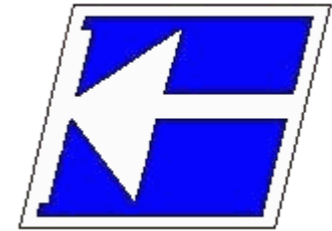


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Máquinas Elétricas



Transformadores

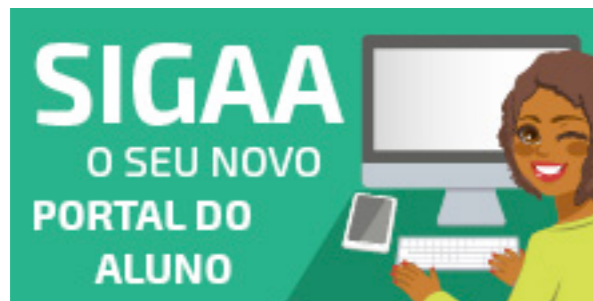
Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, março de 2026.

Máquinas Elétricas

O material do curso está disponível em:

1. SIGAA para os alunos matriculados na disciplina;
2. Página do professor;
3. Canal no youtube do professor.



<https://sigaa.ifsc.edu.br>

A screenshot of the website "ProfessorPetry". The header includes the name "ProfessorPetry" and the tagline "Conhecimento para uma vida plena". There are navigation links for "PRINCIPAL", "PROJETOS", "PUBLICAÇÕES", and "CONTATO". The main content area features a large image of wind turbines in a field. Below the image, there is a welcome message: "Bem vindo ao Website pessoal de Clovis Antonio Petry". To the right, there is a section titled "Eventos" with two entries: "Outubro, 2020 SNCT 2020" and "Setembro, 2020 COBENGE 2020". At the bottom, there are two small images: one showing mathematical formulas on a chalkboard and another showing a book with glasses and a pen.

www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

Esta aula está organizada em:

1. Princípio de funcionamento dos transformadores:
 - Princípio de funcionamento dos transformadores;
 - Modelo elétrico do transformador;
 - Polaridade dos enrolamentos de um transformador.
2. Principais relações em um transformador:
 - Relação de transformação;
 - Relação entre as tensões de entrada e saída;
 - Relação entre as potências de entrada e de saída;
 - Relação entre as correntes de entrada e de saída.
3. Tipos de transformadores:
 - Transformadores abaixadores;
 - Transformadores elevadores;
 - Autotransformadores;
 - Transformadores para fontes chaveadas;
 - Transformadores para casamento de impedância;
 - Transformadores para medição;
 - Transformadores de pulsos;
 - Transformadores trifásicos.
4. Parâmetros e ensaios de transformadores:
 - Modelo elétrico prático de um transformador;
 - Ensaios de transformadores;
 - Regulação de transformadores;
 - Rendimento dos transformadores.



Motivação

O uso de transformadores é comum nos circuitos e equipamentos eletrônicos.

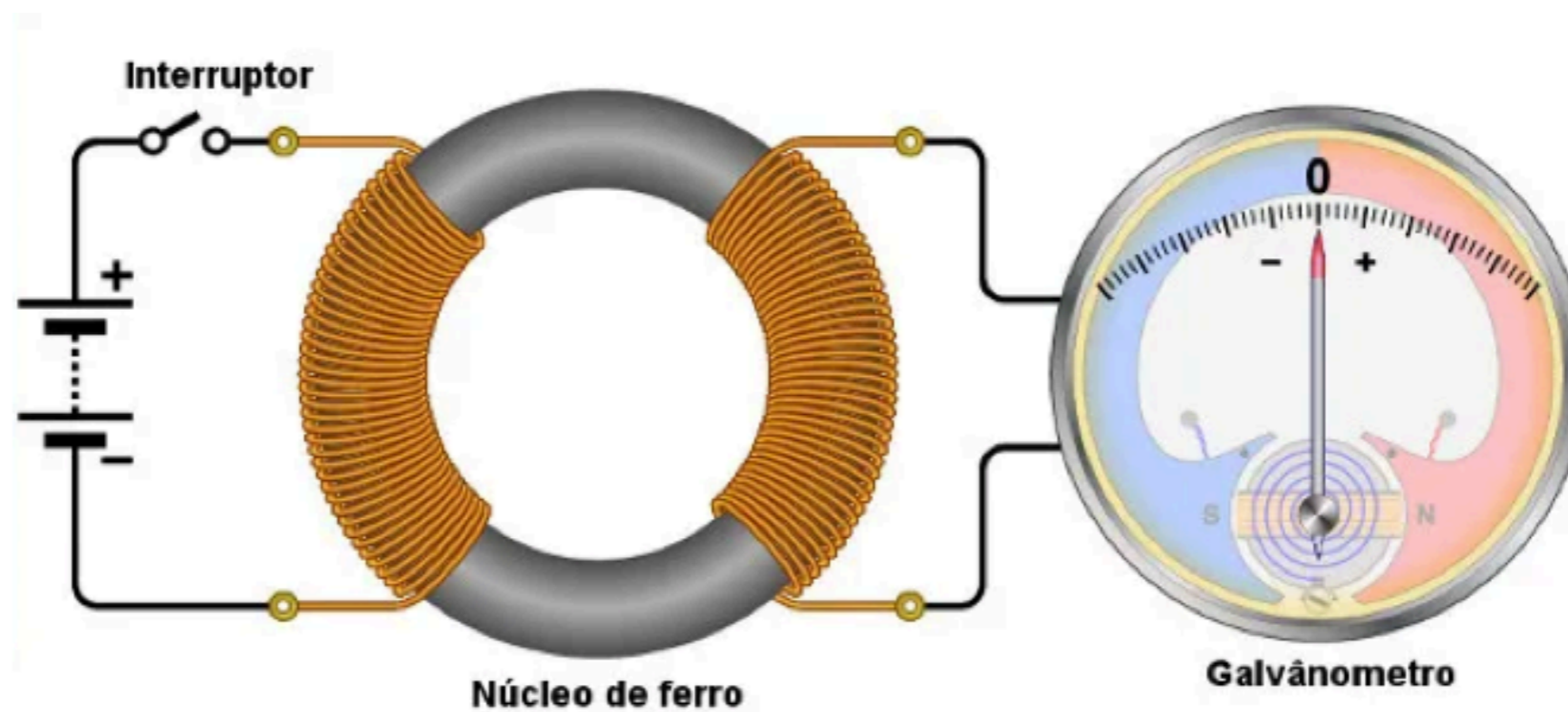


<https://www.weg.net>

Princípio de funcionamento dos transformadores

Indução eletromagnética:

- Experimento de Faraday:
 - No momento que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
 - Após a corrente cessar e durante o tempo em que a chave permanecer fechada, o galvanômetro não mais acusa corrente;
 - Ao abrir-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto ao observado no momento de fechamento da chave.



Experimento de Faraday

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>

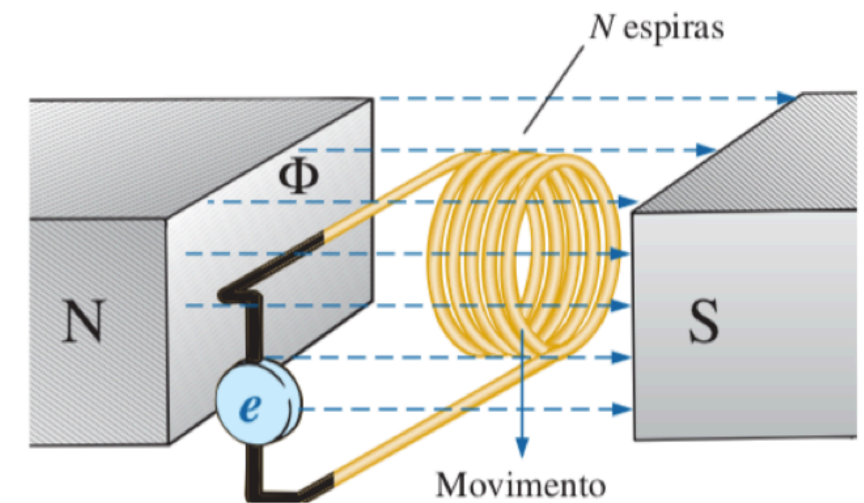
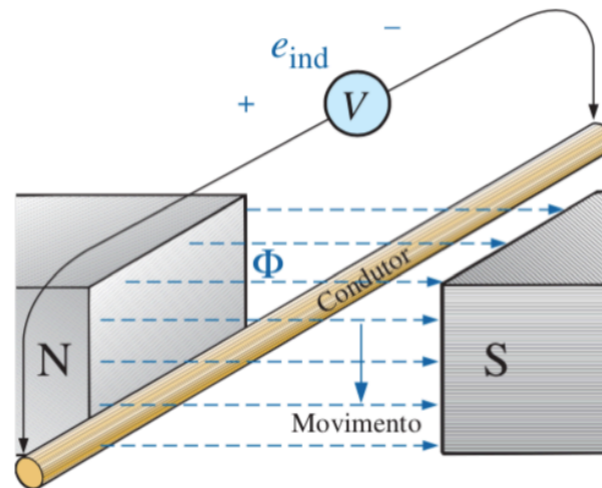
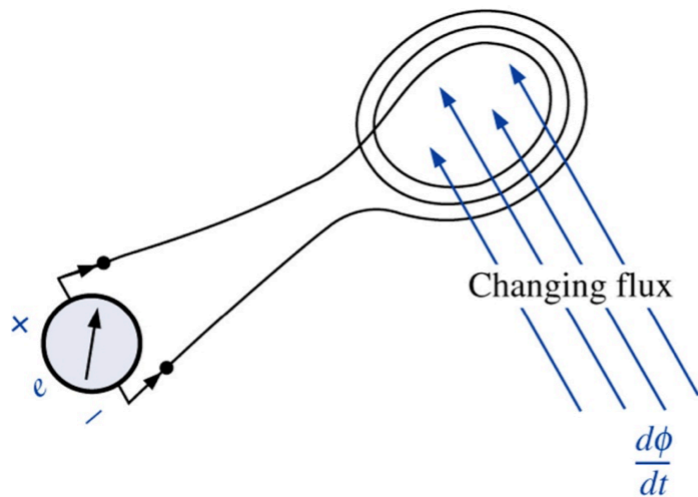
Princípio de funcionamento dos transformadores

Indução eletromagnética:

- Leis de Faraday e Lenz.

$$e = N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

$$e = -N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$



Indução eletromagnética em: bobina com fluxo variável, condutor em movimento, bobina em movimento

Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

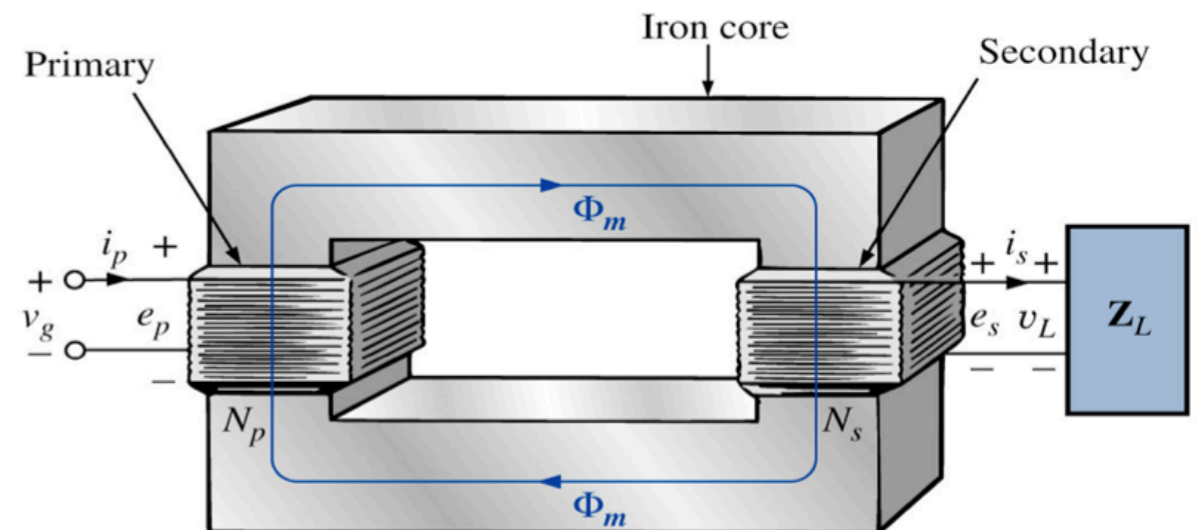
Indução eletromagnética:

- Aplicando a Lei de Faraday.

$$\left\{ \begin{array}{l} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{array} \right. \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s} \rightarrow \frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

Importante:
Considerando
acoplamento unitário entre
primário e secundário.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_s = \Phi_p = \Phi_m \\ k = 1 \end{array} \right.$$



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

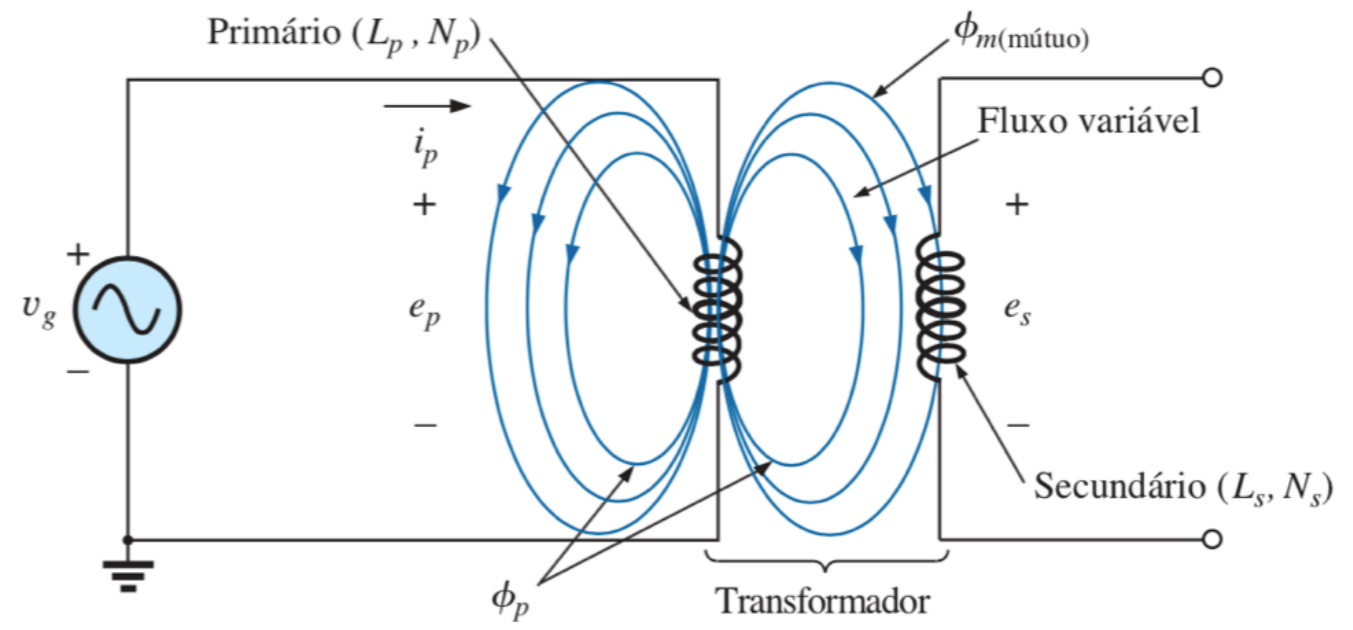
Indução eletromagnética:

- Aplicando a Lei de Faraday.

$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s} \rightarrow \frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

Importante:
Se o acoplamento não for unitário, a relação acima não será válida.

$$\begin{cases} \Phi_s < \Phi_p \\ k < 1 \end{cases}$$

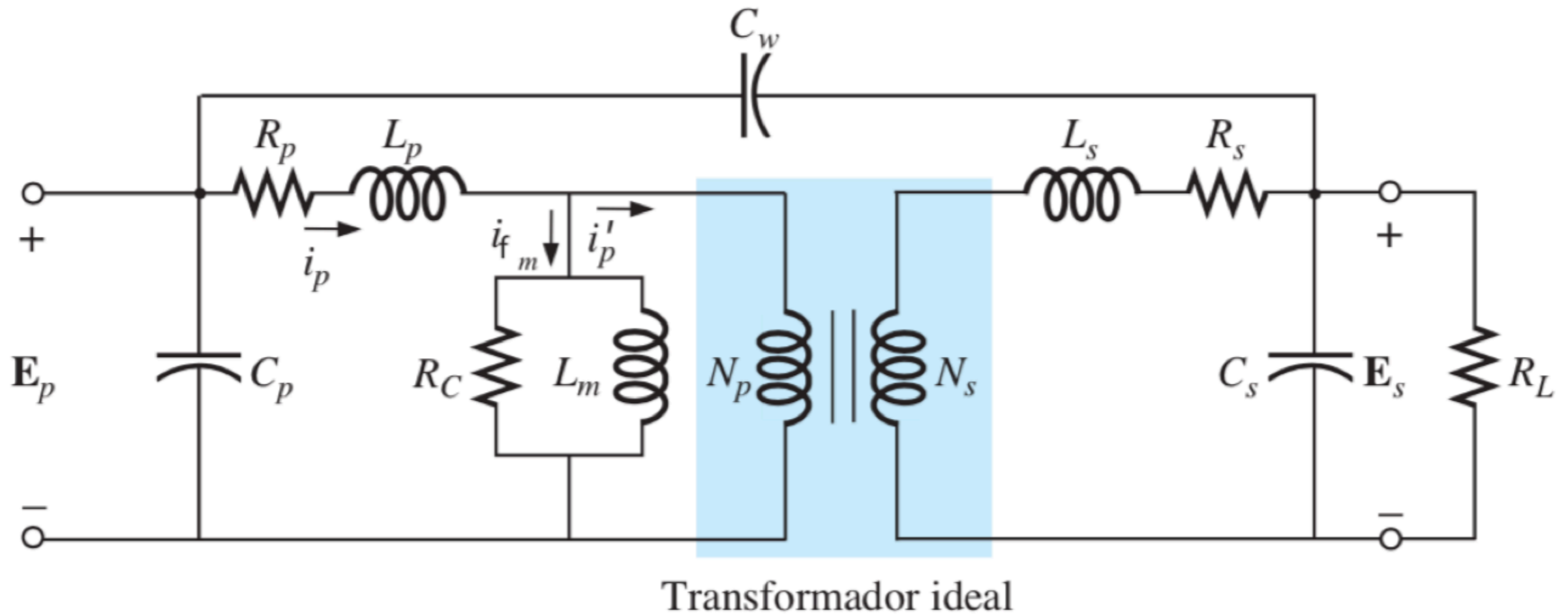


Transformador com núcleo de ar
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Modelos elétricos dos transformadores:

- Circuito elétrico equivalente completo.



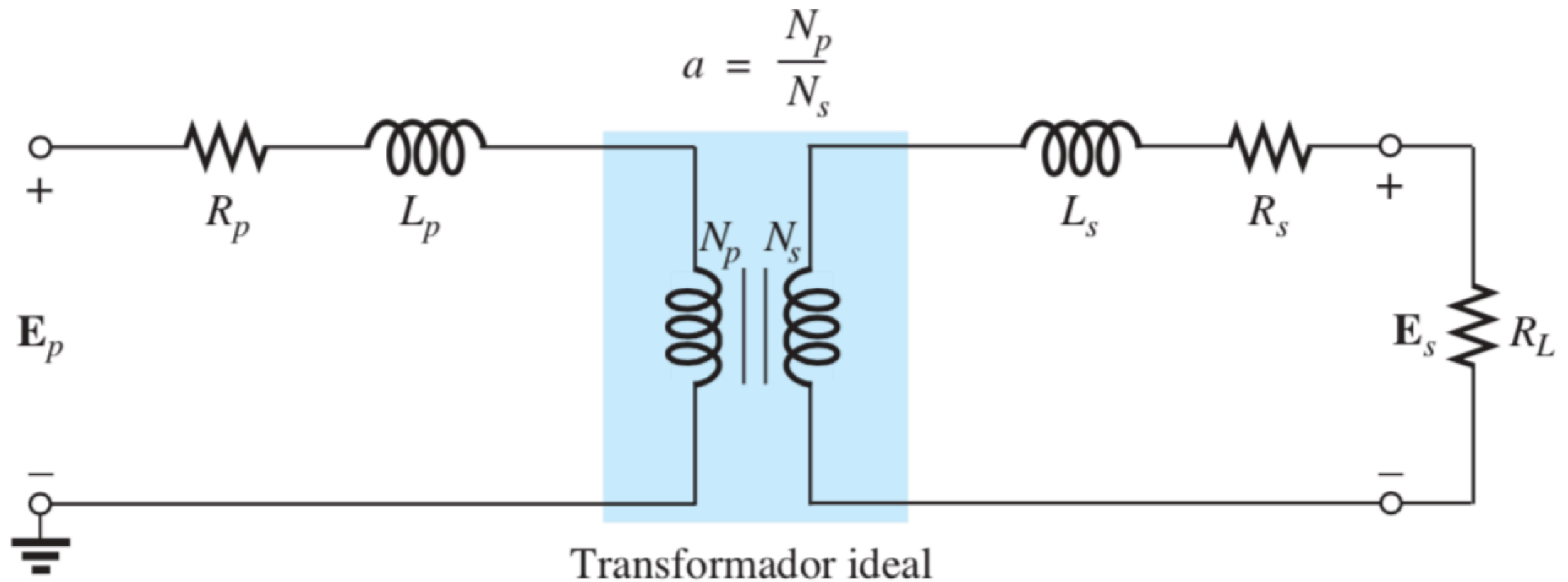
Circuito elétrico equivalente completo do transformador

Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Modelos elétricos dos transformadores:

- Circuito elétrico equivalente simplificado.

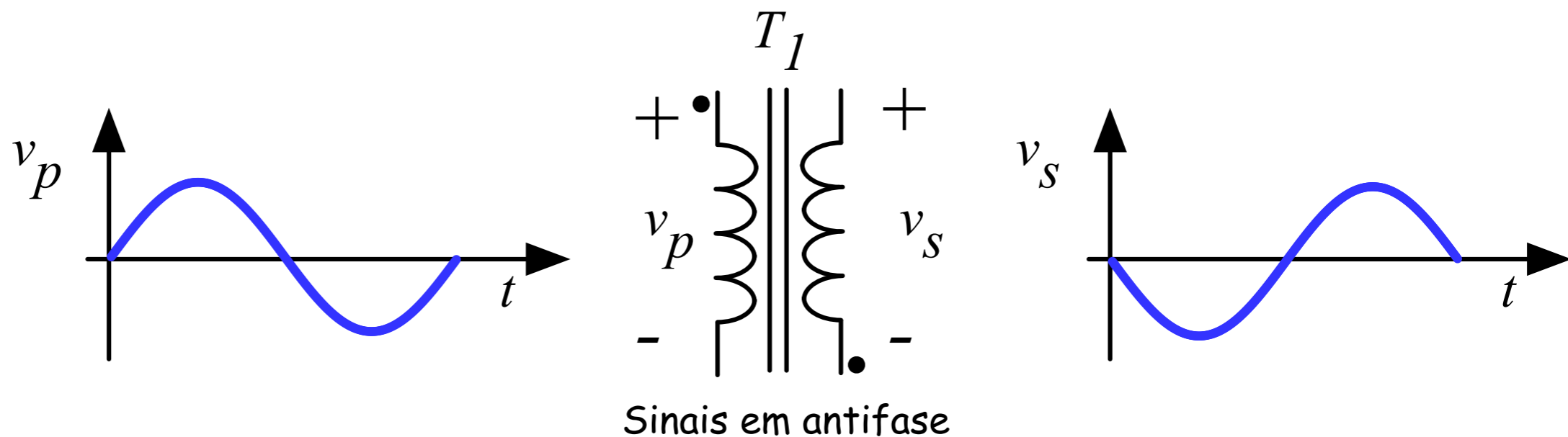
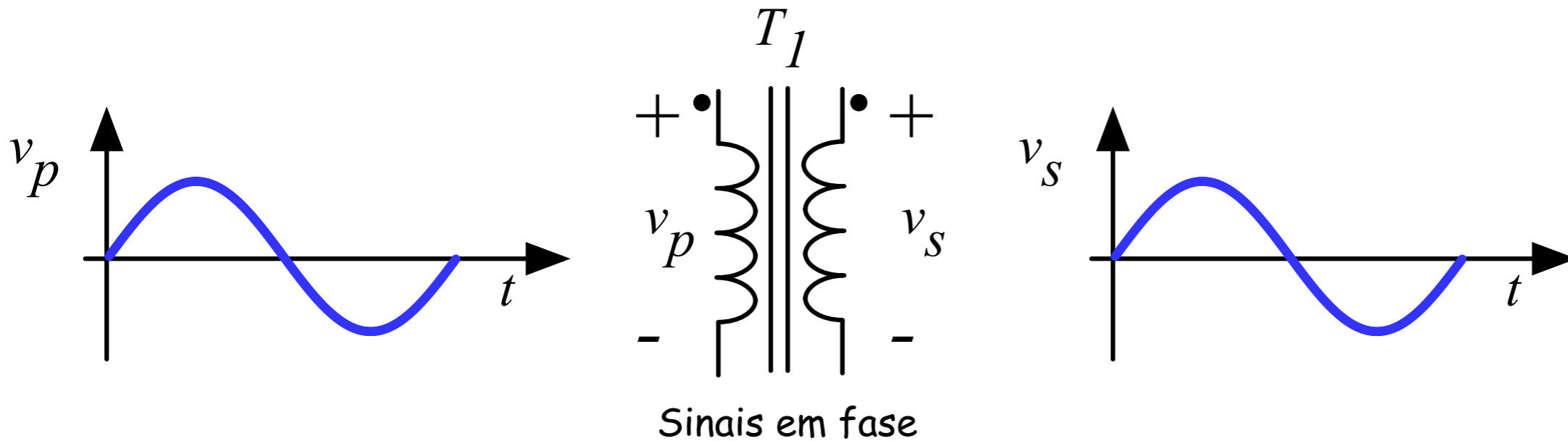


Circuito elétrico equivalente simplificado do transformador

Fonte: (Boylestad, 2012)

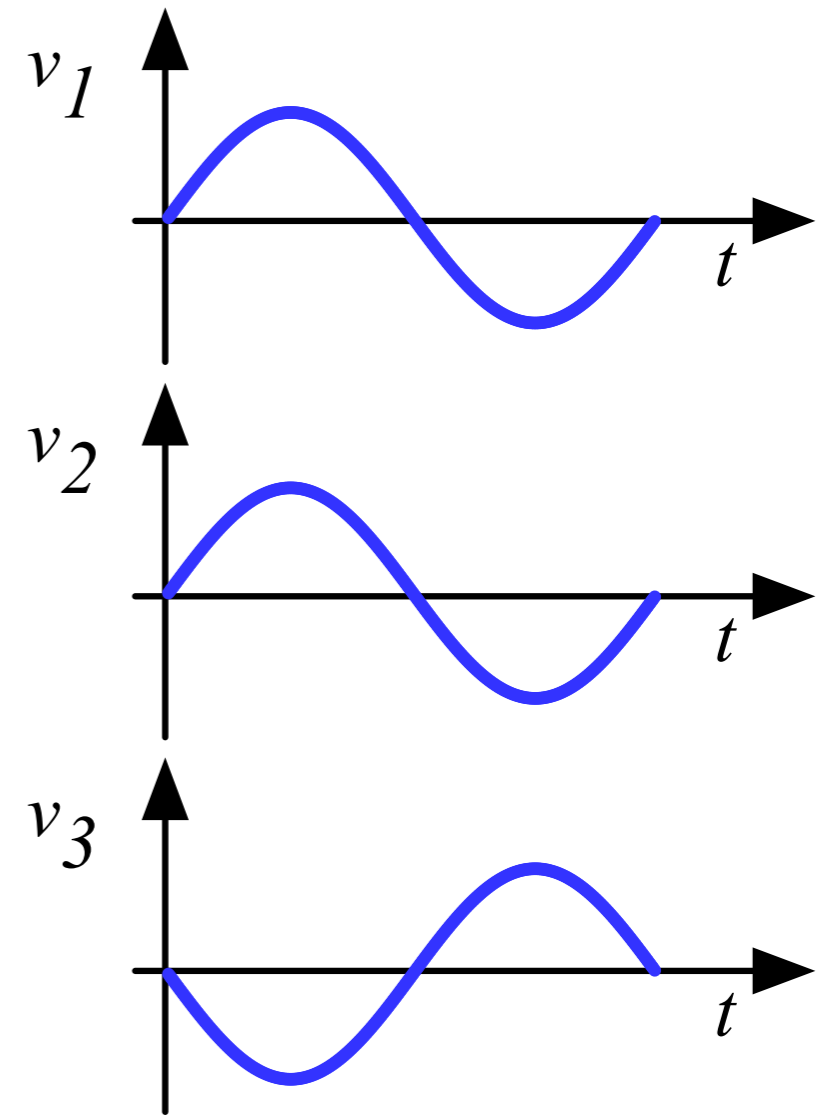
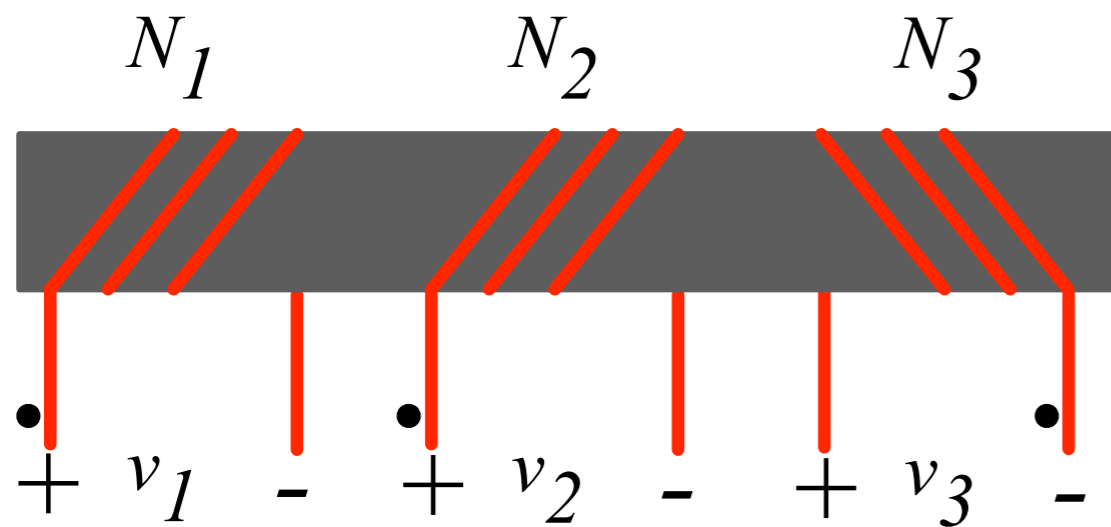
Princípio de funcionamento dos transformadores

Polaridade dos enrolamentos de um transformador



Princípio de funcionamento dos transformadores

Polaridade dos enrolamentos de um transformador

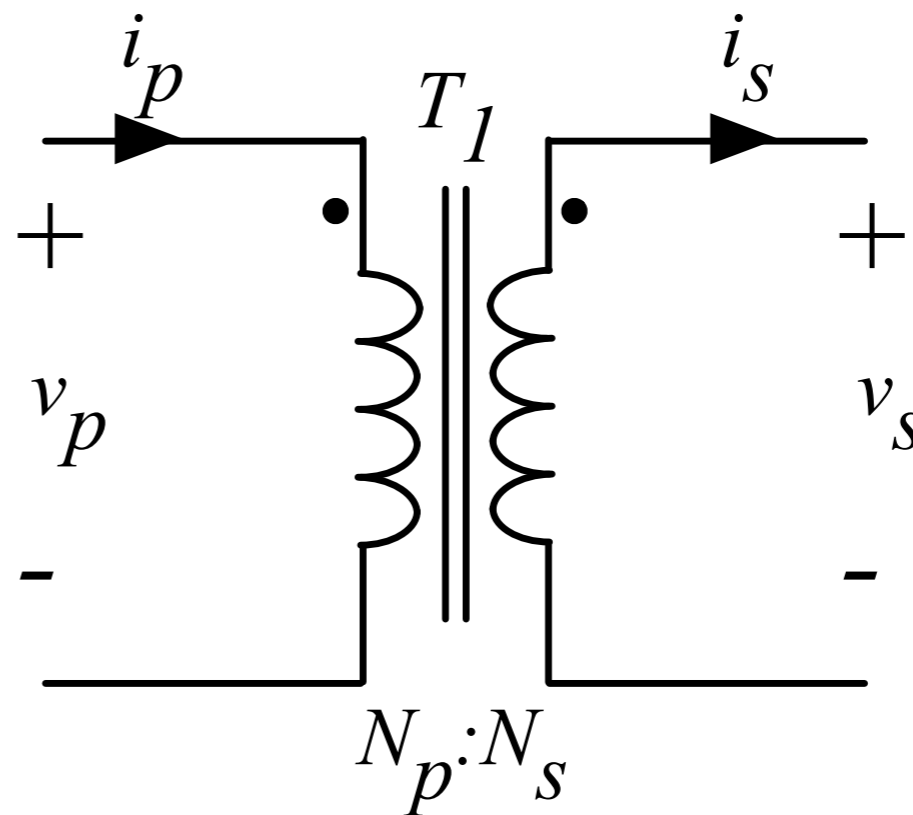


Principais relações nos transformadores

Relação 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).

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



Transformador com dois enrolamentos

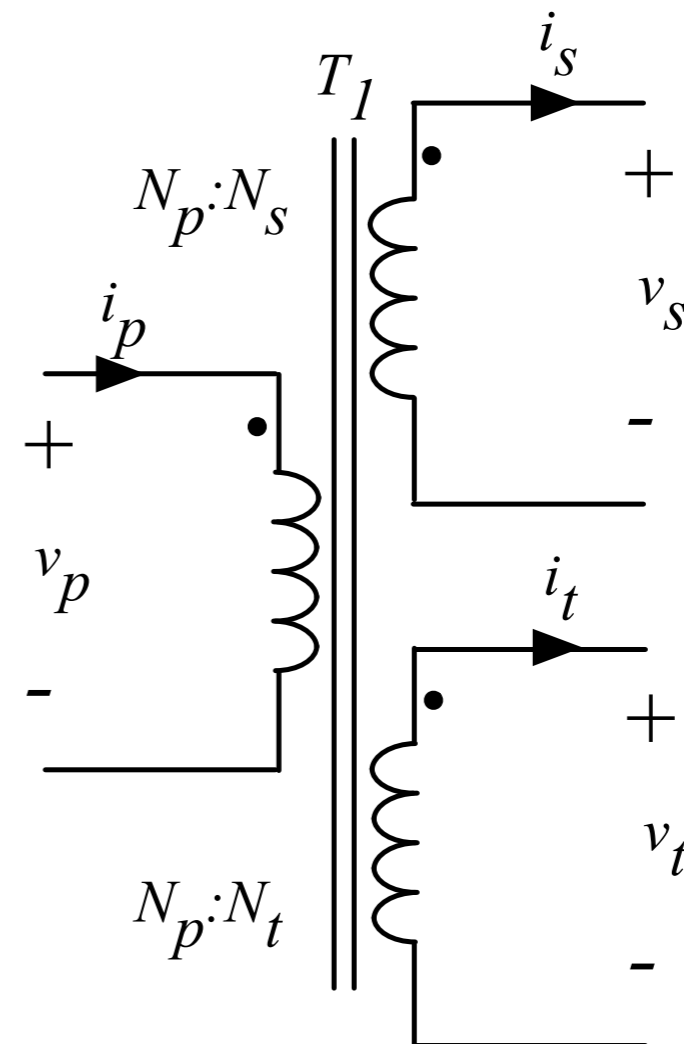
Principais relações nos transformadores

Relação 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).

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

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



Transformador com três enrolamentos

Principais relações nos transformadores

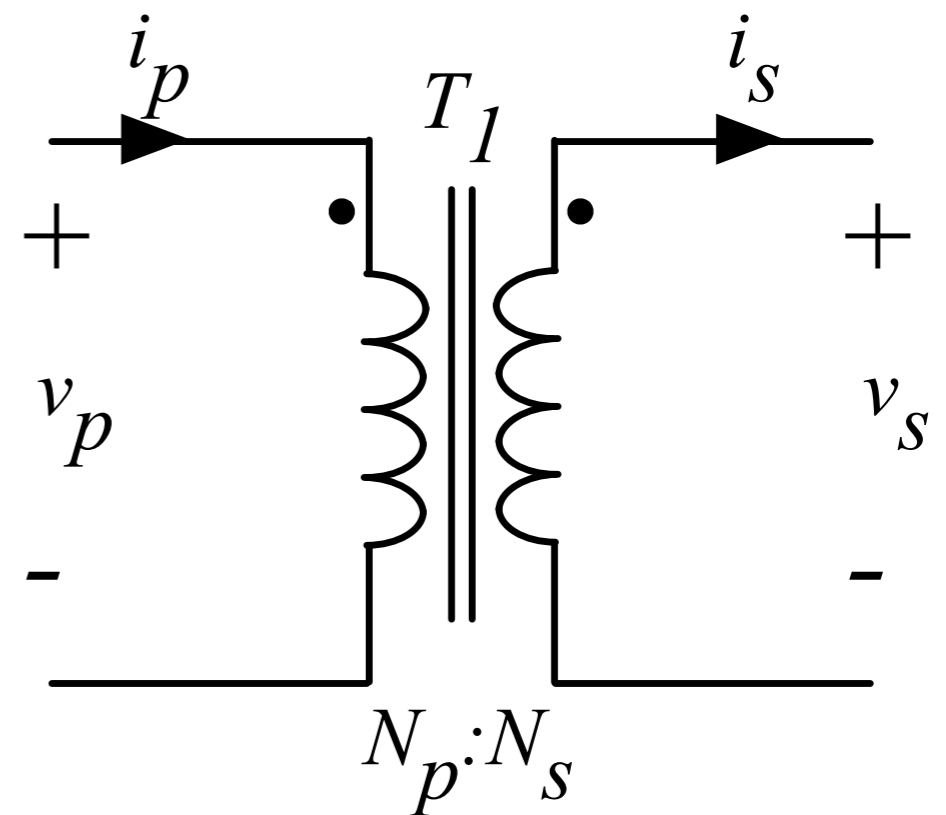
Relação entre as tensões de entrada e de saída:

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

Para mais enrolamentos:

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

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



Transformador com dois enrolamentos

Principais relações nos transformadores

Relação entre as correntes de entrada e saída:

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

Importante:

A relação entre as correntes é o inverso da relação da transformação.

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

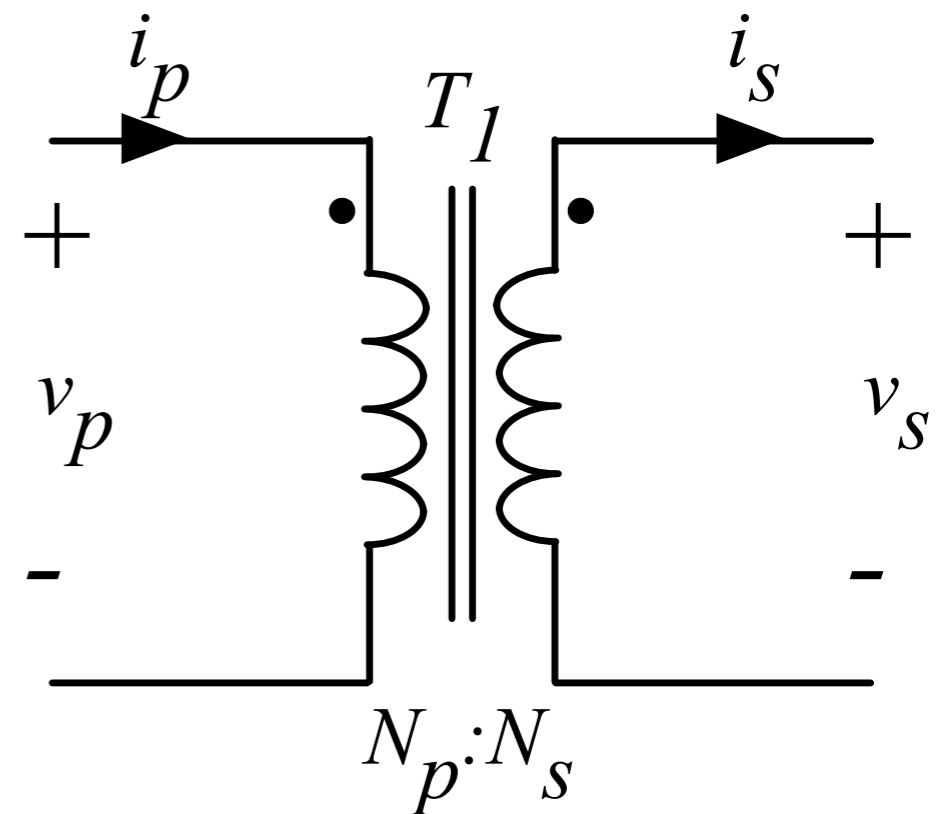


Relação direta

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



Relação inversa



Transformador com dois enrolamentos

Tipos de transformadores

Classificação dos transformadores:

- Relação de transformação - Em termos de relação de transformação, os transformadores podem ser abaixadores ou elevadores, ou ainda, ter relação de transformação unitária, 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.



Exemplos de elementos magnéticos

Fonte: <https://www.magmattec.com.br>

Tipos de transformadores

Transformadores abaixadores:

$$RT > 1$$

220 V / 12 V



Exemplo de transformador abaixador

Fonte: <https://www.makehero.com>

Tipos de transformadores

Transformadores elevadores:

$$RT < 1$$

220 V / 380 V →



Exemplo de transformador elevador

Fonte: <https://nucleoats.ind.br>

Tipos de transformadores

Transformadores isoladores:

$$RT = 1$$

220 V / 220 V →




Exemplo de transformador isolador
Fonte: <https://www.eletopecas.com>

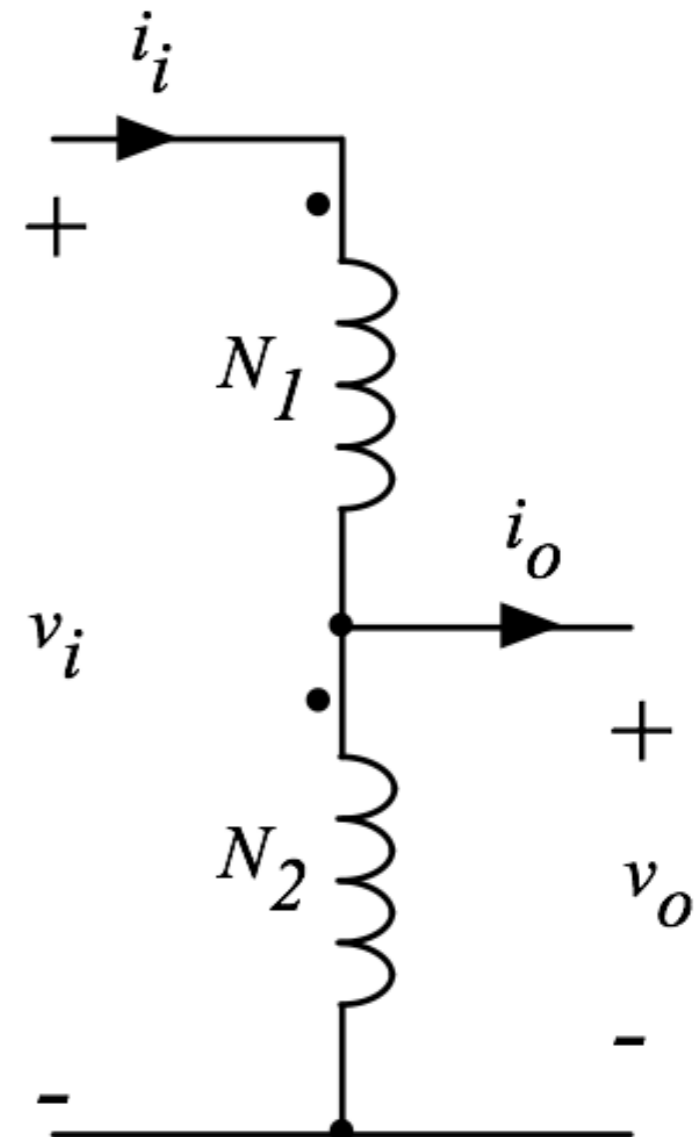
Tipos de transformadores

Autotransformadores:

$$N_1 = N_2$$

$$V_o = \frac{V_i}{2}$$

220 V / 110 V 



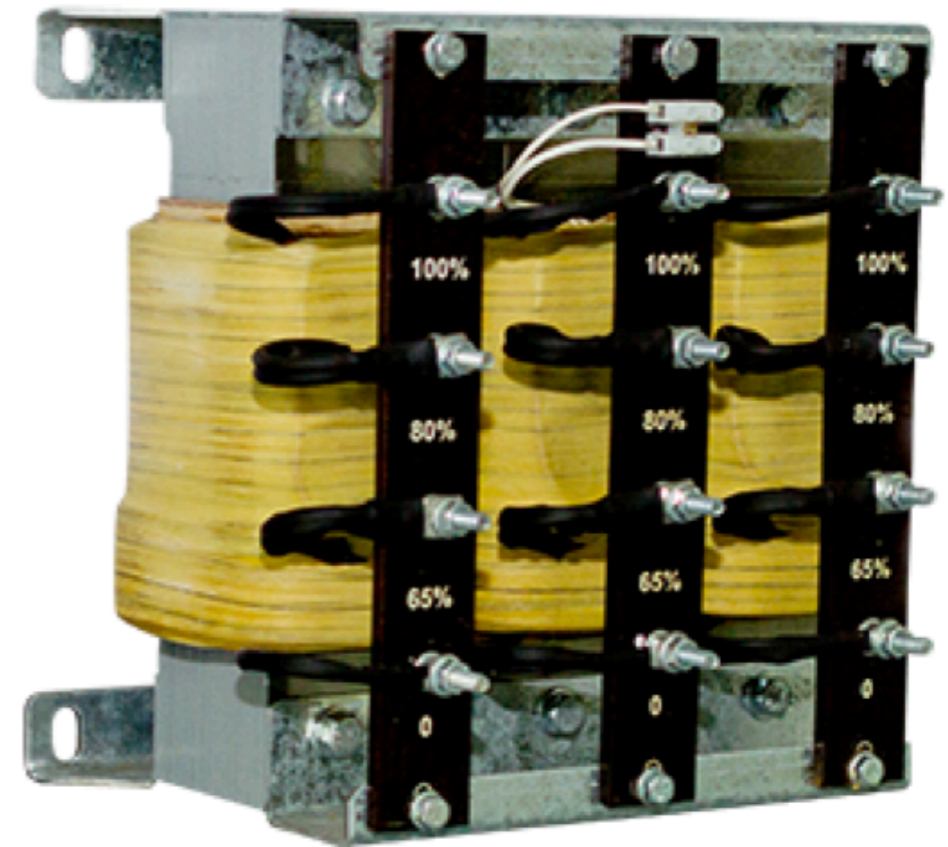
Autotransformador com uma derivação

Tipos de transformadores

Autotransformadores:

$$RT \begin{cases} < 1 \\ = 1 \\ > 1 \end{cases}$$

380 V / 380, 304, 247, 0 V →

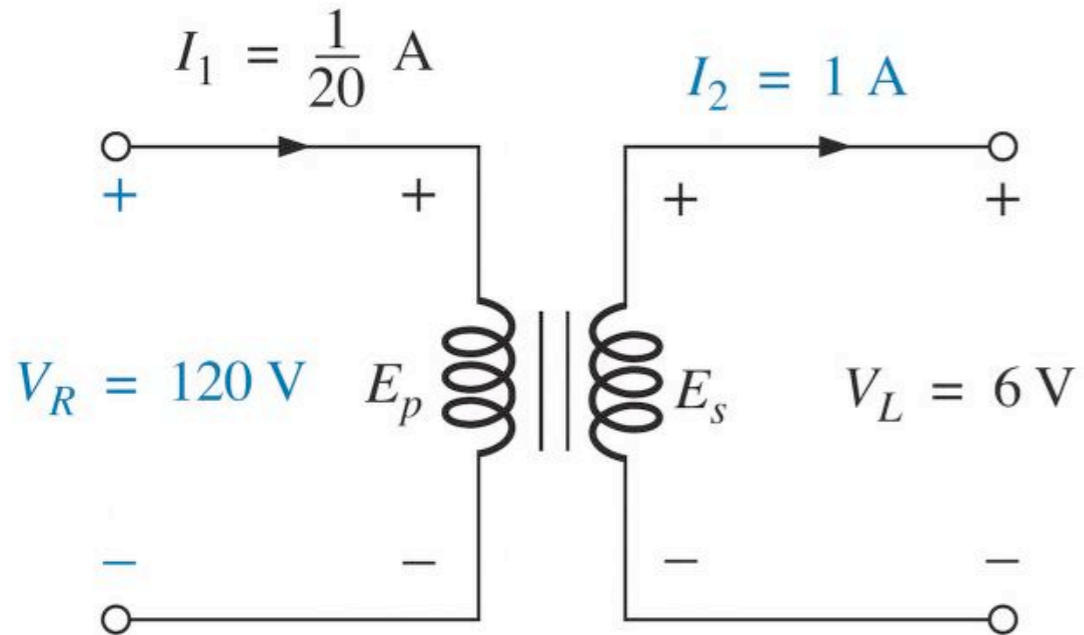


Exemplo de autotransformador

Fonte: <https://www.wisetransformadores.com.br>

Tipos de transformadores

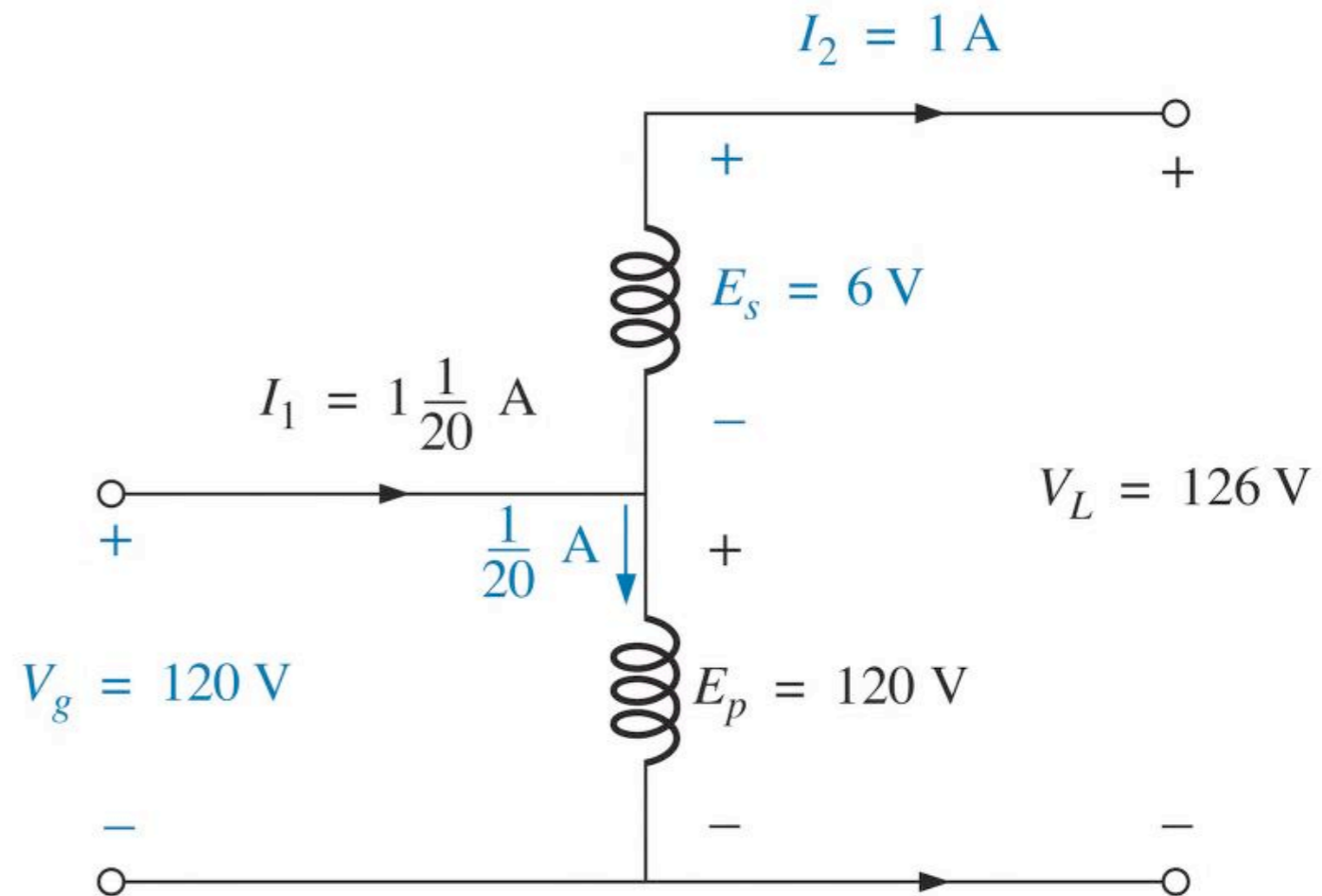
Autotransformadores:



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

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

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



Transformador comum versus autotransformador

Fonte: (Boylestad, 2012)

Tipos de transformadores

Transformadores para fontes chaveadas:

$$RT \begin{cases} < 1 \\ = 1 \\ > 1 \end{cases}$$

220 V / 24 V



Exemplo de transformador para fontes chaveadas

Fonte: <https://chipsen.com>

Tipos de transformadores

Transformadores para casamento de impedâncias:

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

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

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

$$500 \, \Omega / 4 + 4 \, \Omega \quad \rightarrow$$



Exemplo de transformador isolador
Fonte: <https://www.hayama.com.br>

Tipos de transformadores

Transformadores para medição:



Exemplo de transformadores de potencial (TP)

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>

Exemplo de transformadores de corrente (TC)

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>

<https://www.viewtech.ind.br>

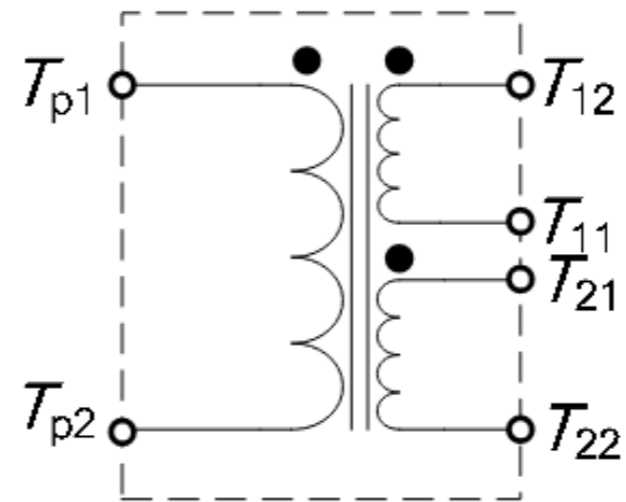
<https://www.choicetech.com.br>



Tipos de transformadores

Transformadores de pulsos:

$27\text{ V} / 5\text{ V}$




Exemplo de transformador de pulso

Fonte: <https://www.supplier.ind.br>

Tipos de transformadores

Transformadores trifásicos:

380 V / 220 V 



Exemplo de transformador trifásico
Fonte: <https://www.mistervolt.com.br>

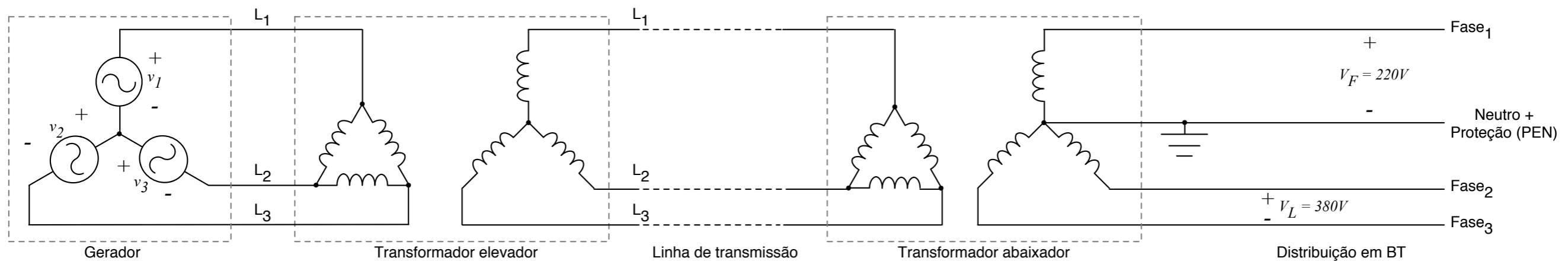
Tipos de transformadores

Sistema de distribuição de energia elétrica:

- Tensão de fase - valor de tensão entre os condutores fase e neutro, 220 V em SC;
- Tensão de linha - valor da tensão entre duas fases, 380 V em SC.

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

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

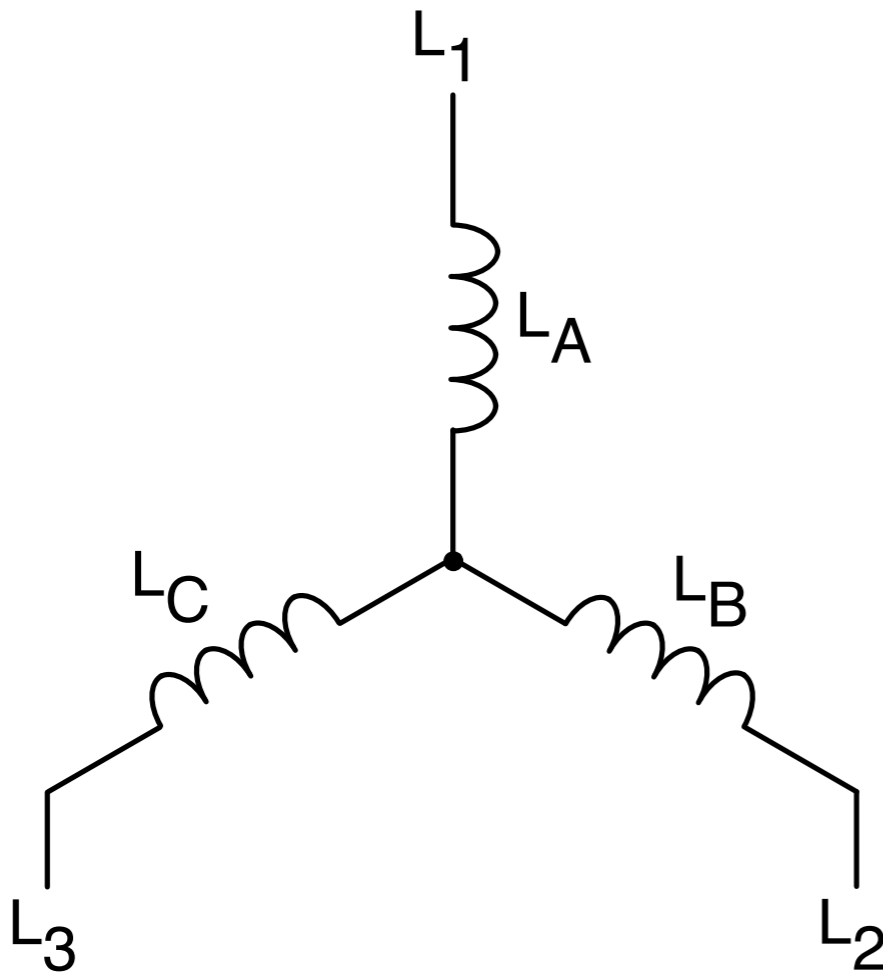


Sistema típico de rede de distribuição de energia elétrica

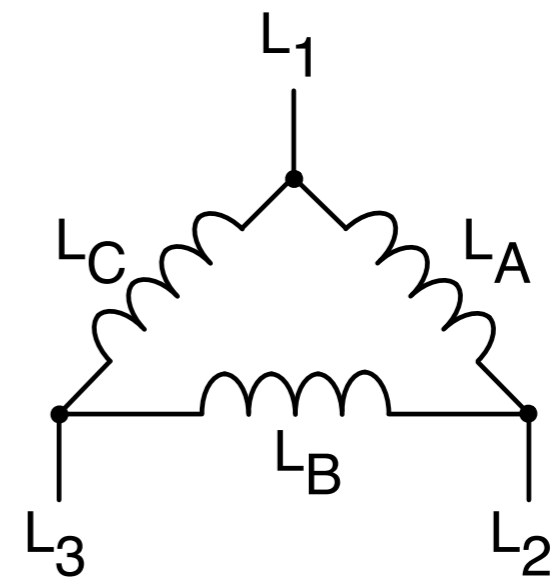
Tipos de transformadores

Ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico:

- Ligação em triângulo (delta) - nesta ligação a tensão de linha será igual à tensão de fase, mas a corrente de linha será 1,73 vezes maior do que a corrente de fase;
- Ligação em estrela - nesta ligação a tensão de linha será 1,73 vezes maior do que a tensão de fase, enquanto a corrente de fase e de linha serão iguais.



Ligação em estrela

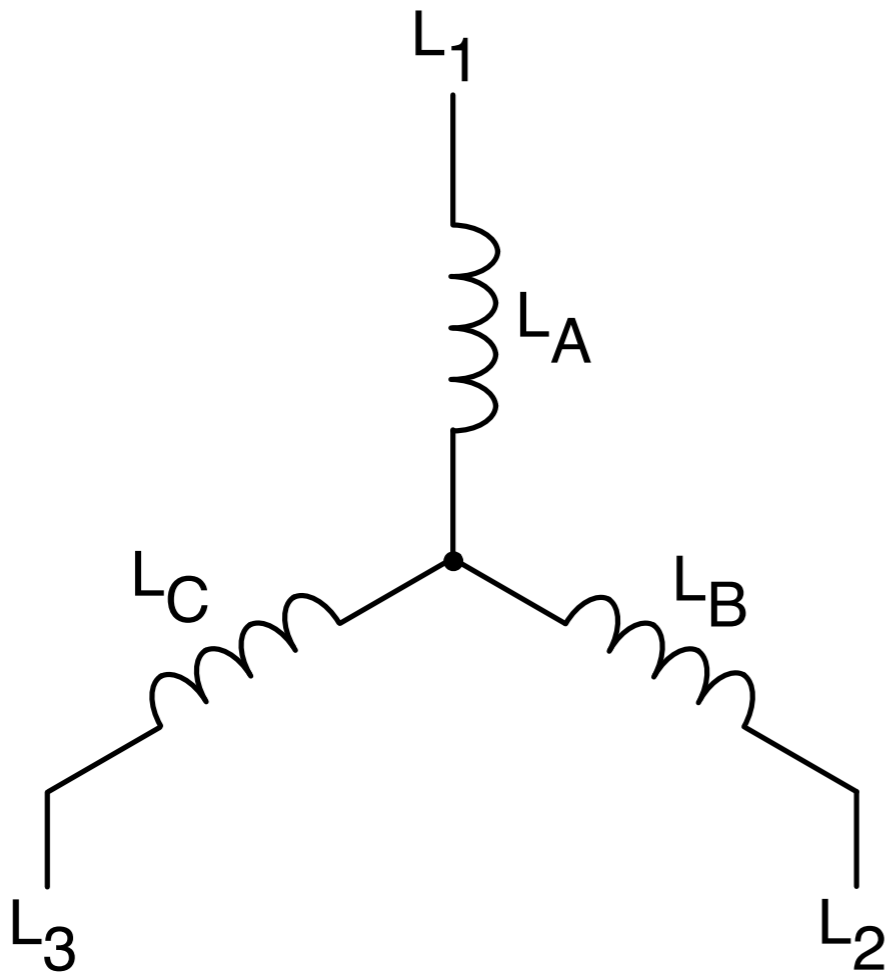


Ligação em triângulo

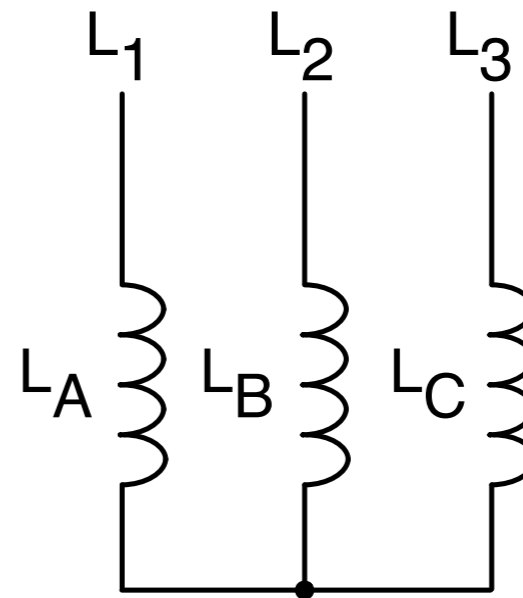
Tipos de transformadores

Ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico:

- Ligação em estrela - nesta ligação a tensão de linha será 1,73 vezes maior do que a tensão de fase, enquanto a corrente de fase e de linha serão iguais.



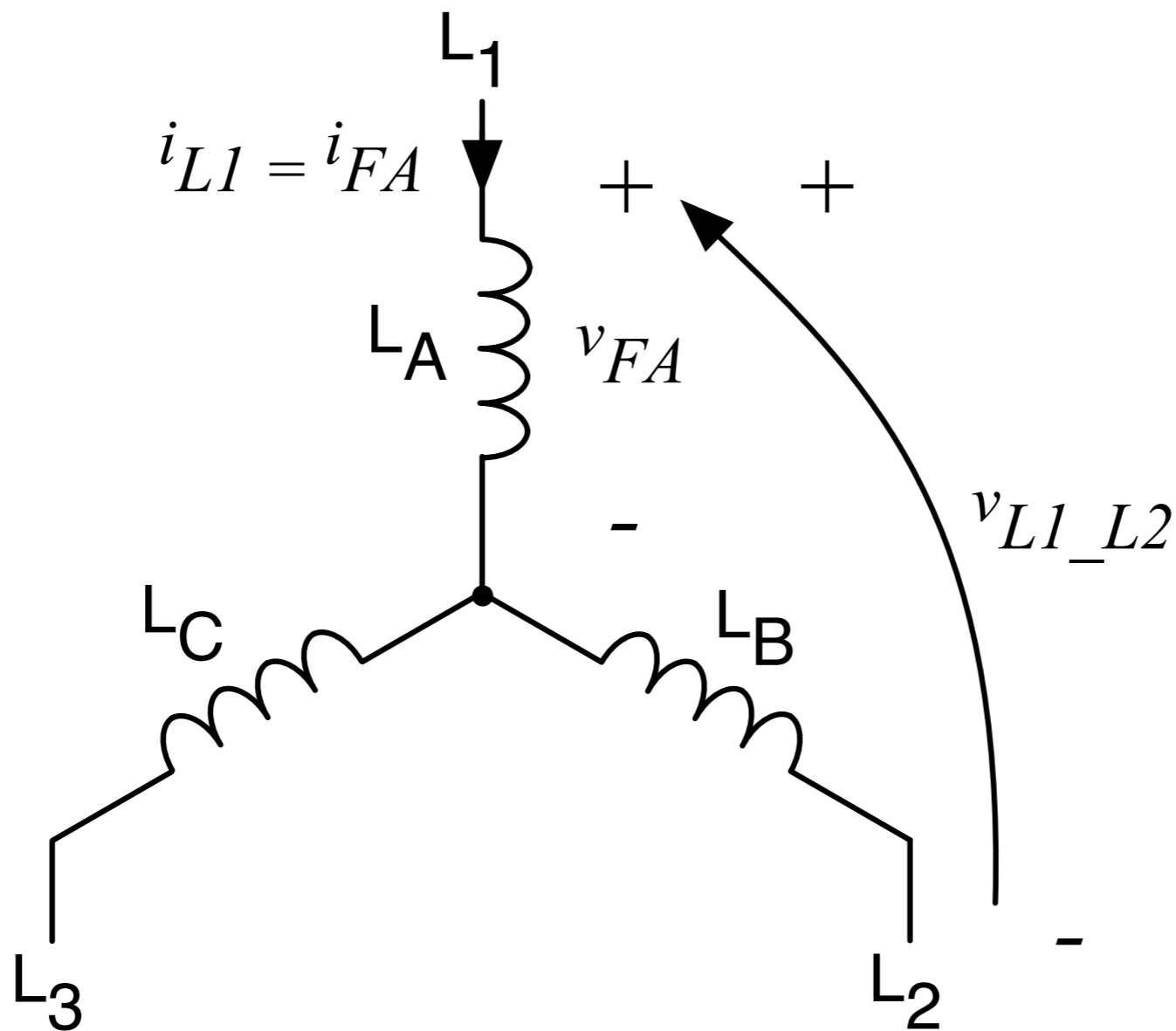
Ligação em estrela



Tipos de transformadores

Ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico:

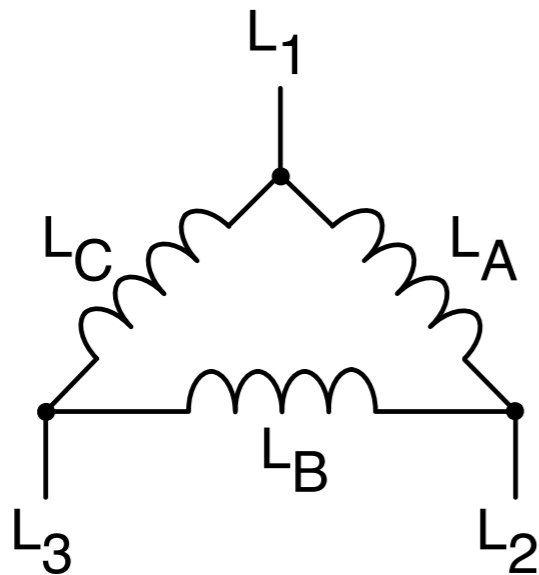
- Ligação em estrela - nesta ligação a tensão de linha será 1,73 vezes maior do que a tensão de fase, enquanto a corrente de fase e de linha serão iguais.



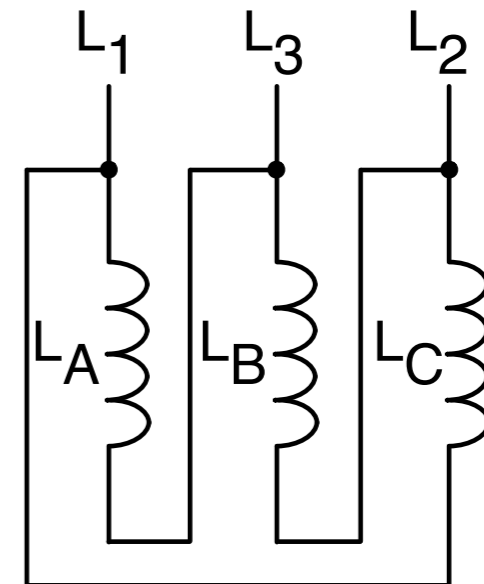
Tipos de transformadores

Ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico:

- Ligação em triângulo (delta) - nesta ligação a tensão de linha será igual à tensão de fase, mas a corrente de linha será 1,73 vezes maior do que a corrente de fase.



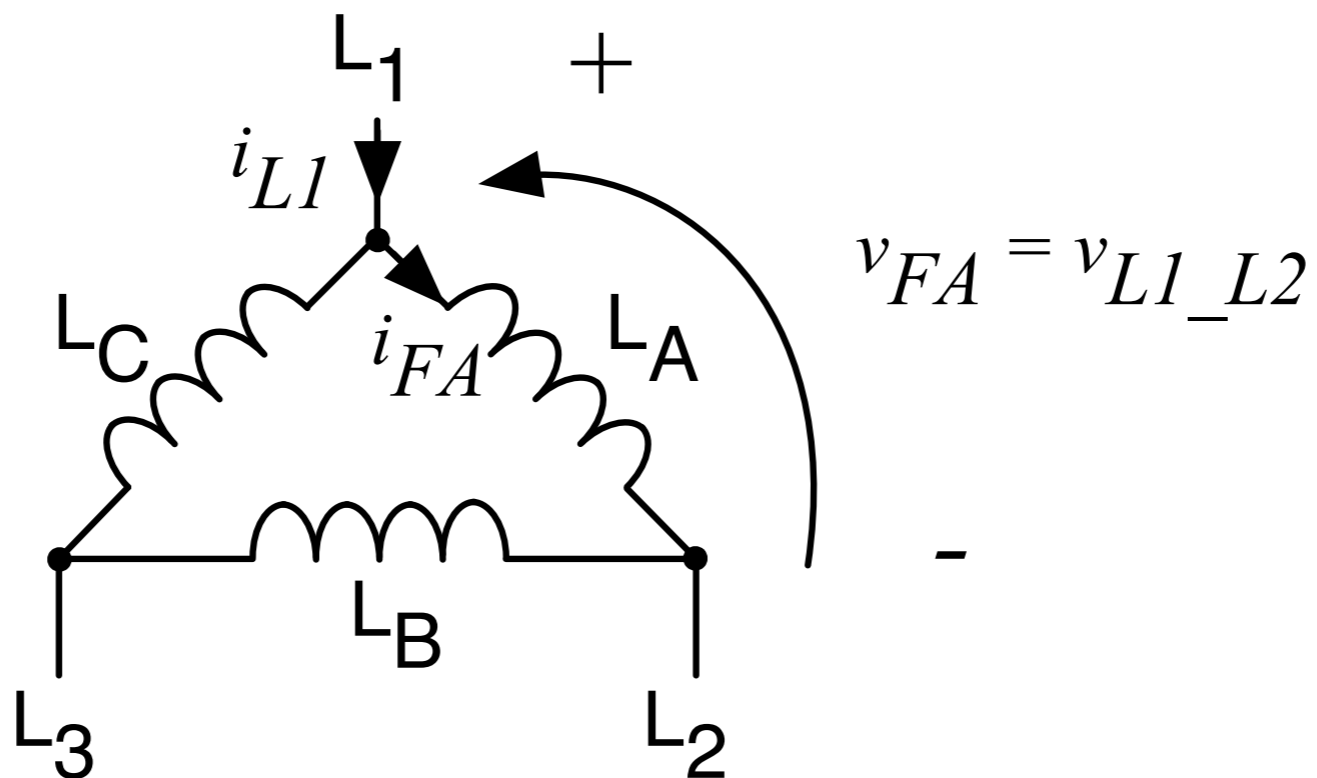
Ligação em triângulo



Tipos de transformadores

Ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico:

- Ligação em triângulo (delta) - nesta ligação a tensão de linha será igual à tensão de fase, mas a corrente de linha será 1,73 vezes maior do que a corrente de fase.



Tipos de transformadores

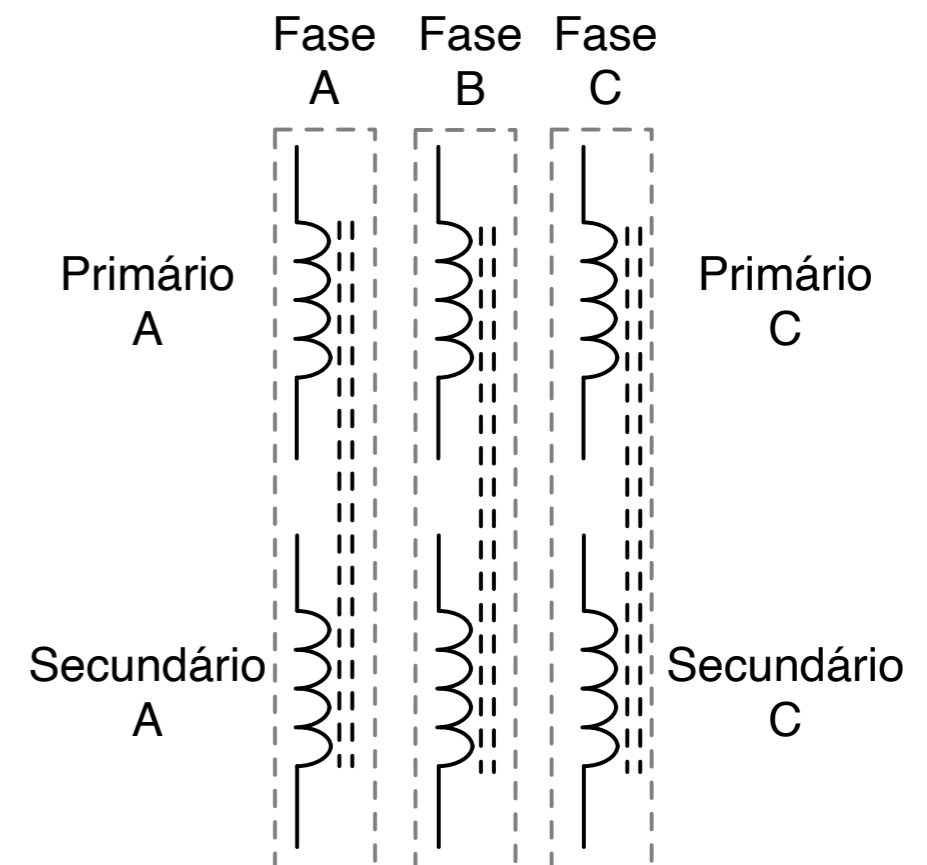
Potência do transformador trifásico:

- A potência do transformador é expressa em VA ou kVA e representa a potência total considerando as 3 fases.

$$P_{Total} = 3 \cdot P_{Fase} [W] \quad \rightarrow \quad \text{Potência ativa}$$

$$Q_{Total} = 3 \cdot Q_{Fase} [VAr] \quad \rightarrow \quad \text{Potência reativa}$$

$$S_{Total} = 3 \cdot S_{Fase} [VA] \quad \rightarrow \quad \text{Potência aparente}$$



Tipos de transformadores

Potência do transformador trifásico:

- Na ligação em estrela se tem:

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

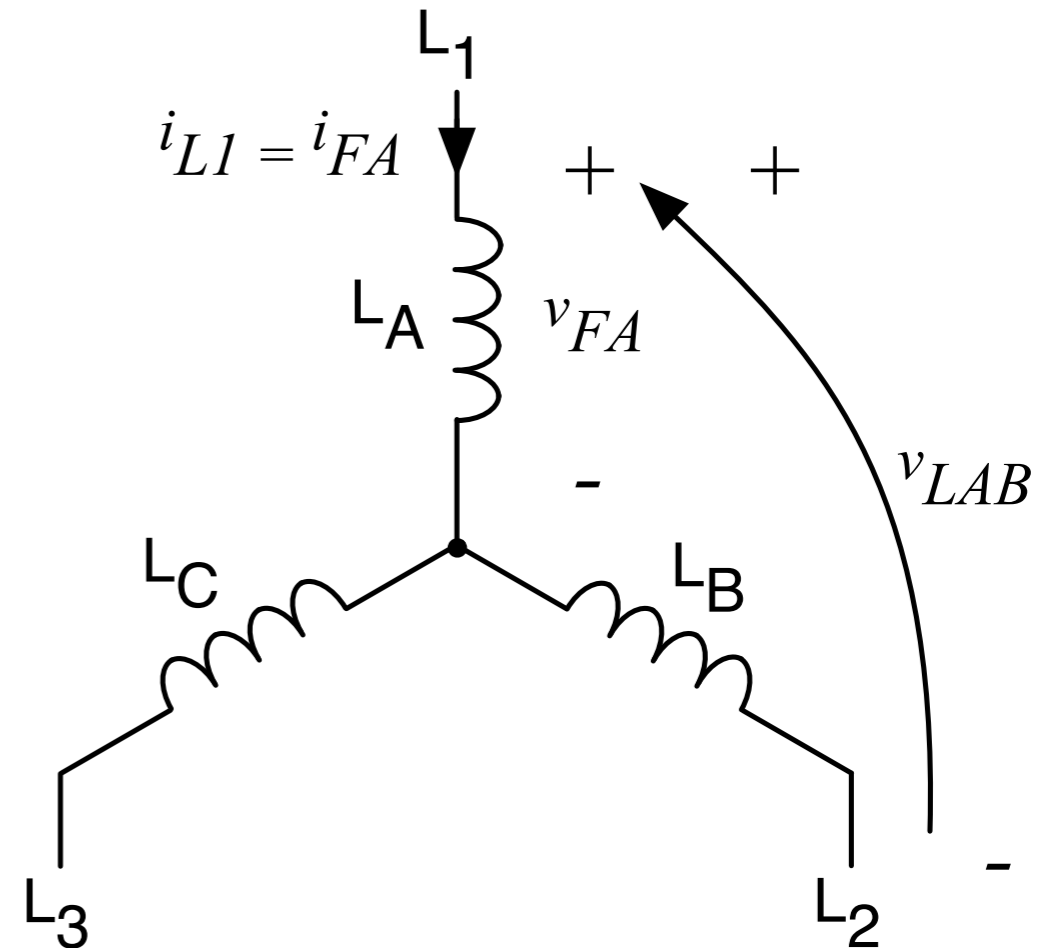
$$V_{Fase} = \frac{V_{Linha}}{\sqrt{3}} \text{ e } I_{Fase} = I_{Linha}$$

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

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



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



Tipos de transformadores

Potência do transformador trifásico:

- Na ligação em triângulo se tem:

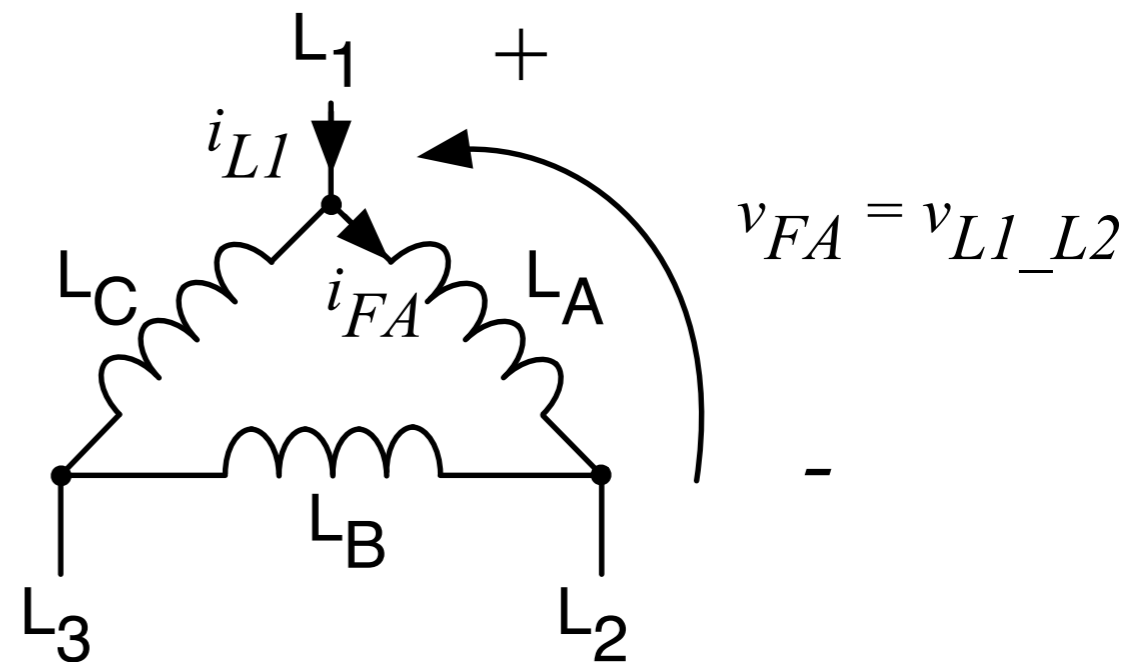
$$P_{Total} = 3 \cdot P_{Fase}$$

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

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

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

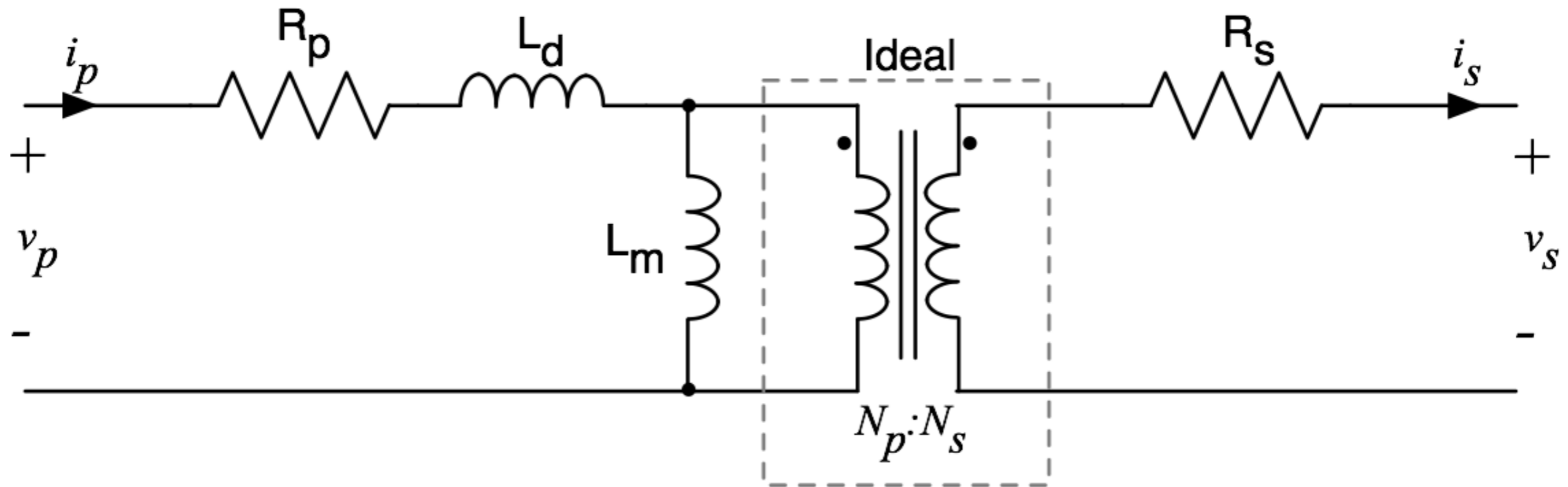
$$P_{Total} = \sqrt{3} \cdot V_{Linha} \cdot I_{Linha} \cdot \cos(\varnothing)$$



Parâmetros e ensaios de transformadores

Modelo elétrico de transformadores:

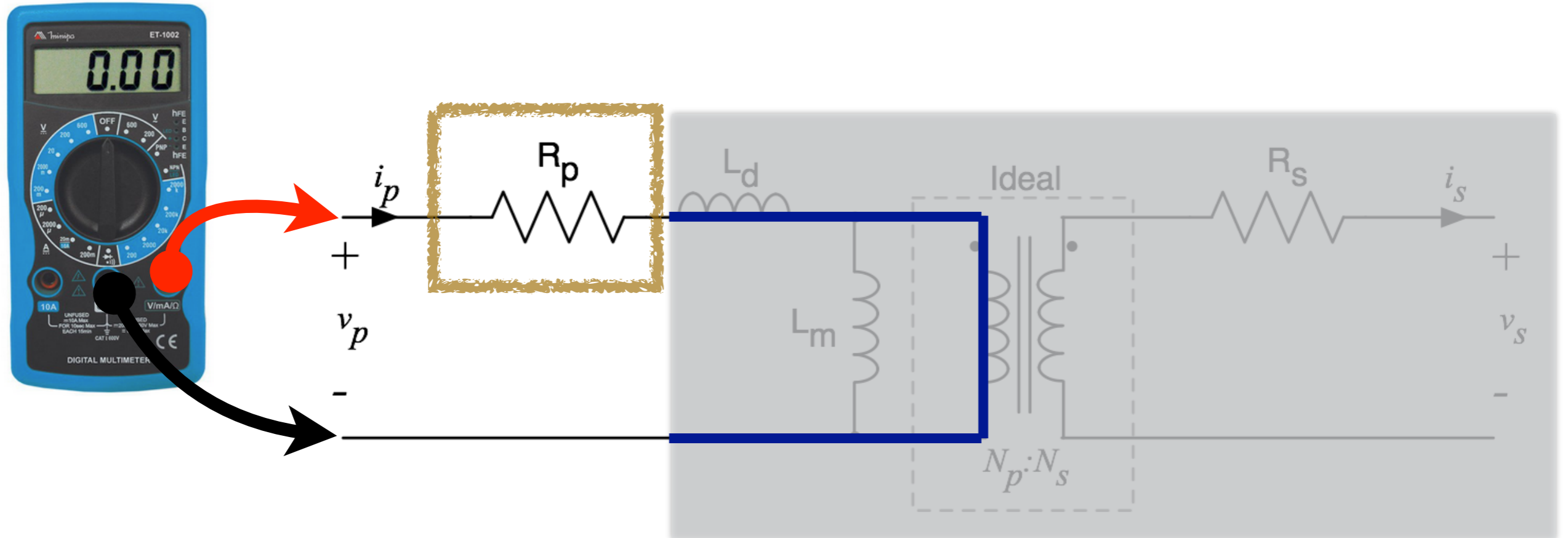
- R_p - Resistência dos condutores do primário;
- R_s - Resistência dos condutores do secundário;
- L_d - Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário;
- L_m - Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário;
- $N_p:N_s$ - Transformador ideal com a relação de transformação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



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

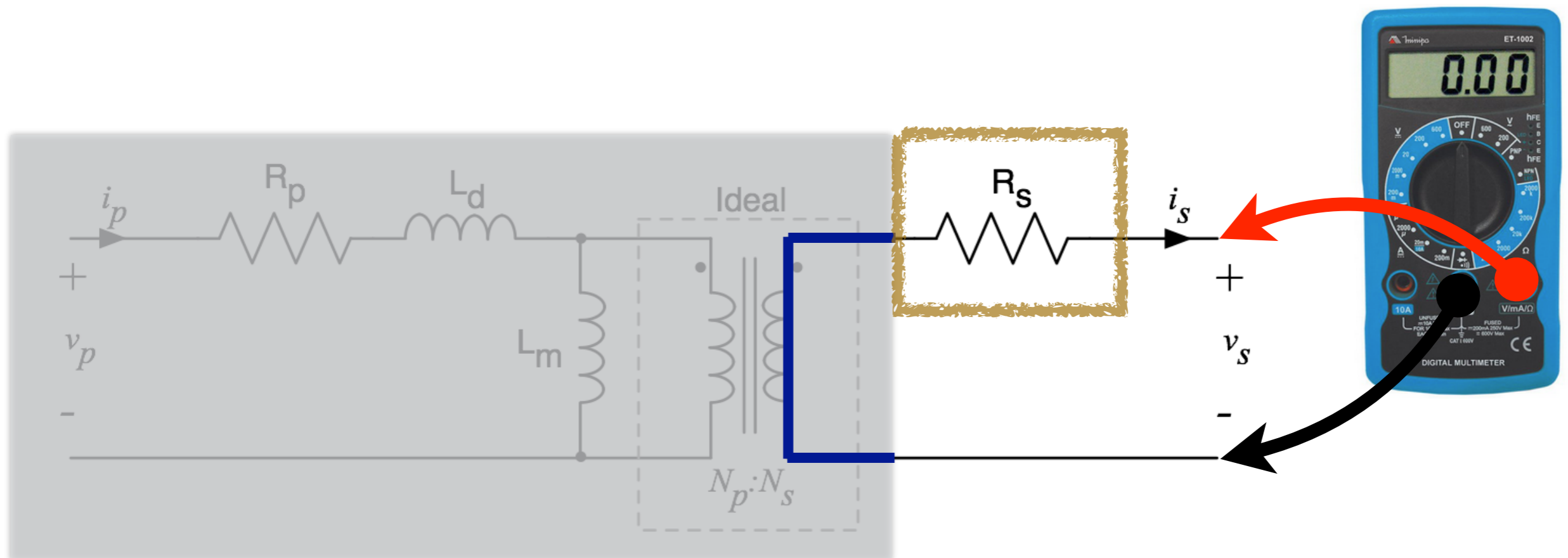
- R_p - Resistência dos condutores do primário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no primário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

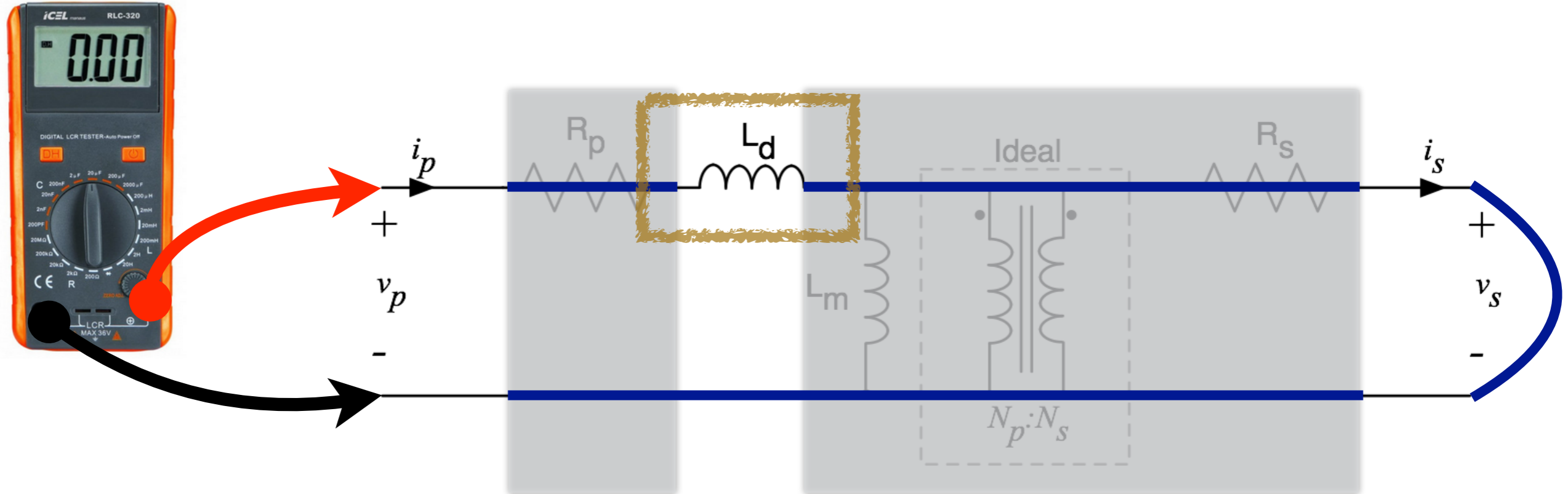
- R_s - Resistência dos condutores do secundário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no secundário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

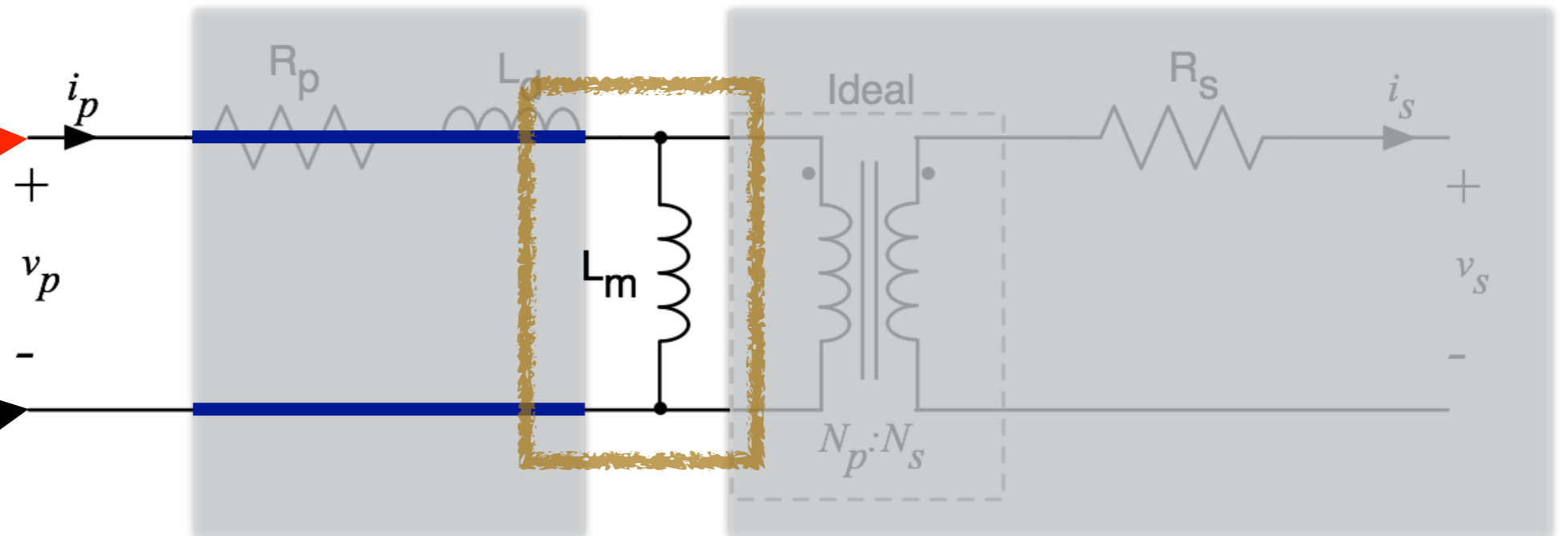
- L_d - Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário, deve ser medida curto-circuitando os terminais do secundário, medindo-se a indutância com um medidor RLC (multímetro ou ponte de medição de resistência, indutância e capacitância) pelo lado primário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

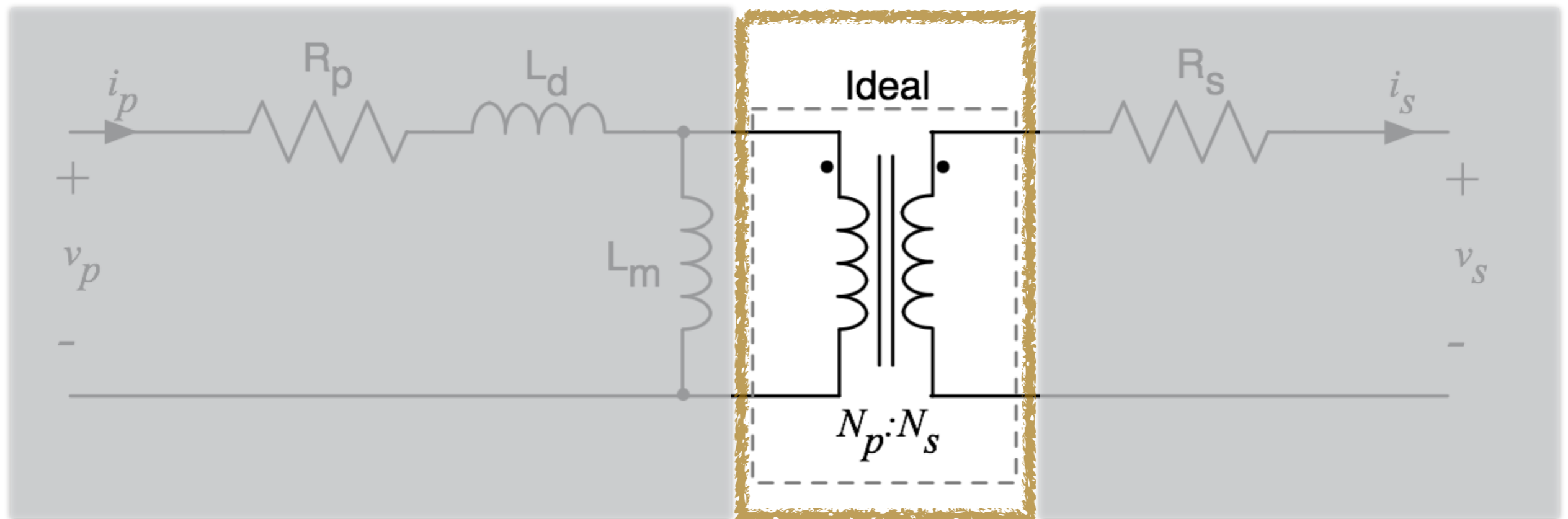
- L_m - Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário, será medida com um medidor RLC pelo lado primário, com o secundário em aberto.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

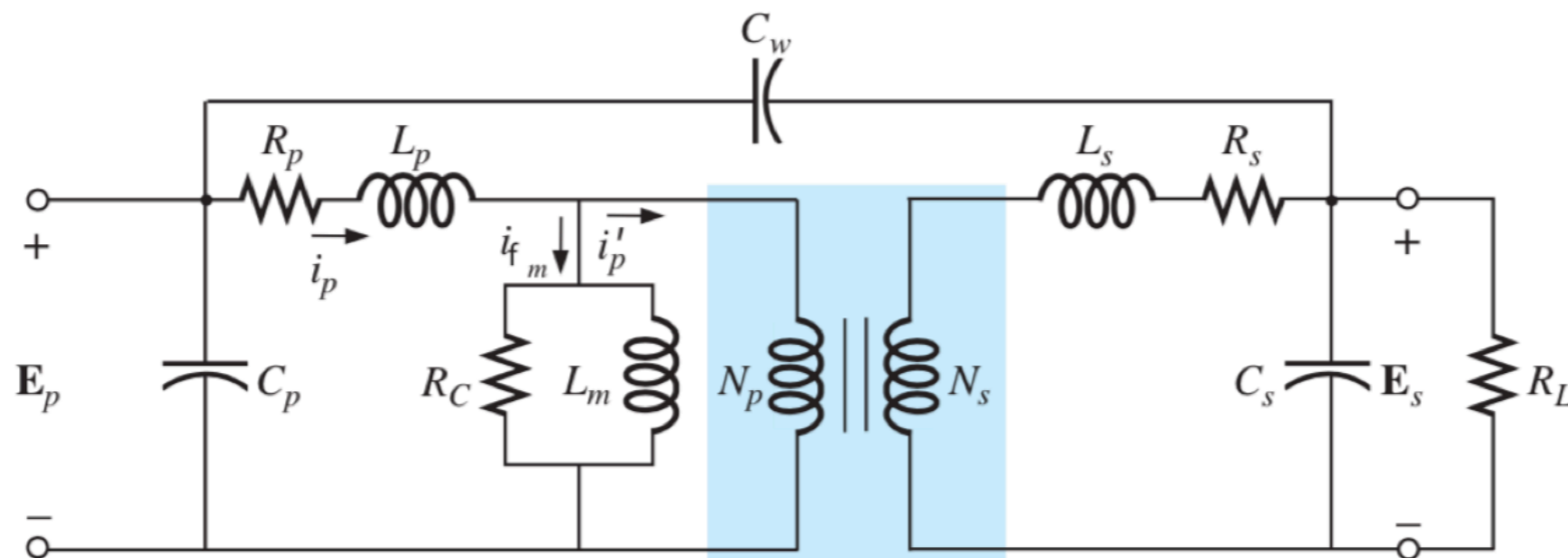
- $N_p:N_s$ - Transformador ideal com a relação de transformação nominal, obtida dividindo-se a tensão de entrada nominal pela tensão de saída nominal.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores para obtenção do circuito elétrico equivalente completo:

- Os parâmetros para o circuito elétrico equivalente do transformador podem ser obtidos realizando os ensaios de circuito aberto e curto-circuito;
- 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 .



Transformador ideal

Circuito elétrico equivalente completo do transformador

Fonte: (Boylestad, 2012)

Parâmetros e ensaios de transformadores

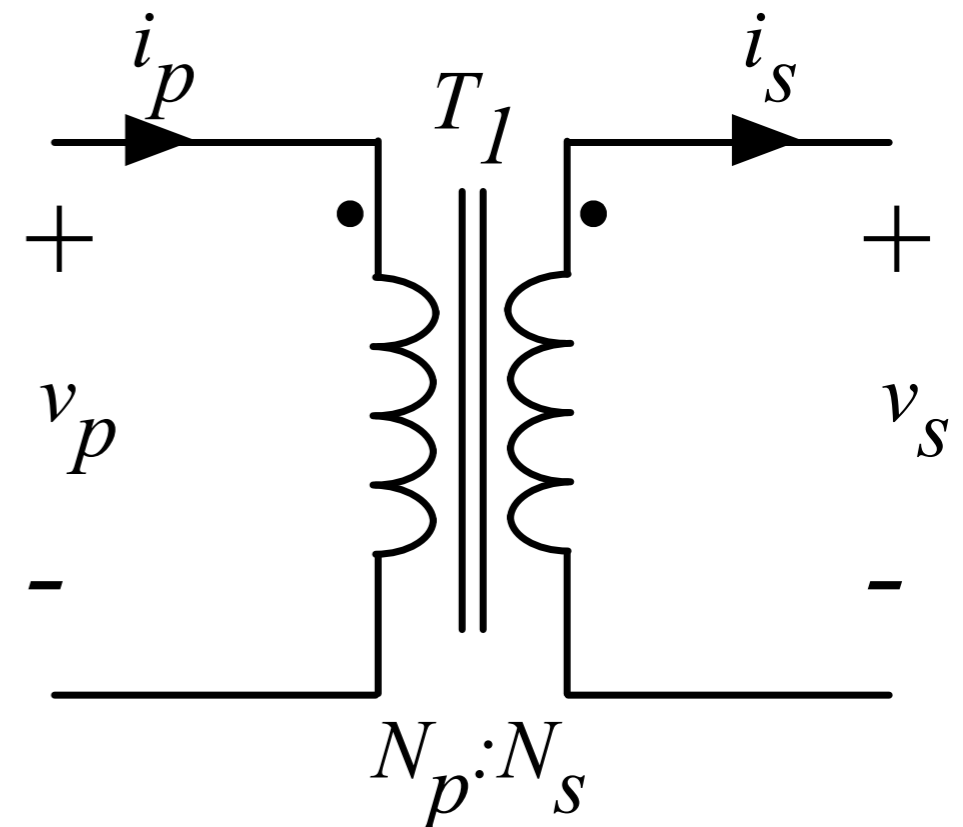
Regulação de um transformador:

- 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.

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

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.



Parâmetros e ensaios de transformadores

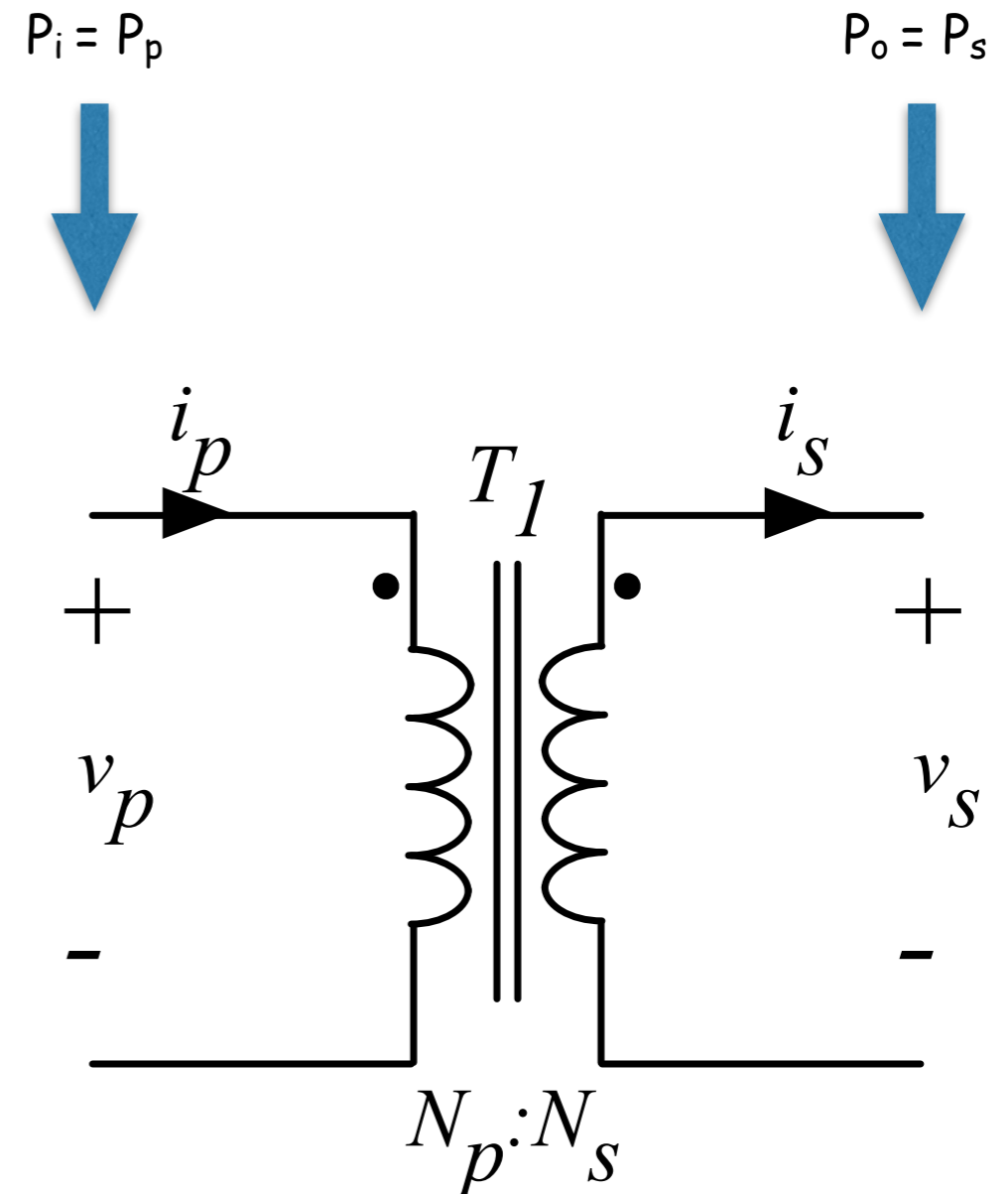
Rendimento de um transformador:

- A relação entre a potência na saída e a potência na entrada do transformador permite obter as perdas e representa o seu rendimento.

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

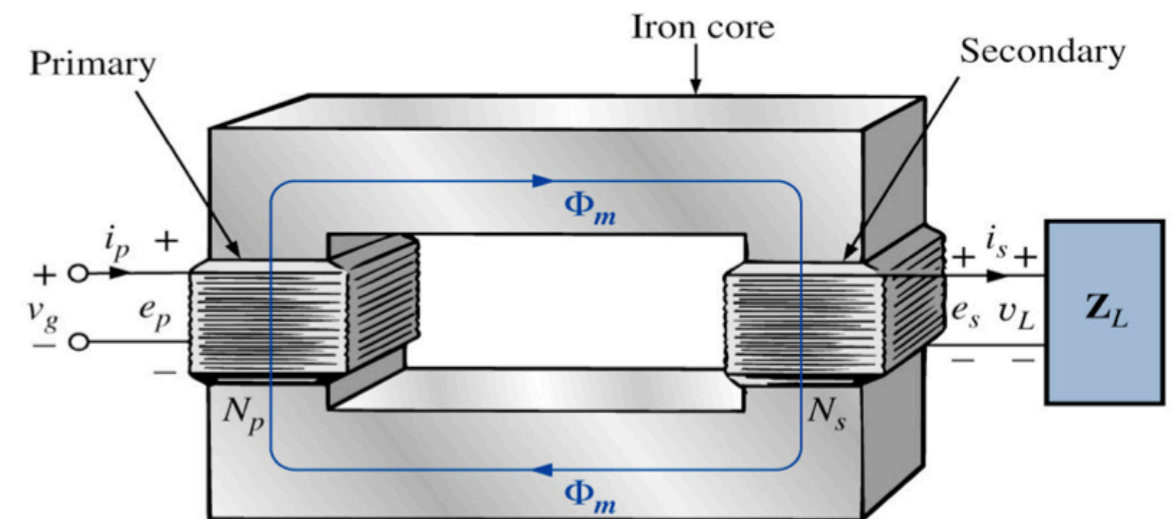
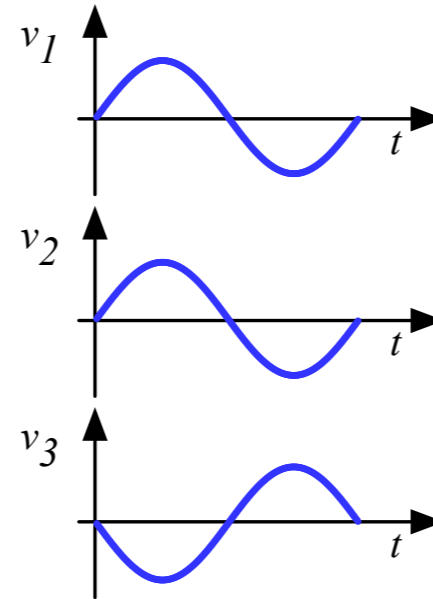
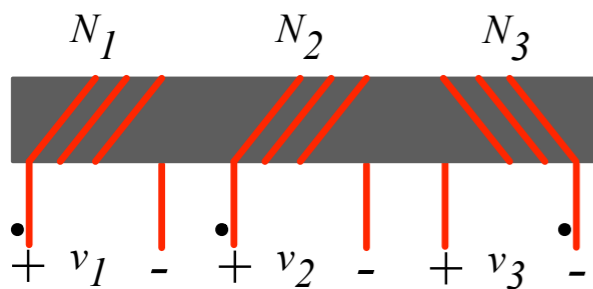
Onde:

- η - Rendimento do transformador;
- P_o - Potência ativa na saída do transformador;
- P_i - Potência ativa na entrada do transformador.



Próxima Aula

Laboratório de transformadores



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)