

Resumo

Nesta atividade experimental, é utilizado um transformador monofásico de forma a estudar as suas propriedades magnéticas e a sua representação equivalente pelo modelo de Steinmetz. Inicialmente, é determinado o número de espiras nos enrolamentos primário ($n_p = 619 \pm 1$) e secundário ($n_s = 55 \pm 1$), recorrendo a um enrolamento auxiliar. Tendo obtido os valores característicos da curva de histerese, procede-se à determinação dos parâmetros do modelo de Steinmetz, tendo os resultados correspondido, em grande parte, ao esperado. Por fim, com o transformador a funcionar em carga, é analisada a transformação de tensões, correntes e impedâncias do aparelho, tendo sido obtido um rendimento $\eta_{exp} = 74.6\%$.

1 Introdução [1–4]

1.1 Transformador

Um transformador é um dispositivo elétrico que converte níveis de tensão entre dois circuitos através de acoplamento magnético, permitindo dispor de um valor de tensão apropriado para a carga a alimentar. Este dispositivo é constituído por dois enrolamentos - primário (p) e secundário (s) - acoplados através de um meio de alta permeabilidade magnética, como o ferro. Ao aplicar uma tensão alternada a um dos enrolamentos, um fluxo magnético variável é induzido no meio, gerando assim uma força eletromotriz. Num transformador ideal, o fluxo magnético está confinado ao interior do núcleo (ou seja, não há dispersão), sendo a resistência dos enrolamentos e as perdas no ferro desprezáveis. No modelo ideal, há acoplamento perfeito entre as bobinas (sendo a permeabilidade magnética infinita), o que implica que a potência elétrica disponível na bobina secundária é igual à potência fornecida à primária. Tendo isto em conta, a Lei de Faraday leva às relações entre tensões, correntes e impedâncias apresentadas (respetivamente) em (1).

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)_{ideal} = \left(\frac{I_s}{I_p}\right)_{ideal} = \frac{N_p}{N_s}, \quad \left(\frac{Z_p}{Z_s}\right)_{ideal} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \quad (1)$$

1.2 Curva característica B(H)

Os materiais ferromagnéticos reagem de forma única à magnetização dentro e fora de um campo magnético, \vec{H} . Ao aumentar a intensidade do campo, um número crescente de domínios magnéticos alinha-se com \vec{H} , até atingir um ponto de saturação, em que todos os domínios magnéticos estão alinhados. A magnitude do campo de indução \vec{B} nesse ponto é denominada indução magnética de saturação, B_s . Se o campo magnético for reduzido lentamente, o processo mencionado não é revertido. Alguns dos domínios permanecem alinhados à medida que o campo magnético se aproxima de zero; a indução magnética remanescente B_r corresponde ao valor de \vec{B} quando o campo magnético se anula. O campo de indução é nulo quando o valor do campo magnético é \vec{H}_c , chamado campo magnético coercivo. Invertendo a polaridade de \vec{H} , é possível obter uma curva semelhante, mas com um campo de saturação simétrico. A curva resultante $B \equiv B(H)$ é designada curva de histerese do material.

1.3 Modelo de Steinmetz

Tal como todas as outras máquinas elétricas, o transformador realiza a conversão de energia com perdas. Na prática, um transformador apresenta algumas características diferentes das previstas pelo modelo ideal. As linhas de força circulam na sua grande maioria pelo núcleo magnético, fechando-se pelos dois enrolamentos - este fluxo designa-se por fluxo principal. Parte das linhas de força fecham-se apenas pelo enrolamento do

primário e circulam pelo ar - é o fluxo de dispersão do primário. O mesmo se passa em relação ao secundário, originando o fluxo de dispersão do secundário. Representando a dispersão com coeficientes de indução equivalentes, pode proceder-se à redução do secundário ao primário, equivalente a substituir o enrolamento secundário por um enrolamento com o número de espiras igual ao do primário, dando origem ao circuito equivalente da Fig. 1. Em vez de se reduzir as grandezas do secundário ao primário, poder-se-ia fazer a operação inversa, isto é, reduzir o primário ao secundário, num processo análogo.

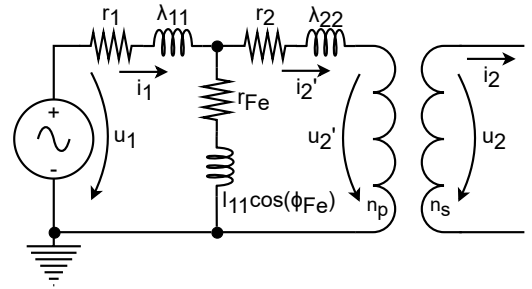


Figura 1: Modelo de Steinmetz e respetivos parâmetros.

As resistências r_1 e r_2 (comummente indicada em literatura como r'_2) representam as perdas de Joule ou no cobre. O ramo de magnetização com r_{Fe} e $l_{11} \cos \phi_{Fe}$ representa a magnetização e as perdas no núcleo. As reactâncias de dispersão λ_{11} e λ'_{22} (aqui designado λ_{22}) representam os fluxos de dispersão ou de fugas.

Neste caso, as transformações de tensões, correntes e impedâncias são dadas pelas equações (2)-(4), onde $Z_{1/2} = r_{1/2} + j\omega\lambda_{11/22}$ e $Z_{Fe} = r_{Fe} + j\omega l_{11} \cos \phi_{Fe}$.

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)_S = \frac{N_p}{N_s} \left| 1 + \frac{Z_1}{Z_{Fe}} + \frac{1}{R_L} \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \left[(Z_1 + Z_2) + \frac{Z_1 Z_2}{Z_{Fe}} \right] \right| \quad (2)$$

$$\left(\frac{I_s}{I_p}\right)_S = \frac{N_p}{N_s} \frac{1}{\left| 1 + \frac{1}{Z_{Fe}} \left(Z_2 + R_L \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \right) \right|} \quad (3)$$

$$\left(\frac{Z_p}{Z_s}\right)_S = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \left| \frac{1 + \frac{Z_1}{Z_{Fe}} + \frac{1}{R_L} \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \left[Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_{Fe}} \right]}{1 + \frac{1}{Z_{Fe}} \left(Z_2 + R_L \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \right)} \right| \quad (4)$$

2 Trabalho experimental

2.1 Número de espiras do primário e do secundário do transformador

De modo a obter o número de espiras no primário e no secundário, começou-se por efetuar a montagem representada na Fig. 2. Conhecendo-se o número de espiras no enrolamento adicional A, $n_a = 3$, foram aplicados 10 valores de tensão eficaz V_p no primário, compreendidos entre 4 V e 40 V (em saltos de aproximadamente 4 V). Para cada caso, registaram-se os valores V_p , V_s (tensão no secundário) e V_a .

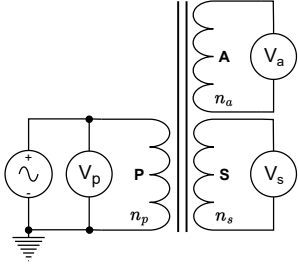


Figura 2: Circuito usado para determinação do número de espiras do primário (n_p) e do secundário (n_s).

Utilizando a primeira relação em (5), uma regressão linear foi aplicada com os valores V_p e V_a , de forma a determinar n_p . Do mesmo modo, uma regressão linear foi aplicada com V_s e V_a , tendo-se determinado n_s . As respectivas representações gráficas são apresentadas na Fig. 3.

$$\frac{V_p}{V_a} = \frac{n_p}{n_a} \Leftrightarrow V_p = \frac{n_p}{n_a} V_a, \quad \frac{V_s}{V_a} = \frac{n_s}{n_a} \Leftrightarrow V_s = \frac{n_s}{n_a} V_a \quad (5)$$

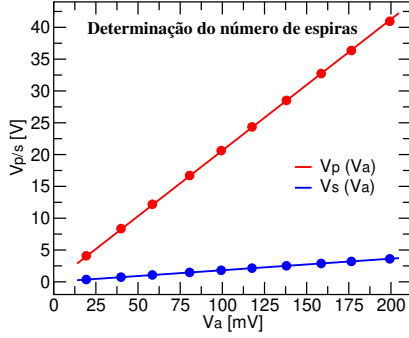


Figura 3: Valores da tensão no primário e no secundário em função da tensão no enrolamento adicional.

Recorrendo ao método dos mínimos quadrados utilizado na plataforma de ajustes gráficos *Fititeia*, foram obtidos os resultados apresentados na Tab. 1. Tendo-se admitindo um modelo ideal para o transformador, no qual a tensão no secundário é proporcional à tensão do primário, sendo a constante de proporcionalidade dada pela razão entre o número de espiras dos dois enrolamentos, estas razões de transformação são apenas valores aproximados.

n_a	n_p/n_a	n_p	n_s/n_a	n_s
3	206.36 ± 0.06	619 ± 1	18.182 ± 0.005	55 ± 1

Tabela 1: Determinação do número de espiras no primário (n_p) e no secundário (n_s).

2.2 Propriedades magnéticas do material do núcleo do transformador

Para determinar as propriedades magnéticas do núcleo do transformador, começou-se por efetuar a montagem da Fig. 4. O valor da resistência R_1 foi determinado com um multímetro, tendo as dimensões do núcleo sido determinadas com uma régua graduada. Estas dimensões correspondem à área da secção do núcleo do transformador (S) e ao comprimento médio de uma linha de força de \vec{H} no núcleo do transformador (δ), estando estes resultados presentes na Tab. 2.

Parâmetro	$R_1[\Omega]$	$\delta[cm]$	$S[cm^2]$
Valor	10.3 ± 0.1	23.1 ± 0.6	13.68 ± 1.48

Tabela 2: Parâmetros usados para calcular B_r , B_s e H_c .

Para além deste parâmetros, um osciloscópio de dois canais (Y_1 e Y_2 , representados na Fig. 4) foi utilizado para determinar a queda de tensão V_2 na resistência R_1 e a tensão V_1 aos terminais do condensador. Inicialmente, colocou-se o osciloscópio no modo X-Y e variou-se a tensão do gerador, de modo a obter a curva de histerese correspondente ao ciclo de magnetização do núcleo.

Desta forma, registaram-se as tensões $V_1|_{H=0}$, $V_1|_{max}$ e $V_2|_{B=0}$. Estes valores foram consequentemente utilizados para determinar os parâmetros discutidos na Sec. 1.2, com as equações (6) e (7). Estes resultados encontram-se registados na Tab. 3.

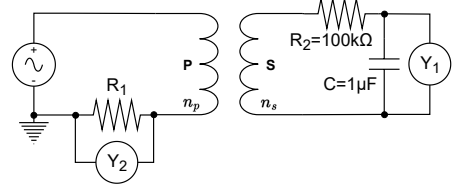


Figura 4: Circuito usado na determinação da característica magnética do núcleo do transformador.

$$B_r = \frac{R_2 C}{n_s S} V_1 \Big|_{H=0}, \quad B_s = \frac{R_2 C}{n_s S} V_1 \Big|_{max} \quad (6)$$

$$H_c = \frac{n_p}{R_1 \delta} V_2 \Big|_{B=0} \quad (7)$$

$B_r[T]$	$B_s[T]$	$H_c[A/m]$
0.68 ± 0.09	1.4 ± 0.2	57.2 ± 2.4

Tabela 3: Determinação dos valores de B_r , B_s e H_c .

Estes resultados corroboram a hipótese do núcleo ser constituído por um material macio, ou seja, com baixa coercividade - sendo estes materiais comumente usados em circuitos magnéticos de fluxo variável, contrariamente a materiais magneticamente duros, que possuem elevada coercividade e são utilizados como ímãs permanentes. Aliás, as ligas de ferro e silício, que são condutoras e constituem materiais macios, possuem campos magnéticos coercivos próximos de $H_c = 40 A/m$ [1], um valor bastante semelhante ao indicado na Tab. 3; por outro lado, possuem induções magnéticas de saturação entre $B_s = 1.4 T$ e $B_s = 1.8 T$ [1], intervalo no qual o resultado experimental se inclui. As perdas de energia que ocorrem em transformadores são, em parte, devidas à histerese. Desta forma, neste caso, o baixo valor de B_r obtido experimentalmente será benéfico por estar associado a menores perdas com campo magnético nulo.

2.3 Modelo de Steinmetz

2.3.1 Transformador com secundário em vazio

Inicialmente, foi utilizada a montagem indicada na Fig. 5, tendo-se aplicado uma tensão ao primário de 220 V, registada com o canal 1 do osciloscópio. Tendo o canal 2 do osciloscópio a registar a tensão aos terminais da resistência, facilmente se determinou I_{1ef} que atravessa esta resistência, correspondendo ao valor efetivo da corrente no primário. Adicionalmente, o osciloscópio também indica o valor médio do produto das tensões nos seus canais. Por sua vez, a tensão efetiva no primário (U_{1ef}) é obtida facilmente através destes dois valores de tensão, enquanto que a tensão U_{2ef} no secundário é determinada com o canal 1 do osciloscópio colocado noutra posição no circuito. Recorrendo às equações (8) e (9), determinam-se os valores de potência, estando todos estes resultados incluídos na Tab. 4.

$$P_{10} = \langle u_1 i_1 \rangle = \frac{\langle V(Y_{1a}) V(Y_2) \rangle - V(Y_2)_{ef}^2}{R} \quad (8)$$

$$P_{12} = \langle u_2 i_1 \rangle = \frac{\langle V(Y_{1b}) V(Y_2) \rangle}{R} \quad (9)$$

$U_{1ef}[V]$	$I_{1ef}[A]$	$U_{2ef}[V]$
219.58 ± 0.01	0.094 ± 0.001	19.14 ± 0.01

$P_{10}[W]$	$P_{12}[W]$
5.080 ± 0.003	0.410 ± 0.001

Tabela 4: Parâmetros iniciais com o secundário em vazio.

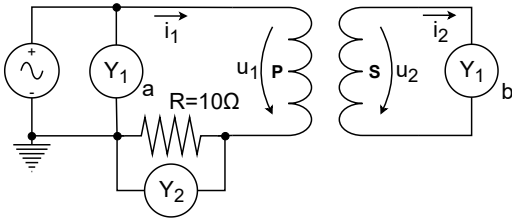


Figura 5: Circuito usado na recolha de valores necessários à determinação dos parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz com o secundário em vazio.

Por sua vez, tendo em conta estes parâmetros, as equações (10)-(12) foram utilizadas para obter os resultados da Tab. 5, tendo sido seleccionada na fonte uma frequência de 50 Hz.

$$r_{Fe} = \frac{n_p}{n_s} \cdot \frac{P_{12}}{I_{1ef}^2}, \quad r_1 + r_{Fe} = \frac{P_{10}}{I_{1ef}^2} \quad (10)$$

$$\omega \cdot l_{11} = \frac{U_{2ef}}{I_{1ef}} \cdot \frac{n_p}{n_s}, \quad \sin(\phi_{Fe}) = \frac{r_{Fe}}{\omega \cdot l_{11}} \quad (11)$$

$$\lambda_{11} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_{1ef}}{I_{1ef}}\right)^2 - (r_1 + r_{Fe})^2 - l_{11} \cos(\phi_{Fe})} \quad (12)$$

$r_1[\Omega]$	$r_{Fe}[\Omega]$	$l_{11} \cos(\phi_{Fe})[H]$	$\lambda_{11}[H]$
53 ± 36	524 ± 23	7.1 ± 0.4	0.10 ± 0.68

Tabela 5: Determinação de parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz com tensão aplicada no primário.

2.3.2 Transformador com primário em vazio

De forma a determinar a resistência e indutância do modelo de Steinmetz relativos ao enrolamento secundário, a montagem indicada na Fig. 6 foi utilizada. De forma análoga ao caso anterior, são registados os valores das tensões com o osciloscópio, tendo-se determinado as potências com as equações (13) e (14). Desta forma, obtiveram-se os resultados da Tab. 6.

$$P_{20} = \langle u_2 i_2 \rangle = \frac{\langle V(Y_{1a})V(Y_2) \rangle - V(Y_2)_{ef}^2}{R} \quad (13)$$

$$P_{21} = \langle u_1 i_2 \rangle = \frac{\langle V(Y_{1b})V(Y_2) \rangle}{R} \quad (14)$$

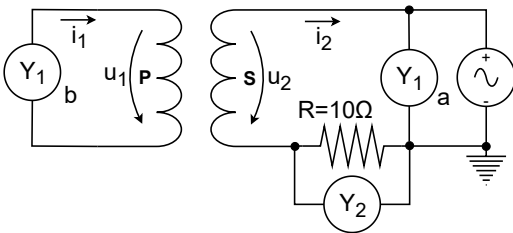


Figura 6: Circuito usado na recolha de valores necessários à determinação dos parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz com o primário em vazio.

$U_{2ef}[V]$	$I_{2ef}[A]$	$U_{1ef}[V]$
20.66 ± 0.02	1.148 ± 0.002	232.64 ± 0.01

$P_{20}[W]$	$P_{21}[W]$
5.69 ± 0.02	60.654 ± 0.001

Tabela 6: Parâmetros iniciais com tensão aplicada no secundário.

Por fim, utilizaram-se as relações em (15)-(17) para obter os resultados apresentados na Tab. 7.

$$r_{Fe} = \frac{n_p}{n_s} \cdot \frac{P_{21}}{I_{2ef}^2}, \quad r_2 + r_{Fe} = \left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2 \frac{P_{20}}{I_{2ef}^2} \quad (15)$$

$$\omega \cdot l_{11} = \frac{U_{1ef}}{I_{2ef}} \cdot \frac{n_p}{n_s}, \quad \sin(\phi_{Fe}) = \frac{r_{Fe}}{\omega \cdot l_{11}} \quad (16)$$

$$\lambda_{22} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_{2ef}}{I_{2ef}}\right)^2 - \left(\frac{n_p}{n_s}\right)^4 - (r_2 + r_{Fe})^2 - l_{11} \cos(\phi_{Fe})} \quad (17)$$

$r_2[\Omega]$	$r_{Fe}[\Omega]$	$l_{11} \cos(\phi_{Fe})[H]$	$\lambda_{22}[H]$
29 ± 38	518 ± 12	7.1 ± 0.3	0.02 ± 0.09

Tabela 7: Determinação de parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz com tensão aplicada no secundário.

Como desejado, obtiveram-se valores bastante semelhantes nas duas montagens para r_{Fe} e $l_{11} \cos(\phi_{Fe})$, parâmetros do ramo de magnetização, comum a ambas as malhas do modelo de Steinmetz. Estes valores representam a magnetização e as perdas no núcleo, pelo que se pode afirmar que os estados de magnetização obtidos nos dois ensaios são semelhantes, como pretendido. Por outro lado, verifica-se que r_1 é cerca de o dobro de r_2 , o que indica perdas de Joule - relativas a quedas de tensão em fase com a corrente - superiores no primário. Também se verifica que $\lambda_{11} > \lambda_{22}$, sendo que estas reatâncias representam fluxos de dispersão ou de fugas, introduzindo quedas de tensão agora em quadratura com a corrente. Tendo-se determinado que $n_p/n_s \approx 11$ na Sec. 2.1, estas relações eram esperadas, visto que no secundário a tensão é reduzida face ao primário, sendo a corrente bastante superior no secundário, devido às transformações inerentes a um transformador, aliás verificadas nos resultados das Tabs. 4 e 6. Estas relações também são aparentes na relação $P_{21} \gg P_{12}$ verificada experimentalmente. O rendimento unitário de um transformador ideal é corroborado pelo facto de P_{10} e P_{20} apresentarem valores semelhantes.

2.3.3 Secundário em curto-circuito

O ensaio em curto-circuito é feito a tensão reduzida, isto é, a tensão muito inferior à tensão nominal do enrolamento (230 V, indicada no próprio aparelho). O secundário é colocado em curto-circuito e é aplicada uma tensão ao primário de modo a atingir-se um valor de I_{1ef} igual à corrente nominal. Sabendo também que a potência nominal vale 200 W e $I_{nom} = P_{nom}/V_{nom}$, estabeleceram-se os valores indicados na Tab. 8, próximos dos desejados. Também é apresentado o valor de P_{10} , dado por uma expressão análoga a (8), com $V(Y_{1a}) \equiv V(Y_1)$. Neste procedimento, foi utilizada a montagem representada na Fig. 7.

$I_{nom}[A]$	$I_{1ef}[A]$	$U_{1ef}[V]$	$P_{10}[W]$
0.87	0.97 ± 0.01	25.04 ± 0.01	23.90 ± 0.03

Tabela 8: Parâmetros iniciais com o secundário em curto-circuito.

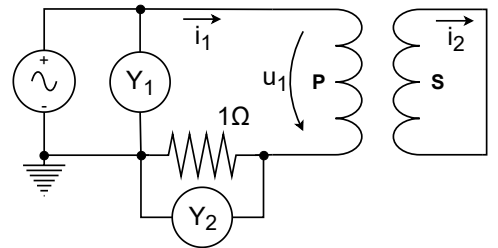


Figura 7: Circuito usado nas medições a efetuar com o secundário em curto-circuito.

Quando o primário for percorrido pela sua corrente nominal, também o secundário é percorrido por um valor de corrente próximo da sua correspondente corrente nominal - determinada pela razão de transformação do transformador. Como a impedância de magnetização é muito superior à impedância do ramo horizontal, e como neste ensaio estas duas impedâncias estão em paralelo, basta considerar a impedância do ramo horizontal, levando assim às equações em (18), a partir das quais se obtiveram os resultados na Tab. 9.

$$r_1 + r_2 = \frac{P_{10}}{I_{1ef}^2}, \quad \lambda_{11} + \lambda_{22} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_{1ef}}{I_{1ef}}\right)^2 - (r_1 + r_2)^2} \quad (18)$$

Curto-circuito		Vazio	
$r_1 + r_2 [\Omega]$	$\lambda_{11} + \lambda_{22} [H]$	$r_1 + r_2 [\Omega]$	$\lambda_{11} + \lambda_{22} [H]$
25.3 ± 0.6	0.016 ± 0.015	81 ± 73	0.12 ± 0.63

Tabela 9: Parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz com o secundário em curto-circuito e com o primário ou secundário em vazio.

Embora os resultados obtidos neste ensaio não sejam totalmente esperados tendo em conta os valores das resistências e reatâncias previamente registados nas Tabs. 5 e 7, é importante realçar os erros consideráveis inerentes aos resultados anteriores. No geral, tratam-se de grandezas com valores consideravelmente baixos, por isso difíceis de obter com grande precisão com os aparelhos utilizados. Aliás, as medições em vazio levaram a um intervalo de erro que inclui valores negativos para estes parâmetros. Mesmo assim, existe sobreposição entre os intervalos dos parâmetros determinados pelos dois métodos, fornecendo assim algum nível de confiança no procedimento realizado.

2.4 Transformador a funcionar em carga

Na última parte da atividade experimental, montou-se o circuito da Fig. 8 para analisar o funcionamento do transformador com uma carga R_2 . O rendimento do transformador depende do valor desta carga, tendo-se selecionado $R_2 = 4.1 \Omega$ no potenciômetro, um valor superior a $R_{2min} = (2.6 \pm 0.1) \Omega$ dado por (19), garantindo que o transformador não excede a potência nominal para a qual está dimensionado ($P_{nom} = 200 \text{ W}$) - tendo-se aplicado ao primário uma tensão eficaz de 220 V.

$$R_{2min} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{V_{1nom}^2}{0.8P_{nom}} \quad (19)$$

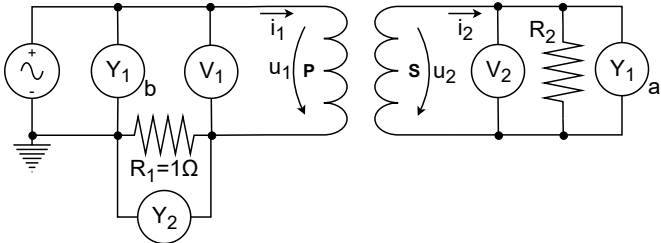


Figura 8: Circuito usado nas medições a efetuar com o transformador em carga.

De forma análoga a procedimentos anteriores, foram então determinados os valores na Tab. 10. As tensões medidas no osciloscópio foram sendo comparadas com as medidas dos voltímetros respetivos, não tendo sido observadas diferenças significativas.

$U_{1ef} [V]$	$I_{1ef} [A]$	$U_{2ef} [V]$	$P_{10} [W]$
221.08 ± 0.01	0.49 ± 0.01	18.22 ± 0.01	103.46 ± 0.02

Tabela 10: Resultados obtidos com recurso ao osciloscópio.

Por sua vez, tendo em conta estes valores e os parâmetros do modelo de Steinmetz calculados nas Secs. 2.3.1 e 2.3.2 - com médias para os parâmetros do ramo comum -, foram utilizadas as equações descritas na Sec. 1 para comparar as relações de transformação de tensões, correntes e impedâncias entre o funcionamento com carga, modelo de transformador ideal e modelo de Steinmetz. Estes resultados estão dispostos na Tab. 11, assim como a variação percentual dos resultados experimentais (em carga) com os resultados esperados tendo em conta os dois modelos. Tendo isto em conta, nota-se uma maior semelhança face aos valores do transformador ideal. Por um lado, poderá tratar-se

de um aspeto positivo, pois indica que haverá menos perdas no transformador utilizado no laboratório, face às previstas pelo modelo de Steinmetz. Por outro lado, o próprio modelo simplifica o funcionamento do aparelho em certos aspetos, e a determinação experimental dos seus parâmetros esteve ligeiramente comprometida devido aos baixos valores dos parâmetros do ramo horizontal, como mencionado anteriormente.

	V_p/V_s	I_s/I_p	Z_p/Z_s
Carga	12.1	9.1	109.9
Ideal	11.2 (8%)	11.2 (-20%)	126.7 (-13%)
Steinmetz	14.2 (-15%)	5.5 (65%)	78.0 (41%)

Tabela 11: Comparação das relações de transformação de tensões, correntes e impedâncias para as três situações consideradas.

Por fim, tendo em conta as tensões do primário e secundário medidas com a montagem da Fig. 8, obtém-se um rendimento de $\eta_{exp} = 74.6\%$, inferior em 25.4% face ao rendimento ideal, $\eta_{teo} = 100\%$. Embora se tenha obtido um rácio V_p/V_s superior no laboratório, o rácio I_s/I_p sofreu uma diminuição mais significativa face ao modelo ideal, o que justifica em parte o menor rendimento.

3 Conclusão

Com a realização deste trabalho experimental, começou-se por recorrer a um método engenhoso de determinar o número desconhecido de espiras num transformador, utilizado o enrolamento auxiliar com $n_a = 3$ espiras. Tendo sido observadas as relações lineares esperadas pelo modelo de transformador ideal, obtiveram-se os valores $n_p = 619 \pm 1$ e $n_s = 55 \pm 1$, essenciais a todos os restantes cálculos efetuados ao longo do procedimento. Posteriormente, com o osciloscópio em modo X-Y, observou-se a curva de histerese típica de materiais ferromagnéticos, tendo-se concluído que o núcleo é constituído por um material macio, devido ao baixo valor de H_c . Posteriormente, foram utilizadas várias montagens para obter os parâmetros do modelo de Steinmetz. Com o secundário em vazio, determinaram-se r_1 e λ_{11} , e com o primário em vazio foram obtidos r_2 e λ_{22} . Em ambos os casos, obtiveram-se também os parâmetros do ramo comum, os quais eram bastante próximos, como esperado. Por fim, com o secundário em curto-circuito, foram determinadas as somas das impedâncias do ramo horizontal do modelo, tendo-se concluído que resultados comprometedores foram obtidos no procedimento anterior, devido à medição de valores de baixas ordens de grandeza. Finalmente, colocando uma carga no secundário, foram determinadas as relações de transformação de tensão, corrente e impedância, tendo os resultados sido próximos dos obtidos pelo modelo ideal. Sendo o ponto de rendimento máximo num transformador obtido quando as perdas no cobre são iguais às perdas no ferro, para um dado valor de carga, poder-se-á inferir que o rendimento experimental $\eta = 74.6\%$ indica que se selecionou uma carga inferior à necessária para alcançar o máximo da curva de rendimento. Por outro lado, existem sempre perdas em transformadores reais, não previstas pelo modelo ideal.

Referências

- [1] José Luís Maia Figueirinhas (DF). *Transformador monofásico*. Complementos de Eletrónica (Instituto Superior Técnico). 2023.
- [2] José Luís Maia Figueirinhas (DF). *Determinação das propriedades magnéticas do núcleo do transformador monofásico. Determinação das características elétricas do transformador monofásico e análise do seu funcionamento em carga*. Complementos de Eletrónica (Instituto Superior Técnico) - protocolos experimentais. 2023.
- [3] M.J. Resende. *Transformador*. Sistemas Eléctricos e Electromecânicos (Instituto Superior Técnico). 2020.
- [4] M.J. Resende Gil Marques. *Circuitos Eléctricos*. Sistemas Eléctricos e Electromecânicos (Área Científica de Energia, Instituto Superior Técnico). 2013/2014.