Experiência 5 — CURVA DE HISTERESE

É extremamente recomendável que antes de iniciar este experimento, se faça uma revisão do Capítulo 25, p. 164 à 180 do Livro Física, Vol. 2, Alaor Chaves.

Vários metais, como o Fe, Ni e Co, e um grande número de ligas contendo estes e outros elementos, apresentam uma alta magnetização à temperatura ambiente quando submetidos a um pequeno campo externo. Nestes materiais, chamados de *ferromagnéticos*, existem assim, entre átomos vizinhos, um tipo especial de interação chamado de *acoplamento de troca*, o qual une os seus momentos magnéticos num paralelismo rígido.

O comportamento de um material ferromagnético submetido a um campo magnético externo tem peculiaridades de grande interesse científico e tecnológico. Consideremos um material ferromagnético inicialmente não imantado e vejamos o seu comportamento sob aplicação de um campo magnético externo H'. Na figura 1 mostramos uma *curva de histerese* para o ferro-doce, que mostra a variação do campo B, proporcional a sua magnetização, em função do campo aplicado.

O campo B cresce muito rapidamente com H' (curva *a*), inicialmente sendo cerca de 10^4 vezes maior do que o campo aplicado. O valor de B, entretanto, tende a saturar em um valor um pouco maior do que *15.000 G (Gauss)* ou *1,5 T*. Se o campo aplicado H' é, então, gradualmente decrescido, o campo B não refaz a curva de subida, mas decresce mais lentamente do que cresceu, pela curva *b*. Para $H'=0$, o campo B permanece em um valor finito B_r, denominado *campo residual,* ou *remanência.* Note-se que, uma vez que:

$$\vec{B} = \vec{H}^{0} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad , \qquad (1)$$

podemos escrever:

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M}_r \, , \qquad (2)$$

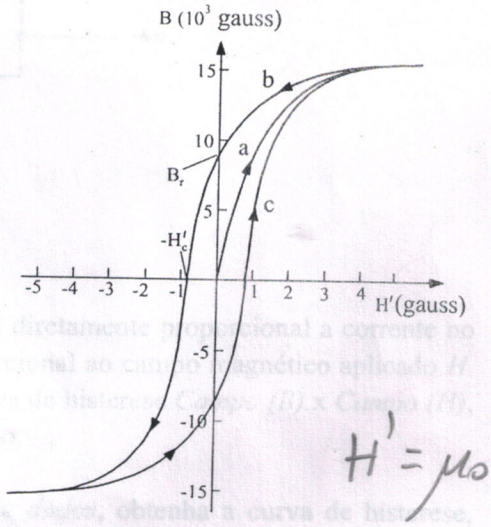


***Figura 1**: Curva de histerese para o ferro-doce. Observe-se que o eixo horizontal representa o campo aplicado $H' = \mu_0 H$, que pode ser medido nas mesmas unidades do campo B.*

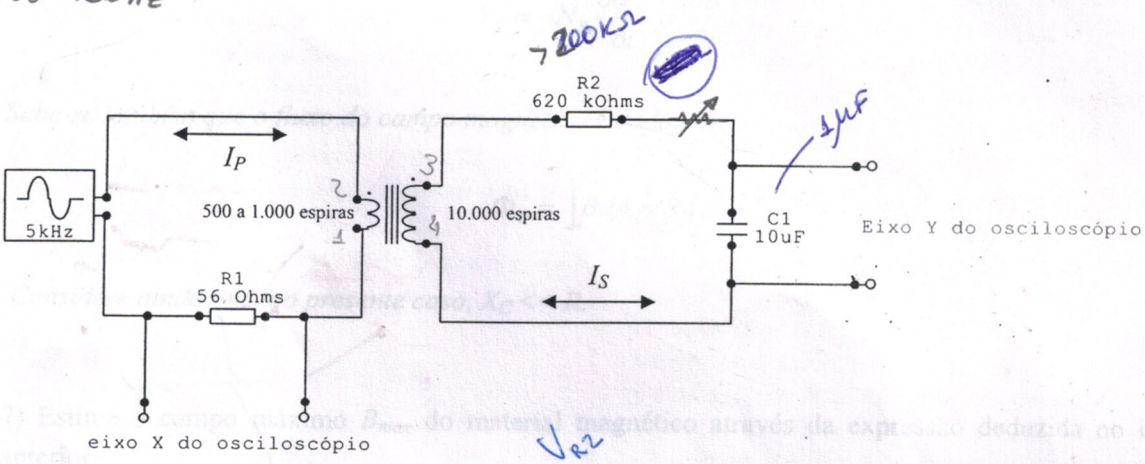
onde M_r é a *magnetização residual*. Se o campo aplicado é gradualmente intensificado na direção oposta à inicial, assim, o campo B somente se anulará ao aplicar um campo igual a H', denominado *campo coercivo* ou *coercividade*. Continuando o processo de variação do campo aplicado, o campo B percorre o ciclo fechado indicado na figura. O ciclo de histerese varia muito sensivelmente de um material ferromagnético para outro, e esta diversidade é muito útil em aplicações tecnológicas.

A coercividade do ferro doce é inferior a $1G$ (10^{-4} T), ou seja, a magnetização deste material pode ser facilmente revertida. Isto não é apropriado, entretanto, se o objetivo é fazer um imã permanente, quando se deseja uma alta remanência e alta coercividade. Entretanto, o ferro doce é de grande utilidade na construção de transformadores, pois neste caso a histerese é indesejada.

II – PARTE EXPERIMENTAL

1) Monte o circuito abaixo com as bobinas, o núcleo magnético (FeSi) fornecido e os resistores e capacitores indicados. Aplique uma tensão senoidal com máxima amplitude e freqüência entre ~~[illegible]~~.

100 - 150 Hz



2) Aplique no eixo X a tensão do resistor V_{R1} ($56\ \Omega$), que é diretamente proporcional a corrente no *Primário* do transformador (I_P) e, conseqüentemente, proporcional ao campo magnético aplicado H. No eixo Y, aplique a tensão do capacitor V_{C1}. Observe a curva de histerese *Campo (B)* x *Campo (H)*, utilizando um osciloscópio no modo XY. Discuta o observado.

3) Agora com auxílio do medidor PASCO de *aquisição de dados*, obtenha a curva de histerese, compondo no *CANAL A*, a tensão no resistor V_{R1} e no *CANAL B*, a tensão [illegible] no capacitor de $10\mu F$.

V_{2R}

4) Mostre que o campo criado pelas ~~por um solenóide~~ de raio r com N espiras, é dado por:

bobina

Dica: Resolva o problema de um loop circular e multiplique o resultado p/ N.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \therefore \vec{H} = \frac{Ni}{2r} \quad \vec{B} = \frac{N\mu_0 I}{2r}$$ (centro da bobina)

5) Aproximando o campo criado na bobina pelo ~~de um solenóide~~ ($N = N_P$, $H = H_{max}$ e $I = I_{P\,max}$), ~~utilize a equação acima e~~ determine o valor do campo magnético aplicado máximo, H_{max}.

resultado acima, usando

6) Demonstre que:

$$B = \frac{V_C R_2 C}{N_S A},$$

onde A é a área da seção reta do núcleo de FeSi.

Dica:

Lembre-se que a tensão induzida na bobina secundária V_S faz circular uma corrente I_S no circuito R_2C_1 ($R_2 = 620\ K\Omega$, $C_1 = 10\ \mu F$), onde:

$$V_S = -N_S \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \propto \frac{\partial B}{\partial t}$$

Sabe-se também que o fluxo do campo magnético é dado por:

$$\Phi_B = \int_A B dA = BA,$$

Considere ainda que, no presente caso, $X_C << R$.

7) Estime o campo máximo B_{max} do material magnético através da expressão deduzida no item anterior.

8) Calcule a constante de permeabilidade magnética relativa do material $\kappa_m = B_{max}/(\mu_0 H_{max})$ e a magnetização $M = (B - \mu_0 H) / \mu_o$. Os valores tabelados da permeabilidade magnética κ_m para o ferro recozido é *5.500*, e para o Fe-Si (96-4%) é *7.000*. Discuta.

9) Detemine também o valor do campo coercivo H'_c e a magnetização residual M_r.

Bibliografia

- "*Física*", D. Halliday and R. Resnick – Vol. 3 - Cap. 37 – Propriedades Magnéticas da Matéria.
- "*Física*", Alaor S. Chaves, Vol. 2 – Cap. 22, Matérias Magnéticos.