



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO DE ELETRÔNICA

Máquinas Elétricas



CAPÍTULO 2

TRANSFORMADORES

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, fevereiro de 2026.

TRANSFORMADORES

Objetivo de Aprendizagem

Estudar transformadores de baixa tensão.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento dos transformadores;
- Conhecer os principais tipos de transformadores;
- Realizar cálculos envolvendo transformadores.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Máquinas Elétricas – 2026/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. Tradução de Daniel Vieira, Jorge Ritter. 12ª ed. São Paulo: Pearson, 2012.

1 Introdução

O capítulo anterior versou sobre os princípios e conceitos do eletromagnetismo, onde se estudaram as Leis de Faraday e Lenz.

Este capítulo tem como objetivo o estudo dos transformadores, dispositivos eletromagnéticos onde se aplicam diretamente os princípios do eletromagnetismo e suas leis.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos transformadores;
- Tipos de transformadores;
- Cálculos envolvendo transformadores.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um transformador;
- Citar tipos de transformadores;
- Realizar cálculos simples envolvendo transformadores.

A atividade autoavaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em descrever o funcionamento de um transformador, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um transformador.
2. Citar tipos de transformadores.
3. Citar os principais parâmetros de transformadores.
4. Realizar cálculos envolvendo transformadores.
5. Citar aplicações dos transformadores.

2 Princípio de Funcionamento dos Transformadores

2.1 Introdução

Os transformadores são dispositivos eletromagnéticos amplamente utilizados em eletricidade e eletrônica, desde o início do processo de uso da energia elétrica pelos seres humanos.

Assim, neste capítulo será estudado o princípio de funcionamento dos transformadores, para na sequência se estudar os tipos de transformadores e os principais cálculos relacionados com os mesmos.

2.2 Princípio de funcionamento do transformador

As Leis de Faraday e de Lenz se aplicam aos transformadores, do mesmo modo que se aplicam aos indutores. Considere o transformador da Figura 1, onde se tem o acoplamento entre os dois enrolamentos realizado pelo ar. Lembre que o enrolamento no qual a fonte é conectada é denominado primário, e o enrolamento no qual a carga é conectada é chamado de secundário.

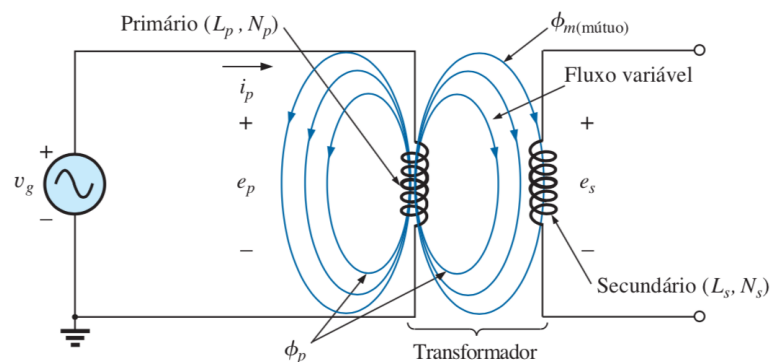


Figura 1 – Transformador com núcleo de ar.

Fonte: (Boylestad, 2012).

O fluxo criado pelo enrolamento primário é denominado de Φ_p e o fluxo que envolve o secundário é denominado de fluxo mútuo Φ_m .

A tensão induzida sobre o enrolamento primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

$$e_p(t) = L_p \frac{di_p}{dt}$$

Para o enrolamento secundário se terá:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_s}{dt}$$

$$e_s(t) = L_s \frac{di_s}{dt}$$

Como o fluxo se mantém tem-se:

$$\phi_m = \phi_s$$

Então:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_p}{dt}$$

A relação entre o fluxo do primário e o fluxo mútuo é o coeficiente de acoplamento do transformador, que idealmente seria unitário. Quanto melhor acoplados estiverem os enrolamentos, mais próximo da unidade será este fator.

$$k = \frac{\phi_m}{\phi_p}$$

Para transformadores com núcleo de material ferromagnético, conforme mostrado na Figura 2, considerando operação com tensão de entrada senoidal:

$$i_p(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$\phi_m = \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t)$$

A tensão induzida no primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$e_p(t) = N_p \frac{d(\Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t))}{dt} = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t) = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$

O valor eficaz da tensão no primário será:

$$E_{p(ef)} = \frac{\omega \cdot N_p \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Portanto:

$$E_{p(ef)} = 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m$$

Esta relação pode ser utilizada para o projeto de transformadores operando em baixa frequência e com tensão senoidal na entrada.

Considerando que o fluxo no primário e secundário será igual, isto é, que o acoplamento entre os enrolamentos seja unitário, se tem:

$$E_{s(ef)} = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m$$

Portanto:

$$\frac{E_{p(ef)}}{E_{s(ef)}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m}$$

$$\frac{E_{p(ef)}}{E_{s(ef)}} = \frac{N_p}{N_s}$$

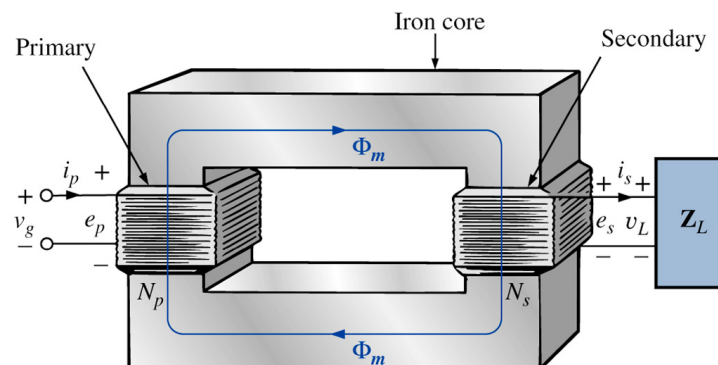


Figura 2 – Transformador com núcleo ferromagnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

2.3 Modelo elétrico do transformador

O circuito elétrico equivalente completo de um transformador é mostrado na Figura 3 onde se pode notar as capacitâncias dos enrolamentos (C_p e C_s), a resistência do enrolamento primário (R_p) e do enrolamento secundário (R_s), a indutância de dispersão (devida ao fluxo disperso/não-acoplado) do primário (L_p) e do secundário (L_s), as perdas no núcleo representadas por uma resistência (R_c), a indutância de magnetização (L_m) responsável por criar o campo magnético para o funcionamento do elemento magnético, e finalmente as indutâncias do primário e secundário representadas por N_p e N_s .

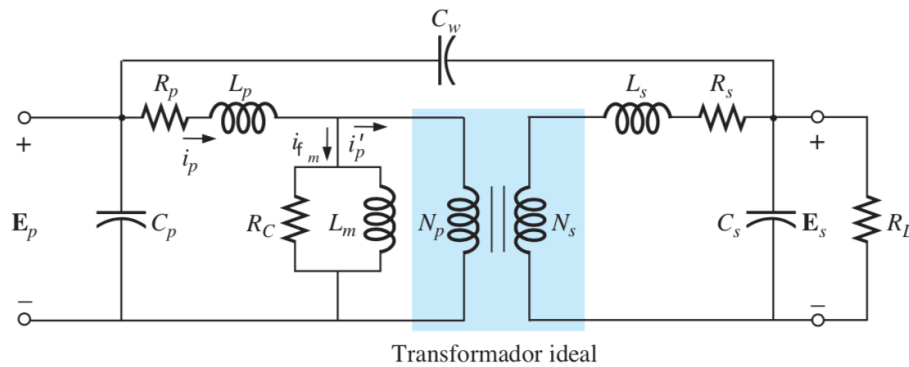


Figura 3 – Circuito elétrico equivalente de um transformador.

Fonte: (Boylestad, 2012).

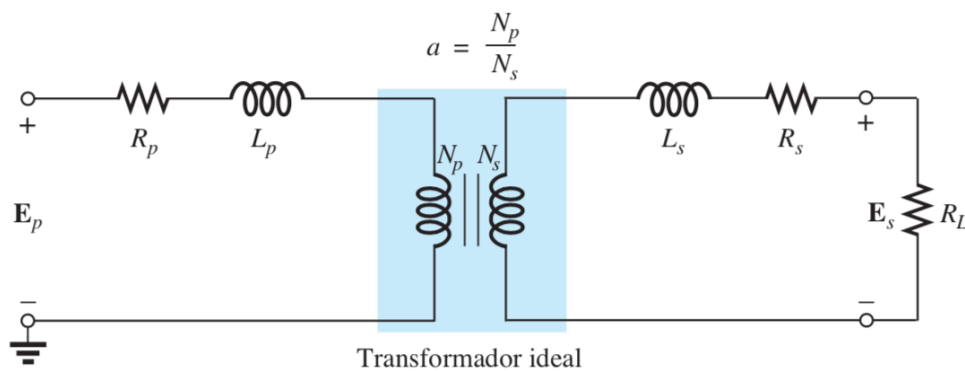


Figura 4 – Circuito elétrico equivalente e simplificado de um transformador.

Fonte: (Boylestad, 2012).

Em geral o circuito da Figura 3 será simplificado, usando-se o circuito da Figura 4. Isso é feito pelo fato de que em frequências baixas (60 Hz) e médias (<500 kHz) pode-se ignorar as capacitâncias dos enrolamentos. Além disso, a corrente de magnetização normalmente é menor do que 10% da corrente nominal do transformador, sendo desprezada quando se opera em baixa frequência (60 Hz), assim a indutância L_m é retirada do circuito. Por fim, as perdas podem ser calculadas em separado, tirando-se também a resistência R_c .

2.4 Polaridade dos enrolamentos de um transformador

Um transformador possui dois ou mais enrolamentos e isso implica que as tensões induzidas e correntes que circulam pelos mesmos tem sentidos e polaridades determinadas pela forma como as espiras são bobinadas (enroladas) no carretel. Deste modo, é muito importante durante a construção do transformador, que sejam identificadas as polaridades dos enrolamentos. Isso pode ser feito por meio de marcações nos fios, indicando o início e fim de cada bobina.

A Figura 5 mostra um transformador com um sinal alternado aplicado no enrolamento primário. A forma de onda obtida em sua saída (enrolamento secundário) é mostrada na mesma

figura. Atente para a fase dos sinais de entrada e de saída.

Por sua vez, na Figura 6 se tem um transformador com a polaridade trocada entre primário e secundário. Verifique que os sinais estão em anti-fase.

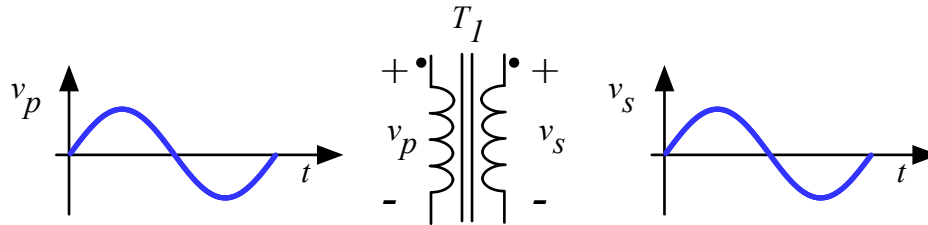


Figura 5 – Transformador com sinais em fase (polaridade igual).

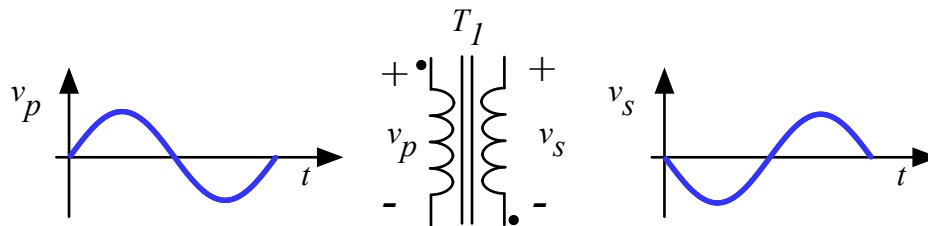


Figura 6 – Transformador com sinais defasados (polaridade diferente).

A polaridade (ponto ao lado dos enrolamentos) é definida no momento de se enrolar as espiras no carretel. Para demonstrar como isso ocorre, mostra-se na Figura 7 um transformador com núcleo cilíndrico e três enrolamentos. Pode-se verificar que os enrolamentos N_1 e N_2 estão com as polaridades iguais (mesmo sentido do enrolamento), enquanto o enrolamento N_3 está com a polaridade trocada, pois foi enrolado em sentido contrário. Atente para a fase dos sinais mostrados na figura.

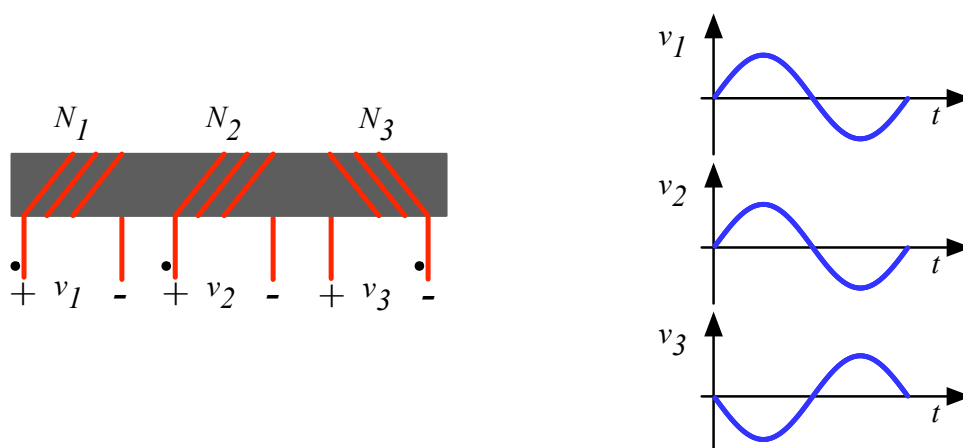


Figura 7 – Transformador com núcleo cilíndrico e identificação da polaridade das bobinas.

3 Principais Relações em um Transformador

3.1 Introdução

As principais relações entre as grandezas na entrada e na saída de um transformador caracterizam seu funcionamento e as diversas aplicações onde os transformadores são utilizados.

Este tópico tem por objetivo apresentar, para transformadores ideais, as principais relações entre as tensões, correntes e potências na entrada e na saída dos transformadores.

3.2 Relação de transformação

A relação de transformação é uma das principais características de um transformador, pois a mesma especifica se o elemento é elevador, abaixador ou apenas isolador, por exemplo.

Em termos de número de espiras entre os enrolamentos primário (entrada) e secundário (saída), considerando um transformador com dois enrolamentos, como mostrado na Figura 8, se tem:

$$RT = \frac{N_p}{N_s}$$

Assim, um transformador que tem relação entre o número de espiras do primário e secundário de 10:1, terá:

$$RT = \frac{N_p}{N_s} = \frac{10}{1}$$

É importante destacar que a relação de transformação não apresenta o número de espiras real, mas apenas a relação entre os enrolamentos.

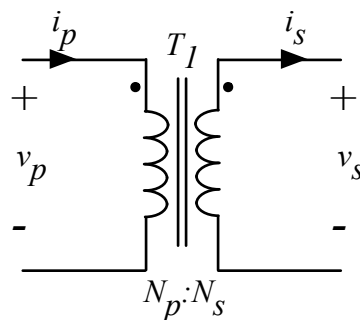


Figura 8 – Transformador com dois enrolamentos.

Um transformador de dois enrolamentos, pode ter as seguintes relações de transformação:

- $RT = 1$ – transformador isolador, onde a tensão de entrada é igual a tensão de saída;
- $RT > 1$ – Transformador abaixador, onde a tensão de entrada (primário) é maior que a tensão de saída (secundário);
- $RT < 1$ – Transformador elevador, onde a tensão de entrada (primário) é menor do que a tensão de saída (secundário).

É oportuno destacar que os enrolamentos de um transformador podem ser usados tanto como entrada ou saída, sendo comumente chamado de primário (entrada) o enrolamento onde se conecta a fonte de alimentação e secundário (saída) o enrolamento onde se conectam as cargas.

Transformadores com mais enrolamentos terão diferentes relações de transformação. Assim, para um transformador de três enrolamentos, como mostrado na Figura 9, se terá:

$$RT_1 = \frac{N_p}{N_s}$$

$$RT_2 = \frac{N_p}{N_t}$$

O transformador da Figura 9 tem um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários, neste caso identificados como secundário e terciário.

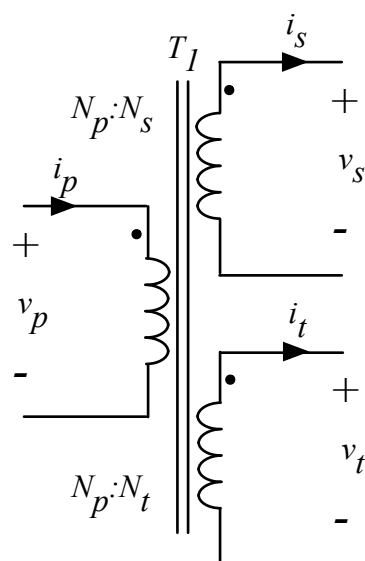


Figura 9 – Transformador com três enrolamentos.

3.3 Relação entre as tensões de entrada e de saída

A partir das Leis de Faraday e Lenz, para o transformador da Figura 8, se tem:

$$RT = \frac{N_p}{N_s} \rightarrow RT = \frac{V_p}{V_s} \rightarrow \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Assim, a relação entre a tensão do primário e a tensão do secundário é dada diretamente pela relação entre o número de espiras entre os enrolamentos, isto é, pela relação de transformação. Para um transformador com mais enrolamentos, se aplica a mesma regra, tendo-se então:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$\frac{V_p}{V_t} = \frac{N_p}{N_t}$$

3.4 Relação entre as potências de entrada e de saída

Em um transformador ideal, as perdas são consideradas iguais a zero. Assim, o rendimento, que é a relação entre a potência de entrada e de saída será unitário, portanto:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_s}{P_p}$$

$$\eta = 1 \rightarrow P_p = P_s [W]$$

Em termos práticos o rendimento de um transformador não será zero, mas em geral é maior que 90%. Assim, a potência de entrada será superior a potência de saída, pois se tem a corrente de magnetização e as perdas nos fios e no núcleo, que elevam a corrente no primário, em relação ao secundário.

A potência aparente de um transformador é calculada pelo produto da tensão eficaz pela corrente eficaz em cada enrolamento, tendo-se então:

$$S_s = V_s \cdot I_s [VA]$$

$$S_p = V_p \cdot I_p [VA]$$

Para o transformador ideal, a potência aparente no primário (S_p) é igual a potência aparente no secundário (S_s).

3.5 Relação entre as correntes de entrada e de saída

A partir do princípio da conservação da energia, considerando um transformador ideal, onde a potência na entrada é igual a saída, se terá:

$$\begin{cases} S_s = V_s \cdot I_s \\ S_p = V_p \cdot I_p \end{cases} \rightarrow \eta = 1 \rightarrow S_p = S_s \rightarrow V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Note que a relação entre as correntes é o inverso da relação de transformação, enquanto a relação entre as tensões é a própria relação de transformação:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

4 Tipos de Transformadores

4.1 Introdução

As aplicações dos transformadores são inúmeras, desde elementos pequenos até centenas de kVA nos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica.

Os transformadores podem ser classificados, em resumo, como:

- Relação de transformação – Em termos de relação de transformação, os transformadores podem ser abaixadores ou elevadores, ou ainda, ter relação de transformação unitário, como exemplo dos transformadores isoladores;
- Frequência de operação – Em termos de frequência de operação, em geral, os transformadores são classificados como de baixa frequência (60 Hz) ou alta frequência (> 1 kHz);
- Potência de operação – Os transformadores podem ter diversas potências de operação desde mW até centenas de kW;
- Número de fases – Em relação ao número de fases, um transformador pode ser monofásico (1 fase), bifásico (2 fases), trifásico (3 fases) ou polifásico (n-fases);
- Aplicações – As aplicações dos transformadores são as mais diversas, desde fontes de alimentação, sistemas de geração, transmissão e distribuição de

energia elétrica, equipamentos médicos e odontológicos, máquinas de soldas, dentre outras.

A seguir serão apresentados alguns tipos de transformadores, comumente aplicados na área de eletrônica.

4.2 Transformadores abaixadores

Os transformadores mais comuns são aqueles utilizados em fontes de alimentação lineares, que operam com frequência de 60 Hz e reduzem a tensão da rede de energia elétrica de 110 ou 220 V para tensões da ordem de 12 V, por exemplo.

A Figura 10 mostra um transformador com entrada em 110/220 V e saída de 12 V com corrente de 2 A.

A corrente apresentada pelo fabricante na etiqueta de identificação pode não ser a corrente eficaz do transformador. Assim, deve-se consultar as tabelas de informações do fabricante para obter a corrente específica de cada elemento.



Figura 10 – Transformador abaixador.

Fonte: <https://www.makerhero.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.3 Transformadores elevadores

Os transformadores elevadores de tensão podem ser utilizados nos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, ou em aplicações específicas. A Figura 11 mostra o exemplo de um transformador elevador utilizado em esteiras transportadoras.

4.1 Transformadores isoladores

Em aplicações onde se faz necessário o isolamento entre a entrada e a saída, mesmo sem alteração na amplitude das tensões, se utilizam os transformadores isoladores, como mostrado na Figura 12.

Este transformador tem a mesma tensão na entrada e na saída, mas permite obter isolamento elétrico entre os enrolamentos, podendo ser utilizado para a proteção dos usuários contra choques elétricos ou para a conexão de instrumentos de medição, por exemplo.



Figura 11 – Transformador elevador.

Fonte: <https://www.solucoesindustriais.com.br>. Acesso em 23/06/2021.



Figura 12 – Transformador isolador.

Fonte: <https://www.eletopecas.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.2 Autotransformadores

Os autotransformadores são transformadores com apenas um enrolamento, podendo ter diversas derivações (*taps*) para a saída ou entrada de diferentes tensões.

A vantagem de se utilizar autotransformadores é a redução de custo e volume, visto este elemento empregar apenas um enrolamento. Por outro lado, não se tem mais o isolamento entre a entrada e a saída do transformador.

Os autotransformadores são utilizados, por exemplo, na partida de motores trifásicos, na implementação de estabilizadores de tensão, dentre outras aplicações.

A Figura 14 mostra o exemplo de um autotransformador simples, com um enrolamento com derivação central, isto é, o número de espiras N_1 seria igual ao número de espiras N_2 .

Neste exemplo, o transformador poderia ser utilizado para a conversão de 220 V em 110 V, pois a tensão de entrada (v_i) será o dobro da tensão de saída (v_o).

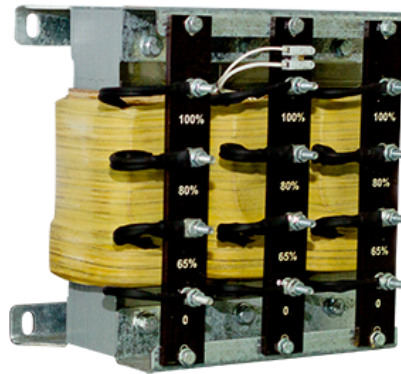


Figura 13 – Autotransformador trifásico.

Fonte: <https://www.wisetransformadores.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

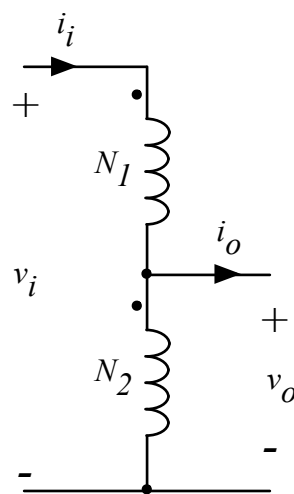


Figura 14 – Autotransformador simples.

A Figura 15 mostra um transformador convencional alimentado com uma tensão de 120 V, com saída de 6 V e corrente de 1 A. A potência aparente deste transformador será:

$$S_{comum} = V_L \cdot I_2 = 6 \cdot 1 = 6 \text{ VA}$$

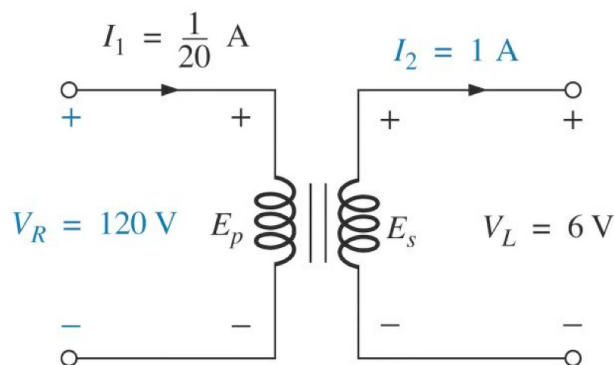


Figura 15 – Exemplo de aplicação de transformador convencional.

Fonte: (Boylestad, 2012).

Por sua vez, a Figura 16 mostra o enrolamento de 6 V conectado junto ao enrolamento de 120 V, na configuração de autotransformador. Neste caso a tensão de saída será de 126 V e corrente de 1 A. A potência aparente do autotransformador será:

$$S_{\text{autotrafo}} = V_L \cdot I_2 = 126 \cdot 1 = 126 \text{ VA}$$

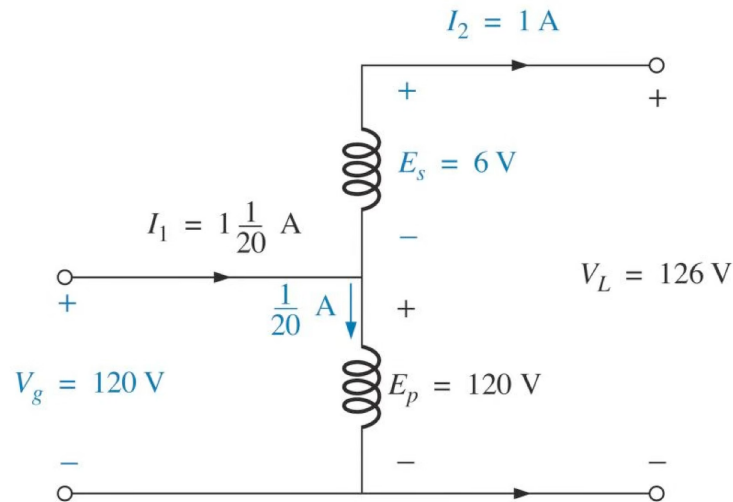


Figura 16 – Exemplo de aplicação de autotransformador.

Fonte: (Boylestad, 2012).

A relação entre as potências do transformador e do autotransformador será:

$$\frac{S_{\text{autotrafo}}}{S_{\text{comum}}} = \frac{126}{6} = 21$$

4.3 Transformadores para fontes chaveadas

Os transformadores utilizados em fontes chaveadas são para operação em alta frequência (dezenas de kHz), como mostrado na Figura 17. Neste caso utilizam núcleos de ferrite, por exemplo.

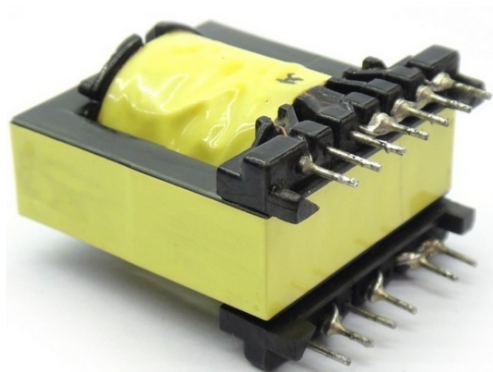


Figura 17 – Autotransformador trifásico.

Fonte: <https://labdegaragem.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.4 Transformadores para casamento de impedância

Em aplicações específicas, como áudio, por exemplo, pode ser necessário realizar o casamento da impedância entre diferentes elementos. Nestes casos se utilizam transformadores especialmente projetados para estas aplicações, como mostrado na Figura 18, também conhecidos como transformadores de linha.

O exemplo mostrado na Figura 18 tem impedância de entrada de 500 Ω e saída de 4 Ω ou 8 Ω .

A relação entre a impedância de entrada e de saída é obtida a partir do quadrado da relação de transformação, conforme seja:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \cdot \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}; Z_s = \frac{V_s}{I_s}$$

$$V_p = V_s \cdot \frac{N_p}{N_s}; I_p = I_s \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} = \frac{V_s \cdot \frac{N_p}{N_s}}{I_s \cdot \frac{N_s}{N_p}} = \frac{V_s}{I_s} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{N_p}{N_s} = Z_s \cdot \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 = Z_s \cdot (RT)^2$$



Figura 18 – Transformador para casamento de impedância.

Fonte: <https://www.hayama.com.br/>. Acesso em 23/06/2021.

4.5 Transformadores para medição

Os transformadores podem ser utilizados para medição de tensão ou corrente, visando reduzir altas amplitudes para baixas amplitudes, que podem ser processadas por circuitos eletrônicos em baixas tensões.

A Figura 19 mostra exemplos de transformadores de potencial (TP), utilizados para medições de altas tensões, tipicamente do sistema de transmissão de energia elétrica.

Já a Figura 20 mostra exemplos de transformadores de corrente, que podem ser utilizados tanto no sistema de energia elétrica como em uso industrial.

Os transformadores de corrente podem ser utilizados para medição ou para proteção de circuitos, quando são associados com elementos que desligam o circuito ao se ultrapassar a corrente previamente especificada pelo projetista. Assim, para proteção dos circuitos e das cargas ligadas aos mesmos, é comum em aplicações industriais, se medir a corrente elétrica para se desligar o circuito caso seu valor ultrapasse os valores normais de funcionamento do circuito.



Figura 19 – Transformador de potencial (TP).

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

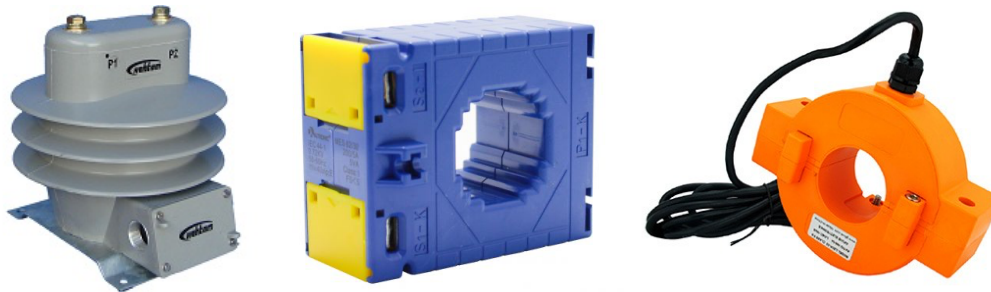


Figura 20 – Transformadores de corrente (TC).

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>; <https://www.viewtech.ind.br>; <https://www.choicetech.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

4.6 Transformadores de pulsos

Os transformadores de pulsos são elementos para operarem com baixas tensões e correntes, mas projetados para funcionarem em altas frequências, em dezenas de kHz. Tem aplicações em eletrônica de potência, por exemplo, em fontes chaveadas, acionamento de interruptores de potência, expansão de circuitos de acionamento de interruptores, dentre outras.

A Figura 21 mostra um exemplo de transformador de pulsos utilizado em eletrônica de potência, que opera com tensões abaixo de 30 V, correntes abaixo de 100 mA e frequência da ordem de 500 kHz.



Figura 21 – Transformador de pulso.

Fonte: <https://www.supplier.ind.br>. Acesso em 23/06/2021.

4.7 Transformadores trifásicos

Os transformadores trifásicos são utilizados quando se opera com potências mais altas e na conexão com o sistema de energia elétrica trifásico. Os mesmos são montados a partir dos transformadores monofásicos, possibilitando a implementação de transformadores abaixadores, elevadores, isoladores e autotransformadores.

A Figura 22 mostra um exemplo de transformador de transformador trifásico de 5 kVA e de 380 V para 220 V.



Figura 22 – Transformador trifásico.

Fonte: <https://www.mistervolt.com.br>. Acesso em 25/02/2026.

Os transformadores trifásicos são amplamente utilizados no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 23. Neste caso a geração e transmissão é realizada à três fios, enquanto a distribuição possui quatro fios, sendo três fases e um neutro.

A tensão entre as fases e condutor neutro é denominada de tensão de fase, sendo de 220 V em Santa Catarina. Por sua vez, a tensão entre as linhas é denominada de tensão de linha, sendo

380 V.

A relação entre a tensão de fase e a tensão de linha é:

$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$$

$$V_L = 220 \cdot \sqrt{3} \cong 381 \text{ V}$$

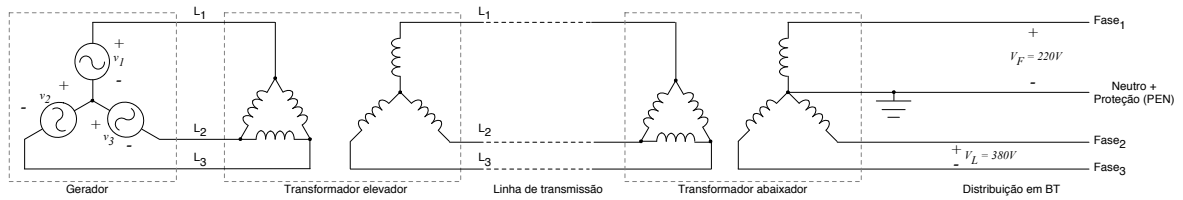


Figura 23 – Sistema típico de rede de distribuição de energia elétrica.

Na Figura 23 se observam diferentes formas de conectar os enrolamentos dos transformadores. Essas ligações podem ser em estrela ou triângulo (delta), conforme mostrado na Figura 26 e Figura 27.

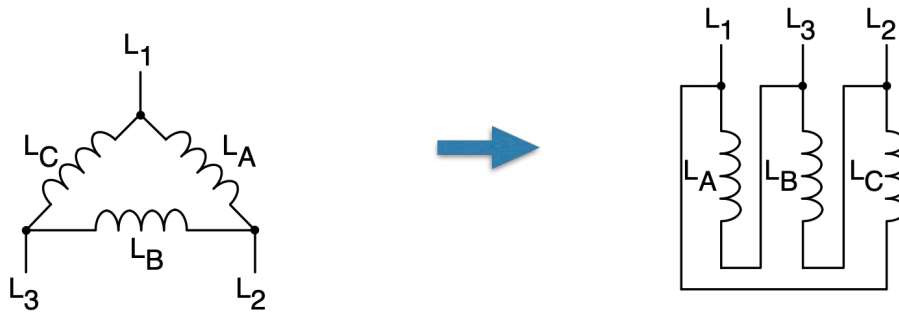


Figura 24 – Ligação dos enrolamentos do transformador em triângulo.

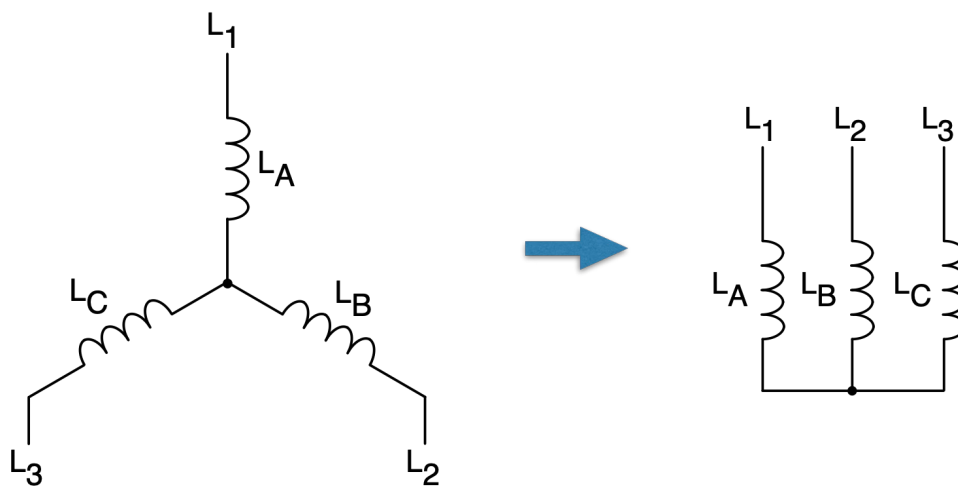


Figura 25 – Ligação dos enrolamentos do transformador em estrela.

As características da ligação em triângulo (delta), mostrada na Figura 26, são:

- Tensão de linha igual à tensão de fase;
- Corrente de linha 1,73 vezes maior do que a corrente de fase.

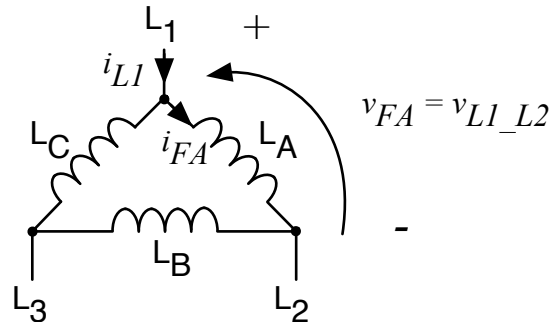


Figura 26 – Ligação dos enrolamentos do transformador em triângulo.

As características da ligação em estrela, mostrada na Figura 27, são:

- Corrente de linha igual à corrente de fase;
- Tensão de linha 1,73 vezes maior do que a tensão de fase.

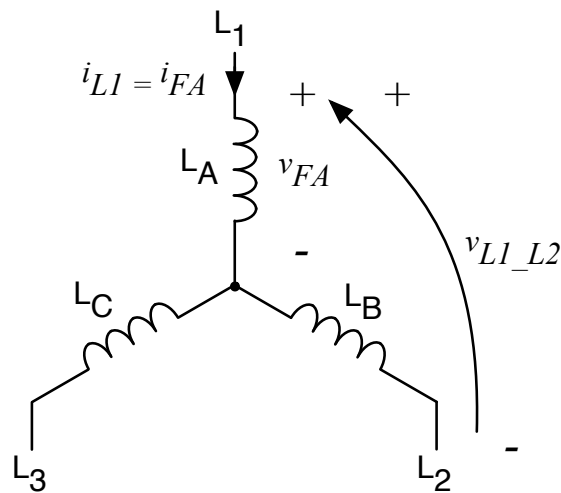


Figura 27 – Ligação dos enrolamentos do transformador em estrela.

A potência de um transformador trifásico representa a potência total considerando as três fases do transformador, sendo expressa em VA ou kVA.

Assim, as potências ativa, reativa e aparente do transformador trifásico serão:

$$P_{Total} = 3 \cdot P_{Fase} [W]$$

$$Q_{Total} = 3 \cdot Q_{Fase} [VAr]$$

$$S_{Total} = 3 \cdot S_{Fase} [VA]$$

No caso da conexão dos enrolamentos do transformador em triângulo, conforme a Figura 26, pode-se determinar a potência ativa total como:

$$P_{Total} = 3 \cdot P_{Fase}$$

$$V_{Fase} = V_{Linha} \text{ e } I_{Fase} = \frac{I_{Linha}}{\sqrt{3}}$$

$$P_{Total} = 3 \cdot V_{Linha} \cdot \frac{I_{Linha}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\emptyset)$$

Mas pode-se mostrar que:

$$\frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}$$

Então a potência total será:

$$P_{Total} = \sqrt{3} \cdot V_{Linha} \cdot I_{Linha} \cdot \cos(\emptyset)$$

Para a conexão do transformador em estrela de acordo com a Figura 27 se tem:

$$P_{Total} = 3 \cdot P_{Fase}$$

$$V_{Fase} = \frac{V_{Linha}}{\sqrt{3}} \text{ e } I_{Fase} = I_{Linha}$$

A potência total resultante será:

$$P_{Total} = \sqrt{3} \cdot V_{Linha} \cdot I_{Linha} \cdot \cos(\emptyset)$$

5 Parâmetros e Ensaio de Transformadores

5.1 Introdução

Ao utilizar transformadores em aplicações de eletroeletrônica, é importante se conhecer os principais parâmetros dos mesmos, além dos ensaios básicos que podem ser realizados para se determinar o modelo equivalente de um transformador.

A seguir serão apresentados os principais parâmetros e ensaios simples envolvendo transformadores de baixa tensão.

5.2 Modelo elétrico prático de um transformador de baixa tensão

Em aplicações de baixa tensão, pode-se utilizar um modelo elétrico equivalente para o transformador, conforme mostrado na Figura 28.

Os elementos apresentados neste circuito elétrico equivalente são:

- R_p – Resistência dos condutores do primário;
- R_s – Resistência dos condutores do secundário;
- L_d – Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário;
- L_m – Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário;
- $N_p:N_s$ – Transformador ideal com a relação de transformação nominal.

As indutâncias, tanto de dispersão como magnetizante, foram representadas (referidas) no lado primário para fins de simplificação e, considerando a facilidade para medição destes parâmetros em laboratório.

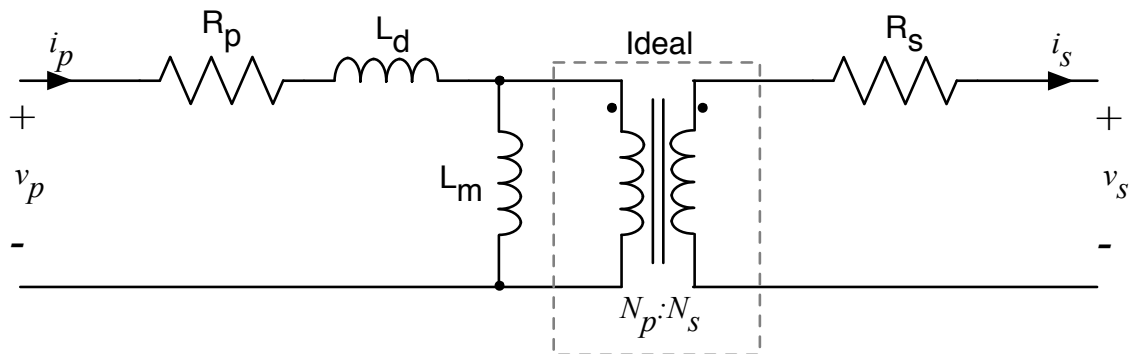


Figura 28 – Modelo elétrico simplificado de um transformador de baixa tensão.

5.3 Ensaio de transformadores

Os ensaios a serem realizados com transformadores tem diferentes objetivos, tais como: obter os elementos do circuito elétrico equivalente, verificar o correto funcionamento do transformador, verificar a operação com carga e sem carga, medir a elevação de temperatura das diferentes partes do transformador, dentre outros.

Em geral, quando se projeta e posteriormente fabrica um transformador, se realizam ensaios para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente e verificar se o elemento construído corresponde ao projeto realizado.

Assim, os elementos mostrados no Figura 28 são medidos como descrito a seguir, considerando o transformador desligado e retirado do circuito elétrico onde será utilizado:

- R_p – Resistência dos condutores do primário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no primário;
- R_s – Resistência dos condutores do secundário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no secundário;
- L_d – Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário, deve ser medida curto-circuitando os terminais do secundário, medindo-se a indutância com um medidor RLC (multímetro ou ponte de medição de resistência,

indutância e capacitância) pelo lado primário;

- L_m – Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário, será medida com um medidor RLC pelo lado primário, com o secundário em aberto;
- $N_p:N_s$ – Transformador ideal com a relação de transformação nominal, obtida dividindo-se a tensão de entrada nominal pela tensão de saída nominal.

As grandezas medidas conforme descrito anteriormente podem também ser medidas e calculadas a partir do ensaio de circuito aberto e de curto-circuito do transformador, como usualmente descrito na literatura.

A resistência dos condutores do primário e secundário dependerá do número de espiras e do fio utilizado, sendo que transformadores de baixa potência apresentam valores da ordem de alguns ohms, enquanto transformadores de alta potência tem resistências nos enrolamentos de alguns miliohms, por exemplo.

A indutância de dispersão geralmente é baixa, da ordem de alguns microhenrys, enquanto a indutância magnetizante possui valores de indutância altos, da ordem de dezenas ou centenas de milihenrys.

Os ensaios de circuito aberto e curto-circuito permitem determinar o circuito elétrico equivalente completo, mostrado na Figura 3, procedendo-se conforme abaixo:

- Ensaio de circuito aberto: é realizado aplicando-se a tensão nominal na entrada do transformador e deixando o secundário sem carga. Neste ensaio é determinada a relação de transformação ($N_p:N_s$), as perdas no núcleo (R_c) e a indutância de magnetização (L_m);
- Ensaio de curto-circuito: é realizado curto-circuitando o secundário e aplicando uma tensão na entrada do transformador com valor ajustado para que no secundário se tenha a corrente nominal. Neste ensaio se determinam as perdas no cobre e as quedas de tensão internas ao transformador, representadas por R_p , L_p , R_s e L_s .

Os elementos do modelo elétrico simplificado do transformador mostrados na Figura 28 podem ser determinados conforme descrito a seguir:

- R_p – Resistência dos condutores do primário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no primário (Figura 29);
- R_s – Resistência dos condutores do secundário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no secundário (Figura 30);
- L_d – Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário, deve

ser medida curto-circuitando os terminais do secundário, medindo-se a indutância com um medidor RLC (multímetro ou ponte de medição de resistência, indutância e capacitância) pelo lado primário (Figura 31);

- L_m – Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário, será medida com um medidor RLC pelo lado primário, com o secundário em aberto (Figura 32).

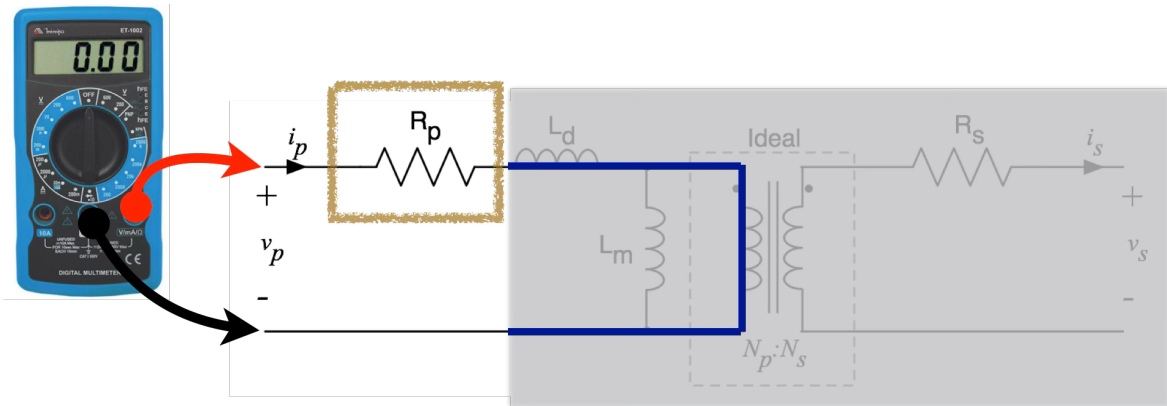


Figura 29 – Medição da resistência série do primário.

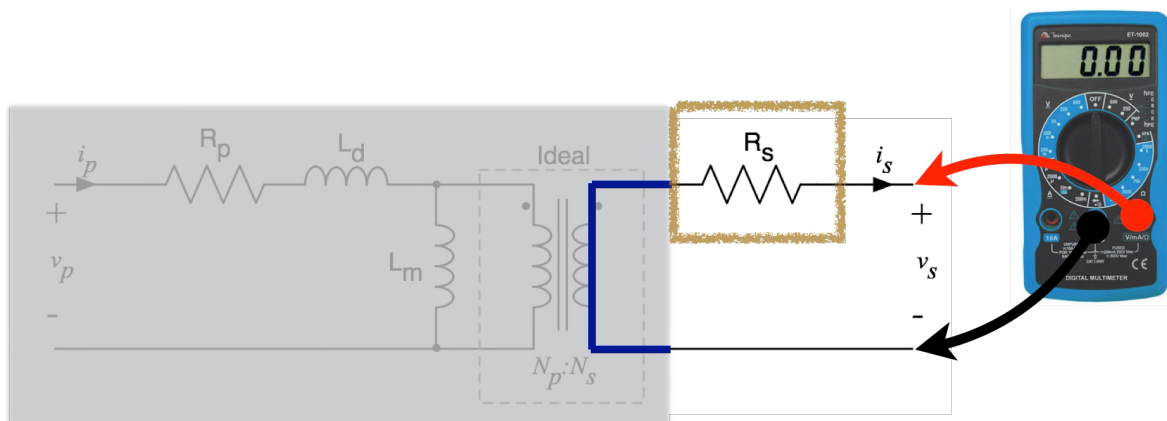


Figura 30 – Medição da resistência série do secundário.

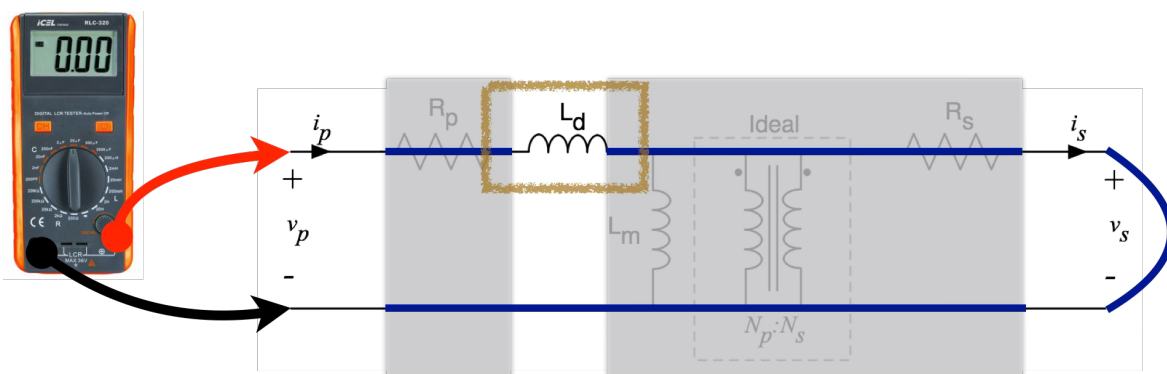


Figura 31 – Medição da indutância total de dispersão referida ao primário.

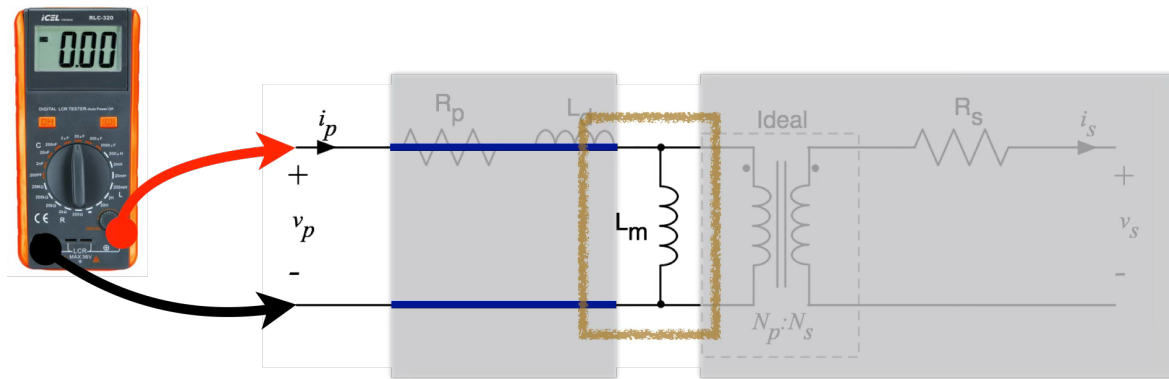


Figura 32 – Medição da indutância magnetizante pelo lado do primário.

5.4 Regulação de transformadores

Em virtude da presença de impedância no primário e secundário do transformador, devido as resistências dos enrolamentos e a indutância de dispersão, a tensão de saída do transformador será menor quando se tiver a conexão de carga ao mesmo, ou seja, quando ocorrer a circulação de corrente pelos enrolamentos do transformador.

A relação entre a tensão do secundário a vazio (sem carga) e a plena carga é denominada de regulação de um transformador, sendo que idealmente, as tensões deveriam ser iguais nas duas situações.

A regulação em termos percentuais é calculada por:

$$Reg = \left| \frac{V_{s(vazio)} - V_{s(carga)}}{V_{s(vazio)}} \right| \cdot 100 \text{ [%]}$$

Onde:

- Reg – Regulação percentual do transformador;
- $V_{s(vazio)}$ – Tensão no secundário do transformador sem carga;
- $V_{s(carga)}$ – Tensão no secundário do transformador com plena carga.

A título de exemplo, considere um transformador de 220 V para 12 V. Ao se medir sua tensão sem carga, se obteve o valor de 14 V. Por outro lado, ao se conectar uma carga para operar com a potência nominal do transformador, se mediu uma tensão de saída de 11 V. Neste caso, a regulação será:

$$Reg = \left| \frac{V_{s(vazio)} - V_{s(carga)}}{V_{s(vazio)}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{14 - 11}{14} \right| \cdot 100 = 21,4\%$$

5.5 Rendimento dos transformadores

A potência na entrada de um transformador é maior do que sua potência de saída em

virtude de suas perdas, que são:

- Perdas nos enrolamentos – São as perdas nos condutores dos enrolamentos pelo efeito joule;
- Perdas no núcleo – São as perdas por histerese e por correntes parasitas no material magnético do núcleo do transformador.

A relação entre a potência na saída e a potência na entrada do transformador permite obter as perdas e representa o seu rendimento, sendo expressa por:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100 [\%] = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100 [\%]$$

Onde:

- η – Rendimento do transformador;
- P_o – Potência de saída em W;
- P_i – Potência de entrada em W;
- P_s – Potência no primário do transformador em W;
- P_p – Potência no secundário do transformador em W.

Exemplificando, considere que a potência na saída de um transformador é de 120 W, enquanto a potência na entrada é de 150 W. Neste caso, o rendimento deste transformador será:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100 = \frac{120}{150} \cdot 100 = 80\%$$

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Explique o que é a relação de transformação de um transformador?

A relação de transformação é a relação entre o número de espiras do primário e do secundário, que também é válida para a relação entre a tensão do primário em relação ao secundário.

ER 02. Cite diferentes tipos de transformadores?

Transformadores isoladores, elevadores, para medição, etc.

ER 03. Um transformador tem relação de transformação de 10:1, sendo que sua tensão de entrada é de 220 V. Qual sua tensão de saída?

A tensão de saída será de $220/10 = 22$ V, pois este transformador é abaixador com relação de 10.

ER 04. A tensão a vazio no secundário de um transformador é de 15 V e com plena carga é de 13 V. Qual a regulação deste transformador?

A regulação será: $\text{Reg} = (V_{\text{vazio}} - V_{\text{carga}})/V_{\text{vazio}} \times 100 = (15-13)/15 \times 100 = 13,33\%$.

ER 05. O que é um transformador isolador?

Transformadores isoladores tem a finalidade de isolar eletricamente o secundário do primário, para fins de proteção dos usuários ou medição, podendo ter relação de transformação unitária.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um transformador?

EP 02. O que são autotransformadores?

EP 03. A tensão de entrada de um transformador é de 220 V e de saída é de 12 V. Qual sua relação de transformação?

EP 04. Explique o que é regulação de um transformador.

EP 05. Cite aplicações para os transformadores.

7 Atividade Autoavaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são transformadores de corrente?

AA 02. Um transformador tem relação de transformação de 1:5. Sua tensão de entrada é de 100 V. Qual sua tensão de saída?

AA 03. O que são transformadores para casamento de impedância?

AA 04. Um transformador tem tensão de saída de 7 V a vazio e de 5 V com carga. Qual sua regulação?

AA 05. Cite três tipos de transformadores.

AA 01. Transformadores de corrente são transformadores para medição, geralmente utilizados para obter correntes menores em circuitos de correntes elevadas, como no sistema de transmissão de energia elétrica, por exemplo.

AA 02. Um transformador com relação de transformação de 1:5 é elevador, então sua tensão de saída será de $100 \times 5 = 500 \text{ V}$.

AA 03. Transformadores para casamento de impedância são elementos que permitem conectar dois circuitos com impedâncias diferentes, com relação dada pelo quadrado da relação de transformação, geralmente utilizados em áudio, por exemplo, e também chamados de transformadores de linha.

AA 04. A regulação será: $R_{\text{reg}} = (V_{\text{vazio}} - V_{\text{carga}}) / V_{\text{vazio}} \times 100 = (7-5) / 7 \times 100 = 28,6\%$.

AA 05. Exemplos de diferentes tipos de transformadores são: abaixadores, de pulso, de alta frequência.