

ENE 111881

Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia

*Laboratório 2: ensaios em circuito aberto e
em curto-circuito de transformador monofásico*



1. Objetivos

São objetivos deste ensaio:

- Realizar ensaios em circuito aberto e em curto circuito de um transformador;
- Obter os parâmetros do circuito equivalente do transformador;
- Calcular o rendimento e a regulação do transformador.

2. Revisão de conceitos básicos

O transformador (TR) é um equipamento que recebe energia elétrica com uma tensão e uma corrente e fornece essa energia, a menos das perdas, em outra tensão e outra corrente. A frequência elétrica se mantém inalterada. A estrutura do TR é constituída por chapas de aço, isoladas por uma resina, justapostas e pressionadas. Envolvendo a estrutura de aço se encontram os enrolamentos do primário e do secundário, conforme representado na Figura 1. O enrolamento do primário tem N_1 espiras e o do secundário N_2 espiras. O primário é ligado à rede elétrica.

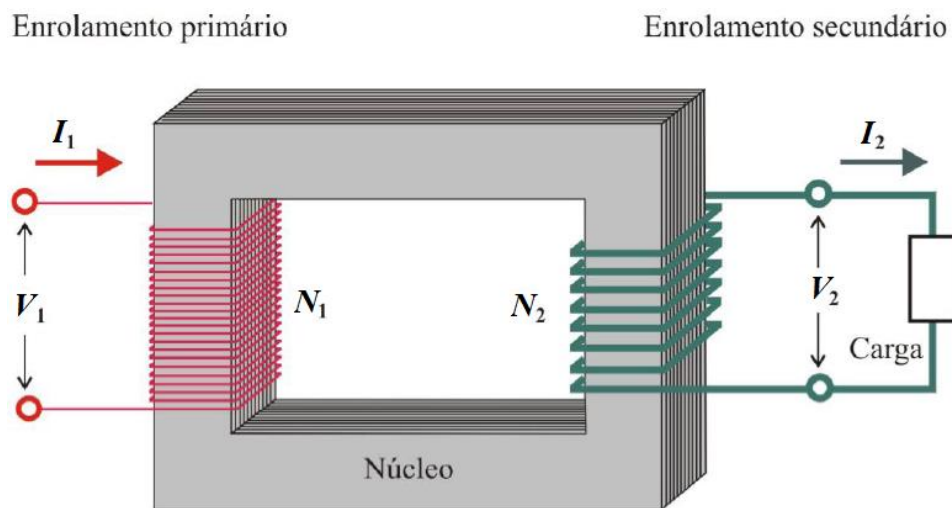
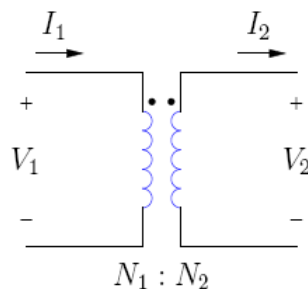


Figura 1. Representação de um transformador monofásico

Transformador monofásico ideal

Circuito equivalente



Relação de tensões

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

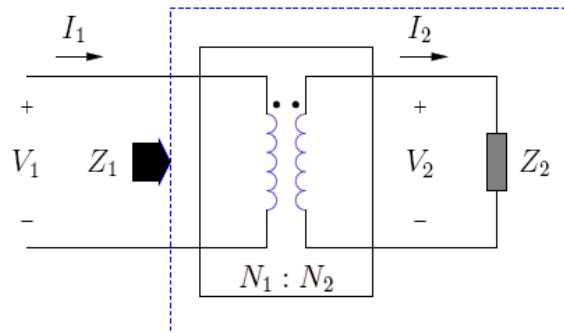
Relação de correntes

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = 0 \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

Relação de potências

$$S_1 = V_1 I_1 = S_2 = V_2 I_2$$

No transformador ideal não há perdas. A potência de entrada é igual à potência de saída.

Relação de impedâncias (reflexão)

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{n V_2}{I_2 / n} = n^2 \frac{V_2}{I_2} = n^2 Z_2$$

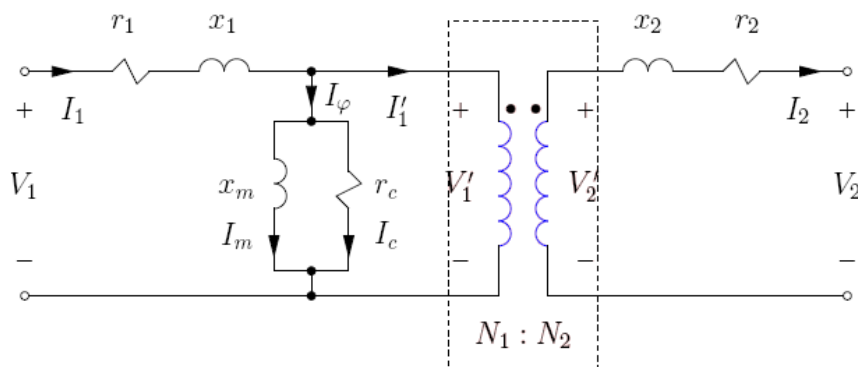
Transformador monofásico real

Perdas ôhmicas. Resistências dos enrolamentos do primário e do secundário (r_1, r_2);

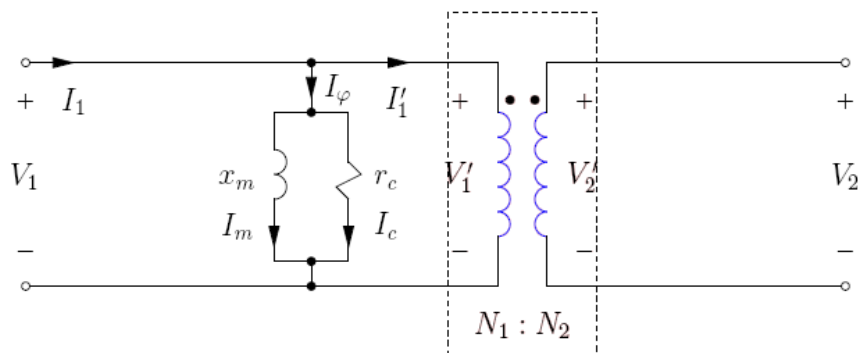
Perdas magnéticas por dispersão de fluxo magnético: reatâncias lineares (x_1, x_2);

Perdas no núcleo. Perdas por Foulcaut e histerese representadas pela resistência (r_c) e a magnetização do núcleo aproximada por reatância linear (aproximada pela componente de 1ª harmônica da corrente de magnetização em quadratura com o fluxo) x_m ;

Circuito equivalente:



Em vazio $I_2 = 0$, logo $I_1' = 0$. A impedância do ramo de magnetização ($r_c + x_m$) é muito maior que a impedância série equivalente e pode-se desprezar os parâmetros série. Circuito equivalente:



Corrente no primário em vazio (da ordem de 5% da corrente nominal do transformador):

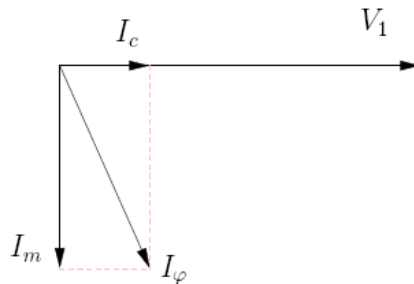
$$I_1(t) = I_c(t) + I_m(t)$$

Tensão no secundário em vazio: $V_2 = \frac{V_1}{n}$

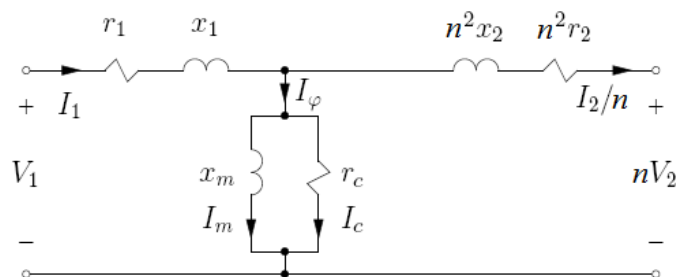
Devido à não linearidade da curva $B \times H$ do núcleo (ciclo de histerese e eventualmente saturação), A corrente de excitação não é senoidal e a análise de Fourier mostra que a corrente de magnetização possui uma componente fundamental em fase com o fluxo e harmônicas de ordem ímpar (3ª, 5ª, ...). Como a I_φ é pequena, considera-se somente a componente de primeira harmônica:

$$I_1 = I_\varphi$$

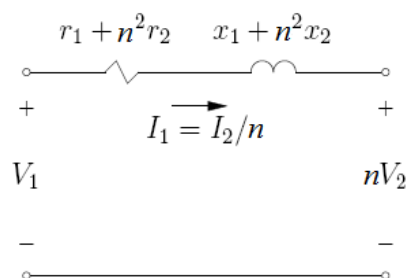
Diagrama fasorial:



Para $I_2 \neq 0$, todos os parâmetros do circuito equivalente são considerados. Podemos eliminar do circuito equivalente o transformador ideal, refletindo as impedâncias do secundário para o primário, utilizando as relações de transformação de tensão e corrente:



Como $I_\varphi \ll I_1$, pode-se desprezar o ramo de magnetização:



Em geral, para transformadores de potência (centenas de kVA), despreza-se as perdas ôhmicas. A partir de ensaios é possível determinar os parâmetros do modelo do transformador nas condições de regime permanente. Com o lado de baixa tensão em curto-circuito, impõe-se uma tensão menor do que a nominal no lado de alta tensão de modo a se ter corrente nominal no curto-circuito, medindo-se a tensão, as correntes e a potência consumida. Com o terminal do lado de alta tensão em vazio impõe-se tensão nominal no lado de baixa tensão e mede-se as tensões, a corrente e a potência consumida.

Resolva as questões a seguir para melhor compreender o ensaio a ser realizado.

- a) Um transformador de distribuição monofásico de 20kVA, 8000V/480V, tem os valores de resistências e reatâncias conforme a Figura 2. Calcule os valores resultantes dos ensaios em circuito aberto e em curto-circuito.

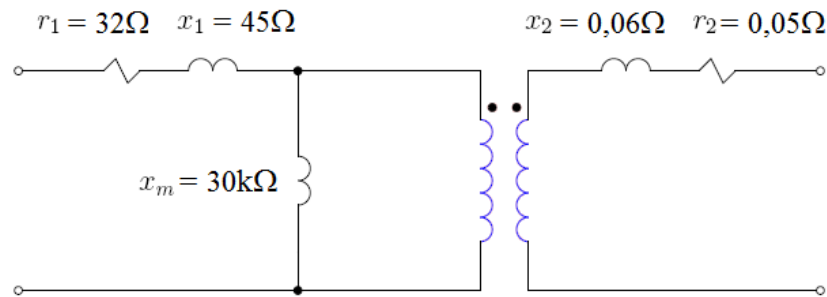


Figura 2. Circuito equivalente de um transformador monofásico

- i) Ensaio de circuito aberto:

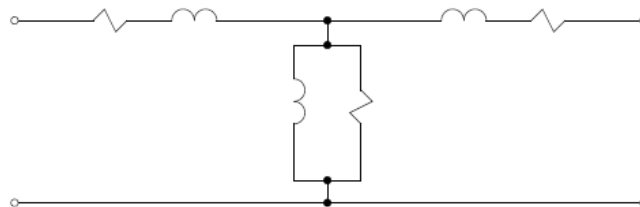
V_{BT} : _____ V V_{AT} : _____ V I_{BT} : _____ A Potência ativa: _____ W

- ii) Ensaio em curto circuito:

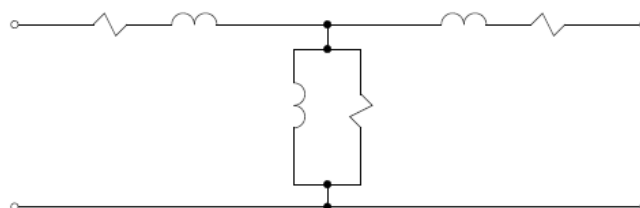
V_{AT} : _____ V I_{AT} : _____ A I_{BT} : _____ A Potência ativa: _____ W

- b) Desenhe os circuitos equivalentes deste transformador referindo-se aos lados da alta tensão, baixa tensão e em p.u. Escolha como base do sistema p.u. os valores nominais do transformador.

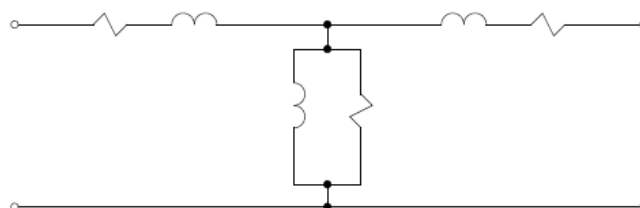
Circuito equivalente para o lado de AT



Circuito equivalente para o lado de BT



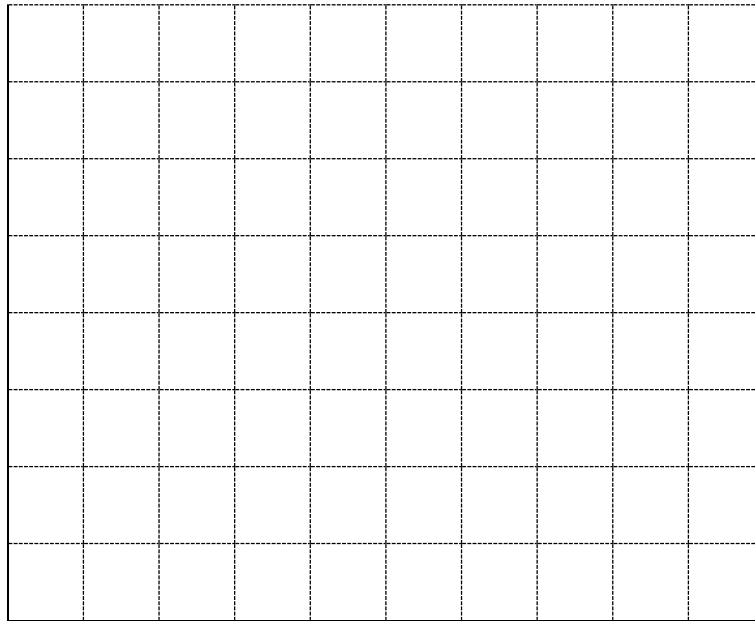
Circuito equivalente em p.u.



- c) Para o transformador da questão (a), calcule o rendimento (η) e a sua regulação para cargas iguais a: 1) $R=100\Omega$; 2) $R=50\Omega$; 3) $R=10\Omega$.

d) Plote o gráfico Regulação(%) \times Carga(%) para as três cargas utilizadas na questão (c)

Obs: $\text{Carga(\%)} = S_{\text{SAÍDA}} / S_{\text{NOMINAL}}$



3. Introdução para o Laboratório 2

Wattímetro digital

Nos wattímetros digitais, um circuito eletrônico calcula, por amostragem, a tensão e a corrente eficazes e, através delas, a potência ativa. Na Figura 3 é ilustrado um wattímetro digital e seu esquema de ligação para medida de potência ativa de uma carga. O wattímetro digital apresenta uma melhor precisão nas leituras de pequenos valores de potência quando comparados aos wattímetros analógicos.

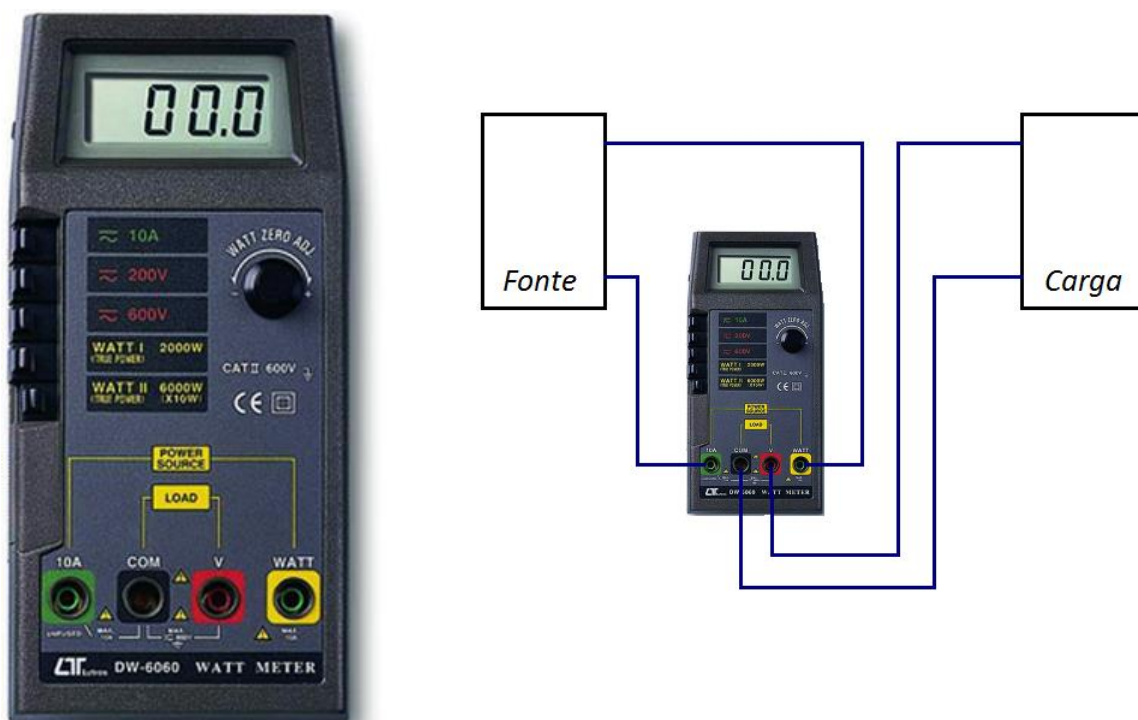


Figura 3. Wattímetro digital e seu esquema de ligação.

4. Atividades experimentais

Equipamentos utilizados

Transformador de 24VA 110V/12V, fontes da bancada, wattímetro digital, voltmímetro, amperímetros, conectores, reostato de 450Ω, que suporte até 2A.

Inspeção do Transformador

Preencha a Tabela 1 utilizando os dados nominais do transformador.

Tabela 1 – Dados nominais do transformador

	Lado de BT	Lado de AT
Tensão (V)		
Corrente (A)		
Potência (VA)		

Qual a relação de espiras? $n =$ _____

Identificação dos terminais

Identificar os terminais de alta e baixa tensão através das medições das resistências dos enrolamentos e da verificação das tensões. Atenção para não ultrapassar os valores nominais das tensões. Qual o lado que tem menor valor para a resistência do enrolamento: alta ou baixa? Justifique. _____

	Lado de BT	Lado de AT
Tensão (V)		
Resistência (Ω)		

Calcule a relação de transformação. $RT =$ _____

Ensaio 1: Circuito aberto

O esquema das ligações está representado na Figura 4.

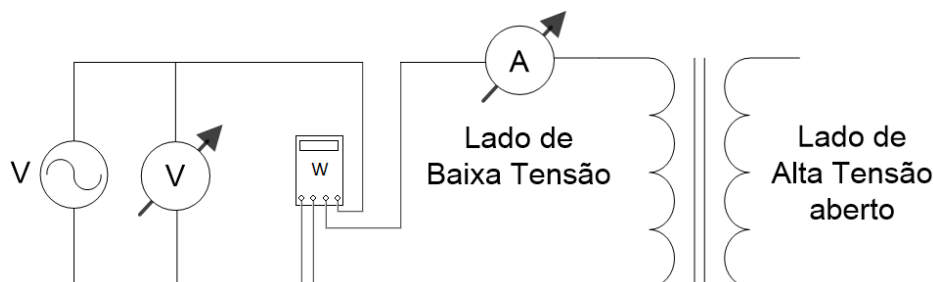


Figura 4. Esquema de ligação para o ensaio em circuito aberto

O Ensaio deverá ser realizado aplicando **tensão nominal** (12V) no terminal de baixa tensão (BT). Por quê? _____

Ensaio 2: Curto-circuito

O esquema das ligações está representado na Figura 5.

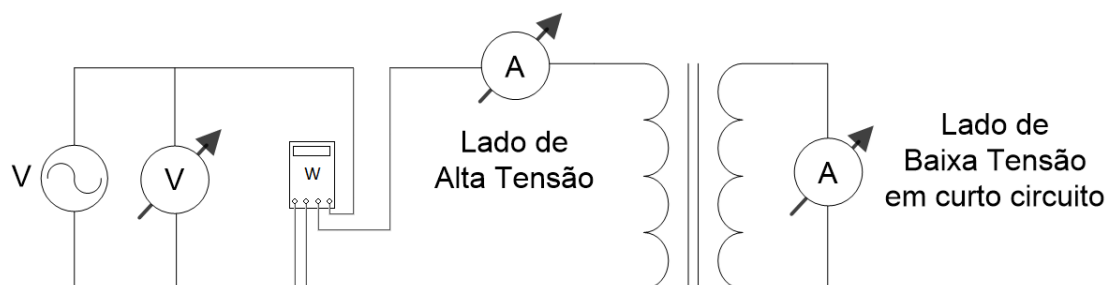


Figura 5. Esquema de ligação para o ensaio em curto circuito

O ensaio deverá ser realizado aplicando **corrente nominal** no lado de alta tensão (AT). Por quê? _____

Consolidação dos resultados

Preencha a Tabela 2, com os dados obtidos nos ensaios em circuito aberto e em curto-circuito.

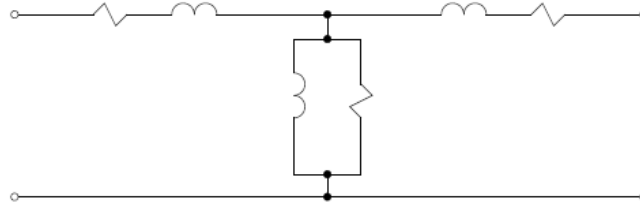
Tabela 2 – Valores medidos durante os ensaios no transformador

	Ensaio em circuito aberto (lado de BT)	Ensaio em curto circuito (lado de AT)
Tensão (V)		
Corrente (A)		
Potência ativa (W)		

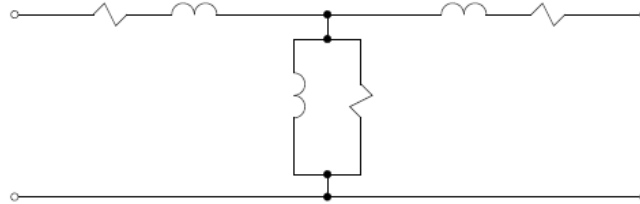
5. Modelagem

Com os dados obtidos, determine os parâmetros e desenhe os circuitos equivalentes deste transformador, referindo-se aos lados da alta tensão, baixa tensão e em p.u. Escolha como base do sistema p.u. os valores nominais do transformador.

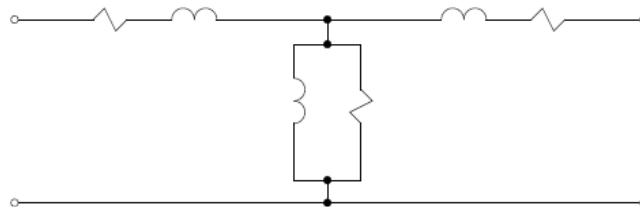
Circuito equivalente para o lado de AT



Circuito equivalente para o lado de BT



Circuito equivalente em p.u.



Por que as perdas no cobre podem ser desprezadas no ensaio em circuito aberto? _____

Por que as perdas no núcleo podem ser desprezadas no ensaio em curto circuito? _____

6. Cálculo da regulação e rendimento do transformador

A regulação da tensão de um transformador é definida como a variação na tensão do secundário sem carga (vazio) até a carga total e é normalmente expressa como uma percentagem do valor da carga total. Em aplicações de sistemas de potência, a regulação é uma figura de mérito para um transformador. Um valor baixo indica que as variações de carga no secundário do transformador, não afetarão significativamente a amplitude da voltagem a ser fornecida para a carga. A regulação é calculada com base no pressuposto de que a tensão primária se mantém constante à medida que a carga varia no secundário do transformador.

$$Reg_{\%} = \frac{V_{\text{vazio}} - V_{\text{carga}}}{V_{\text{carga}}} \times 100\%$$

O rendimento (ou eficiência) do transformador é definido como

$$\eta_{\%} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} = 1 - \frac{P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\%$$

Monte o circuito de acordo com a Figura 6.

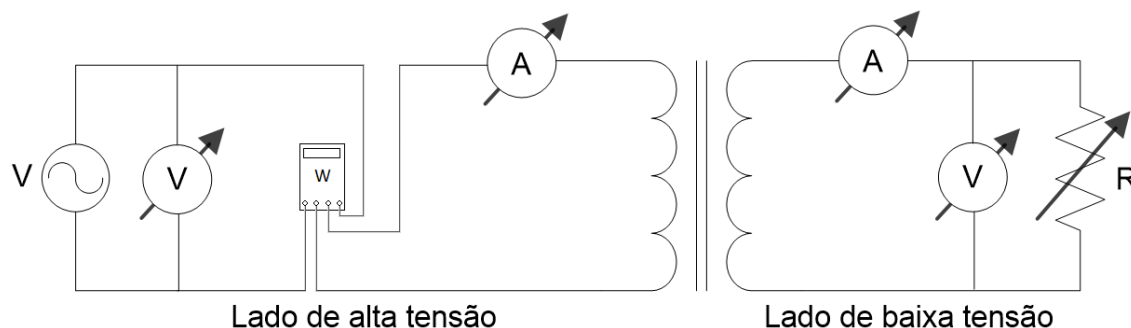


Figura 6 – Transformador monofásico com carga variável no secundário.

Aplique 110V no lado de AT, com o circuito do secundário do transformador em aberto (carga desconectada). Verifique o valor da tensão a vazio no lado de BT. Conecte o reostato após ajustá-lo para o seu valor máximo. Varie a carga até atingir a potência nominal do transformador (corrente e tensão nominal do secundário). Anote na Tabela 3 os resultados das medições para 10 valores de carga.

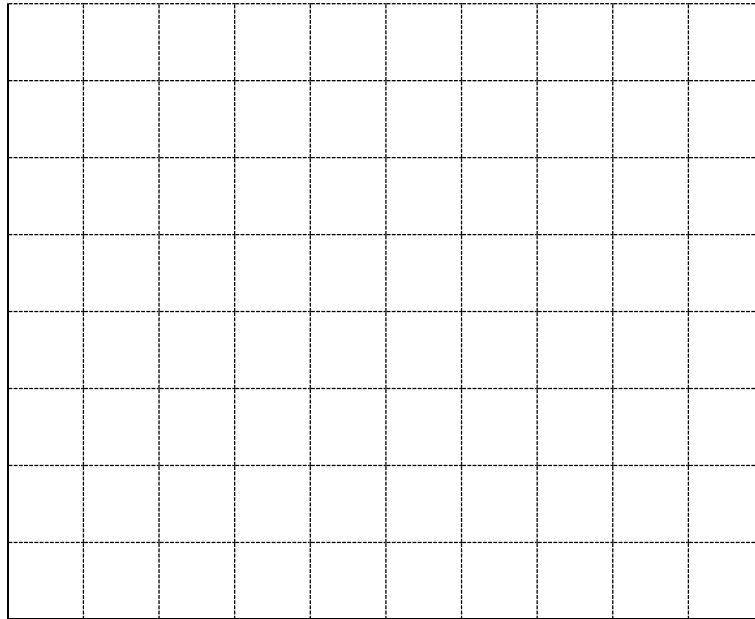
Tabela 3 – Medidas dos ensaios de regulação e rendimento.

Baixa Tensão				Alta Tensão		Valores calculados	
Porcentagem da corrente	Corrente	Tensão	Potência na carga	Corrente	Potência de entrada	η	Reg
100 %							
90 %							
80 %							
70%							
60 %							
50 %							
40 %							
30 %							
20 %							
10 %							
0 %							

Calcule os valores teóricos da tabela 3 (η , Reg), utilizando o circuito equivalente.

Curvas de regulação e rendimento

Trace os gráficos de regulação de tensão e de rendimento do transformador utilizando os valores da Tabela 3 e os valores calculados a partir do circuito equivalente.



O que você pode observar da comparação entre as curvas de regulação de tensão e de rendimento teóricas e práticas? Justifique sua resposta. _____

Explique a variação da corrente devida à variação da carga no lado de BT (diretamente ou inversamente proporcional à resistência da carga). _____

É possível que um transformador tenha uma regulação de tensão negativa? Justifique. _____
