

SISTEMA ELETRÔNICO PARA DETERMINAÇÃO DO CICLO DE HISTERESE E DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Milena de A. Moreira - milena_ee@yahoo.com.br

Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Aristides Novis, nº 02, Federação
40.210-630 - Salvador - BA

Jés de J. F. Cerqueira - jes@ufba.br

Resumo: Este artigo apresenta um sistema eletrônico que permite ao aluno traçar a curva de magnetização de materiais ferromagnéticos por meio da visualização da curva de histerese. Além disto, também é possível a determinação do circuito equivalente do indutor. Para tal finalidade, montou-se um circuito eletrônico para medição da corrente (i) e do fluxo concatenado (λ). Com o auxílio de um osciloscópio, o ciclo de histerese pode ser visualizado. Variando-se a tensão em um autotransformador variável, o ciclo de histerese irá variar gradativamente podendo atingir o limite correspondente à saturação magnética. λ está diretamente relacionado à densidade de campo magnético (B), e i diretamente relacionado à intensidade de campo magnético (H). As dimensões físicas do material ferromagnético são conhecidas. Sendo assim, a partir do ponto extremo do ciclo de histerese, com suas variações concomitantes à variação da tensão no autotransformador, é possível a construção da curva de magnetização ($B \times H$) para o material em estudo. De posse desta curva, pode-se determinar a permeabilidade magnética (μ) do material. O valor teórico do parâmetro indutância (L) dever ser comparado com o valor obtido experimentalmente a partir da medição da potência (W), tensão (V) e corrente (i) sobre o material. Este sistema eletrônico compõe um kit didático para uso em aulas práticas da disciplina Conversão Eletromecânica de Energia.

Palavras-Chave: Histerese, Ferromagnetismo, Indutor

1. INTRODUÇÃO

Ao trabalhar com sinais alternados em materiais ferromagnéticos, é necessário introduzir o conceito de histerese magnética. Porém, a compreensão da histerese e de seu ciclo é de difícil assimilação por parte dos alunos.

O plano $B \times H$ mostra a relação entre densidade magnética (B) e intensidade de campo magnético (H). Considerando um núcleo inicialmente desmagnetizado, para o primeiro instante de tempo tem-se intensidade e densidade de campo na origem do plano $B \times H$.

Ao variar alternadamente o sinal de corrente elétrica sobre o sistema magnético, é observado que a intensidade de campo H acompanha simultaneamente esta variação, ou seja, ao mesmo tempo em que ocorrem os valores de pico positivo e negativo do sinal, tem-se o máximo valor positivo (H_{\max}) e o máximo valor negativo de H ($-H_{\max}$), respectivamente.

No entanto, o mesmo não ocorre para a densidade de campo B . A defasagem entre o sinal de corrente elétrica em relação a B (conseqüentemente também entre B e H) é devida à densidade magnética residual decorrente da reorientação dos domínios magnéticos do núcleo em relação à intensidade de campo imposta ao sistema.

O traço da curva $\lambda \times i$ que ocorre em um ciclo completo do sinal alternado sobre o sistema é chamado de ciclo de histerese. Um conjunto de ciclos de histerese pode ser construído, por exemplo, variando-se o valor de pico da corrente elétrica (i), como mostra a Figura 1 abaixo. A partir dos extremos de cada ciclo de histerese pode-se traçar a curva de magnetização $B \times H$.

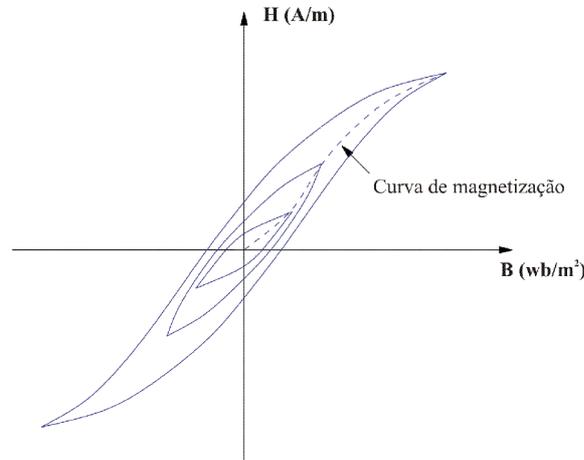


Figura 1: Ciclos de histerese e curva de magnetização

O parâmetro indutância (L) é uma alternativa para modelagem de sistemas eletromagnéticos, por meio de uma relação direta entre este parâmetro L , tensão (v) e corrente elétrica (i), baseada na teoria de circuitos elétricos.

Demonstrações teóricas sugerem que corrente elétrica é atrasada em 90 graus em relação à tensão. Pode ser demonstrado experimentalmente que, no indutor real, esta defasagem é inferior a 90 graus.

O objetivo deste trabalho é permitir a visualização do ciclo de histerese de um material ferromagnético pelo aluno, usando um sistema eletrônico apropriado. De posse dos dados extraídos do ciclo de histerese, é possível o levantamento da curva de magnetização $B \times H$, determinando assim a tipo de material do núcleo ferromagnético sob ensaio. Além disso, os dados são usados para o levantamento do circuito equivalente do indutor.

O artigo está organizado de forma a demonstrar conceitos magnéticos básicos (Item 2), tratando de equações, levantamento de perdas e modelos do indutor (real e prático). É feita a descrição do sistema eletrônico desenvolvido (Item 3), com a apresentação de suas partes constituintes. E, por fim, os resultados experimentais obtidos (Item 4) e comentários gerais sobre a aplicabilidade do equipamento (Item 5).

2. CONCEITOS MAGNÉTICOS BÁSICOS

A corrente elétrica i (carga em movimento) produz campo magnético ao seu redor. O campo magnético pode ser descrito por dois vetores de mesma direção e sentido: \vec{H} (intensidade de campo magnético) e \vec{B} (densidade de campo magnético).

A Lei de Ampère expressa a relação entre \vec{H} e i na forma:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot i \quad (1)$$

onde $d\vec{l}$ é uma componente infinitesimal do comprimento do material magnético e N é o número de espiras do enrolamento. Ou seja, a integral de linha de um percurso fechado do vetor H é igual ao somatório (N vezes) das correntes elétricas envolvidas na criação do campo magnético. A unidade padrão no SI para o vetor \vec{H} é ampère/metro (A/m).

Os vetores \vec{B} e \vec{H} relacionam-se pela variável permeabilidade magnética (μ) na forma:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

A unidade padrão para \vec{B} é weber/m² (wb/m²) e para μ é Henry/m (H/m).

Como cada material possui um valor específico para μ , utiliza-se uma variável auxiliar chamada permeabilidade magnética relativa (μ_r) que é definida por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, com valor definido em $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Comparando as equações (1) a (3), é verificado que quanto maior o valor de μ_r , menor será a corrente elétrica necessária para estabelecer uma densidade magnética no material.

Características da densidade magnética no material permitem classificar os materiais magnéticos em 2 tipos: Materiais Moles, nos quais anulando-se o campo magnético aplicado não há uma significativa densidade magnética residual; e Materiais Duros, nos quais há uma significativa densidade magnética residual mesmo após cessado o campo magnético aplicado sobre eles. Estes últimos são ditos ímãs permanentes.

Em função de μ_r , os Materiais Moles podem ser classificados em: Diamagnéticos, com μ_r um pouco abaixo da unidade ($\mu_r < 1$), como o cobre; Paramagnéticos, com μ_r um pouco acima da unidade ($\mu_r > 1$), como o alumínio; e Ferromagnéticos, onde μ_r é bastante superior à unidade ($\mu_r \gg 1$), como o ferro.

O objeto de estudo deste trabalho são os materiais ferromagnéticos. Uma importante característica destes materiais é que μ varia em função de \vec{H} . Logo, utilizando a equação (2), pode-se verificar que B também varia em função de H nos materiais ferromagnéticos. A curva que representa a relação B x H é chamada de Curva de Magnetização.

À passagem de linhas de campo magnético (vetor \vec{B}) sobre uma área A, denomina-se fluxo de campo magnético (ϕ). A relação entre ϕ , \vec{B} e A é dada por:

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

onde dA é uma componente infinitesimal da área do material. A unidade padrão para ϕ é weber (wb).

Sendo a área A constante ao longo de todo o material, \vec{B} e $d\vec{A}$ estarão sempre paralelos. A equação (4) pode ser reescrita como:

$$\phi = B.A \quad (5)$$

Quando o material magnético está envolto em espira ou bobina com N voltas, costuma-se utilizar a variável λ , dita fluxo concatenado, cuja relação com ϕ é dada como:

$$\lambda = N.\phi \quad (6)$$

Define-se como tensão induzida a diferença de potencial que surge entre os terminais de um condutor inserido em uma região cujo campo magnético varia com o tempo. A Lei de Faraday demonstra este fenômeno na forma:

$$e(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (7)$$

A Lei de Lenz mostra que o sentido (sinal) de $e(t)$ é definido pelo sentido da corrente circulante no sistema, a qual se opõe ao campo magnético que a originou.

2.1 Circuito magnético equivalente

É comum a analogia entre circuitos elétricos e sistemas eletromagnéticos, de onde surge então o conceito de circuito magnético equivalente. Considerando um núcleo de material ferromagnético na forma de paralelepípedo vazado, envolto por N espiras nas quais há uma corrente $i(t)$ circulante, a Lei de Ampère, expressa na equação (1), sobre o comprimento médio do núcleo resulta em:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H.l = N.i(t) \quad (8)$$

Substituindo as equações (2) e (5) na equação (8), tem-se:

$$N.i(t) = \phi \cdot \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (9)$$

$$\mathcal{F}_{mm} = \phi \cdot \mathcal{R} \quad (10)$$

em que $\mathcal{F}_{mm} = N.i(t)$ é a força magnetomotriz, análoga à tensão elétrica, e $\mathcal{R} = l / (\mu \cdot A)$ é a relutância magnética, análoga à resistência elétrica. A unidade no SI para \mathcal{F}_{mm} é Ampère-espiras (Ae), e a da relutância é Ae/weber.

2.2 Indutância

Da teoria de circuitos elétricos, a relação entre tensão (v), corrente elétrica (i) e indutância (L) é dada como:

$$v(t) = \frac{dL(t) \cdot i(t)}{dt} \quad (11)$$

Esta expressão demonstra que variações em i (conseqüentemente no campo magnético) e em L (conseqüentemente na geometria do sistema) implicam variação da tensão nos terminais do indutor.

A igualdade das equações (7) e (11) resulta em:

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} + i \cdot \frac{dL(t)}{dt} = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (12)$$

Considerando o sistema magnético na forma de paralelepípedo vazado citado acima, da equação (10) observa-se que:

$$\phi = \frac{\mathcal{F}_{mm}(t)}{\mathcal{R}} = \frac{N \cdot i(t)}{\mathcal{R}} \quad (13)$$

Este sistema não apresenta variação geométrica durante todo seu percurso. Desta forma \mathcal{R} tem valor constante, o que implica um valor também constante para L. Aplicando a equação (13) nas equações (6) e (12), tem-se:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (14)$$

Comprova-se então que as características magnéticas do sistema podem ser representadas pelo parâmetro L. Para que haja variação da indutância própria do sistema é necessária a variação de \mathcal{R} .

2.3 Modelo do indutor

A modelagem de indutores reais pode ser feita a partir de um modelo de indutor ideal como mostra a Figura 3. A Figura 2 mostra o modelo de indutor chamado de prático para levantamento de parâmetros. Neste trabalho é feito o levantamento do modelo prático do indutor, pois as deduções algébricas são mais simplificadas.

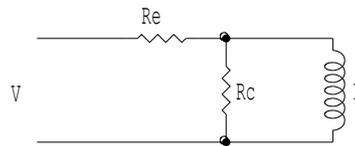


Figura 2: Modelo de indutor prático

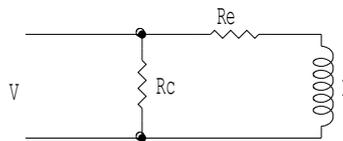


Figura 3: Modelo de indutor real

sendo R_e a resistência do enrolamento, R_c a resistência do núcleo, L o parâmetro indutância e V a tensão de entrada no circuito magnético.

A partir da Figura 2, a tensão v_e sobre R_e é definida como:

$$v_e = i_e \cdot R_e \quad (15)$$

sendo i_e a corrente elétrica que passa por R_e .

Desta forma, pela Lei de Thevénin, as tensões sobre R_c (v_c) e L (v_L) são:

$$v_c = v_L = V - v_e \quad (16)$$

A potência dissipada sobre R_e é:

$$P_e = R_e \cdot i_e^2 \quad (17)$$

Logo, o valor de R_c pode ser determinado como:

$$R_c = \frac{v_c^2}{P - P_e} \quad (18)$$

em que $P = V \cdot i_e$ é a potência fornecida ao circuito.

A soma das correntes pode então ser escrita como:

$$\frac{R_e}{v_e} = \frac{R_c}{v_c} - \frac{jX_L}{v_L} \quad (19)$$

sendo $X_L = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ a impedância indutiva de L (f é a frequência associada a V).

Esta é outra forma, além da apresentada na equação (14), de determinar o valor do parâmetro indutância do circuito magnético.

2.6 Perdas

A perda no núcleo do material magnético é obtida a partir da soma das perdas por histerese (P_h) e das perdas por corrente parasita (P_e).

Perdas por histerese

O ciclo de histerese é resultado da defasagem de B em relação à H . Esta defasagem ocorre devido à reorientação dos domínios magnéticos do núcleo na presença de sinais alternados, o que implica na diferença entre a energia entregue ao sistema e a energia devolvida durante cada ciclo da corrente de entrada. Esta diferença de energia é consumida pelo sistema para a reorientação dos domínios magnéticos, sendo dissipada na forma de calor, caracterizando então as perdas por histerese P_h .

Perdas por corrente parasita

As correntes parasitas (ou correntes de Foucault) surgem quando materiais magnéticos são atravessados por um fluxo magnético variante no tempo $\phi(t)$. Este fluxo induz tensão elétrica no interior da massa do material ferromagnético, provocando circulação de uma corrente $i_p(t)$, dita parasita, a qual pode assumir altos valores de pico e elevada perda como consequência. Esta perda é dissipada na forma de calor, caracterizando as perdas por corrente parasita P_e .

Para reduzir as perdas por P_e são utilizados núcleos laminados, e não de material maciço, o que reduz a área de circulação das correntes parasitas.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 4 mostra o sistema composto basicamente de 3 subsistemas: subsistema eletrônico, subsistema elétrico e subsistema de visualização. O primeiro subsistema é formado por um circuito com amplificador operacional montado na configuração integradora e uma fonte simétrica para polarização deste amplificador operacional. O material magnético em estudo juntamente com um varivolt compõe o subsistema elétrico. Um osciloscópio compõe o subsistema de visualização.

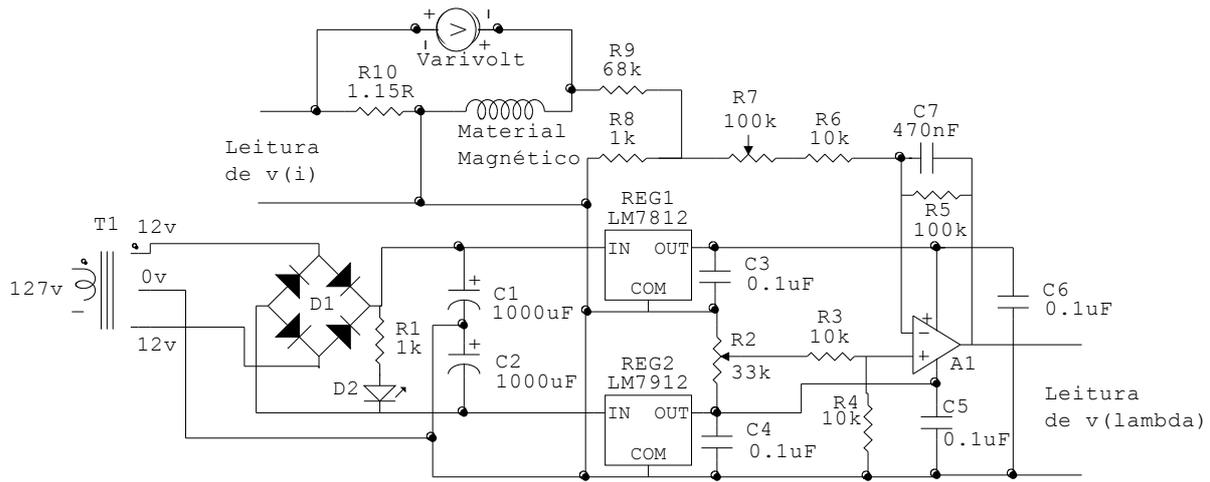


Figura 4 – Equipamento eletrônico

No sub-sistema elétrico, a tensão sobre o material magnético é dada por:

$$v = (R + r).i + e \quad (20)$$

onde R é uma resistência usada como sensor de corrente e r é a resistência do enrolamento do material magnético.

Como a parcela $(R + r)$ é muito pequena, a equação (20) pode ser aproximada para:

$$v = e. \quad (21)$$

Das equações (7) e (21), pode-se escrever:

$$\lambda = \int v. dt \quad (22)$$

O amplificador operacional está montado na configuração integrador, então, para leitura do fluxo concatenado λ a partir da integração da tensão v .

Para traçar a curva de histerese, o osciloscópio deve estar no Modo XY, sendo X a entrada do sinal $v(i)$ na Figura 4, e Y a entrada do sinal $v(\lambda)$. Os extremos de cada laço de histerese que surge a partir da variação da tensão no autotransformador nos permitem traçar a curva $v(\lambda) \times v(i)$, que são sinais de tensão proporcionais ao fluxo concatenado e à corrente elétrica, respectivamente. A construção da curva $\lambda \times i$, então, necessita de manipulações algébricas sobre $v(\lambda)$ e $v(i)$.

Para se obter λ , é necessário considerar o ganho do amplificador operacional (G). Tem-se então:

$$\lambda = \frac{v(\lambda)}{G} \quad (23)$$

O valor de i é obtido na forma:

$$i = \frac{v(i)}{R} \quad (24)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi conectado ao sistema eletrônico um núcleo toroidal com número de espiras (Figura 5) e dimensões conhecidas (Tabela 1).



Figura 5: Núcleo toroidal

Tabela 1: Dimensões do núcleo toroidal

Número de espiras	3.200
Raio externo (m)	0,0725
Raio interno (m)	0,0575
Raio médio (m)	0,065
Comprimento médio l (m)	0,4084
Largura (m)	0,025
Espessura (m)	0,012
Área (m ²)	0,0003

Pode-se visualizar um conjunto de ciclos de histerese ao variar a intensidade da corrente elétrica sobre o material magnético em estudo através da variação de tensão de saída do autotransformador (Figura 6).

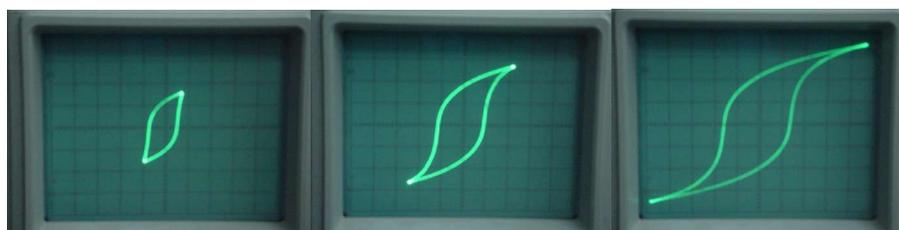


Figura 6: Ciclos de histerese

Os valores de $v(i)$ e $v(\lambda)$ são obtidos a partir da projeção do extremo de cada laço de histerese nos eixos X e Y, respectivamente. Desta forma, foram levantados 36 pontos, como mostra a Tabela 2, onde v_{in} é a tensão sobre o material magnético.

Tabela 2: Dados obtidos experimentalmente

v_{in} (V)	$v(i)$ ($\times 10^{-3}v$)	$v(\lambda)$ ($\times 10^{-3}v$)	v_{in} (V)	$v(i)$ ($\times 10^{-3}v$)	$v(\lambda)$ ($\times 10^{-3}v$)	v_{in} (V)	$v(i)$ ($\times 10^{-3}v$)	$v(\lambda)$ ($\times 10^{-3}v$)
4,6	7,0	56,0	43,0	60,0	280,0	94,7	130,0	360,0
6,0	9,0	70,0	47,6	66,0	300,0	98,6	140,0	370,0
8,2	12,5	90,0	51,4	72,0	305,0	102,6	148,0	375,0
10,5	15,5	110,0	55,4	78,0	310,0	106,6	151,0	380,0
12,4	18,0	125,0	59,7	84,0	320,0	109,5	155,0	380,0

14,8	21,5	145,0	63,9	90,0	335,0	111,8	160,0	386,0
18,0	16,0	170,0	68,1	96,0	340,0	114,2	164,0	386,0
21,7	31,0	190,0	72,9	102,0	345,0	116,4	166,0	390,0
24,8	35,5	205,0	77,1	110,0	350,0	119,3	170,0	395,0
29,8	42,0	240,0	82,3	118,0	355,0	121,5	175,0	398,0
33,3	47,0	250,0	86,1	125,0	360,0	124,1	180,0	398,0
38,0	54,0	260,0	90,3	130,0	362,0	127,5	180,0	400,0

A Figura 7 mostra o ajuste para a melhor curva (em azul) feito após o levantamento dos dados da Tabela 2 (os pontos em vermelho são os obtidos experimentalmente).

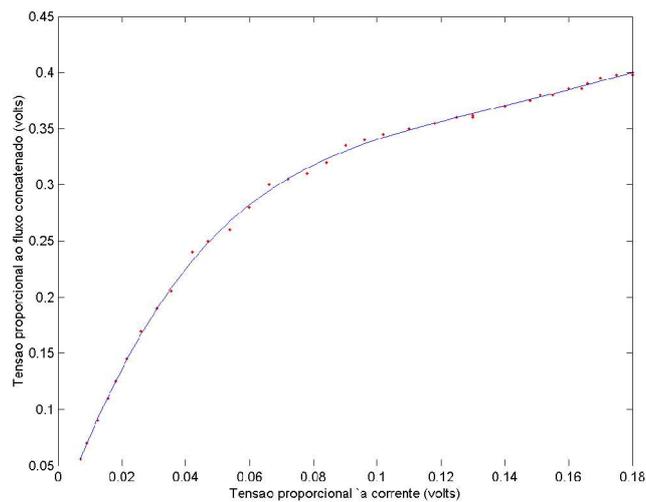


Figura 7: Gráfico $v(\lambda) \times v(i)$

A determinação de λ e i é possível utilizando-se as equações (23) e (24), respectivamente, pois são conhecidos os valores do ganho G do amplificador operacional ($G = 1,6162$) e do resistor R utilizado como sensor de corrente ($R = 1,15\Omega$). A partir de então é traçada a curva $\lambda \times i$ (Figura 8).

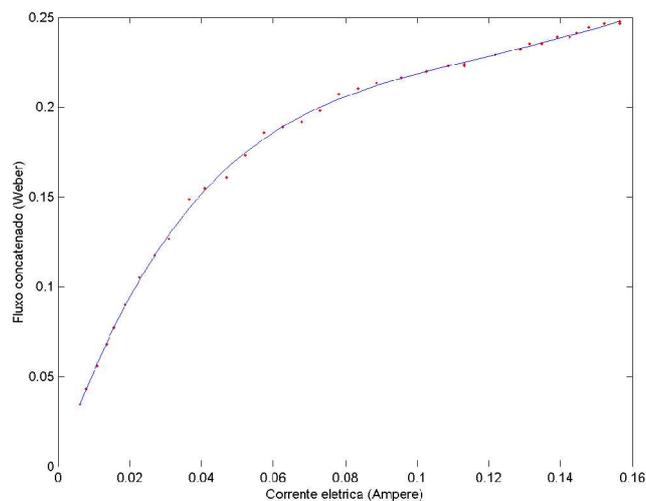


Figura 8: Curva $\lambda \times i$

Para um material com dimensões uniformes, a equação (1) pode ser aproximada para:

$$H = \frac{N.i}{L} \quad (25)$$

e a igualdade entre as equações (5) e (6) pode ser aproximada para:

$$B = \frac{\lambda}{N.A} \quad (26)$$

Sendo os valores de N, l e A conhecidos (Tabela 1), das equações (25) e (26) tem-se:

$$H = K_h.i \quad (27)$$

$$B = K_b.\lambda \quad (28)$$

onde $K_h = 3200 / 0,4084 = 7835,46$ e $K_b = 1 / (3200.0,0003) = 1,042$.

É possível então a montagem da curva de magnetização do material ferromagnético em estudo (Figura 9).

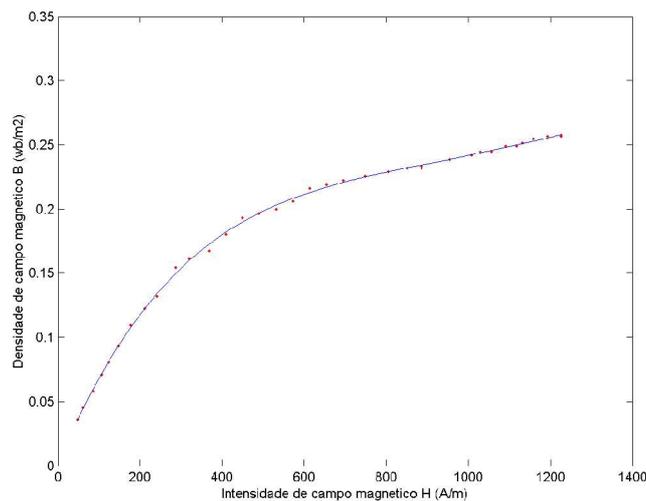


Figura 9: curva de magnetização B x H

Com a curva de magnetização obtida e de posse de curvas teóricas conhecidas (Figura 10), é possível inferir que o material do núcleo é ferro fundido. As pequenas diferenças entre ambas podem ser justificadas por erros na leitura dos dados experimentais.

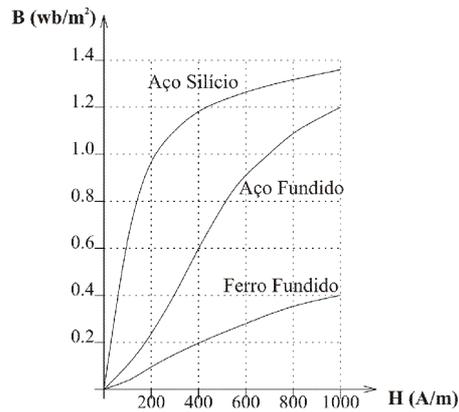


Figura 10: Curvas B x H para alguns materiais utilizados em dispositivos eletromagnéticos

Os valores teórico e experimental do parâmetro indutância podem ser obtidos através dos métodos descritos nas equações (14) e (19), respectivamente.

Considerando inicialmente a equação (14), é necessário determinar o valor de μ para calcular a relutância magnética \mathcal{R} do núcleo. Sendo $\mu = B / H$, utilizando um ponto da região linear da Figura 9, foi calculado $\mu \approx 6,57 \times 10^{-7} \text{ H/m}$. Logo, $\mathcal{R} = 2.072.333,8 \text{ Ae/wb}$. Desta forma, o valor teórico calculado para a indutância é $L = 4,94 \text{ H}$.

Através do método descrito na equação (19), e conhecidos a potência fornecida ao circuito ($P = 10,23 \text{ W}$) para uma tensão de entrada $V = 127,5 \text{ v}$ sobre o material magnético (ver Tabela 2) e o valor da resistência $R_e = 25,3 \Omega$, foram calculados: $v_L = 6,19 \text{ mv}$, $R_e = 1.686,58 \Omega$, $X_L = 1.666,65 \Omega$. Desta forma, o valor experimental obtido para a indutância é $L = 4,42 \text{ H}$.

Os valores obtidos teórica e experimentalmente são bastante próximos, sendo que a diferença entre eles pode ser justificada pelos erros de leitura experimentais.

A potência dissipada no material magnético (perdas) justifica o atraso da corrente elétrica em relação à tensão menor que 90 graus.

5. COMENTÁRIOS GERAIS

O sistema eletrônico proposto foi apresentado a algumas turmas das disciplina Conversão Eletromecânica de Energia no ano de 2003. Como ainda não foram produzidos outros kits didáticos, os alunos não manusearam o equipamento, apenas visualizando os laços de histerese, bem como a diferença menor que 90 graus entre as correntes de entrada e sobre o indutor. A apresentação aos alunos pode ser considerada proveitosa.

É importante salientar que este sistema pode ser utilizado em outras disciplinas do curso de Engenharia Elétrica que abordem conceitos de intensidade e densidade de campo magnético, como Eletromagnetismo, por exemplo.

Além disto, outras aplicações não didáticas podem ser feitas. Em parceria com o Instituto de Física da UFBA (Laboratório de Propriedades Óticas) e a Escola de Veterinária da FIB (Faculdades Integradas da Bahia), o sistema eletrônico foi utilizado para o levantamento das características magnéticas do aparelho terapêutico eletromagnético Kenkobio, utilizado para pesquisas com ratos.

6. CONCLUSÃO

O sistema eletrônico desenvolvido apresenta vasta utilidade no estudo de dispositivos magnéticos, possuindo como primeiro foco a facilidade de visualização do fenômeno da histerese por parte dos alunos. Além disto, a possibilidade do levantamento da curva de

magnetização, bem como do circuito equivalente do indutor cria no estudante a necessidade do aprofundamento em conceitos magnéticos básicos à medida que o faz trabalhar com dados experimentais para montagem de gráficos e circuitos equivalentes de componentes.

O equipamento é considerado satisfatório para o fim ao qual se destina, podendo-se ampliar sua aplicabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SEN, P.C. **Principles of Electric Machines and Power Eletronics**; John Wiley and Sons, 1997.

SLEMON, Gordon R. **Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas**; tradução de Luiz Carlos de Jesus Albuquerque. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos, 1974.

***Abstract:** This article presents an electronic system to trace magnetization curve of ferromagnetic materials from visualization of hysteresis curve for student. Moreover, the inductor equivalent circuit determination is also possible. For this purpose, an electronic circuit for current (i) and linkage flow (λ) measurement was built. The hysteresis cycle can be visualized from an oscilloscope . Varying tension in a changeable autotransformer, the hysteresis cycle will vary gradually being able to reach the corresponding limit to magnetic saturation. λ is related directly to magnetic field density (B), and i is related directly to magnetic field intensity (H). The physical dimensions of ferromagnetic core are known. Being thus, from the extreme point of the hysteresis cycle, the magnetization curve ($B \times H$) for the material in study is plotted. From this curve, magnetic permeability (μ) of the material can be gotten and, consequently, theoretical value of inductance (L). The theoretical value should be compared with experimentally value gotten from the measurement of power (W), tension (v) and current (i) on the material. This electronic system composes a didactic kit for use in practical lessons of discipline Electromechanical Conversion of Energy.*

***Key-words:** Hysteresis, Ferromagnetism, Inductor*