

Experimento V: Transformadores

Objetivos:

1. Estudar experimentalmente transformadores, saturação e histerese.
2. Caracterizar o ganho de voltagem, perdas e resposta em frequência de um transformador. Determinar a curva de histerese.

Preparação:

1. Reveja, no livro texto de Física de sua preferência (Halliday & Resnik - vol 3, por exemplo), os conceitos de: leis de Ampère e de Faraday, indutância, indutância mútua, cálculo da indutância de um solenóide de seção reta, permeabilidade magnética. Complete estudando, no Cap. 9, detalhes sobre transformadores, corrente de magnetização, histerese, força coercitiva, campo remanente e energia dissipada no ciclo de histerese.
2. Mostre que, no circuito da figura V.1(a), V_x é proporcional ao campo magnético aplicado (H) e (se $2\pi fRC \ll 1$, onde f é a frequência) V_y é proporcional ao campo de indução magnética (B). Quais são as constantes de proporcionalidade? (expresse estas constantes como função das dimensões do núcleo, dos números de voltas dos enrolamentos, R_1 , R e C). [Note que V_y é proporcional à integral de V_s no tempo e que, por sua vez, V_s é proporcional à derivada da indução, dB/dt]. (Cap. 9 da Apostila).

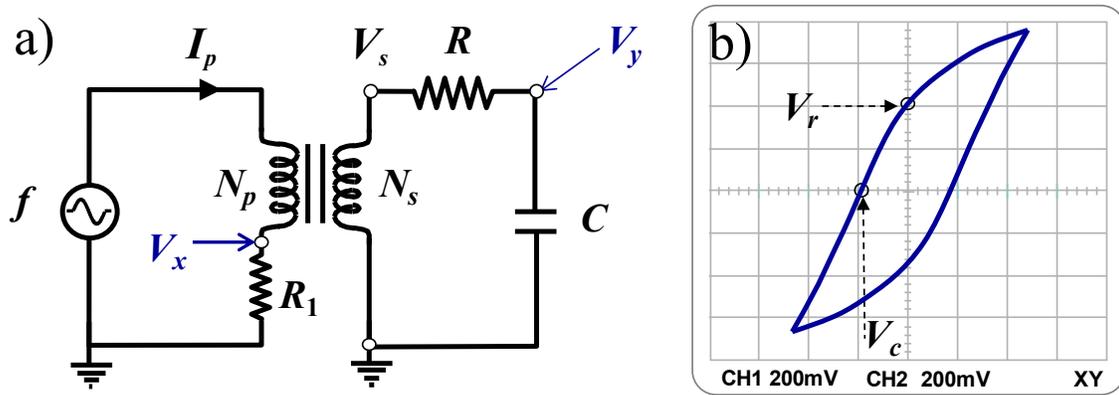


Fig. V.1. **a)** Circuito para observar a curva de histerese de um transformador utilizando um osciloscópio operando no modo X-Y. A voltagem sobre R_1 , proporcional à corrente no primário I_p (e portanto ao campo magnético H) é ligada à entrada X do osciloscópio. R e C formam um integrador para frequências $f \ll 1/2\pi RC$. A voltagem sobre C (ligada à entrada Y) é então proporcional à integral da fem induzida no secundário (portanto proporcional ao fluxo e, portanto, ao campo de indução magnética B). **b)** Curva de histerese típica observada no transformador de ensino para 15 Hz. Neste exemplo a área da curva de histerese é aproximadamente $\tilde{A} = (11 \text{ quadrinhos} \times 200 \text{ mV} \times 200 \text{ mV}) = 0.44 \text{ V}^2$.

3. Mostre que a energia dissipada por ciclo de histerese e por unidade de volume, assumindo que B e H são uniformes e confinados ao núcleo, pode ser escrita como

$$P_{hist} = \frac{fRCN_p}{R_1N_s} \tilde{A},$$

onde N_p (N_s) é o número de voltas do enrolamento do primário (secundário) e \tilde{A} é a área do ciclo de histerese com as voltagens medidas na Fig. V.1(b), ou seja,

$$\tilde{A} = \oint V_y dV_x.$$

4. Reveja como medir indutâncias utilizando o método da figura de Lissajous; como medir capacitâncias rapidamente com o método do circuito integrador e como funciona o circuito integrador RC (Exp. III)
5. Relacione o campo remanente B_r e a força coercitiva H_c com, respectivamente, os valores de V_r e V_c indicados no diagrama de histerese da Fig. V.1(b), o perímetro médio (ℓ) e a seção transversal (S) do núcleo (vide Fig. V.2(b)).
6. Projete o experimento fazendo escolhas adequadas dos resistores e do capacitor da Fig. V.1(A) para medir a corrente no primário e a integral da *fem* induzida no secundário para $f = 20$ Hz e bobinas com $N_p = 400$ e $N_s = 1600$:
 - Para que o circuito secundário integre corretamente, a constante de tempo $\tau = RC$ deve ser pelo menos 4 ou 5 vezes maior que o período $T = 1/f$. No laboratório dispomos de capacitores de plástico de $10 \mu\text{F}$. Por exemplo, se $f = 20$ Hz e $C = 10 \mu\text{F}$, então $\tau/T > 5$ implica em $R > X$ k Ω . Calcule X.
 - Se R_1 for muito grande, o gerador (que tem uma resistência interna de 50Ω e gera uma corrente máxima de uns 200 mA_{pp}) não poderá fornecer corrente suficientemente alta como para saturar o núcleo de ferro. Os resistores de menor valor disponíveis no laboratório são de $4,7 \Omega$. Por outro lado, não adianta que R_1 seja muito menor que os 50Ω do gerador. Assim, R_1 entre 5 e 10Ω deve permitir observar ciclos de histerese confortavelmente. Se o gerador opera com $20 V_{pp}$, que potência máxima deverá suportar R_1 ?
 - Que voltagem pico-a-pico espera no secundário (V_s) quando o gerador opera com $20 V_{pp}$?
 - Quais serão as potências dissipadas nos enrolamentos primário e secundário supondo que as resistências dos enrolamentos sejam, respectivamente de 3Ω e 50Ω ?

Roteiro sugerido:

1. **Anote os instrumentos e os componentes utilizados.**
2. Meça, com multímetro, as resistências dos enrolamentos das duas bobinas (utilize uma bobina de 3 mH e outra de 50 mH, estas têm, respectivamente, 400 e 1600 voltas). Utilizando o método da figura de Lissajous, meça, para cada bobina, as indutâncias com e sem núcleo de ferro e com a indutância do outro lado do transformador em aberto e em curto-circuito. Note que o ferro não responde magneticamente à altas frequências. Assim, quando for medir as indutâncias com núcleo de ferro, escolha valores de C tais que as frequências de ressonância sejam ≤ 50 Hz e meça depois o valor de C com o método do circuito integrador.

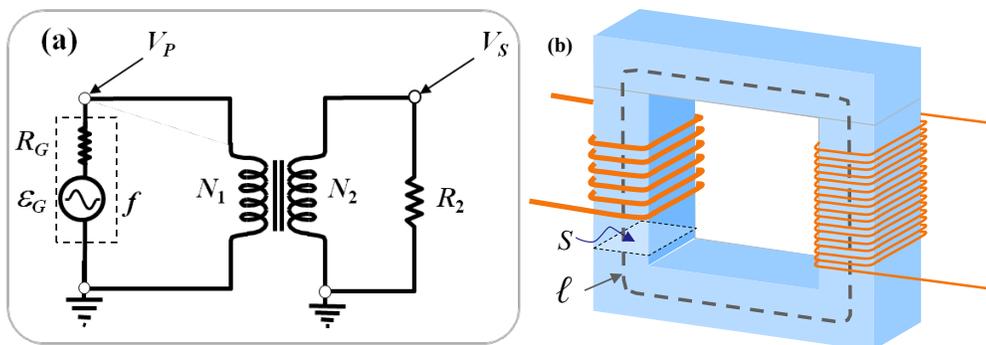


Fig V.2. (a) Circuito para medir o ganho de tensão e resposta em frequência do transformador. (b) Transformador com núcleo. As linhas de campo percorrem um perímetro médio ℓ e atravessam a seção transversal S . Use $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$.

3. Monte o circuito da Figura V.2(a) com f entorno de 50 Hz e $N_1 < N_2$. Meça as tensões e correntes no primário e secundário para uns 10 valores de V_p (entre 0 e 20 V) e faça um gráfico para verificar se a relação é linear ou não. Da inclinação da reta, determine o ganho de voltagem ($|V_s/V_p|$) e compare com o quociente entre o número de voltas dos enrolamentos. Compare também com a raiz quadrada da razão entre as indutâncias medidas no item 1. Depois, troque N_1 com N_2 e, para um único valor de tensão (1 V) meça o ganho de voltagem e verifique se é o recíproco do valor anteriormente medido.
4. Monte o circuito da Figura V.1(a) com f entorno de 20 Hz, $N_p < N_s$, $R_1 = 4,7 \Omega$, $R = 100 \text{ k}\Omega$ e $C > 10 \mu\text{F}$ (o maior valor que tiver disponível e que não seja eletrolítico). Verifique que o circuito secundário está integrando corretamente (ou seja, ligue o gerador direto, sem o transformador, e verifique se a diferença de fase entre a entrada e saída deste circuito é de 90° - ou coloque uma onda quadrada e veja se a onda no capacitor é triangular).
5. Aumente a voltagem ao máximo ($20 V_{pp}$) e varie a frequência observando o que acontece com a curva de histerese. Anote as suas observações.
6. Para uma frequência fixa e baixa (15 a 30 Hz, mas meça-a) copie a curva de histerese no quadriculado do seu caderno (ou tire uma fotografia, ou capture a tela do osciloscópio no computador), anote as escalas (Volts/div) do vertical e horizontal. Estime a área do ciclo de histerese e determine a potência dissipada por ciclo $P_{hist} \pm \Delta P_{hist}$ (em Watts).
7. Capture ou desenhe a curva de histerese para 60 Hz nas mesmas escalas horizontais e verticais do osciloscópio que utilizou no item 6.
8. Meça com régua as dimensões do núcleo do transformador e dos enrolamentos (Fig. V.2(b)) e determine assim o perímetro médio que percorrem as linhas de campo dentro do núcleo ($\ell \pm \Delta\ell$) e a área da seção transversal deste ($S \pm \Delta S$). Estime então, utilizando os dados (V_c e V_r) da curva de histerese, a força coercitiva $H_c \pm \Delta H_c$ (em A/m) e o campo remanente $B_r \pm \Delta B_r$ (em Teslas).