético (H) são obtidos apenas pela multiplicação de constantes, de acordo com as Equações 1 e 2.

$$B = \left[\frac{R_0 C_0}{N_2 A} \right] V_0 \quad (1)$$

$$H = \left[\frac{N_1}{l_e R} \right] V_H \quad (2)$$

Nessas equações, A é a área efetiva da secção transversal do núcleo, em metros quadrados, N_1 e N_2 são os números de espiras do primário e do secundário, respectivamente, e l_e é o comprimento efetivo médio, em metros.

A permeabilidade magnética μ é dada pela relação 3.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3)$$

2.2. Hardware

O *hardware* desenvolvido na realização do equipamento proposto compreende as fontes de alimentação, circuitos condicionadores de sinais, circuitos de conversão analógica-digital e circuitos de interface de comunicação de dados.

No módulo de aquisição, os sinais proporcionais a tensão e a corrente são inicialmente tratados por circuitos de condicionamento para adequá-los ao processo de amostragem e digitalização de forma que o processador possa executar as operações desejadas [3-4].

O módulo que contém o microprocessador está associado às funções de conversão, escolha de escala automática de ganho dos sinais de interesse e envio dos dados para o microcomputador para a determinação da densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético, força coerciva e da permeabilidade magnética.

O condicionamento dos sinais analógicos V_0 e V_H para a digitalização é realizado conforme o diagrama de blocos apresentado na Fig. 2.

No circuito utilizado para implementar o diagrama de blocos da Fig. 2 foi utilizado o microcontrolador PIC-18F4520. O filtro passa-alta é utilizado apenas para retirar o nível DC do sinal e tem frequência de corte de 0,5 Hz. Como a frequência do laço B versus H em estudo é de 60 Hz, através da análise da *FFT* dos sinais V_0 e V_H , constatou-se a importância de se considerar até a 10ª harmônica. Portanto, o filtro passa baixa tem frequência de corte de 600 Hz, sendo utilizado para diminuir a influência de ruídos. Pelo teorema de Nyquist, a frequência de amostragem tem que ser no mínimo duas vezes maior que a frequência mais alta contida em um sinal. Desse modo, a frequência de amostragem deve ser de, no mínimo, 1200 Hz. No entanto,

na implementação final, visando uma melhor resolução, um período de amostragem de 0,1515 ms foi utilizado, correspondendo uma frequência de amostragem de 6,6 kHz.

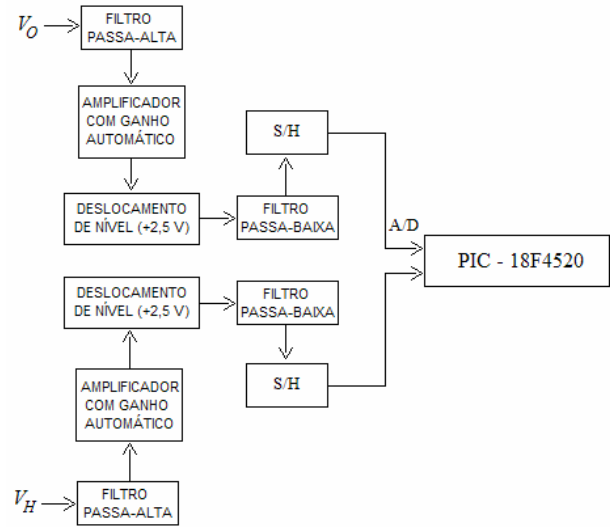


Fig. 2 – Diagrama de blocos para o condicionamento dos sinais V_H e V_0

Com a aquisição e a discretização dos sinais analógicos de interesse, a análise dessas variáveis pode ser feita. Para obtenção da permeabilidade magnética relativa foram empregadas as expressões 1, 2 e 3. Como os sinais V_0 e V_H estão discretizados, bastou apenas determinar a maior amplitude de cada sinal e substituir nas correspondentes equações.

Observa-se na Fig. 3 que raramente existe um ponto para o valor de B igual a zero; o que existe são valores próximos de zero (pontos 1 e 2). Para se estimar o valor da força coerciva (H_C) usou-se uma interpolação linear entre pontos 1 e 2.

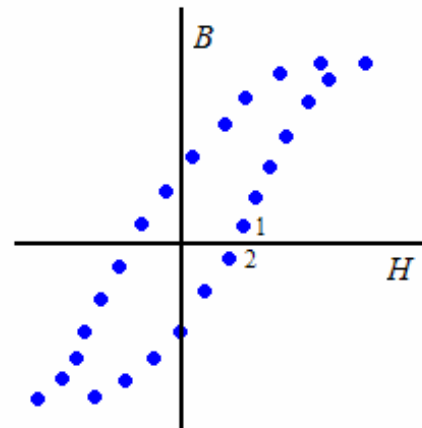


Fig. 3 - Pontos do laço B versus H

2.3. Software

O *software* é responsável pela execução das tarefas de aquisição dos dados, seleção de escalas, armazenamento em memória, processamento numérico, comunicação serial com a estação de trabalho e visualização de dados de forma gráfica e por tabela.

O *software* para monitoramento do sistema de medição possui uma interface de gerenciamento de dados entre o usuário e o *hardware*. A configuração do *software* permite ao usuário uma visualização simples e funcional das informações coletadas. Após ser estabelecida a comunicação entre o equipamento de medição e o computador, através da comunicação com a porta serial RS-232, os sinais digitalizados são transmitidos do PIC 18F4520 para o microcomputador, disponibilizando as variáveis de interesse. A densidade de fluxo magnético e a intensidade de campo magnético são disponibilizadas tanto em valores absolutos de pico, quanto na forma de gráficos, Fig. 4. O laço de histerese é disponibilizado em gráfico.

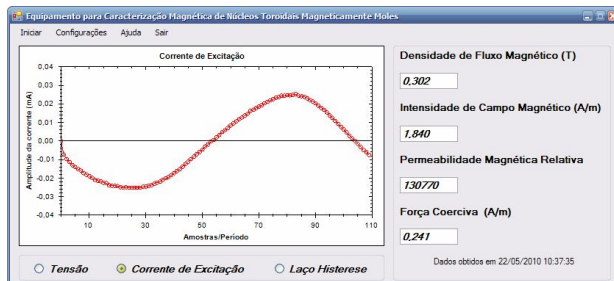


Fig. 4 - Tela de apresentação do *software* desenvolvido para o equipamento de caracterização magnética, corrente de excitação.

2.4. Determinação do laço B versus H utilizando integração digital

Para a comparação entre a integração analógica, na qual são utilizados capacitor e resistor, e a integração digital, na qual são utilizadas rotinas computacionais, foi utilizado o mesmo circuito apresentado na Fig. 1 sem o integrador analógico, conforme mostrado no Fig. 5. Nesse caso, o sinal analógico V_I foi condicionado de forma idêntica ao sinal V_O e integrado pelo *software* desenvolvido, através do método de integração trapezoidal.

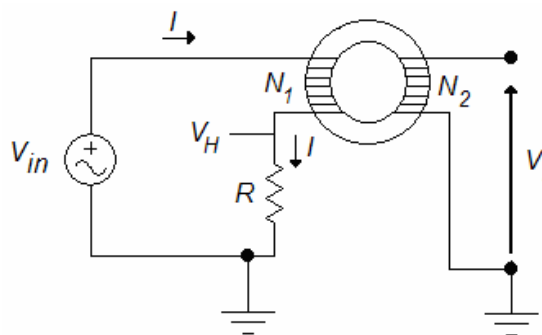


Fig. 5 - Circuito para determinação do laço B versus H com integração digital

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles

Na tabela 1 são apresentadas a permeabilidade magnética relativa máxima e a densidade de saturação de fluxo magnético para diversos materiais sob ensaio, na frequência de 60 Hz. Os materiais apresentados na coluna 1 da tabela 1 são os seguintes: NT27-TH50 (ferrite MnZn), M-033 e M-006 (liga nanocristalina NANOPERM®), N3E3 (liga nanocristalina, de composição básica: FeSiBnCu), a liga FINEMET®, e a liga Fe-3,2%Si GO. L_e e A_e são, respectivamente, o comprimento médio da trajetória do fluxo magnético no interior do núcleo e a área efetiva da seção transversal do núcleo.

Tabela 1. Permeabilidade magnética máxima e densidade de saturação de fluxo magnético para diversos materiais sob ensaio

Núcleos Toroidais	L_e (mm)	A_e (mm ²)	60Hz	
			μ_r máx	B_{SAT} (T)
M-033	63,4	36	30012	1,09
NT27 TH-50	67,54	64,5	7308	0,32
N3E3	102	90	185707	0,94
M-006	102	90	33494	0,96
FINEMET	164,9	115	142000	1,15
FeSi GO	160,22	157,44	30994	1,79

A partir dos resultados mostrados na tabela 1, pode-se destacar que as ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética superior ao ferrite MnZn e a liga FeSi de grãos-orientados. Porém, dependendo da composição química da liga nanocristalina suas características magnéticas são afetadas. Por isso, se torna importante não apenas citar que um material é uma liga nanocristalina e sim a composição dessa liga nanocristalina.

Na Fig. 6 é mostrada a tela do *software* desenvolvido mostrando o laço B versus H para a liga nanocristalina N3E3, sob ensaio em 60 Hz.

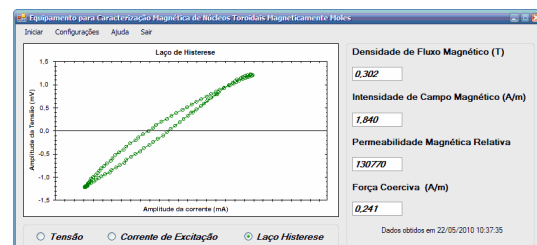


Fig. 6. Tela de apresentação do *software* desenvolvido para o equipamento de caracterização magnética, laço B versus H .

3.2. Comparação entre os circuitos com integradores analógicos e digitais

A tensão induzida V_I , obtida utilizando o circuito da Fig. 5, é apresentada na Fig. 7. A tensão V_I ao ser integrada por uma rotina computacional é mostrada na Fig. 8.

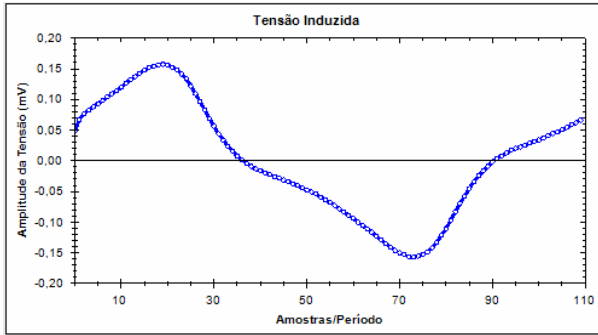


Fig. 7 – Tensão induzida V_1 obtida utilizando o circuito da Fig. 5

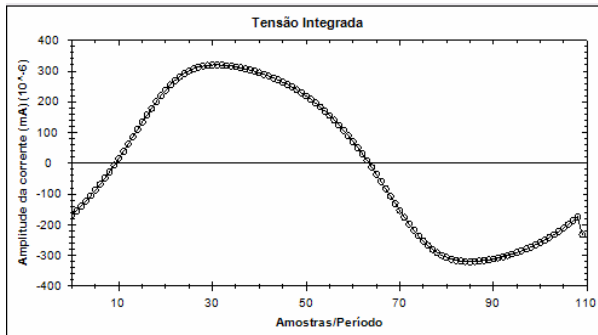


Fig. 8 – Tensão integrada através de uma rotina computacional

Na Fig. 9 é mostrada a tensão induzida V_0 , obtida a partir do circuito da Fig. 1, na qual foi utilizado um integrador analógico.

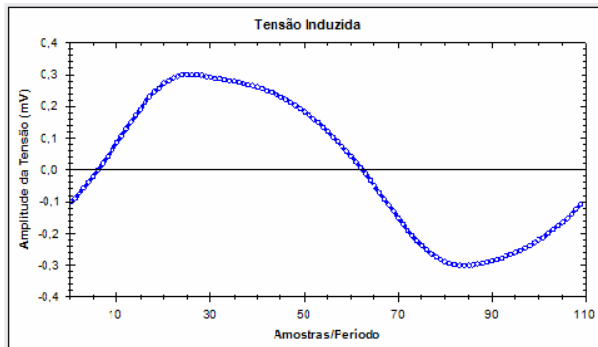


Fig. 9 – Tensão induzida V_0

A partir da análise das Fig. 8 e 9 pode-se perceber que os resultados obtidos com a integração analógica e digital têm formas de onda semelhantes, na qual a única diferença é a amplitude dos sinais. Porém, para obter a densidade de fluxo magnético B na integração analógica utiliza-se a equação 1, enquanto que na integração digital a equação 4.

$$B = \left[\frac{1}{N_2 A_e} \right] \int V_t dt = \left[\frac{1}{N_2 A_e} \right] V_I \quad (4)$$

Como o valor de R_0 e C_0 da expressão 1 são respectivamente 1 k Ω e 1 μ F, o seu produto é 0,001. Portanto, a tensão induzida V_0 têm amplitude 1000 vezes

maior do que a amplitude da tensão induzida V_1 integrada. Desta forma, analisando-se as Fig. 8 e 9 pode-se perceber que o máximo da tensão V_1 integrada é próximo de $300 \cdot 10^{-6}$ mV e o máximo da tensão induzida V_0 é próximo de 0,3 mV, exatamente 1000 vezes maior. Pode-se, então, concluir que para um laço B versus H de 60 Hz, uma frequência de amostragem de 6,6 kHz é suficiente para realizar a integração de forma digital.

4. CONCLUSÃO

Com o instrumento virtual apresentado neste trabalho foi possível realizar a caracterização magnética em materiais magneticamente moles sob a forma de núcleos toroidais. A frequência de amostragem de 6,6 kHz, utilizada no equipamento desenvolvido, se mostrou suficiente para realizar a integração de forma digital da tensão induzida pelo enrolamento secundário, no ensaio utilizado para determinação da densidade de fluxo magnético. Comparativamente aos materiais ferromagnéticos convencionais (FeSi e ferrite mole), verificou-se que as ligas nanocristalinas apresentam algumas propriedades magnéticas superiores. Estas propriedades são: alta permeabilidade magnética relativa, alta densidade de saturação de fluxo magnético e baixa força coerciva.

AGRADECIMENTOS

À Hitachi Metals Ltd. (Japão) e à Magnetec GmbH (Alemanha) pela doação dos núcleos de ligas nanocristalinas. À TOROID do Brasil pela doação dos núcleos de FeSi. Ao CNPq, CAPES e NAMITEC pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Duwez, “Metallic glasses – Historical background”, Topics in Applied Physics, Vol. 46, p.19-23, 1981.
- [2] Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, “New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure”, Journal of Applied Physics 64, pp. 6044-6046, 1988.
- [3] A. J. Batista, J. C. S. Fagundes, P. Viarouge, “An automated system for core loss measurement and characterization: a useful tool for high frequency magnetic components design”, Industrial Electronics, 1998. Proceedings. ISIE '98. IEEE International Symposium, Vol. 2, pp. 540-545, 1998.
- [4] B. A. Luciano, T. C. Batista, R. C. S. Freire, J. G. A. Lira, W. B. Castro, “Projeto e realização de um equipamento microcontrolado para caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles”, 18^o CBCiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, pp.7374-7385, 2008.