

Relatório 3: Transformadores

F429 - G.5 2º semestre 2016

Prof. Lázaro Padilha

Giovani Nascimento Pereira - 168609

Seong Eun Kim - 177143

Renan Adriani Sterle - 176536

Carlos Augusto Figueiredo Freire de Carvalho - 165684

*Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Campinas, SP*

26 de outubro de 2016

Resumo

Nesse experimento, estudamos a dependência da tensão de uma bobina primária em função do número de voltas de uma bobina secundária em um transformador e analisamos o fenômeno da histerese no núcleo. Para isso, primeiramente, montamos um circuito com um transformador formado por duas bobinas acopladas por um núcleo e analisamos a mudança do valor da tensão quando as trocávamos de lugar. Depois, montamos um circuito usando dois transformadores e observamos o efeito da histerese através do osciloscópio. A partir disso, pudemos calcular, na primeira etapa do experimento, que $V_s/V_p = 3.606 \pm 0.003$ e que $V_p/V_s = 0.210 \pm 0.002$ e comparar esses valores com o modelo teórico esperado, que diz que $V_s/V_p = N_s/N_p$. Além disso, a partir da curva de histerese obtida, que estava dentro do formato esperado, pudemos calcular o valor da força coercitiva $(H_c \pm \Delta H_c) = (-70 \pm 4) A/m$ e do campo remanente $(0.23 \pm 0.02) T$.

Sumário

1	Introdução	3
2	Objetivos	3
3	Metodologia	3
4	Resultados	7
5	Análise de Dados	10
5.1	Medidas de Indutâncias	10
5.2	Ganho de Tensão no Transformador	10
5.3	Histerese do Transformador	11
6	Discussão	11
7	Conclusão	13
8	Instrumentos utilizados	14
9	Propagação de erros	14

1 Introdução

O Experimento 3 - Transformadores, foi feito com o intuito de compreender melhor o funcionamento de transformadores em circuitos elétricos, mais especificamente, investigar a transformação de tensão através de bobinas acopladas por um núcleo de ferro. Para isso, medimos a indutância dos indutores que faziam parte do transformador, e observamos qualitativamente o efeito do núcleo de ferro na indutância de um indutor. Além disso, foi observado o efeito da histerese núcleo de ferro do transformador, pela montagem de circuitos que permitiam analisar a tensão entre os solenoides de cada lado do indutor mostrados através de um osciloscópio.

2 Objetivos

Esse experimento teve como objetivos estudar o comportamento da tensão em indutores acoplados por um núcleo de ferro, particularmente a relação entre a tensão e o número de voltas de cada bobina, e analisar o fenômeno de histerese no núcleo do transformador.

3 Metodologia

Para a montagem do circuito com os indutores, o primeiro passo foi encontrar a indutância dos indutores utilizados. Para isso, usamos dois indutores com número de espiras diferentes, I_1 e I_2 . I_1 , de 400 espiras, com indutância nominal $L = (3.60 \pm 0.01)mH$ e resistência interna nominal de $R_i = (5.8 \pm 0.1)\Omega$. I_2 , de 1600 espiras, com indutância nominal $L = (54.36 \pm 0.01)mH$ e resistência interna nominal de $R_i = (63.5 \pm 0.1)\Omega$.

Como a indutância é proporcional ao número de voltas na espira do indutor, elas são, portanto, diferentes.

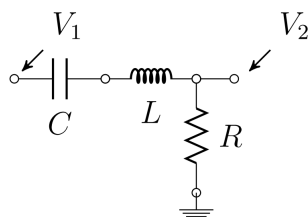


Figura 1: Diagrama de um circuito RLC ressonante.

Então, foi montado um circuito RLC, como descrito na figura fig. 1 com um capacitor de $C = 24\mu F$ medindo-se com o uso do osciloscópio a tensão no resistor de $R = 150\Omega$ e a tensão de alimentação do circuito, fornecida pelo gerador de função. O gerador foi ligado na forma de onda senoidal, com uma tensão baixa (na faixa de $V_{in} = 500mV$) e o osciloscópio ajustado para mostrar a forma XY, comparando a fase da tensão de entrada (V_1) com a da medida no resistor (V_2).

A imagem obtida no osciloscópio é chamada de *Figura de Lissajous* e o seu formato é alterado conforme se altera a diferença de fase entre as medidas dos dois canais. Essa defasagem decorre da presença do capacitor e do indutor no circuito, sendo que eles têm efeitos contrários na fase resultante. Desse modo, quando o capacitor compensa o efeito do indutor, o que caracteriza a ressonância, a diferença de fase entre (V_1) e (V_2) é nula e a figura representada é a reta bissetriz dos quadrantes ímpares. Desse modo, sabendo-se a capacitância nominal C, pode-se determinar a indutância L ou

mesmo determinar frequência natural de ressonância do circuito. A frequência f_o pode ser descrita como:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Assim, variando-se a frequência através do gerador de função, até que a *Figura de Lissajous* torne-se uma reta, é possível encontrar o valor da indutância do indutor e a frequência de ressonância.

Essa parte do experimento foi repetida para cada um dos indutores utilizados.

$$V_L = \frac{d\phi_B}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$\phi_B = BA = Li \quad (3)$$

Onde V_L é a tensão no indutor, ϕ_B é o fluxo magnético, L é a indutância, i é a corrente, B é o campo magnético, e A é a área atravessada por ele.

Da eq. (2), podemos depreender que a tensão no indutor é proporcional à variação do fluxo magnético dentro dele.

Da eq. (3), podemos inferir que o fluxo magnético depende do campo magnético que existe através do indutor. Já o campo magnético dentro do solenoide depende da corrente através do indutor (i), do seu comprimento (l) e do seu número de voltas (N), como é descrito na equação:

$$B = \mu_o \frac{N}{l} i \quad (4)$$

Dentro de um transformador, formado por dois indutores conectados através do núcleo de ferro, o fluxo magnético em cada indutor depende do fluxo gerado pelo outro indutor. Sendo B_1 o campo magnético gerado pelo primeiro indutor, e A_2 a seção interna do segundo solenoide, é possível descrever o fluxo causado no indutor 2 pelo 1 como:

$$\phi_{21} = \int \vec{B}_1 \cdot d\vec{A} = N_2 B_1 \pi R_1^2 = \frac{\mu_o N_2 N_1}{l} \pi R^2 i_1 = M i_1 \quad (5)$$

Observa-se que nessa equação, a integral foi resolvida, e o valor de B_1 foi substituído na equação. O termo $\frac{\mu_o N_2 N_1}{l} \pi R^2$ é uma constante que é chamada de M (indutância mútua).

Então no caso ideal, a tensão medida no solenoide primário do indutor nada mais é que o descrito na eq. (2), E no secundário a mesma coisa. Portanto pode-se assumir que as duas tensões se relacionam através de:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (6)$$

Por exemplo, um transformador ideal com um solenoide de 1000 voltas e outro com 500 voltas, a tensão medida no primeiro é o dobro da segunda.

Agora, para estudar o efeito da transformação de tensão, é necessário compreender o indutor utilizado, que é composto de dois indutores unidos por um núcleo de ferro. Num indutor ideal, a perda de energia no núcleo é nula, pois a histerese também é, e o fluxo magnético numa seção do núcleo é igual a outra seção de mesma área.

O fluxo magnético dentro do transformador depende do número de espiras que existem no solenoide do indutor.

Depois de encontradas as indutâncias, foi montado o circuito da fig. 2 com o gerador de função a frequência aproximadamente de 50Hz e com a tensão de pico-a-pico limitada a 5V ($V_{pp} = 5V$) e com o osciloscópio medindo a tensão aplicada no primeiro indutor (N_p) e a tensão que aparece no segundo (N_s). Na primeira montagem, foi feita de forma que $N_p < N_s$. Então, com os instrumentos ligados a um computador com **MATLab**, adquirimos os dados de uma varredura de tensão para observar a proporcionalidade expressa na eq. (6). Esse procedimento foi repetido para o caso em que $N_p > N_s$.

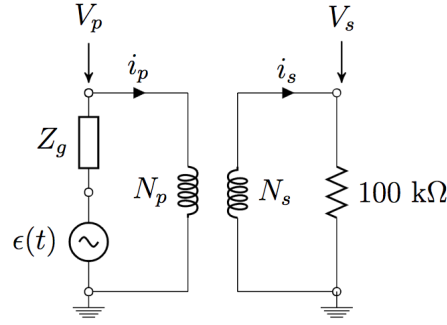


Figura 2: Diagrama do circuito do transformador com bobinas de N_p voltas no primário e de N_s voltas no secundário.

Com a montagem de $N_s < N_p$, foi feita uma medição qualitativa da função do núcleo de ferro no indutor. O circuito da fig. 2 foi montado, mas com os indutores concatenados e desacoplados do núcleo de ferro, e depois foi observado o comportamento das tensões medidas em cada indutor através do osciloscópio quando o núcleo de ferro foi introduzido lentamente entre as bobinas dos indutores. O foco foi em perceber se a proporção eq. (6) foi sempre mantida.

Depois de terminada essa parte, para compreensão do efeito da indução e da transformação da tensão, foi montado o circuito da fig. 3 com $N_p < N_s$, usando resistores de resistências nominais $R_1 = 4.7\Omega$ e $R = 100\text{ k}\Omega$ e um capacitor com capacitância nominal $C = 24\mu F$. Nesta parte do experimento, não foi utilizado o gerador de função, e sim a tomada disponível no laboratório, dessa forma a frequência de entrada de circuito era a frequência da tomada (que no caso era de aproximadamente 60 Hz), onde foi ligado um transformador que reduzia a tensão da tomada a $18V_{rms}$.

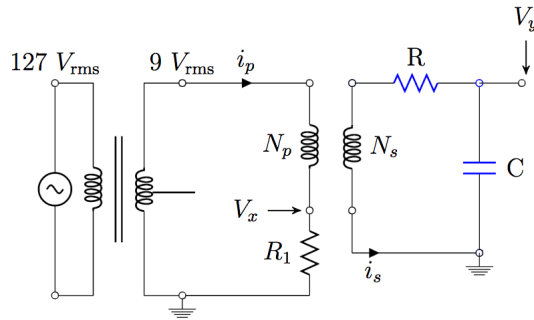


Figura 3: Diagrama do circuito para observar o fenômeno da histerese.

Assim, com o circuito montado, o osciloscópio foi ligado no modo XY para observação da histerese do núcleo férrio.

O sinal do canal 1, V_x é proporcional ao campo magnético H , enquanto que no canal 2 V_y , é proporcional ao fluxo magnético B .

A partir da figura obtida no osciloscópio, sabemos o valor máximo da queda de tensão. Assim, podemos calcular o valor da tensão no resistor R_1 V_{rms} , da corrente i_{rms} e da resistência equivalente R_{eq} :

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R_1} \quad (8)$$

$$R_{eq} = \frac{P_d}{i_{rms}^2} \quad (9)$$

Sendo P_d o valor da potência RMS dissipada no transformador.

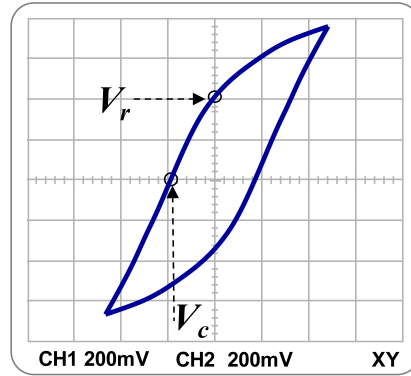


Figura 4: Figura típica de Lissajous para a histerese de um núcleo férrio.

Depois o osciloscópio foi alterado para o modo YT, e as formas de onda observadas foram capturadas com o auxílio do **MATLab**. A forma esperada era similar à fig. 4.

Com a área da figura obtida, pudemos calcular a potência dissipada, P_d , que é definida por:

$$P_d = \frac{fRCN_pA}{R_1N_s}. \quad (10)$$

A partir das tensões V_r e V_c , indicadas na fig. 4, podemos calcular o valor do campo remanente B_R e da força coercitiva H_c . A força coercitiva corresponde à tensão necessária para neutralizar o campo magnético da magnetização do núcleo, V_c , enquanto o campo remanente corresponde à tensão que permanece devido à magnetização do núcleo, V_r .

Com esses valores, podemos computar o valor do campo remanente B_R e da força coercitiva através das equações:

$$B_R = \frac{RCV_r}{SN_s} \quad (11)$$

$$H_c = \frac{N_pV_c}{R_1L} \quad (12)$$

Por fim, fizemos as medições das dimensões do núcleo de ferro utilizado no experimento, de forma que foi possível calcular o perímetro médio (l) e a área da seção transversal (S) usando as seguintes equações:

$$l = 2(D - F) + 2(E - F) \quad (13)$$

$$S = FB \quad (14)$$

Em que F, B, D e E são os valores das dimensões obtidos.

4 Resultados

Os valores eficazes dos componentes utilizados no experimento são: $V_x = (0.051 \pm 0.002)V$, $V_c = (-0.34 \pm 0.02)V$, $R = (98.8 \pm 0.1)\Omega$, $R_1 = (7.5 \pm 0.1)\Omega$ e $C = (28.12 \pm 0.01)\mu F$. As dimensões do núcleo do transformador, medidas com o auxílio de uma régua, são $F = (19.0 \pm 0.5)mm$, $B = (20.0 \pm 0.5)mm$, $D = (95.0 \pm 0.5)mm$ e $E = (72.0 \pm 0.5)mm$.

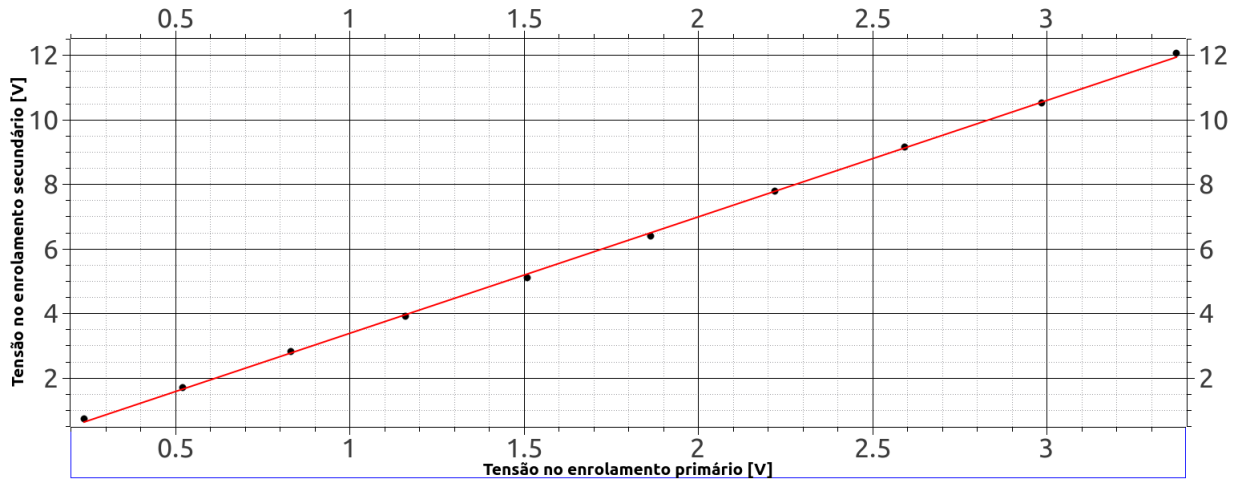


Figura 5: Gráfico obtido da Varredura em tensão comparando as tensões nos indutores 1 e 2 para $N_s > N_p$, de acordo com a montagem da fig. 2. A equação da regressão linear expressa em vermelho é

$$Y = (3.606 \pm 0.003)X - 0.23 \pm 0.05. \quad \frac{Chi^2}{doF} = 0.0001575896 \quad R^2 = 0.999557227$$

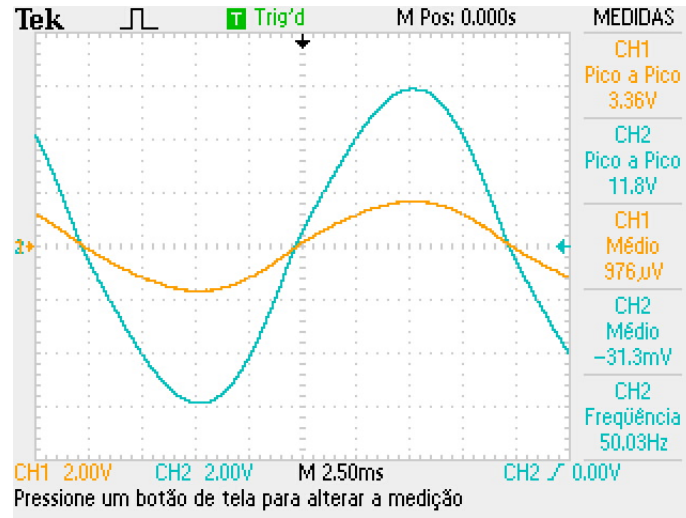


Figura 6: Imagem da forma de onda obtida do osciloscópio varrendo o circuito da fig. 2 para uma situação da fig. 5, onde $N_s < N_p$, ou seja, a tensão de saída é maior que a que entra no transformador. (Todas as legendas foram geradas automaticamente pelo osciloscópio.)



Figura 7: Gráfico obtido da varredura em tensão comparando as tensões nos indutores 1 e 2 para $N_s < N_p$, de acordo com a montagem da fig. 2 A equação da regressão linear expressa em vermelho é $Y = (0.210 \pm 0.002)X - 0.019 \pm 0.006$. $\frac{Chi^2}{doF} = 7.344391$ $R^2 = 0.99935213017$

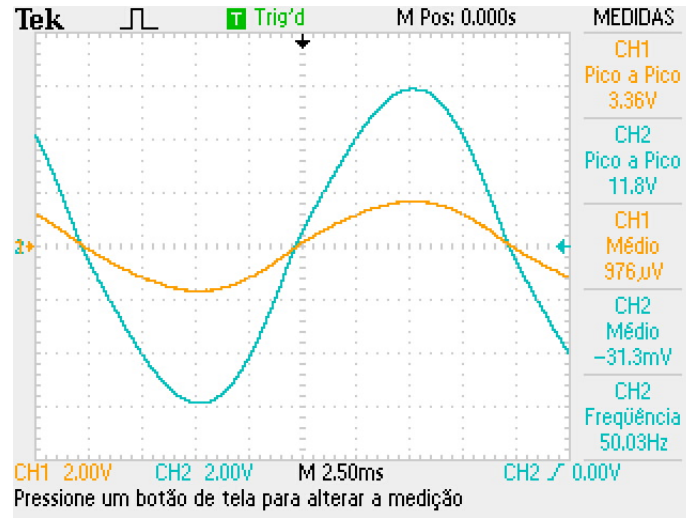


Figura 8: Imagem da forma de onda obtida do osciloscópio varrendo o circuito da fig. 2 para uma situação da fig. 5, onde $N_s > N_p$, ou seja, a tensão de saída é menor que a que entra no transformador. (Todas as legendas foram geradas automaticamente pelo osciloscópio.)

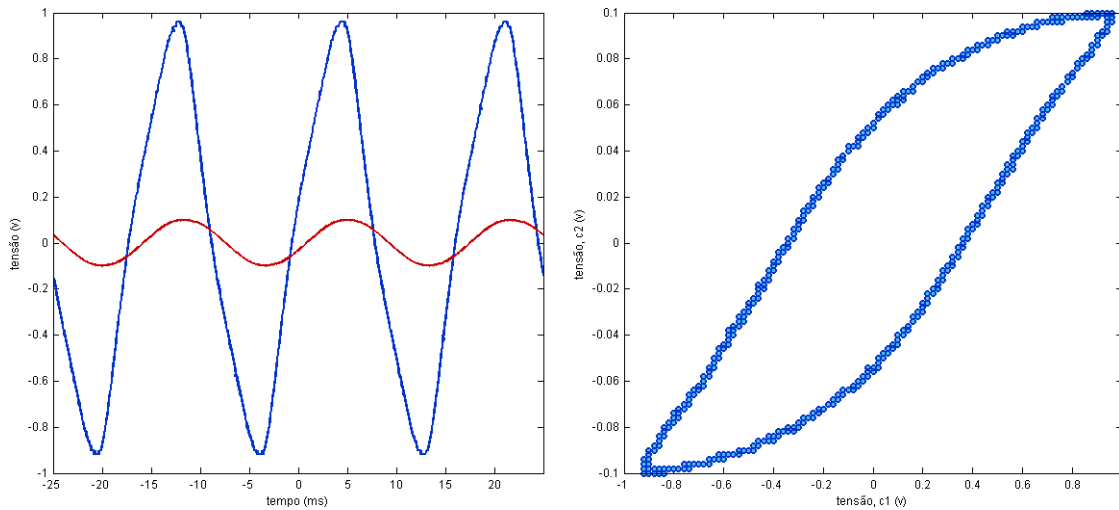


Figura 9: Gráfico obtido através da figura obtida pelo MATLAB da figura de *Lissajous* representando a histerese decorrente da montagem da fig. 3.

A área interna ao segundo gráfico, da histerese, foi calculada por integração numérica em C++ e tem valor $(0.1195 \pm 0.0002)V^2$

5 Análise de Dados

5.1 Medidas de Indutâncias

Através da montagem do circuito da fig. 1, e medindo a tensão com o auxílio do osciloscópio, foi possível encontrar o valor das indutâncias reais dos indutores utilizados, colocando o osciloscópio no modo XY e ajustando a frequência de entrada de forma que a imagem observada se tornasse uma reta. Isso garantiria que o circuito havia entrado no estado de ressonância, e a frequência pode ser descrita através da eq. (1), sabendo-se a frequência e a capacitância do circuito, isso permitia encontrar o valor da indutância.

Para o primeiro indutor (que possuía menor número de espiras), a frequência de ressonância foi de $f_o = (50 \pm 1)10^1 Hz$, como o capacitor utilizado tinha capacitância de $C = 28.12 \pm 0.01 \mu F$, a indutância pode ser calculada como sendo:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 C f_o^2} \Rightarrow L_1 = (3.6 \pm 0.1)mH$$

Para o segundo indutor (com maior número de espiras), o cálculo é análogo ao do indutor menor, para esse caso, a frequência de ressonância encontrada foi de $f_o = 128 \pm 1 Hz$. Assim o valor de indutância encontrado foi de:

$$L_2 = (55.0 \pm 0.9)mH$$

Depois, a mesma montagem da fig. 1 foi feita para o indutor 1 (com menor número de espiras), mas dessa vez, ele foi introduzido ao núcleo férrio (que é utilizado para montagem do transformador). Pelo método das figuras de *Lissajous*, a nova frequência de ressonância encontrada foi de $f_o = (110 \pm 1 Hz)$. Calculando-se a nova indutância do componente através da eq. (1), foi possível encontrar a nova indutância como sendo:

$$L_{nucleo} = (74.4 \pm 0.9)mH$$

5.2 Ganho de Tensão no Transformador

Através do experimento feito com os circuitos montados da fig. 2 foi possível obter os gráficos da fig. 5 e fig. 7.

Essas imagens representam a relação da tensão no primeiro indutor e no segundo. É possível notar que a razão entre as tensões é aproximadamente constante, por isso a curva pode ser descrita através de uma função linear nos dois casos.

Na fig. 5, onde $N_s < N_p$, a razão $|V_s/V_p| = 3.606 \pm 0.003$, ou seja, houve um ganho de tensão de 3.606 vezes no transformador.

Na fig. 7, onde $N_s > N_p$, a razão $|V_s/V_p| = 0.210 \pm 0.002$, ou seja, houve uma perda de tensão de 0.21 vezes da tensão de entrada ao passar pelo transformador.

A razão entre as tensões, ou seja, o ganho de tensão no transformador, pode ser descrito através da eq. (6). Como o indutor 1 possui 400 espiras, e o indutor 2 cerca de 1600 espiras, a razão esperada pode ser calculada como:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = 1600/400 = 4$$

5.3 Histerese do Transformador

A fim de estudar o efeito da histerese do transformador, é importante ter uma análise do transformador em si, principalmente da sua forma, que influencia nesse efeito. A partir das dimensões medidas do núcleo do transformador, pudemos calcular o perímetro médio que percorrem as linhas de campo dentro do núcleo (1) usando a eq. (13):

$$(l \pm \Delta l) = (258 \pm 2)mm$$

E a área de seção transversal (S) usando a eq. (14):

$$(S \pm \Delta S) = (38 \pm 1)10mm^2$$

Assim, como agora temos o valor de S, podemos substituir os valores calculados na eq. (11) e computar o valor do campo remanente (B_R):

$$(B_R \pm \Delta B_R) = (0.23 \pm 0.02)T$$

E calcular a força coercitiva (H_c) usando a eq. (12):

$$(H_c \pm \Delta H_c) = (-70 \pm 4)A/m$$

Essa força é o que representa a tendência do material férrio de manter as suas propriedades anteriores (a histerese).

Para o cálculo da potência dissipada, primeiramente, calculamos a área A da curva de histerese por integração numérica, (representada à direita da fig. 9) e obtivemos:

$$A = (0.1195 \pm 0.0002)V^2$$

Assim, sabendo que a frequência da histerese é de $f = (60.047 \pm 0.001)Hz$, $N_p = 400$ e $N_s = 1600$, substituímos esses valores na eq. (10) e obtemos que a potência dissipada no ciclo é:

$$(P_d \pm \Delta P_d) = (0.66 \pm 0.01)W$$

Pela curva capturada no resistor de 4.7Ω (representada à esquerda da fig. 9), sabemos que a queda de tensão máxima foi de V_{max} . Assim, obtemos o valor de V_{rms} a partir da eq. (7) e, usando a eq. (8) podemos calcular o valor de i_{rms} e, então, obter o valor da resistência equivalente R_{eq} associada ao circuito, por meio da eq. (9) .

$$(V_{max} \pm \Delta V_{max}) = (0.94 \pm 0.02)V$$

$$V_{rms} \pm \Delta V_{rms} = (0.66 \pm 0.01)V$$

$$(I_{rms} \pm \Delta I_{rms}) = (0.089 \pm 0.001)A$$

$$(R_{eq} \pm \Delta R_{eq}) = (85 \pm 3)\Omega$$

6 Discussão

Da primeira parte do experimento, de medição das indutâncias dos indutores utilizados, foi encontrada a indutância do indutor 1 (de menor número de espiras) como $L_1 = (3.6 \pm 0.1)mH$ e do indutor 2 como $L_2 = (55 \pm 0.9)mH$. Esses valores estão bem próximos dos valores indicados nos

próprios indutores, o indutor 1 tinha como valor nominal $L_{01} = (3.60 \pm 0.01)mH$ e o indutor 2 $L_{02} = (54.36 \pm 0.01)mH$, de fato, os valores se abrangem dentro das suas faixas de erro, isso condiz que essa parte do experimento foi feita corretamente. Todavia, os valores obtidos experimentalmente têm um erro associado maior que os valores nominais, isso se deve principalmente pelo método utilizado que associava um erro significativo à frequência de ressonância encontrada. Depois, a indutância foi calculada novamente para o indutor 1, mas dessa vez com o núcleo de ferro associado ao indutor, e houve um aumento significativo da indutância para $L_{nucleo} = (74.4 \pm 0.9)mH$. Esse aumento associado está de acordo com o esperado pela literatura, já que o valor do μ (a permeabilidade magnética do meio) para o ferro é bem maior que o do ar. Podemos observar através da eq. (4) que o campo magnético gerado pelo indutor (que é diretamente proporcional à sua indutância) depende de μ , então a indutância deveria mesmo aumentar ao adicionar o núcleo de ferro.

Quando observamos o comportamento descrito pelas fig. 5 e fig. 7, foi possível encontrar o ganho de tensão no transformador utilizando os indutores de indutância calculada anteriormente como sendo de (3.606 ± 0.003) . O ganho de tensão teve um comportamento linear com a variação da tensão, assim como esperado através da eq. (6), a razão é uma constante. Todavia, como o número de espiras do indutor 1 é de 400 espiras, e do indutor 2 de 1600 espiras, a razão $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_p}{N_s}$ deveria valer 4. Essa diferença se deve ao fato que o transformador não é ideal, ele possui uma resistência interna que não é nula, e a própria histerese do núcleo afeta a proporção de tensão. É interessante notar que o inverso do coeficiente angular do fig. 5 ($a_1^{-1} = 1/3.06 \Rightarrow a_1^{-1} = 0.28 \pm 0.02$) quando somado ao coeficiente angular do fig. 7 ($0.0.21 \pm 0.02$), para o qual a ordem dos enrolamentos foi invertida corresponde à 0.49 ± 0.03 que é próximo de 0.5, o que seria esperado para 2 vezes 0.25 que deveria ser o valor obtido do segundo coeficiente. Isso significa que embora haja um desvio no inverso do primeiro coeficiente e no segundo coeficiente em relação à razão do número de espiras dos indutores, estes estão aproximadamente a mesma distância do valor esperado, o que indica que a causa dos desvios é a mesma nos dois casos que é o fato do transformador não ser ideal (o mesmo ocorre entre o inverso do segundo coeficiente quando somado ao primeiro).

Na última parte do experimento, calculamos os valores do campo remanente B_R a partir da análise da tensão V_Y na figura da histerese e dos valores conhecidos de R , C , S , e N_S . Calculamos também o valor da força coercitiva, H_C , com os valores conhecidos de N_P , R_1 , e do período L . Os valores obtidos foram $B_R = (0.23 \pm 0.02)T$ e $H_C = (70 \pm 4)A/m$. Ambos os valores são razoáveis.

Através do cálculo da área da figura da histerese $A = (0.1195 \pm 0.0002)V^2$, e com este valor, calculamos a potência dissipada no transformador, $P_d = (0.66 \pm 0.01)W$.

É interessante notar que a magnetização e desmagnetização do núcleo férrio tem um custo energético, que corresponde à P_d . Isso demonstra que o transformador de fato não é ideal, e essa análise pode ser estendida ao mundo real, em que transformação de tensão, em redes de distribuição de potência por exemplo, representam gastos significativos de energia.

Com o valor da tensão RMS no resistor R_1 , V_{rms} , obtivemos $I_{rms} = (0.089 \pm 0.001)A$. Então pudemos determinar a resistência equivalente do primeiro enrolamento do transformador mais R_1 , $R_{eq} = (85 \pm 3)\Omega$.

Considerando a resistência nominal interna do indutor I_1 , $R_i = (63.5 \pm 0.1)\Omega$, e $R_1 = (7.5 \pm 0.1)\Omega$, o valor obtido $(85 \pm 3)\Omega$ é bastante razoável.

Um ponto importante que funcionou como fonte de erro para o experimento, era a instabilidade de acoplamento dos indutores ao núcleo de ferro, já que era difícil de garantir o alinhamento ideal dos solenoides e seu *encaixe* no núcleo de ferro, além dos encaixes da *Protoboard* e da resistência dos cabos utilizados que interferiam nos dados medidos do experimento.

7 Conclusão

Nesse experimento, pudemos compreender a transformação da tensão em transformadores formados por bobinas acopladas através do núcleo de ferro e o fenômeno de histerese neste. Foi possível encontrar experimentalmente através do método das figuras de *Lissajous* o valor da indutância dos indutores como sendo (Indutor de 400 espiras) $L_1 = (3.6 \pm 0.1)mH$ e (Indutor de 1600 voltas) $(55.0 \pm 0.9)mH$ que são valores condizentes com os valores nominais dos indutores utilizados de $(3.60 \pm 0.01)mH$ e $(54.36 \pm 0.01)mH$, respectivamente. Pudemos observar o ganho de tensão num transformador na forma $N_p < N_s$, e que isso é proporcional à razão do número de espiras entre as bobinas do transformador de maneira constante. A curva obtida da histerese, pelo osciloscópio no modo XY, do núcleo de ferro teve o formato esperado que mostrava a tendência do material de conservar as suas propriedades magnéticas. O valor encontrado da resistência equivalente do circuito foi de $R_i = (85 \pm 3)\Omega$ foi dentro do esperado que condizia ao valor da soma das resistências do circuito. Dessa forma, o experimento realizado esteve coerente com o esperado pela literatura, e permitiu um estudo acerca do funcionamento de um transformador e da sua característica de histerese.

8 Instrumentos utilizados

Os instrumentos utilizados neste experimento foram,

- Osciloscópio Tektronix 10002B
- Gerador de funções arbitrárias BK Instruments 4052
- Multímetro DT830 Digital

9 Propagação de erros

1. Erro da indutância calculada a partir da eq. (1):

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{4\pi^2 C^2 f_o^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_o}{2\pi^2 C f_o^3}\right)^2}$$

2. Erro do perímetro médio a partir da eq. (13):

$$\Delta l = \sqrt{4\Delta F^2 + 4\Delta G^2}$$

3. Erro da área da seção transversal a partir da eq. (14):

$$\Delta S = \sqrt{B^2\Delta F^2 + F^2\Delta B^2}$$

4. Erro do campo remanente a partir da eq. (11):

$$\Delta B_R^2 = \left(\frac{\Delta R C V_R}{S N_S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C R V_R}{S N_S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_R R C}{S N_S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S N_S R C V_R}{S^2 N_S^2}\right)^2$$

5. Erro da força coercitiva a partir da eq. (12):

$$\left(\frac{\Delta H_c}{H_c}\right)^2 = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_C}{V_C}\right)^2$$

6. Erro da potência dissipada no ciclo a partir da eq. (10):

$$\left(\frac{\Delta P_d}{P_d}\right)^2 = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2$$

7. Erro da tensão V_{rms} a partir da eq. (7):

$$\Delta V_{rms} = \frac{\Delta V_{max}}{\sqrt{2}}$$

8. Erro da corrente i_{rms} a partir da eq. (8):

$$\Delta I_{rms} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{rms}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_1 V_{rms}}{R_1^2}\right)^2}$$

9. Erro da resistência equivalente a partir da eq. (9):

$$\Delta R_{eq} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_d}{i_{rms}^2}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta i_{rms} P_d}{i_{rms}^3}\right)^2}$$

Referências

- [1] Gustavo Wiederhecker e colaboradores, *Roteiros de F429 - Corrente alternada e óptica*. Compilado em 26 de setembro de 2016.
- [2] [Boyce and DiPrima, 2009 Boyce, W. E. and DiPrima, R. C. (2009)]. Elementary differential equations and boundary value problems. Wiley, Hoboken, NJ, 9th ed edition.
- [3] [Yaro Burian Jr. e Ana Cristina Lyra]. Circuitos Elétricos.
- [4] Fundamentos da Física, Volume 3 - 9ª edição.