

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
CIRCUITOS POLIFÁSICOS E MAGNÉTICOS



**Projeto 2**

Curvas BxH e curvas de histerese de transformadores monofásicos

Turma: PL3

Henrique Marques Cruz - 2023059555

Theo Fonseca Cruz - 2023059440

Tiago Braga Rocha Mello - 2023060235

Belo Horizonte

13/10/2025

# Introdução

O transformador monofásico é um dispositivo eletromagnético fundamental nos sistemas de potência, responsável pela transferência de energia elétrica entre dois circuitos através do acoplamento magnético. Seu desempenho depende fortemente das propriedades do núcleo magnético, o que torna essencial a análise das curvas de excitação e de histerese.

A curva de excitação relaciona a tensão e a corrente de magnetização, permitindo caracterizar o comportamento não linear do núcleo e avaliar parâmetros como rendimento e regulação de tensão. Já a curva de histerese descreve a relação entre a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) e a intensidade do campo magnético ( $H$ ), revelando perdas energéticas associadas ao ciclo de magnetização.

Nesta prática, foram realizadas medições experimentais com multímetros e osciloscópio para determinar essas curvas e estudar o comportamento magnético do transformador em regime de excitação, possibilitando a extração de parâmetros físicos e o entendimento das perdas no material do núcleo.

## Objetivos

- Determinar a curva de excitação de um transformador monofásico por meio de medições de grandezas eficazes terminais, utilizando multímetros;
- Determinar a curva de histerese de um transformador monofásico por meio de medições de grandezas terminais, utilizando osciloscópio;
- Estudar as leis que regem o comportamento de circuitos magnéticos.

## Materiais e Equipamentos Utilizados

- 1 transformador monofásico;
- 1 paquímetro;
- 3 multímetros digitais;
- 1 varivolt monofásico;
- 1 osciloscópio;
- 1 resistor ( $R_H = 180 \text{ k}\Omega, 1/4 \text{ W}$ );
- 1 capacitor ( $C = 6,8 \mu\text{F}$ ).

## Parte 1

- Para traçar a curva  $B \times H$  faz-se necessário o conhecimento do projeto do transformador ensaiado, ou seja, deve-se conhecer a geometria do trafo, traduzida nas variáveis área líquida efetiva ( $A_{liq}$ ) e no caminho médio no núcleo ( $\ell_{médio}$ ). Com o auxílio de um paquímetro, realizar a medição das dimensões do físicas do transformador conforme a Figura 1 e preencher a Tabela 1.

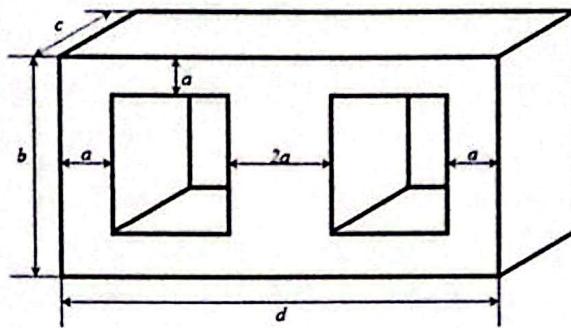


Figura 1: Determinação da geometria do núcleo transformador monofásico.

Tabela 1: Dimensões do transformador monofásico.

Dimensões	Medidas
a (m)	$30, 30 \cdot 10^{-3}$
b (m)	$150, 12 \cdot 10^{-3}$
c (m)	$79, 80 \cdot 10^{-3}$
d (m)	$121, 32 \cdot 10^{-3}$

- A partir dos dados obtidos, e por análise de relutância, o caminho médio ( $\ell_{médio}$ ), área líquida efetiva ( $A_{liq}$ ) e volume do núcleo podem ser calculados.

Sendo que o fator de redução de área líquida ( $k_{red}$ ) em virtude da área do núcleo ser laminada, também chamado de fator de empacotamento ou empilhamento, que depende da espessura da chapa utilizada. Neste caso, considerar:

$$k_{red} = 0,97$$

Preencher então a Tabela 2.

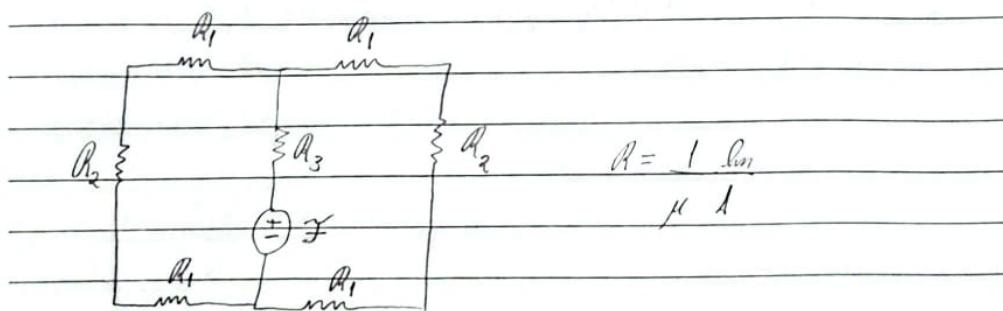
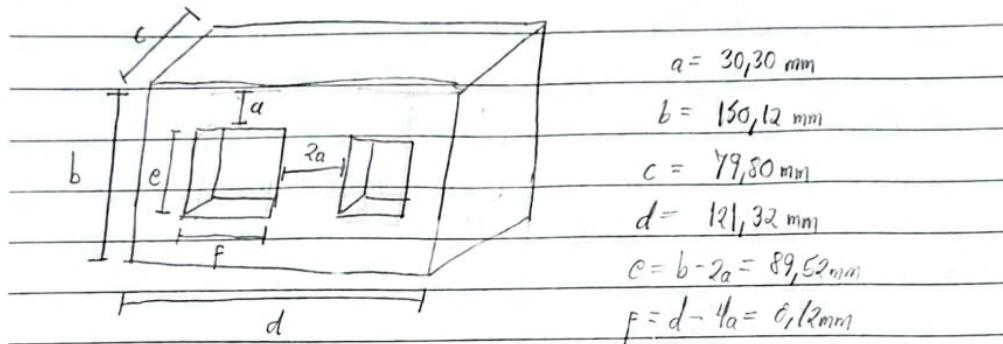
Tabela 2: Dimensões calculadas do trafo monofásico.

Dimensões	$A_{total}$ (m <sup>2</sup> )	$k_{red}$	$A_{liq}$ (m <sup>2</sup> )	$\ell_{médio}$ (m <sup>2</sup> )	$V_{núcleo}$ (m <sup>3</sup> )
Valores	$48,36 \cdot 10^{-4}$	0,97	$46,91 \cdot 10^{-4}$	0,1422	$14,516 \cdot 10^{-4}$



## Laboratório de Polífaísicos - Projeto 2

### Determinação de $A_{liq}$ e $l_{med}$



$$R_1 = \frac{1}{\mu \cdot a \cdot c} \quad R_2 = \frac{1}{\mu \cdot a \cdot c} \quad R_3 = \frac{1}{\mu \cdot 2a \cdot c}$$

$$R_{eq} = \frac{(R_2 + 2R_1)}{2} + R_3 = \frac{1}{\mu} \left( \frac{d+b}{2 \cdot a \cdot c} + \frac{b}{2a \cdot c} \right) = \frac{1}{\mu} \left( \frac{d+2b}{2 \cdot a \cdot c} \right)$$

$$\therefore l_{med} = d + 2b = 0,42156 \text{ m}$$

$$A_{total} = 2 \cdot a \cdot c = 48,3588 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{liq} = A_{total} \cdot k_{red} = 46,9080 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\boxed{\text{tilibra}} \quad V_{núcleo} = b \cdot c \cdot d - 2 \cdot e \cdot f \cdot c = 14,516 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

3. Deve-se também conhecer os números de espiras dos enrolamentos de alta tensão  $N_H$  e de baixa tensão  $N_X$ . A determinação do número de espiras dos enrolamentos pode ser feita através de um enrolamento externo auxiliar  $T$ . Este enrolamento, construído pelos próprios alunos, vai possuir um número conhecido de espiras ( $N_T = 4$ ). Faz-se a aplicação de uma tensão conhecida em um dos enrolamentos ( $V_H = 80V$ ), e a medição das tensões nos outros dois enrolamentos, respectivamente  $V_X$  e  $V_T$ , de acordo com a Figura 2. Pode-se utilizar a equação (1) a seguir, sabendo-se que nestas equações apenas não são conhecidos o número de espiras nos enrolamentos de alta  $N_H$  e de baixa  $N_X$ . Preencher a Tabela 3.

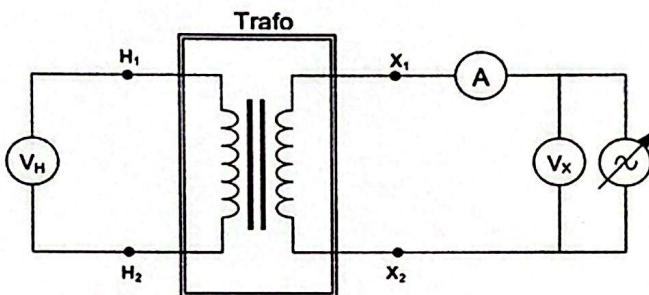


Figura 2: Montagem do experimento.

$$\frac{V_H}{N_H} = \frac{V_X}{N_X} = \frac{V_T}{N_T} = \frac{1}{k_5} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_H = k_5 \cdot V_H \\ N_X = k_5 \cdot V_X \end{cases}$$

Tabela 3: Resultados obtidos na medição de espiras do trafo.

$V_H$ (V)	$V_X$ (V)	$V_T$ (V)	$N_T$	$k_5$	$N_H$	$N_X$
80	100	3,3	4	121	210	121

4. Executar a montagem da Figura 2 (sem o enrolamento externo auxiliar  $T$ ), sendo X o lado de baixa e H o lado de alta. Variar o valor de  $V_X$  em um intervalo de 0,0 a 150,0 V Anotar os pontos  $I_x, V_x$  e  $V_H$  na Tabela 4, lidos respectivamente no amperímetro  $A$  e nos voltímetros  $V_H$  e  $V_X$  de forma a montar a curva de tensão induzida em função da corrente de excitação.

Tabela 4: Valores aferidos para as medições de tensão e corrente nos lados de alta e baixa, densidade e intensidade do campo magnético.

$V_X$ (V)	$V_H$ (V)	$I_X$ (A)	$B_m$ (Wb/m <sup>2</sup> )	$H_m$ (Ae/m)
0				
10,98	19,1	0,04	90652	16,24
20,91	34,4	0,07	0,131	28,41
30,04	53,0	0,09	0,202	36,53
40,39,6	69,0	0,10	0,263	40,59
50,50,4	87,9	0,12	0,335	48,71
60,59,5	103,8	0,14	0,396	56,83
70,69,6	121,4	0,15	0,463	60,88
80,80,4	140,1	0,17	0,534	69,00
90,90,5	157,7	0,20	0,601	81,18
100,99,6	173,7	0,22	0,662	89,30
110,100,5	192,6	0,26	0,734	105,53
120,120,2	209	0,31	0,797	125,83
127,127,1	220	0,36	0,838	146,12
130,130,2	225	0,39	0,858	158,30
140,140,1	242	0,47	0,922	190,77
150,150,2	260	0,58	0,990	235,42

Sabendo-se que a tensão induzida é aproximadamente igual à tensão terminal, tem-se que

$$V_H \approx E = 4,44 \cdot B_m \cdot A_{liq} \cdot f \cdot N_H \rightarrow B_m = \frac{V_H}{4,44 \cdot A_{liq} \cdot f \cdot N_H} = k_1 \cdot V_H \quad (2)$$

$$B_m = \frac{1}{4,44 \cdot A_{liq} \cdot f \cdot N_H} \cdot V_H = \dots \cdot V_H = k_1 \cdot V_H$$

Onde,

$B_m$  é o valor de pico da densidade de campo magnético em  $\frac{Wb}{m^2}$ ;

$V_H$  é a tensão eficaz no enrolamento de alta;

$A_{liq}$  é a área líquida efetiva em  $m^2$ ;

$f$  é a frequência em Hz;

$N_H$  o número de espiras do enrolamento de alta tensão.

A equação (2) mostra que  $B_m$  é diretamente proporcional à tensão  $V_H$ . A intensidade de campo magnético  $H$  é dada pela relação da equação (3).

$$H = \frac{N_x}{l_{\text{médio}}} \cdot I_x \quad (3)$$

Considerando campos e correntes senoidais, tem-se então que

$$H_m = \frac{\sqrt{2} \cdot N_x}{l_{\text{médio}}} \cdot I_x = k_2 \cdot I_x \quad (4)$$

$$H_m = \frac{\sqrt{2} \cdot N_x}{l_{\text{médio}}} \cdot I_x = \dots \cdot I_x = k_2 \cdot I_x$$

Onde,

$H$  é o valor eficaz da intensidade de campo magnético em  $\frac{Ae}{m}$ ;

$H_m$  é o valor de pico da intensidade de campo magnético em  $\frac{Ae}{m}$ ;

$N_x$  é o número de espiras do enrolamento de baixa tensão;

$I_x$  é a corrente eficaz do enrolamento de baixa em  $A$ ;

$l_{med}$  é o caminho médio do núcleo do transformador em  $m$ .

A equação (4) mostra que  $H_m$  é diretamente proporcional à corrente  $I_x$ .

5. Apresentar memória de cálculo de  $k_1$  e  $k_2$ .

$k_1$	$k_2$
$3,811 \cdot 10^3 \text{T/V}$	$4,059 \cdot 10^2 \text{m}^{-1}$

6. Traçar as curvas  $V_H \times I_x$  e  $B_m \times H_m$ .



Cálculo de  $\mu_1$  e  $\mu_2$

$$\mu_1 = \frac{f}{4,44 \cdot A_{11q} \cdot f \cdot N_H} = \frac{f}{4,44 \cdot 46,91 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 210} = 3,811 \cdot 10^{-3} \text{ T/V}$$

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot N_x}{l_{\text{med}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 121}{0,48156} = 4,059 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1}$$

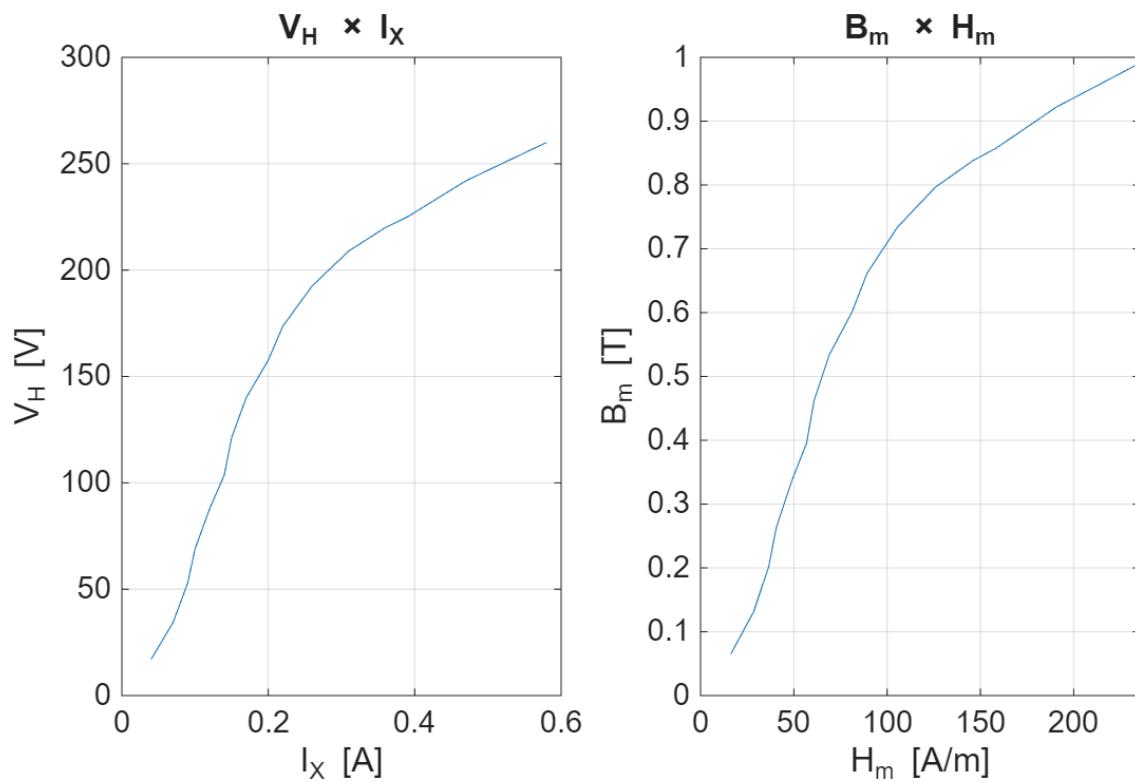


Figura 1: Curvas  $V \times I$  e  $B \times H$

Comparando com a curva de vários materiais, o núcleo usado deve ser provavelmente de aço silicioso. O valor de saturação em torno de 1 T (até 1,2 T) é característico desse material.

Além do formato da curva, de maneira mais analítica, foi possível determinar o valor da permeabilidade relativa  $\mu_r$  por meio de uma aproximação linear na região antes da mudança de inclinação do gráfico  $B_m \times H_m$ , utilizando o software SciDAVis. O coeficiente angular obtido foi 0,00864477, o que fornece:

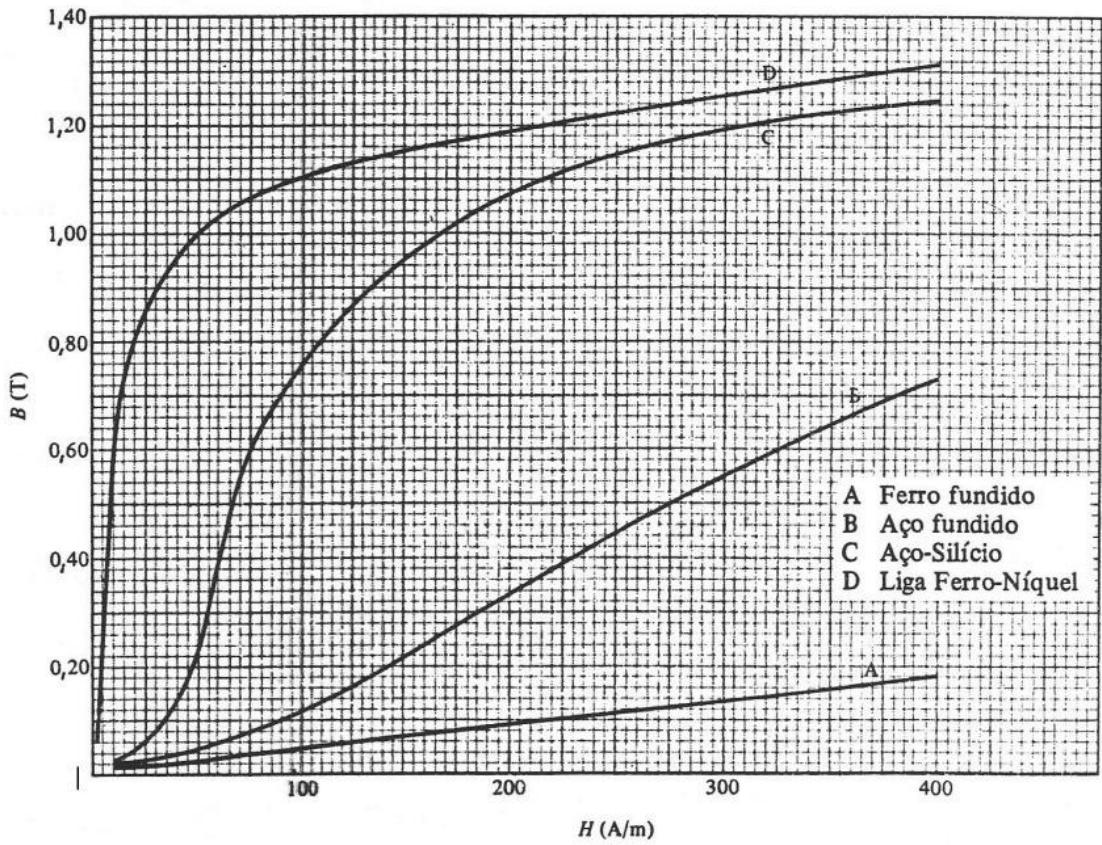


Figura 2: Curvas  $B \times H$  de vários materiais

$$\mu_r = \frac{0,00864477}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 6,88 \times 10^3.$$

Esse valor é compatível com a faixa típica de permeabilidade relativa do aço-silício.

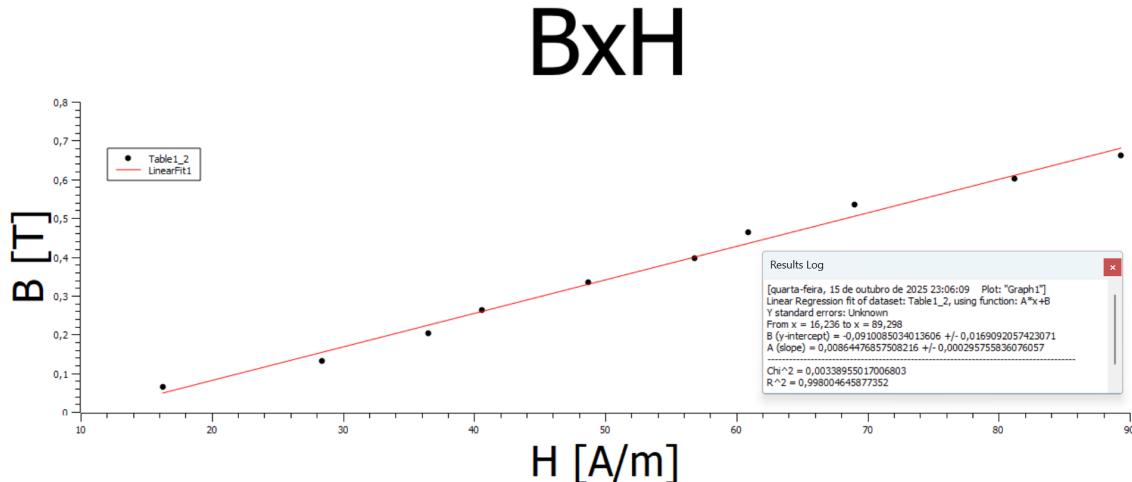


Figura 3: Determinação de  $\mu_r$  por aproximação linear na região pré-saturação.

# Análise de resultados e conclusão

A partir das medições realizadas, foi possível traçar a curva de excitação do transformador monofásico, evidenciando o comportamento não linear característico do núcleo magnético. Observou-se que, para valores baixos de tensão aplicada, a corrente de magnetização cresce de forma aproximadamente linear, indicando operação na região de baixa densidade de fluxo. À medida que o campo magnético aumenta, a densidade de fluxo magnético cresce de forma menos acentuada (permeabilidade magnética menor), demonstrando a saturação do material do núcleo.

Essa não linearidade confirma a presença de histerese e de perdas magnéticas inerentes ao material. Assim, os resultados obtidos estão coerentes com o comportamento esperado para transformadores reais, validando o procedimento experimental e o modelo teórico do circuito magnético.

## Parte 2

### Gráficos de histerese para $V_x = 80 \text{ V}$ e $V_x = 130 \text{ V}$

A partir dos pontos obtidos pelo osciloscópio, foram geradas no MATLAB as curvas de histerese e calculadas as respectivas áreas, tanto para  $V_x = 80 \text{ V}$  quanto para  $V_x = 130 \text{ V}$ .

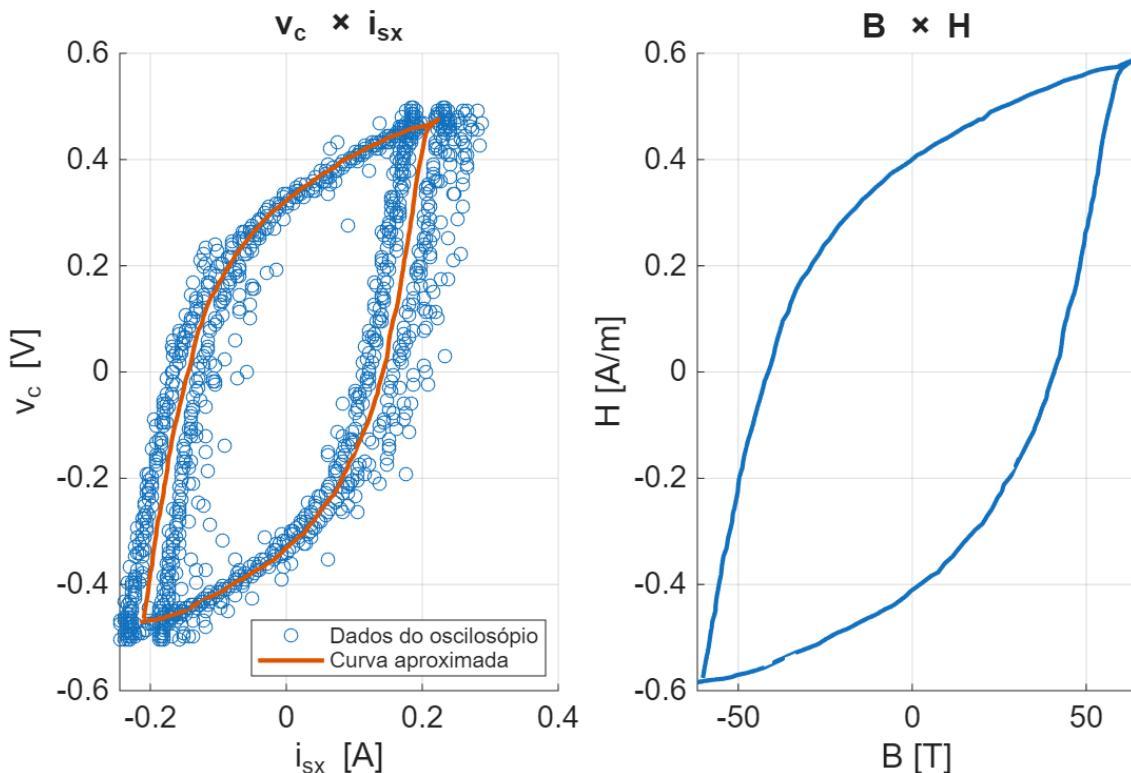


Figura 4: Curvas  $v(t) \times i(t)$  e  $B(t) \times H(t)$  para  $V_x = 80 \text{ V}$ .

As áreas das curvas de histerese obtidas foram:

- Para  $V_x = 80 \text{ V}$ :  $A = 72,81 \text{ J/m}^3$
- Para  $V_x = 130 \text{ V}$ :  $A = 147,33 \text{ J/m}^3$

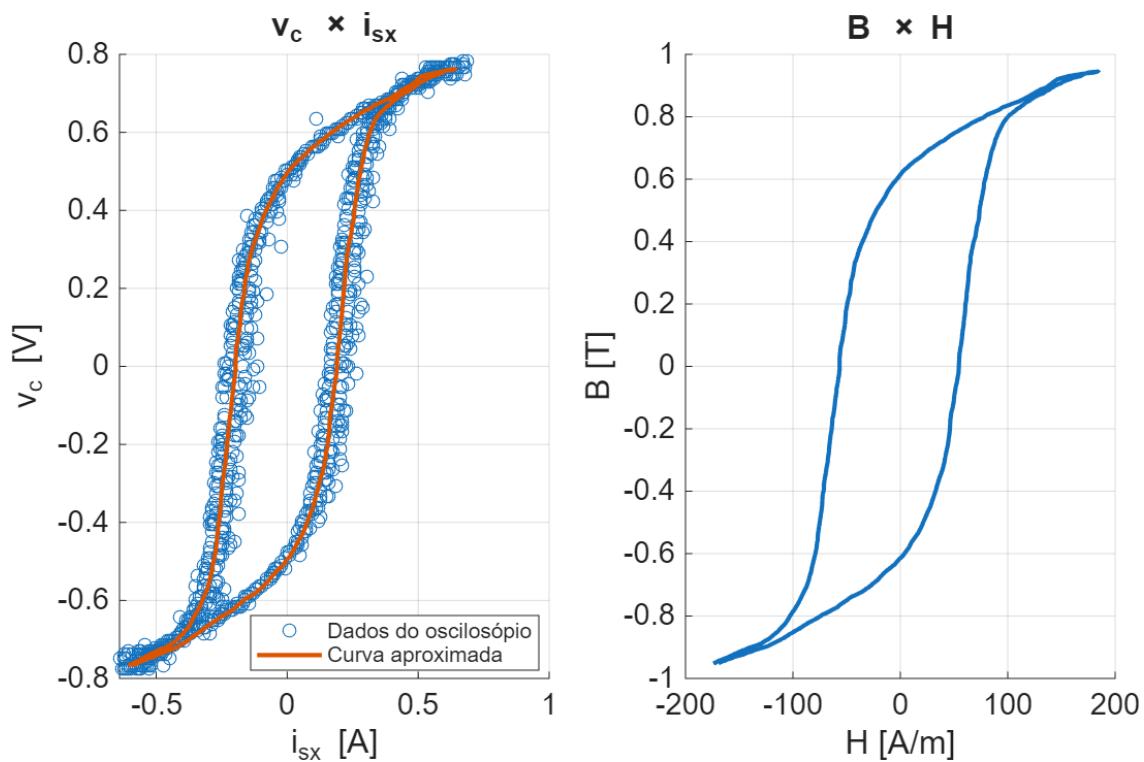


Figura 5: Curvas  $v(t) \times i(t)$  e  $B(t) \times H(t)$  para  $V_x = 130$  V.

## Perdas por histerese

A potência de histerese é dada por

$$P_h = V_{\text{núcleo}} \cdot A_{B \times H} \cdot f,$$

onde  $V_{\text{núcleo}}$  é o volume do núcleo,  $A_{B \times H}$  é a área do ciclo de histerese (energia por unidade de volume, em  $\text{J/m}^3$ ) e  $f$  é a frequência.

Tomando  $V_{\text{núcleo}} = 14,516 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 1,4516 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  e  $f = 60 \text{ Hz}$ , e, usando as áreas obtidas, tem-se:

$$\begin{aligned} & \bullet V_x = 80 \text{ V} \\ P_h &= V_d \cdot A_f = 14,516 \cdot 10^{-4} \cdot 72,81 \cdot 60 \approx 6,34 \text{ W} \\ & \bullet V_x = 130 \text{ V} \\ P_h &= V_d \cdot A_f = 14,516 \cdot 10^{-4} \cdot 147,33 \cdot 60 \approx 12,83 \text{ W} \end{aligned}$$

CS Digitalizado com CamScanner

Figura 6: Memória de cálculo das potências de histerese para  $V_x = 80$  V e  $V_x = 127$  V.

Portanto, as potências de histerese estimadas são aproximadamente 6,34 W para 80 V e 12,83 W para 127 V.

## Parte 2

- Para se observar as curvas de histerese do transformador monofásico utiliza-se um osciloscópio com uma sonda de tensão e uma sonda de efeito Hall, conforme montagem da Figura 4. A sonda de tensão utilizada no laboratório possui escala de 10mV/A.

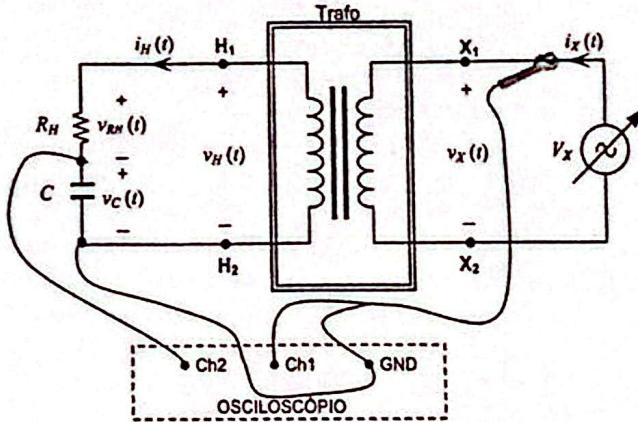


Figura 4: Montagem para determinação da curva  $B \times H$  de um trafo monofásico utilizando o osciloscópio.

As perdas totais no núcleo  $P_n$  são compostas pelas perdas por histerese  $P_h$  e pelas perdas devido às correntes parasitas de Foucault  $P_f$ . Desta forma,

$$P_n = P_h + P_f \quad (5)$$

A perda de potência durante um ciclo completo de histerese será,

$$P_h = (Vol_{núcleo}) \cdot (\text{Área da curva } B \times H) \cdot f \quad (6)$$

O valor instantâneo da intensidade de campo magnético desenvolvida no núcleo do transformador pode ser calculada por:

$$H(t) = \frac{N_x}{\ell_{\text{médio}}} \cdot i_x(t) \quad (7)$$

Mas a tensão na sonda de efeito Hall no lado de baixa é tal que

$$v_{sx}(t) = f_{sx} \cdot i_x(t) \quad (8)$$

Onde  $f_{sx}(t)$  é um fator de escala associado à sonda de efeito Hall.

Substituindo (8) em (7), tem-se

$$H(t) = \frac{N_x}{\ell_{\text{médio}}} \cdot \frac{v_{sx}(t)}{f_{sx}} = k_3 \cdot v_{sx}(t) \quad (9)$$

Ou seja, a intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à tensão na sonda de efeito Hall.

$$H(t) = \frac{N_x}{\ell_{\text{médio}}} \cdot \frac{1}{f_{sx}} \cdot v_{sx}(t) = \text{_____} \cdot \text{_____} \cdot v_{sx}(t) = k_3 \cdot v_{sx}(t)$$

No enrolamento de alta ( $H_1 - H_2$ ) tem-se que a tensão terminal é aproximadamente igual à tensão induzida. Assim,

$$v_H(t) \approx -\frac{d\lambda(t)}{dt} = -N_H \frac{d\phi(t)}{dt} = -N_H \cdot A_{liq} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (10)$$

Por outro lado, a tensão  $v_H$  é tal que

$$v_H(t) = v_{R_H}(t) + v_C(t) = R_H \cdot i_H(t) + \frac{1}{C} \int i_H(t) \cdot dt \quad (11)$$

Na hipótese de  $R_H \gg X_C$ , para uma certa frequência de operação  $\omega$ , a tensão  $v_H(t)$  será praticamente a tensão no resistor  $R_H$ . Assim,

$$v_H(t) \approx v_{R_H}(t) + v_C(t) = R_H \cdot i_H(t) \rightarrow i_H(t) = \frac{v_H(t)}{R_H} \quad (12)$$

Substituindo a relação para a corrente  $i_H(t)$  presente na equação (12) na expressão para a tensão no capacitor  $v_C(t)$ , resulta em

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int i_H(t) \cdot dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_H(t)}{R_H} \cdot dt = \frac{1}{R_H \cdot C} \int v_H(t) \cdot dt \quad (13)$$

Substituindo (10) em (13) resulta em

$$v_C(t) = \frac{1}{R_H \cdot C} \int \left( -N_H \cdot A_{liq} \frac{dB(t)}{dt} \right) dt = -\frac{N_H \cdot A_{liq}}{R_H \cdot C} \int \frac{dB(t)}{dt} dt = -\frac{N_H \cdot A_{liq}}{R_H \cdot C} \cdot B(t) \quad (14)$$

Ou seja,

$$B(t) = \frac{R_H \cdot C}{N_H \cdot A_{liq}} \cdot v_C(t) = k_4 \cdot v_C(t) \quad (15)$$

A equação (15) mostra que a densidade de campo magnético  $B$  é diretamente proporcional à tensão no capacitor  $C$ .

$$B(t) = \frac{R_H \cdot C}{N_H \cdot A_{liq}} \cdot v_C(t) = \text{_____} \cdot v_C(t) = k_4 \cdot v_C(t)$$

2. Com o auxílio do osciloscópio, obtenha os gráficos de histerese para  $V_x = 80V$  e  $V_x = 130V$  e calcule as perdas por histerese para esses dois casos.

3. Apresentar memória de cálculo de  $k_3$  e  $k_4$ . E apresentar as perdas na tabela a seguir.

$k_3$	$k_4$	$V_x = 130V$		
		$P_h$	$P_n$	$P_f$
$2,87 \cdot 10^2 S^{-1}$	$1,24 T/V$	$12,83 W$	$26 W$	$13 W$

#### Observação:

1. Ao realizar os cálculos da Parte 1 observar com cuidado as unidades.
2. Levar pendrive para salvar as curvas do osciloscópio.

Calculo de  $k_3$  e  $k_4$

$$\bullet k_3 = \frac{N_x \cdot 1}{l_{\text{núcleo}} f_{\text{fix}}} = \frac{121}{0,42156} \approx 289 \cdot 10^3 \text{ S/m}$$

$$\bullet k_4 = \frac{B_{\text{H}} C}{N_x A_{\text{núcleo}}} = \frac{180 \cdot 10^3 \cdot 6,8 \cdot 10^6}{210 \cdot 46,908 \cdot 10^{-4}} \approx 1,24 \text{ T/V}$$

Perdas por Corrente da bobina

$$P_f = P_n - P_h = 26 - 12,83 \approx 13 \text{ W}$$

Figura 7: Memória de cálculo dos coeficientes  $k_3$  e  $k_4$ .

#### Observações:

1.  $f_{sx} = 1 \text{ V/A}$ , pois ajustamos a atenuação na ponta do osciloscópio para obter um ganho de 100, compensando os 10 mV/A originais.
2.  $P_n$  foi obtido do Projeto 1, determinado pela perda no teste a vazio,  $P_n = 26 \text{ W}$ .

## Parte 2 – Análise de Resultados e Conclusão

Os ciclos de histerese obtidos para  $V_x = 80 \text{ V}$  e  $V_x = 130 \text{ V}$  apresentaram áreas de  $72,81 \text{ J/m}^3$  e  $147,33 \text{ J/m}^3$ , respectivamente. O aumento da área com a tensão indica maior densidade de fluxo e aproximação do núcleo à saturação magnética, resultando em perdas mais elevadas por histerese. As potências correspondentes ( $6,34 \text{ W}$  e  $12,83 \text{ W}$ ) confirmam essa tendência.

Conclui-se que o aumento da tensão de excitação amplia a área do laço  $B \times H$ , elevando as perdas magnéticas no núcleo. O experimento mostrou-se adequado para verificar a coerência com o previsto teoricamente.

## Parte 3

Em vista da dificuldade de se mensurar a área da curva B–H, devido à sua característica não linear, a equação (1) aproxima as perdas por histerese por meio de  $B_{\text{max}}$ , que é o máximo valor da densidade de fluxo,  $n$ , que varia entre 1,5 e 2,5, e  $K_h$ , que é a constante de Steinmetz, dependente das propriedades do material ferromagnético.  $n$  e  $K_h$  devem ser determinados empiricamente.  $f$  é a frequência de variação da corrente, em Hz.

$$P_h = K_h \cdot B_{\text{max}}^n \cdot f \quad (1)$$

(a) Para o material do transformador, definido anteriormente, o valor de  $n$  pode ser considerado igual a 1,6. Baseado no valor de  $P_h$  encontrado, determine o valor de  $K_h$ .

Pelo MATLAB, obtivemos:

$$V_x = 80 \text{ V} : B_{\max} = 0,5906 \text{ T}$$

$$V_x = 127 \text{ V} : B_{\max} = 0,9456 \text{ T}$$

Assim, por meio da equação (1):

$$\bullet V_x = 80 \text{ V}$$

$$P_h = K_h B_{\max}^n \Rightarrow K_h = \frac{6,34}{0,5906^{1,6} \cdot 60} \approx 0,245$$

$$\bullet V_x = 127 \text{ V}$$

$$P_h = K_h B_{\max}^n \Rightarrow K_h = \frac{12,83}{0,9456^{1,6} \cdot 60} \approx 0,234$$

$$\therefore \bar{K}_h \approx \frac{0,245 + 0,234}{2} \approx 0,240$$

CS Digitalizado com CamScanner

Figura 8: Determinação experimental da constante de Steinmetz ( $K_h$ ).

Como esperado, os valores obtidos para a constante de Steinmetz foram próximos para  $V_x = 80$  V e  $V_x = 127$  V. A média dos dois valores é  $K_h \approx 0,240$ .

(b) Utilizando a equação (1) e os valores empíricos obtidos no item anterior, 3(a), determinou-se a perda por histerese do transformador quando alimentado por uma tensão eficaz de 80 V.

Para efeito de avaliação da proximidade entre o valor de  $P_h$  obtido experimentalmente e o calculado, é mais conveniente utilizar o valor de  $K_h$  determinado apenas pela tensão de 127 V, ou seja,  $K_h = 0,234$ .

Assim, considerando esse valor:

$$\bullet V_x = 80V$$

$$P_h = K_h B_{\max}^n f \approx 0,234 \cdot 0,5906^{1.6} \cdot 60 \approx 6,05W$$

 Digitalizado com CamScanner

Figura 9: Cálculo de  $P_h$  para  $V = 80$  via  $K_h$ .

**(c) Verifique se o valor encontrado no exercício anterior, 3(b), é próximo ao valor encontrado ao se calcular a área dentro da curva de histerese quando o transformador é alimentado por 80V.**

O valor obtido por meio da equação de Steinmetz foi comparado com o obtido pela área da curva  $B \times H$ , determinada a partir dos dados do osciloscópio. A Tabela 1 apresenta a comparação e o erro relativo.

Valor pela Área (W)	Valor pela Fórmula (W)	Erro Relativo (%)
6,34	6,05	4,63

Tabela 1: Comparação entre valores obtidos pela área da curva e pela fórmula para  $V = 80V$ .

## Análise de resultados e Conclusão

Os resultados obtidos mostram que o valor calculado de  $P_h$  por meio da equação de Steinmetz está em boa concordância com aquele obtido experimentalmente pela área da curva de histerese. Pequenas discrepâncias podem ser atribuídas a incertezas de medição, dispersão dos dados e variações locais na densidade de fluxo.

Assim, o modelo de Steinmetz se mostrou adequado para a estimativa das perdas por histerese no material ferromagnético analisado.

**Repositório do projeto com os códigos:**

<https://github.com/TheoFCruz/lab-poli-projeto2.git>