

Fundamentos de Energia Elétrica

Guia do 2º Trabalho Laboratorial

Transformador Trifásico

Célia de Jesus

Gil Marques

Alexandre Dias

Laboratório de Máquinas Elétricas

2023/2024 P1

Índice

Introdução	3
Lista de Material	5
Montagem dos componentes	7
A – Transformador em vazio	7
B – Transformador em curto-circuito.....	9
C – Transformador em carga.....	10
Trabalho pós-laboratorial	11

Introdução

Este trabalho destina-se a dar aos alunos uma visão do circuito equivalente e do funcionamento do transformador trifásico. O trabalho aqui proposto deverá ser executado por um número restrito de alunos supervisionados por um professor. Dado o risco associado ao nível das tensões em jogo, os alunos deverão proceder com o máximo cuidado de modo a evitar choques elétricos, os quais podem ter consequências graves.

O transformador trifásico é constituído por três conjuntos de dois ou mais enrolamentos condutores (de fio de cobre ou alumínio), e por um núcleo magnético de ferro. O seu princípio de funcionamento é dado pela lei geral da indução (Lei de Faraday), que relaciona a tensão alternada induzida num enrolamento com a derivada do fluxo magnético ligado com esse enrolamento. O primário é constituído pelos 3 enrolamentos de cada fase que recebem energia do exterior. O secundário é constituído pelos três enrolamentos que fornecem energia ao exterior a tensão diferente. Poderá haver mais enrolamentos designados por terciário.

Num enrolamento do primário tem-se $v_1 = r_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt}$ e num enrolamento do secundário $v_2 = r_2 i_2 + N_2 \frac{d\phi_2}{dt}$. No conceito de transformador ideal não se considera a existência de perdas (nos enrolamentos e núcleo) nem a dispersão de fluxo magnético, resultando que o rendimento é unitário e verificando-se a relação $\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = k = c^{te}$.

Na realidade os transformadores não são ideais, havendo perdas no núcleo de ferro e perdas por efeito de Joule nos enrolamentos ($r_1 \neq 0, r_2 \neq 0$). O núcleo é construído em ferro laminado de forma a reduzir as perdas que nele ocorrem devido a correntes de Foucault. A existência de fluxo de dispersão (linhas de fluxo magnético que se fecham exteriormente ao circuito magnético de ferro) provoca quedas de tensão de carácter indutivo.

Neste trabalho pretende-se caracterizar o circuito equivalente monofásico do transformador trifásico a partir dos resultados obtidos nos ensaios em vazio e em curto-circuito. Realiza-se também o ensaio em carga do transformador trifásico. Neste ensaio pretende-se determinar o rendimento do transformador e a queda de tensão em função da carga (considerada puramente resistiva).

O transformador trifásico pode ser representado por um circuito equivalente monofásico em T referido ao primário, tal como se apresenta na Fig. 1, com

$$v'_2 = \frac{N_1}{N_2} v_2 \quad i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad r'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 \quad x'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 x_2 \quad k = \frac{N_1}{N_2},$$

onde r_1 é a resistência dos enrolamentos do primário, x_1 a reactância de dispersão dos enrolamentos do primário, r_2 a resistência dos enrolamentos do secundário, x_2 a reactância de dispersão dos enrolamentos do secundário, N_1 o número de espiras dos enrolamentos do primário e N_2 o número de espiras dos enrolamentos do secundário.

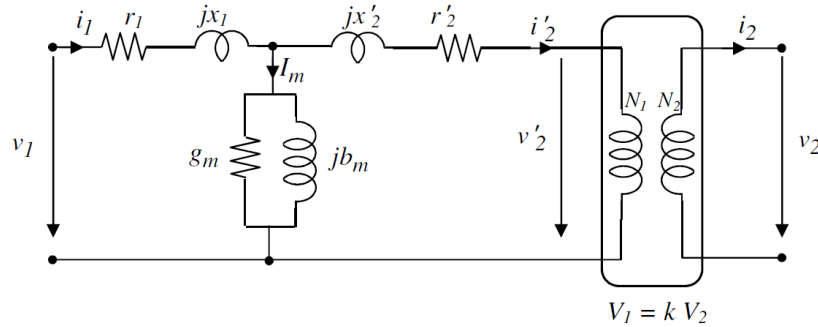


Fig. 1: Transformador trifásico: circuito equivalente monofásico em T referido ao primário.

O circuito equivalente monofásico mais utilizado em estudos de redes elétricas é o circuito simplificado em L apresentado na Fig. 2, onde o ramo transversal (G_m, B_m - admitâncias) se encontra do lado do primário. Este circuito resulta de uma simplificação que é legítima, dado que a corrente de magnetização é muito menor que a corrente nos enrolamentos primário/secundário. Os parâmetros tomam valores por unidade (p.u.), daí não se representar a relação de transformação correspondente à relação entre o número de espiras do primário e do secundário, k . Este circuito é o utilizado neste trabalho para determinar os parâmetros do transformador.

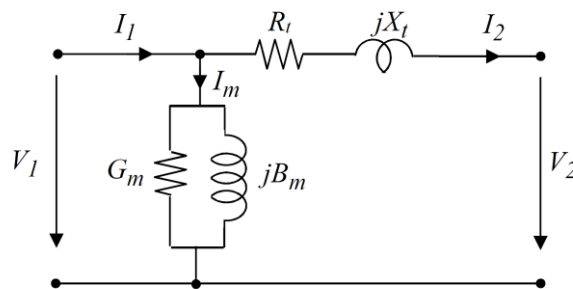


Fig. 2: Circuito equivalente monofásico do transformador em L, com grandezas em p. u..

A partir do ensaio em vazio (**efetuado à tensão nominal**), é possível determinar os valores dos parâmetros relacionados com os efeitos no núcleo do transformador, G_m e B_m . A partir do ensaio em curto-circuito (**efetuado à corrente nominal e tensão reduzida, bastante inferior à nominal**), obtém-se os valores dos parâmetros R_t e X_t relacionados com as perdas por efeito de Joule e dispersão magnética.

Lista de Material

1. Transformador trifásico OFICEL (1 kVA)

Este transformador tem um núcleo de 3 colunas, cada uma correspondente a uma fase. Cada fase tem três enrolamentos associados, conforme se indica no esquema da Fig. 3.

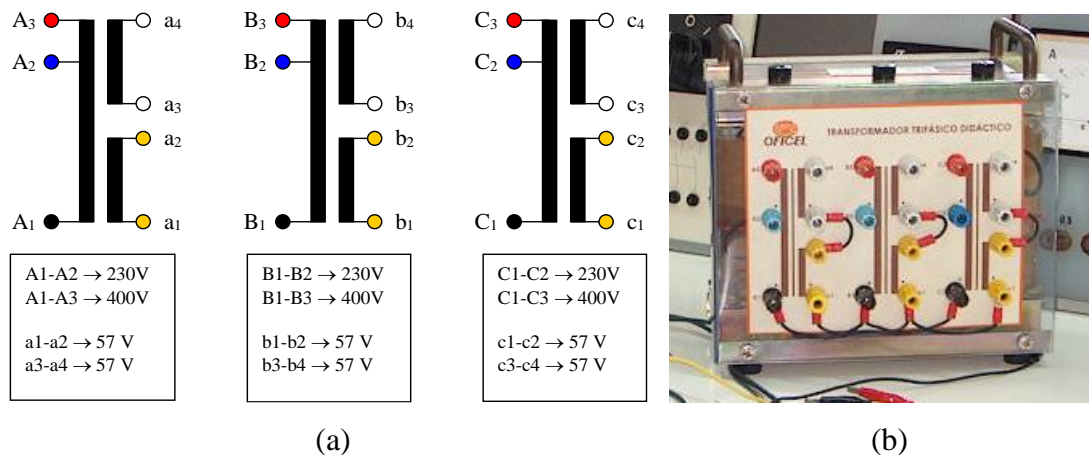


Fig. 3: Transformador trifásico didático: esquema dos três enrolamentos de cada fase (a) e fotografia com ligação do primário e do secundário em estrela e ligação dos enrolamentos do secundário em série (b).

O primário é constituído por três enrolamentos, um por fase, que suportam 400 V (entre A1 e A3, B1 e B3, e C1 e C3). Estes enrolamentos têm tomadas a 230 V (entre A1 e A2, B1 e B2, e C1 e C2). Para que o nível de fluxo se mantenha aproximadamente constante (em módulo), sempre que se quiser ligar o primário em triângulo deverá utilizar-se a totalidade dos enrolamentos do primário (A1-A3, B1-B3 e C1-C3). Quando se quiser ligar o primário em estrela, deverão ser utilizados os terminais intermédios (A1-A2, B1-B2 e C1-C2). Os enrolamentos do primário estão protegidos por fusíveis. Estes fusíveis apenas protegem o transformador em caso de curto-circuito, não havendo proteção em caso de sobrecarga.

O secundário é constituído por seis enrolamentos, dois por fase, todos com igual número de espiras. Cada um destes enrolamentos tem o valor nominal de tensão de 57 V.

Na Fig. 3 (b), mostra-se o transformador preparado para a ligação em estrela do lado do primário e do lado do secundário (configuração estrela-estrela do transformador). Os enrolamentos do secundário estão ligados em série, constituindo o conjunto um enrolamento com valor nominal de tensão de 115 V (2×57 V). A preparação da ligação em estrela de ambos primário e secundário e ligação dos dois enrolamentos de cada fase do secundário em série correspondem ao conjunto de ligações A1-B1-C1 (primário em estrela), a1-b1-c1 (secundário em estrela), e a2-a3 e b2-b3 e c2-c3 (enrolamentos do secundário em série).

2. Autotransformador trifásico com regulação de tensão em carga

Deverá aplicar-se tensão de forma suave e progressiva ao transformador que será ensaiado. Com essa finalidade é utilizado um autotransformador com regulação de tensão em carga. A escala do cursor do autotransformador (0 a 450 V) refere-se ao valor eficaz da tensão composta na sua saída (terminais UVW), sendo que o valor nominal da tensão composta do primário do autotransformador é de 400 V.

Deverá certificar-se de que **o cursor se encontra na posição zero sempre que ligar o disjuntor trifásico que alimenta o autotransformador** (terminais RSTN da bancada). Esta medida deverá ser especialmente verificada no início da realização dos ensaios com o transformador em curto-circuito.

3. Carga resistiva trifásica OFFICEL

É constituída por um conjunto trifásico de resistências, cujo valor ôhmico é igual nas três fases e é simultaneamente ajustável através de três comutadores (A1, A2 e A3). Na tabela existente por baixo dos comutadores, poderá verificar-se os valores de resistência correspondentes às várias posições dos comutadores (cada um, de 0 a 5). A carga resistiva adicional de $12\ \Omega$ 1000 W não é utilizada neste trabalho.

4. Multímetro Digital INTEGRA 1232

Além de poder medir as tensões e correntes do sistema trifásico, permite também medir a potência ativa, reativa, aparente e o fator de potência. Utiliza três transformadores de corrente com isolamento galvânico sendo alimentado através das tensões que está a medir.

Deverá ser usado nos ensaios com o transformador em vazio, em curto-circuito e em carga. Este dispositivo permite medir o valor eficaz das tensões nas três fases.



Fig. 4 Multímetro digital INTEGRA 1232

5. Multímetro digital

Serve para medir as várias tensões presentes no sistema. Tensões do primário, do secundário, tensões simples e tensões compostas.

6. Pinça amperimétrica

Para evitar o uso de vários amperímetros, uma vez que temos um sistema trifásico, optou-se pela utilização de uma pinça amperimétrica, a qual permite medir a corrente elétrica sem necessidade de desligar ou interromper o circuito.

Montagem dos componentes

Para ilustrar a montagem de forma simplificada, apresenta-se o esquema da Fig. 5. O transformador é alimentado através de um autotransformador com regulação de tensão em carga. O secundário deste autotransformador encontra-se ligado a um conjunto trifásico de nós para facilitar as ligações (bornes de ligação UVWN). Antes de efetuar qualquer alteração às ligações a tensão na saída do autotransformador deverá ser anulada (colocando o cursor na posição zero). Nos bornes de ligação do autotransformador ou do transformador a ensaiar introduz-se o Multímetro digital para medição das tensões e correntes no primário do transformador (ABCN), bem como das potências absorvidas por este.

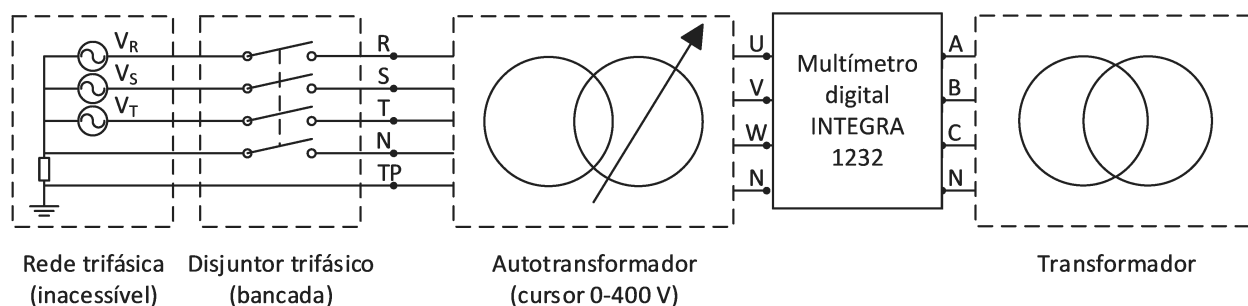


Fig. 5: Representação simplificada da montagem necessária à realização do trabalho.

A – Transformador em vazio

Ligações

O esquema de ligações do transformador para o ensaio em vazio encontra-se representado na Fig. 6. O transformador será ensaiado com configuração estrela-estrela, ou seja, com o primário e o secundário ligados em estrela.

Para ligação do primário em estrela serão usados os enrolamentos de 230 V (entre A1 e A2, B1 e B2, e C1 e C2), sendo necessário efetuar as ligações A1-B1-C1. A ligação do secundário em estrela corresponde às ligações a₁-b₁-c₁. Os dois enrolamentos de cada fase do secundário são ligados em

série (ligações a_2 - a_3 , b_2 - b_3 e c_2 - c_3). Assim, as tensões simples no secundário serão medidas em a_4 , b_4 e c_4 relativamente ao ponto de neutro do secundário (terminais a_1 , b_1 ou c_1).

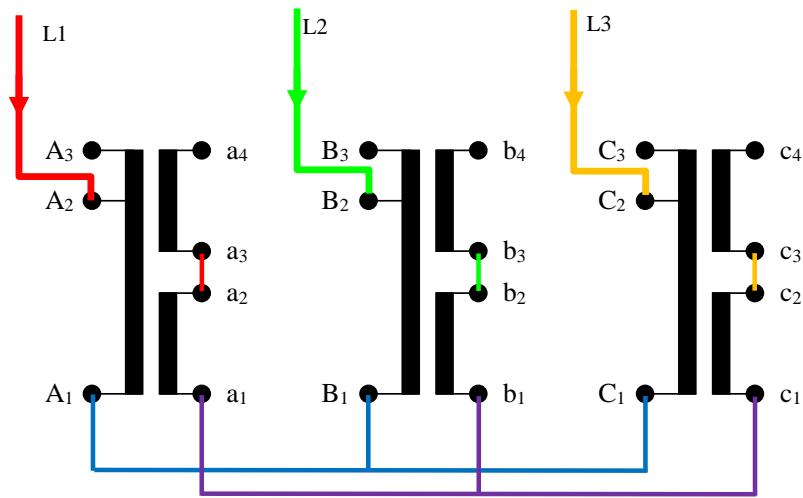


Fig. 6: Esquema de ligações do transformador (ligação estrela-estrela) para o ensaio em vazio. As ligações coloridas representam cabos a interligar os vários terminais/bornes de ligação do transformador.

Condução do ensaio

- 1) Com o cursor do autotransformador na posição **zero**, ligue o disjuntor trifásico. Atuando no cursor do autotransformador, aplique uma tensão de valor nominal ao primário do transformador. Recorrendo ao multímetro digital verifique que o valor eficaz da tensão composta (ou simples) aplicada ao primário é próximo do nominal (400/230 V).
 - a) Registe os valores eficazes das tensões e correntes em cada fase do primário e do secundário.
 - b) Registe os valores de potência ativa e aparente absorvidas pelo transformador, bem como o respetivo valor do fator de potência ($\cos \varphi$).
- 2) Atuando no cursor do autotransformador, diminua a tensão aplicada ao transformador até **zero**. Desligue o disjuntor trifásico da bancada. (preparação para o ensaio em curto-circuito)

B – Transformador em curto-circuito

Ligações

Assegurando-se de que o cursor do autotransformador está na posição **zero** e o disjuntor da bancada desligado, mantenha inalteradas as ligações efetuadas para o ensaio em vazio do transformador e curto-circuite as fases do secundário (ligações adicionais a₁-a₄, b₁-b₄ e c₁-c₄ representadas na Fig. 7).

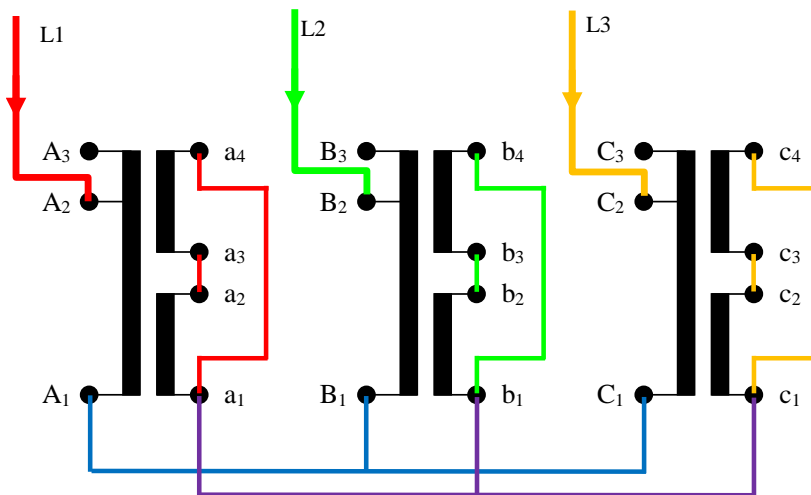


Fig. 7: Esquema de ligações do transformador (ligação estrela-estrela) para o ensaio em curto-circuito. As ligações coloridas representam cabos a interligar os vários terminais/bornes de ligação do transformador.

Condução do ensaio

Este ensaio será realizado **com tensão de valor eficaz reduzido (face ao nominal)**. O valor eficaz da tensão composta (simples) no primário necessário à obtenção do valor desejado de corrente é de cerca de 35 V (20 V).

- 1) Com o cursor do autotransformador na posição zero, ligue o disjuntor trifásico da bancada. Atuando no cursor do autotransformador, aumente progressivamente a tensão de alimentação até atingir os valores nominais de corrente no primário e no secundário ($I_{N,pri}=1,5\text{ A}$ e $I_{N,sec}=2,7\text{ A}$).
 - a) Registe os valores eficazes das tensões simples e das correntes numa mesma fase do primário e do secundário do transformador, bem como das potências ativa e aparente absorvidas.
- 2) Assegurando-se de que o cursor do autotransformador está na posição **zero**, desligue o disjuntor trifásico da bancada. Desfaça as ligações a₁-a₄, b₁-b₄ e c₁-c₄ responsáveis pelo estabelecimento do curto-circuito. (preparação para o ensaio em carga)

C – Transformador em carga

Importante: nos ensaios com o transformador em carga, a carga resistiva estará a absorver uma potência de até 1 kW e poderá aquecer consideravelmente, pelo que não deverá haver nenhum objeto colocado em cima da sua grelha superior de ventilação (incluindo cabos de ligação e instrumentos de medição). Deverá ligar o ventilador desta carga.

Ligações

Com base nas ligações efetuadas no transformador para o ensaio em vazio (ver Fig. 6 para referência), ligue o secundário do transformador (a_4 , b_4 , c_4 e ponto de neutro a_1 - b_1 - c_1) à carga resistiva trifásica. As resistências desta carga deverão ser ligadas em estrela (a resistência de $12\ \Omega$ não é utilizada).

Condução do ensaio

Este ensaio será realizado com tensão de valor eficaz nominal (400/230 V) aplicado ao primário. O ensaio será efetuado atuando na resistência de carga de forma decrescente, isto é, do ponto de funcionamento nominal para o ponto de funcionamento em vazio, o que corresponde a passar da resistência mínima e indo aumentando o valor desta até ao circuito aberto.

- 1) Atuando nos comutadores de regulação da carga, selecione as posições (0,0,0), o que corresponde a circuito aberto nas três fases (carga nula).
- 2) Ligue o ventilador da carga resistiva.
- 3) Com o cursor do autotransformador na posição **zero**, ligue o disjuntor trifásico. Atuando no cursor do autotransformador, aumente progressivamente a tensão de alimentação até atingir o valor eficaz nominal da tensão composta aplicada ao primário do transformador (400 V).
- 4) Atue nos comutadores da resistência de carga (diminuindo o valor de resistência ou, equivalentemente, aumentando a carga do transformador) até atingir os valores nominais de corrente ($I_{N,pri}=1,5\text{ A}$ e $I_{N,sec}=2,7\text{ A}$).
 - a) Registe os valores eficazes das tensões simples e das correntes numa mesma fase do primário e do secundário do transformador, bem como das potências ativa e aparente absorvidas (primeira linha da tabela).
- 5) Atuando nos comutadores de forma a aumentar o valor de resistência (diminuindo a carga do transformador), diminua progressivamente a corrente no primário (I_{pri}) em intervalos de aproximadamente 0,20 A até à situação de vazio (corrente no primário igual à corrente de magnetização, carga nula).

- a) Registe os valores eficazes das tensões simples e das correntes numa mesma fase do primário e do secundário do transformador, bem como das potências ativa e aparente absorvidas (restantes linhas da tabela) e correspondente fator de potência.
- 6) Assegurando-se de que o cursor do autotransformador está na posição **zero**, desligue o disjuntor trifásico da bancada. Desfaça as ligações do secundário do transformador à carga.

Trabalho pós-laboratorial

Nota: os valores nominais (para cálculo de grandezas em p.u.) constam na primeira folha do relatório (identificação do grupo).

1) Ensaio em vazio:

- a. Determine os valores médios de tensão e corrente no primário do transformador.
- b. Calcule os valores dos parâmetros G_m , B_m , Y_m do esquema equivalente do transformador trifásico (em p.u. e em Siemens, com os valores em Siemens referidos ao primário) com base nos resultados deste ensaio (I_m e P_0) e nos valores nominais do transformador (S_n , V_n).
- c. Responda à questão, comentando sobre o valor obtido para o fator de potência e os resultados para os valores dos parâmetros.

2) Ensaio em curto-circuito:

- a. Calcule os valores dos parâmetros R_t , X_t , Z_t do esquema monofásico equivalente do transformador trifásico (em p.u. e em Ohm, com os valores em Ohm referidos ao primário) com base nos resultados deste ensaio (U_{cc} e P_{cc}) e nos valores nominais do transformador (S_n , V_n).
- b. Responda à questão relativa ao valor do fator de potência e aos resultados para os valores dos parâmetros.

3) Ensaio em carga:

- a. Determine os valores do rendimento (relembra-se que $\eta = P_{out}/P_{in} = P_{\text{útil}}/P_{\text{total}}$).
- b. Atente nos gráficos gerados automaticamente a partir dos valores da tabela.
- c. Comente sobre os resultados obtidos (fator de potência, rendimento e declives das retas geradas)