

HISTERESE E RELAXAÇÃO FERROMAGNÉTICA

Introdução

Um material magnetizado é descrito pelo seu vetor de magnetização M definido como o momento de dipolo magnético por unidade de volume.

$$M = \frac{dm}{dV} \quad (1)$$

De acordo com o comportamento magnético, os materiais podem ser classificados como: paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos. Há também os materiais classificados como superparamagnéticos, que não serão objetos de estudo dessa aula.

Os materiais paramagnéticos possuem elétrons desemparelhados e os dipolos magnéticos não interagem fortemente uns com os outros, de forma que na presença de um campo magnético externo, os dipolos se alinham, provocando um leve aumento na intensidade do campo. Esses materiais são fracamente atraídos pelos ímãs. Exemplos de materiais paramagnéticos: alumínio, platina, magnésio, urânio, sódio, etc.

O diamagnetismo é observado em materiais cujas moléculas não têm momentos magnéticos permanentes, e quando colocados na presença de um campo magnético externo, seus dipolos magnéticos induzidos se opõem à direção do campo, diminuindo o campo externo. Exemplos de diamagnéticos: bismuto, prata, mercúrio, chumbo, cobre, etc.

Nos materiais paramagnéticos e diamagnéticos, a magnetização M é proporcional ao campo aplicado H , ou seja:

$$M = \chi \frac{H}{\mu_0} \quad (2)$$

onde χ é a suscetibilidade magnética e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo $= 4\pi \cdot 10^{-7}$ (T.m/A). A permeabilidade do material pode ser definida como:

$$\mu = (1 + \chi)\mu_0 \quad (3)$$

Nos materiais ferromagnéticos, existe forte interação dos dipolos magnéticos vizinhos produzindo um alinhamento interno em certas regiões chamadas de domínios magnéticos, de forma que mesmo na ausência de um campo magnético externo, os dipolos continuam alinhados como ocorre nos ímãs permanentes. Os materiais ferromagnéticos são empregados em motores, transformadores, eletroímãs, etc. Exemplos de materiais ferromagnéticos: ferro, níquel, cobalto, ligas que contêm esses materiais.

Quando um material ferromagnético é submetido a um campo magnético externo, existe um ponto que todos os momentos magnéticos do material estão alinhados ao campo externo, conhecido como magnetização de saturação. Após ter atingido a saturação, um aumento posterior do campo magnético não produz mais nenhum aumento da magnetização M . Quando o campo magnético é reduzido a zero, alguma magnetização persiste. Esse efeito é denominado de histerese; a magnetização e a desmagnetização de um material que possui histerese produzem perda de energia (área interna da curva de histerese) e a temperatura do material aumenta durante o processo. A curva de histerese é própria para cada material e pode ser vista na Figura 1 a seguir.

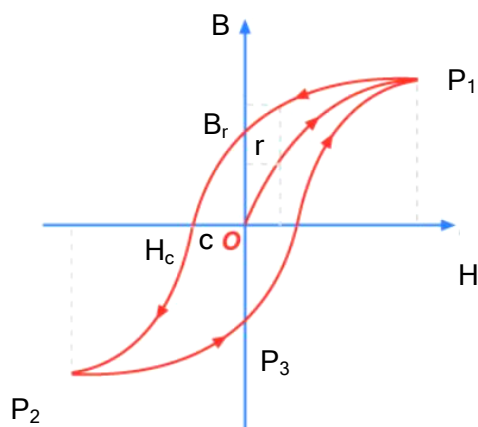


Figura 1: Curva de histerese (indução magnética, B , versus campo aplicado).

A curva de histerese mostra o gráfico do campo magnético B em função do campo magnético aplicado H . Quando a corrente aumenta gradualmente, a partir de zero, B aumenta de zero seguindo a curva que vai da origem O até o ponto P_1 (curva de magnetização). Nas proximidades de P_1 , a curva se torna horizontal, mostrando que a magnetização está próxima da magnetização de saturação (momentos magnéticos alinhados). A partir da saturação, o campo B só aumenta devido ao aumento do campo aplicado $H = \mu_0 nI$. Quando o campo

aplicado H diminui gradualmente a partir do ponto P_1 , não há uma diminuição correspondente da magnetização. A movimentação das fronteiras dos domínios de um material ferromagnético não é completamente reversível, e parte da magnetização permanece no material mesmo quando o campo aplicado H é reduzido à zero. O valor do campo no ponto r , quando H é nulo, é a magnetização residual B_r (ou indução residual - indica quanto de magnetização ficou retida).

Quando a corrente é invertida, o campo aplicado H tem direção oposta à inicial e o campo magnético B vai diminuindo até zero no ponto c (campo coercitivo H_C - indica quanto é difícil desmagnetizar o material). Para chegar ao outro ponto de saturação P_2 , basta aumentar a corrente na direção oposta. O ciclo é completado quando a corrente é diminuída a zero, no ponto P_3 , e em seguida é aumentada até o ponto P_1 .

Quando um determinado campo magnético aplicado em um material for retirado bruscamente, passa ocorrer o fenômeno de relaxação magnética. Os momentos magnéticos decrescem rapidamente devido a ausência do campo magnético.

Para o emprego de materiais ferromagnéticos em transformadores, motores ou aplicações em que seja necessário obter o mais elevado campo magnético possível para uma dada corrente, geralmente é utilizado o ferro doce que possui alta permeabilidade magnética e um ciclo de histerese o mais estreito possível (Figura 2a). Para aplicações em ímãs permanentes, o ferro puro é mais adequado, pois apresenta uma curva mais larga (Figura 2b) e conseqüentemente uma alta magnetização residual e alto campo coercitivo, significando que o mesmo não pode ser facilmente desmagnetizado.

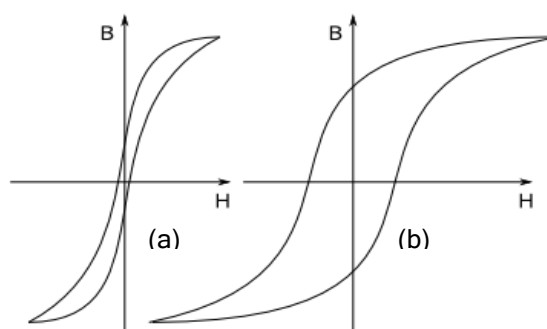


Figura 2: Curvas de histerese (a) ciclo de histerese mais estreito ou com menor perda e (b) curva mais larga, possuindo alta magnetização residual.

Atividade experimental

1. Objetivos

O objetivo desta atividade prática é contribuir para a compreensão do efeito da histerese ferromagnética, a partir de medidas em núcleos de ferro sólido e laminado, determinação da magnetização residual e do campo coercitivo, e o cálculo da perda energética.

2. Materiais e Métodos

Os materiais necessários para realização deste experimento são:

- Bobina de 600 voltas;
- Núcleos em forma de U de ferro sólido e laminado;
- Barras de ferro, sólida e laminada;
- Fonte de tensão elétrica;
- Cabos;
- Teslâmetro com detector de campo magnético;
- Placa de aquisição com arduino;
- Computador

Roteiro Experimental:

- i. Desconecte os cabos da fonte;
- ii. Gire os potenciômetros (ajuste grosso e fino) da corrente e voltagem totalmente no sentido anti-horário;
- iii. Ligue a fonte;
- iv. Aumente a voltagem até 4,5 V (limite seguro para proteger o Arduino de queima);
- v. Conecte os cabos da bobina passando por uma chave inversora;
- vi. Conecte a fonte na chave inversora. A fonte vai apresentar tensão zero;
- vii. Conecte os cabos de medida de tensão ao Arduino, mas CUIDADO: os cabos do Arduino devem ser conectados nos mesmos conectores que estão ligados na fonte, obedecendo a polaridade: o fio do Arduino que irá medir a tensão deve está conectado no pino (+) da fonte, que corresponde ao plug vermelho da fonte;
- viii. O sensor de campo deve está fora dos entre ferros;

- ix. Conecte a placa Arduino ao PC;
- x. Rode o programa de aquisição HISTERESE e preencha os valores de L, R e n (L = comprimento médio das linhas de campo no núcleo, R = resistência da bobina e n = número voltas da bobinas). O campo aplicado será determinado pela expressão $H = n.I/L$, como $I = V/R$, então $H = (n.V)/(L.R)$. Para o núcleo de ferro sólido $L = 0,232$ m e para o núcleo de ferro laminar $L = 0,244$ m. Escolha a porta COM diferente COM1 e clique em CONECTAR.
- xi. Faça a CALIBRAÇÃO do sensor de campo magnético;
- xii. Posicione o sensor entre os ferros e verifique se $B > 0$, caso contrário inverta o sensor;
- xiii. Gire o potenciômetro de ajuste grosso da corrente até o valor 1,8 A (limite seguro para proteger a bobina de queima);
- xiv. Comece o experimento clicando no botão MEDIR e quando o ponto aparecer na tela, gire o botão da corrente de ajuste grosso diminuindo a corrente em passos de 0,05 A. A cada novo passo clique em MEDIR;
- xv. Quando a corrente atingir o valor de 0 A clique em INVERTER e inverta a chave inversora;
- xvi. Coloque a valor da corrente em 0,05 A e clique em MEDIR e quando o ponto aparecer na tela, gire o botão da corrente de ajuste grosso aumentando a corrente em passos de 0,05 A. A cada novo passo clique em MEDIR;
- xvii. Sempre observe se a tensão não vai passar de 4,5 V, isso pode queimar a placa Arduino;
- xviii. Quando a corrente atingir o valor de 1,8 A, comece a diminui-la em passos de 0,05 A e clique em MEDIR a cada novo passo;
- xix. Quando a corrente atingir o valor de 0 A clique em INVERTER e inverta a chave inversora;
- xx. Coloque a valor da corrente em 0,05 A e clique em MEDIR e quando o ponto aparecer na tela, gire o botão da corrente de ajuste grosso aumentando a corrente em passos de 0,05 A. A cada novo passo clique em MEDIR;
- xxi. Quando a corrente atingir o valor de 1,8 A, que corresponde ao final da histerese, clique em RELAXAÇÃO, espere em torno de 5 s e depois desligue a fonte;

- xxii. Espere em torno de 5 s e clique em PARAR;
- xxiii. Feche o programa de aquisição HISTERESE;
- xxiv. Mude os nomes dos arquivos de dados para Histerese_NomeDoNúcleo e Relaxação_NomeDoNúcleo.
- xxv. Gire o potenciômetro da corrente para o lado esquerdo até o final e não mexa no potenciômetro da tensão: PODE QUEIMAR O ARDUINO;
- xxvi. Desconecte os cabos da fonte;
- xxvii. Ligue a fonte e verifique se a tensão é igual a 4,5 V;
- xxviii. Troque o núcleo sem desfazer as conexões e refaça o experimento a partir do item viii;

3. Discussão

1. Faça um gráfico de B (mT) versus H (kA/m) para cada um dos núcleos (sólido e laminar) e analise o seu comportamento comparando-os com a Figura 2.
2. Nos dois gráficos, determine a magnetização residual (B_r) e o campo coercitivo (H_c), indicados na Figura 1, através da média aritmética ($B_r = \frac{B_{r+} + |B_{r-}|}{2}$, $H_c = \frac{H_{c+} + |H_{c-}|}{2}$). Caso seja necessário, pode-se usar o método da interpolação linear para determinar B_{r+} , B_{r-} , H_{c+} , H_{c-} .
3. Para os gráficos anteriores, comente e discuta sobre a diferença de magnetização residual e de campo coercitivo entre os núcleos, explicando o porquê.
4. Faça dois gráficos de B (mT) versus H (kA/m) para cada um dos núcleos (sólido e laminar) da parte positiva da indução magnética (B) e partir deles calcule a energia perdida E_{perd} (J/m^3) no processo de magnetização e desmagnetização;
5. Faça uma análise entre as energias perdidas E_{perd} (J/m^3) de cada núcleo;
6. Faça um único gráfico da relaxação magnética de B (mT) versus Tempo (s) de ambos os núcleos e analise o seu comportamento fazendo um correlação com a histerese específica;