

Transformadores

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, junho de 2021.

Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos

O material do curso está disponível em:

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



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



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.
4. Parâmetros e ensaios de transformadores:
 - Modelo elétrico prático de um transformador;
 - Ensaios de transformadores;
 - Regulação de transformadores.



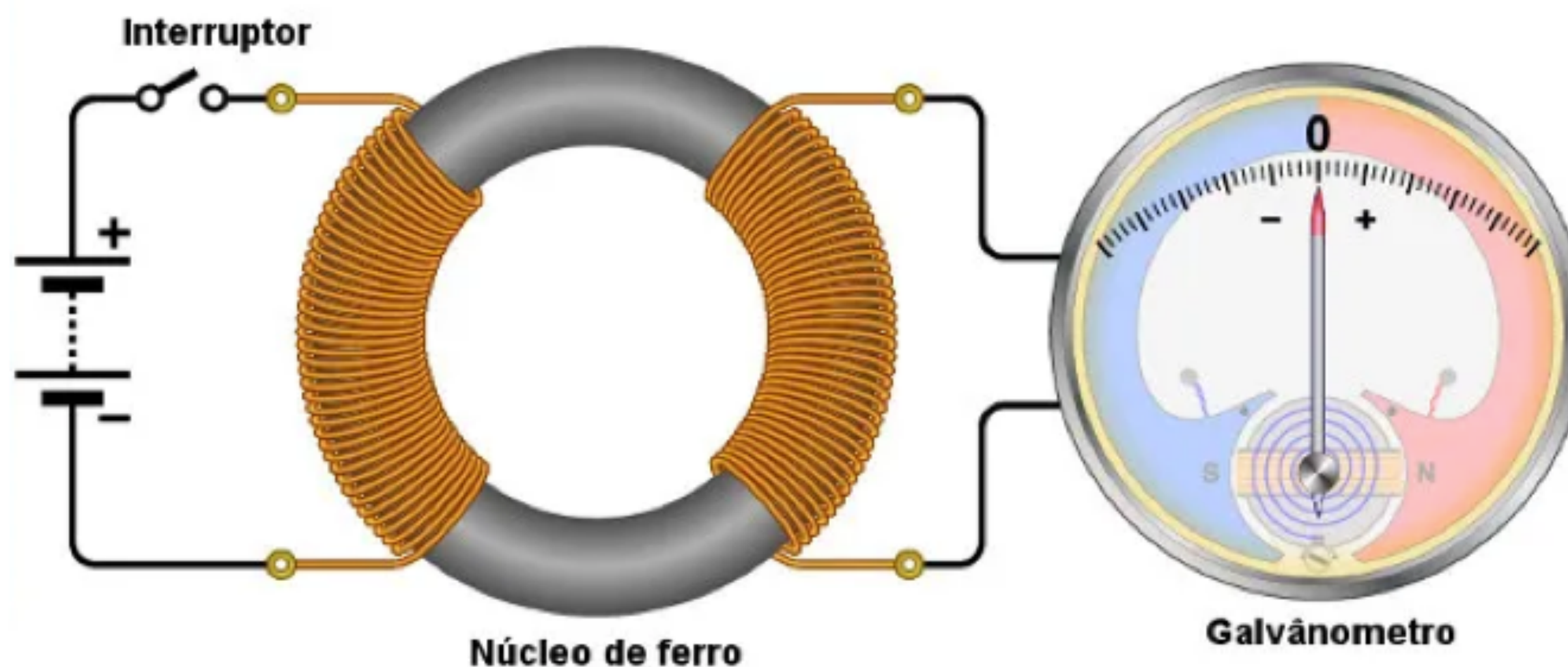
O uso de transformadores é comum nos circuitos e equipamentos eletrônicos.



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>

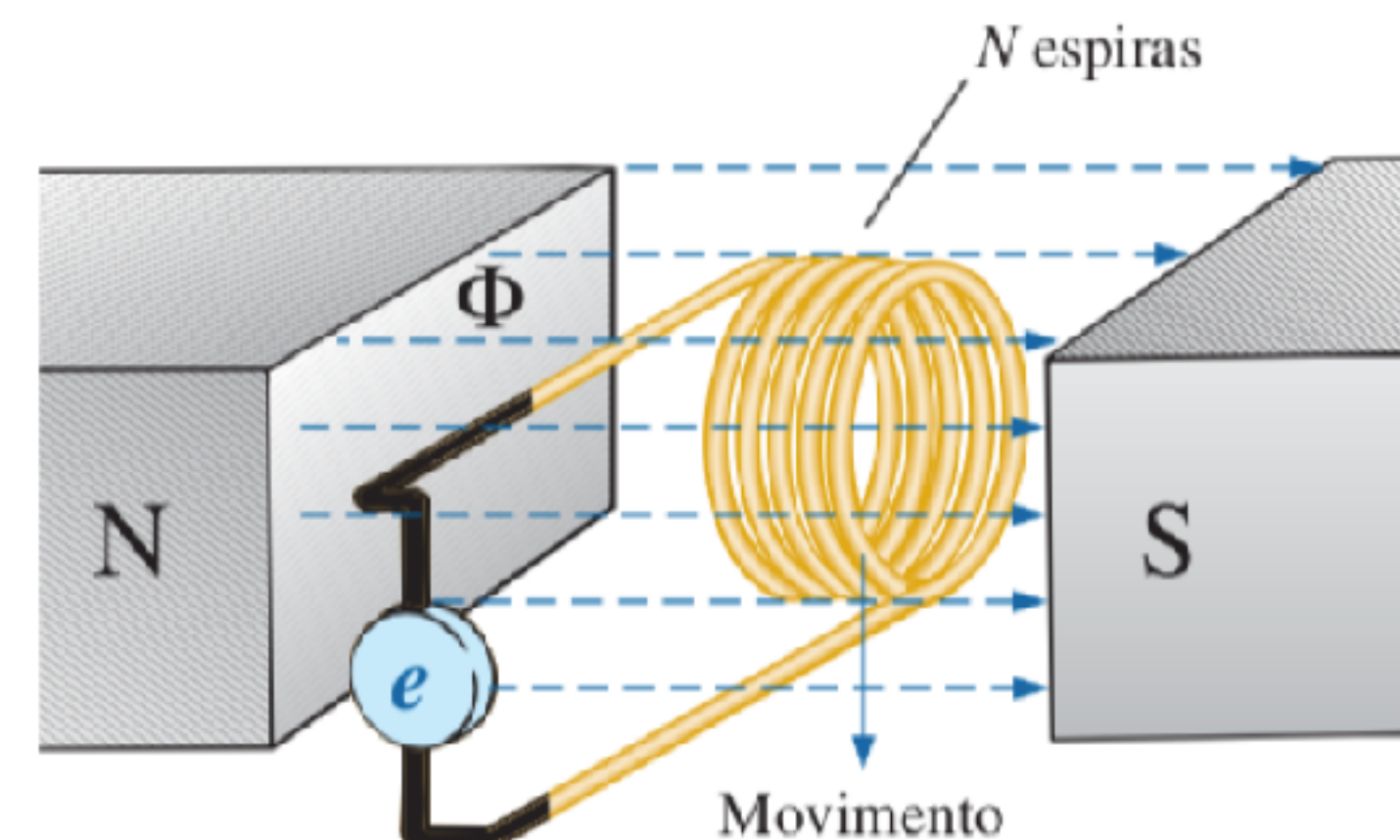
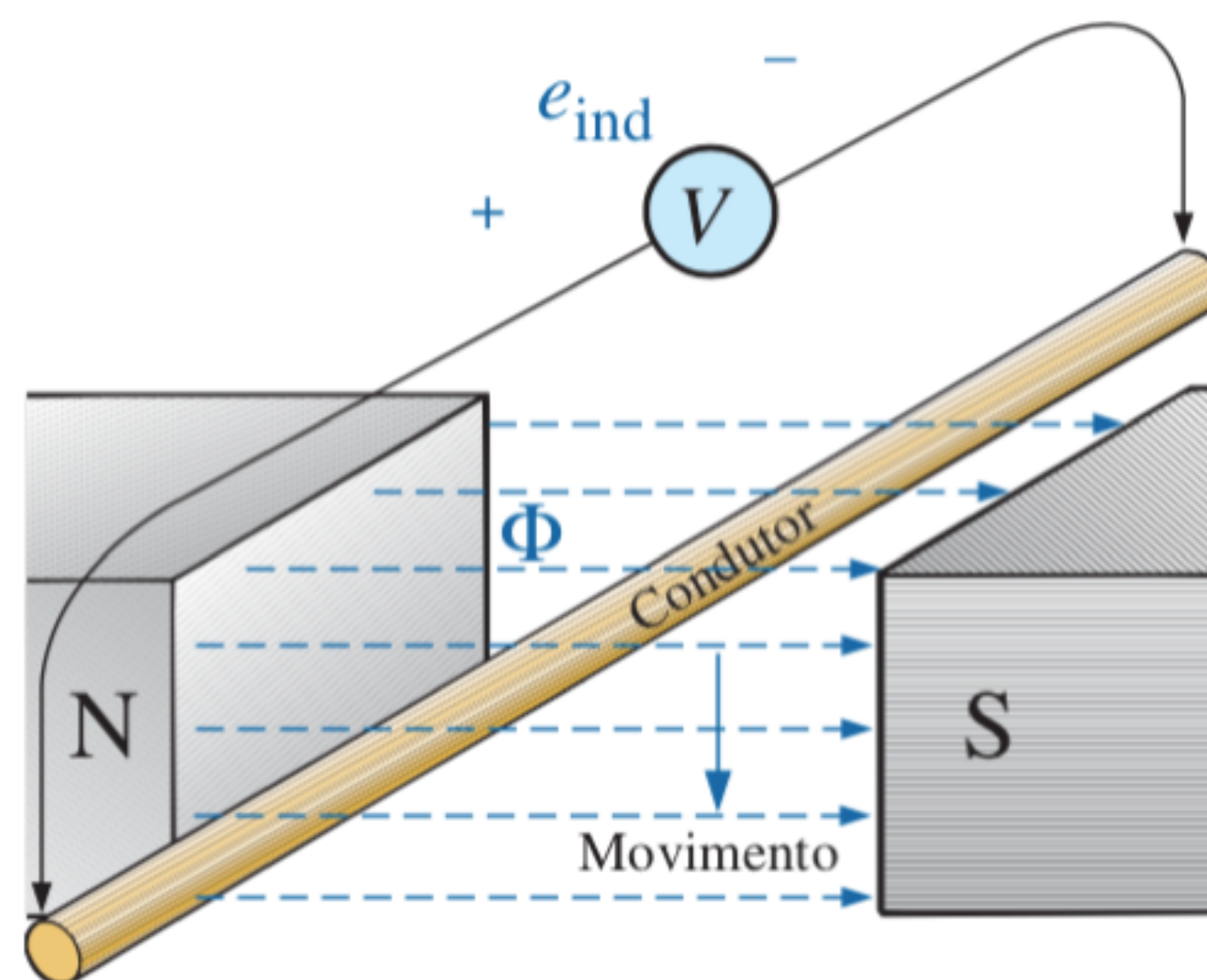
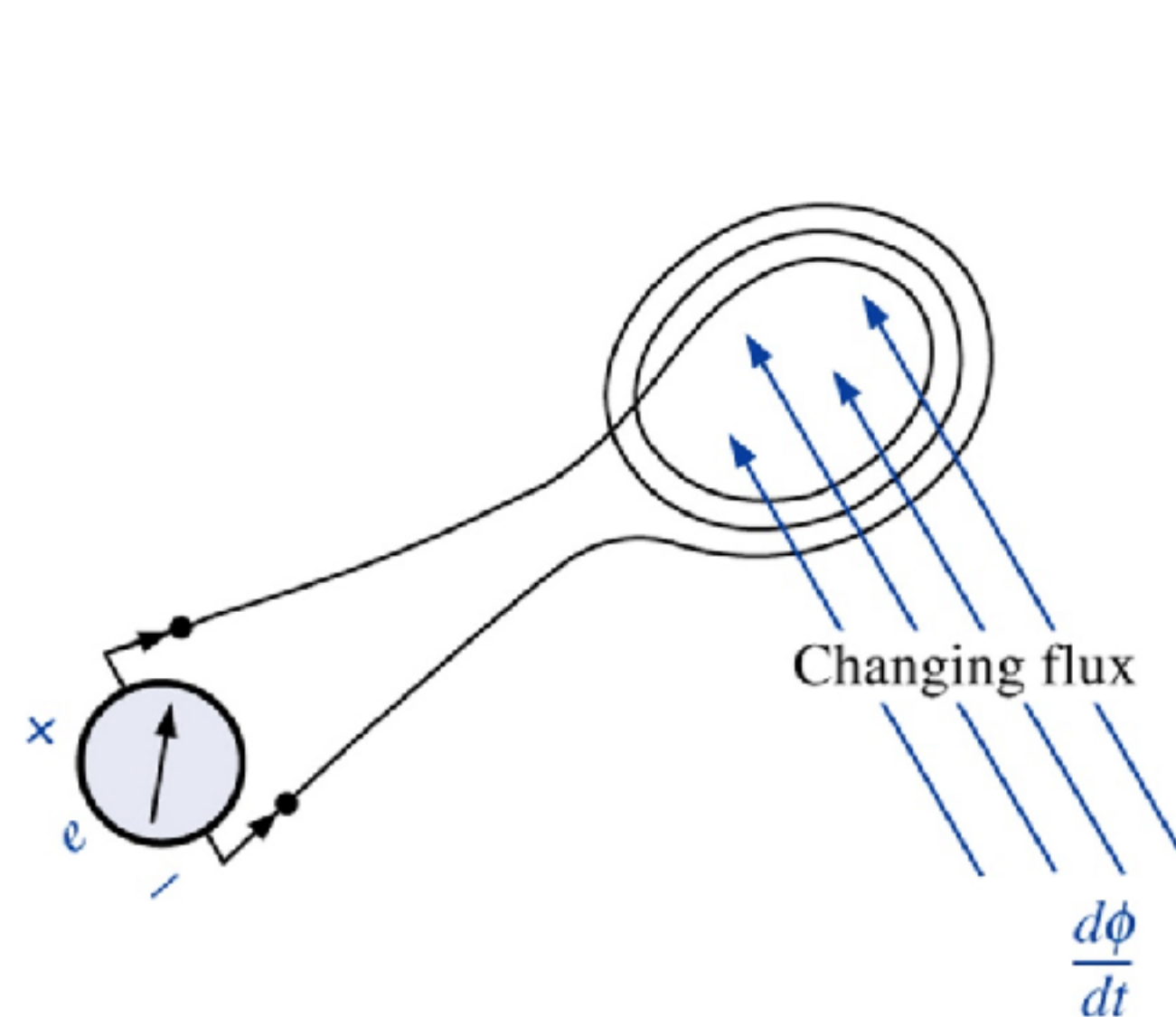
Princípio de funcionamento dos transformadores

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

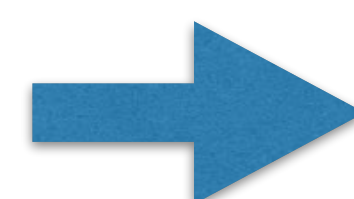
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Transformador:

- Aplicando a Lei de Faraday:

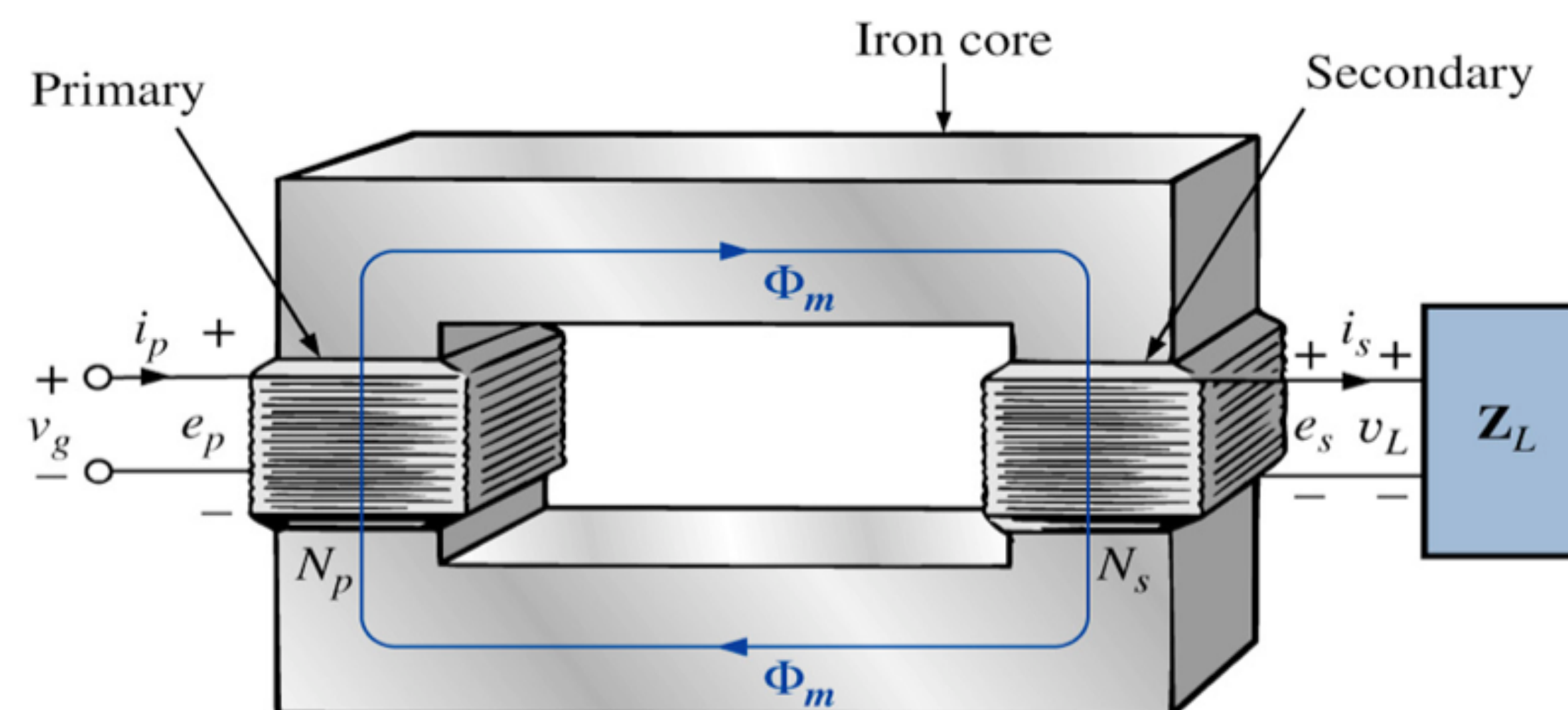
$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$



$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

Importante:
Considerando acoplamento
unitário entre primário e
secundário.

$$\begin{cases} \Phi_s = \Phi_p = \Phi_m \\ k = 1 \end{cases}$$



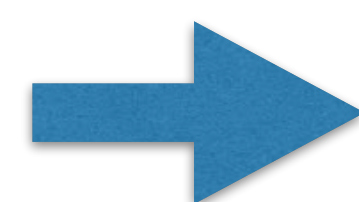
Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Transformador:

- Aplicando a Lei de Faraday:

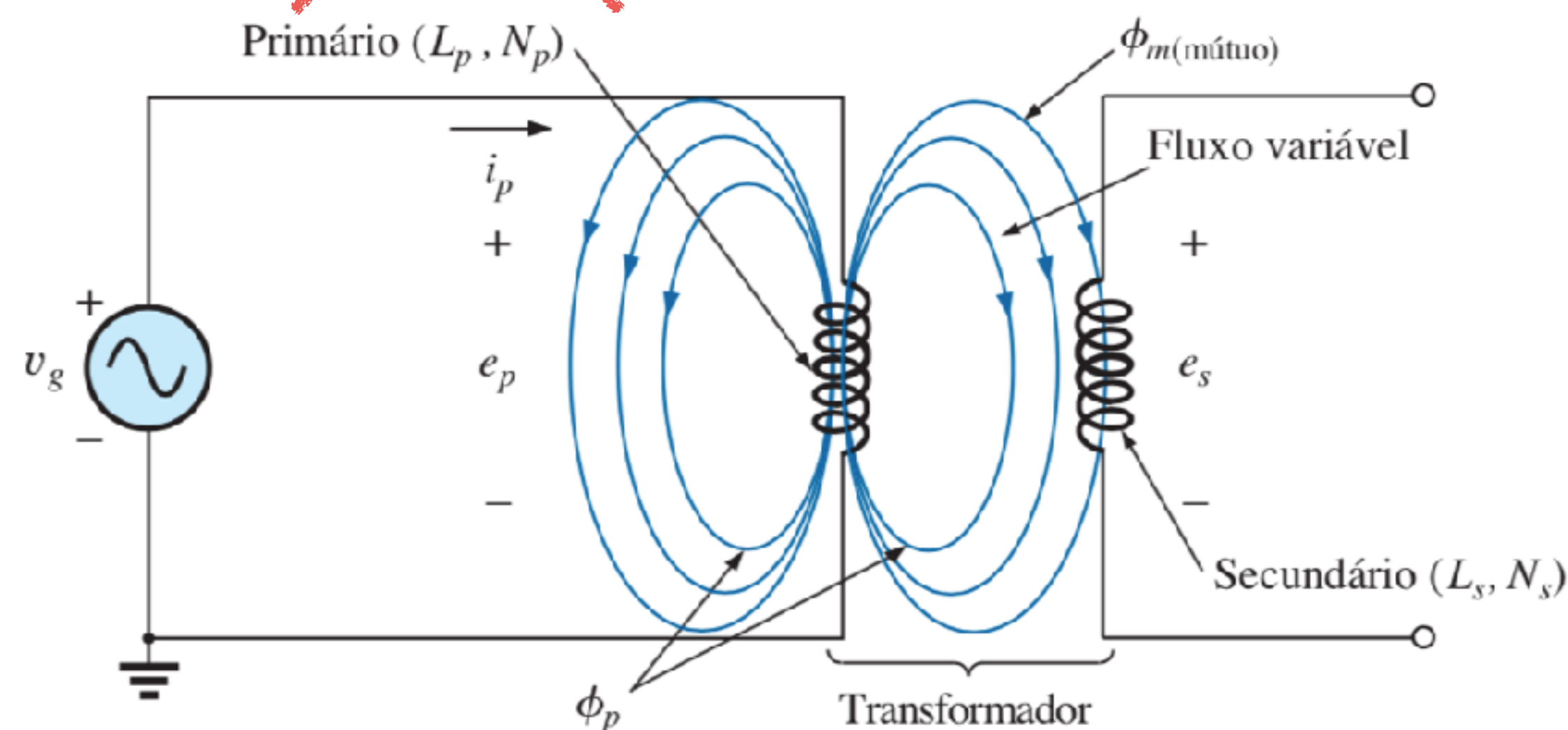
$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$



~~$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$~~

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

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

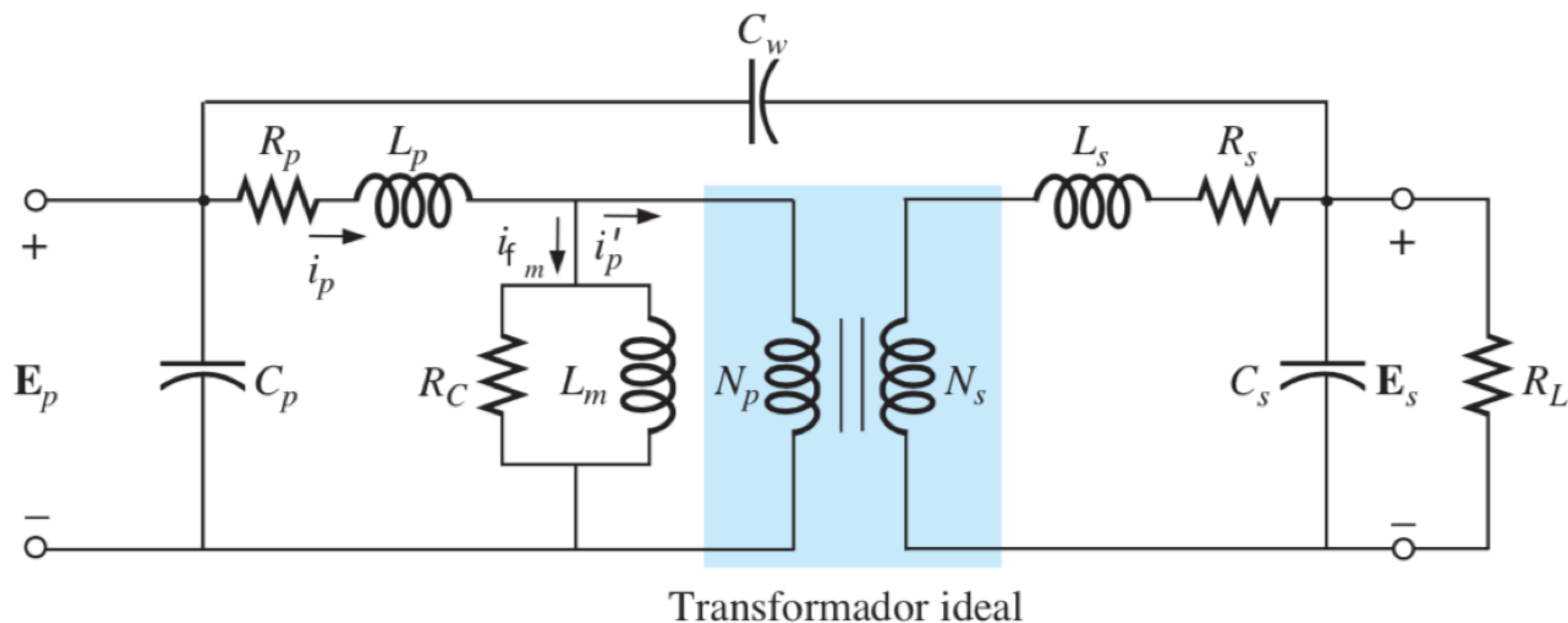


Transformador com núcleo de ar
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Modelos elétricos dos transformadores:

- Circuito elétrico equivalente completo.

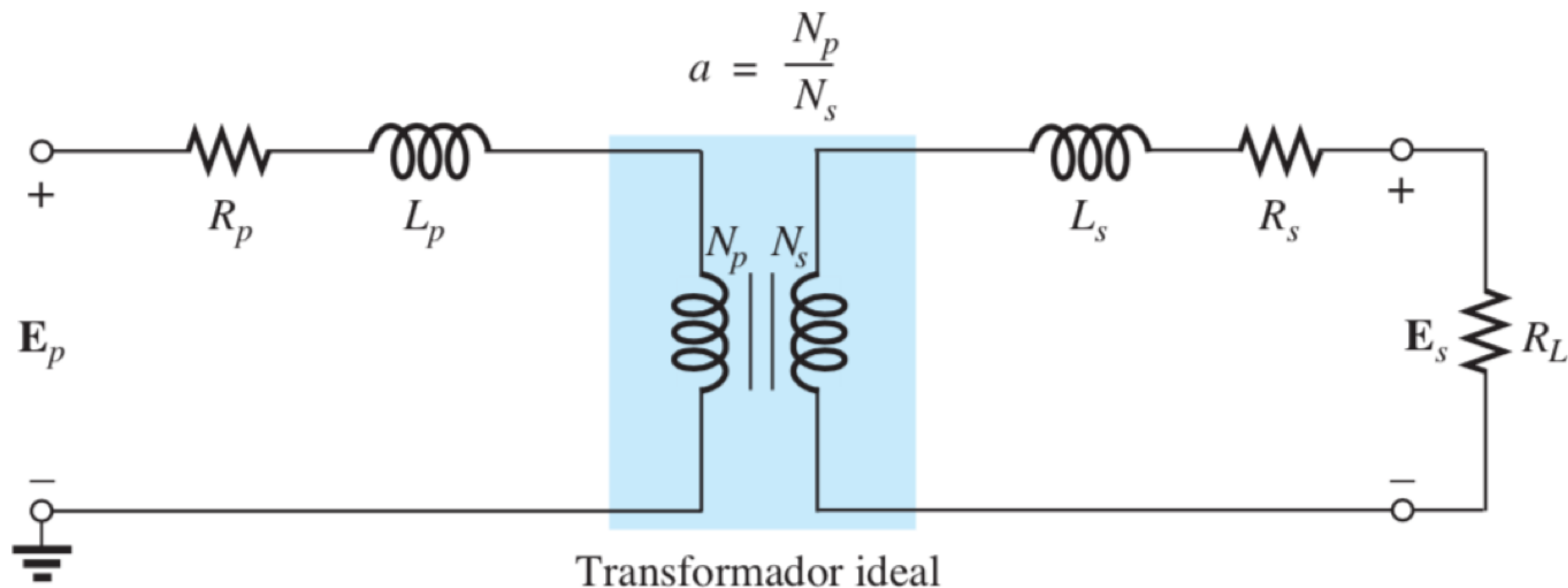


Circuito elétrico equivalente completo do transformador
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Modelos elétricos dos transformadores:

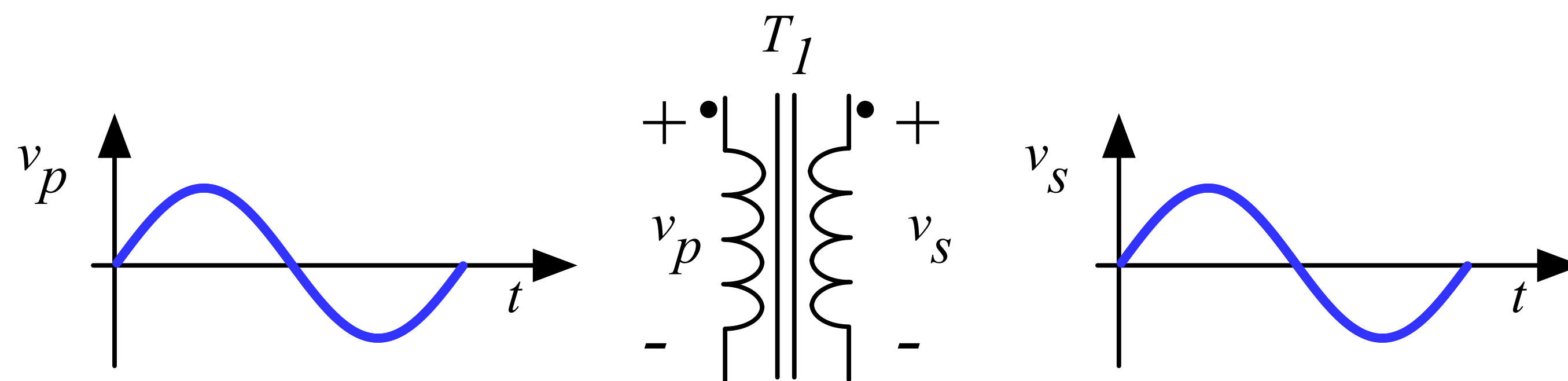
- Circuito elétrico equivalente simplificado.



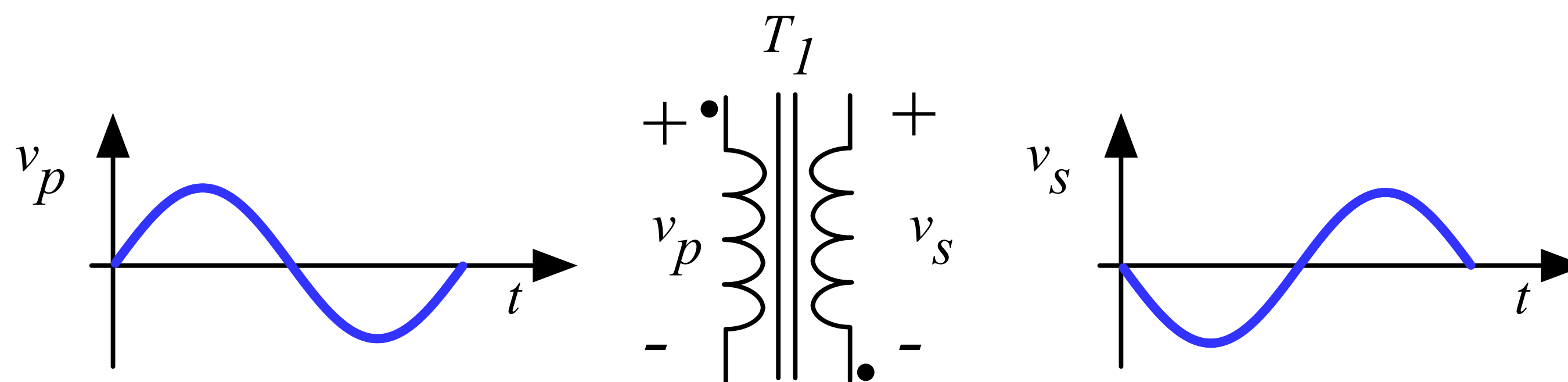
Circuito elétrico equivalente simplificado do transformador
Fonte: (Boylestad, 2012)

Princípio de funcionamento dos transformadores

Polaridade dos enrolamentos de um transformador:



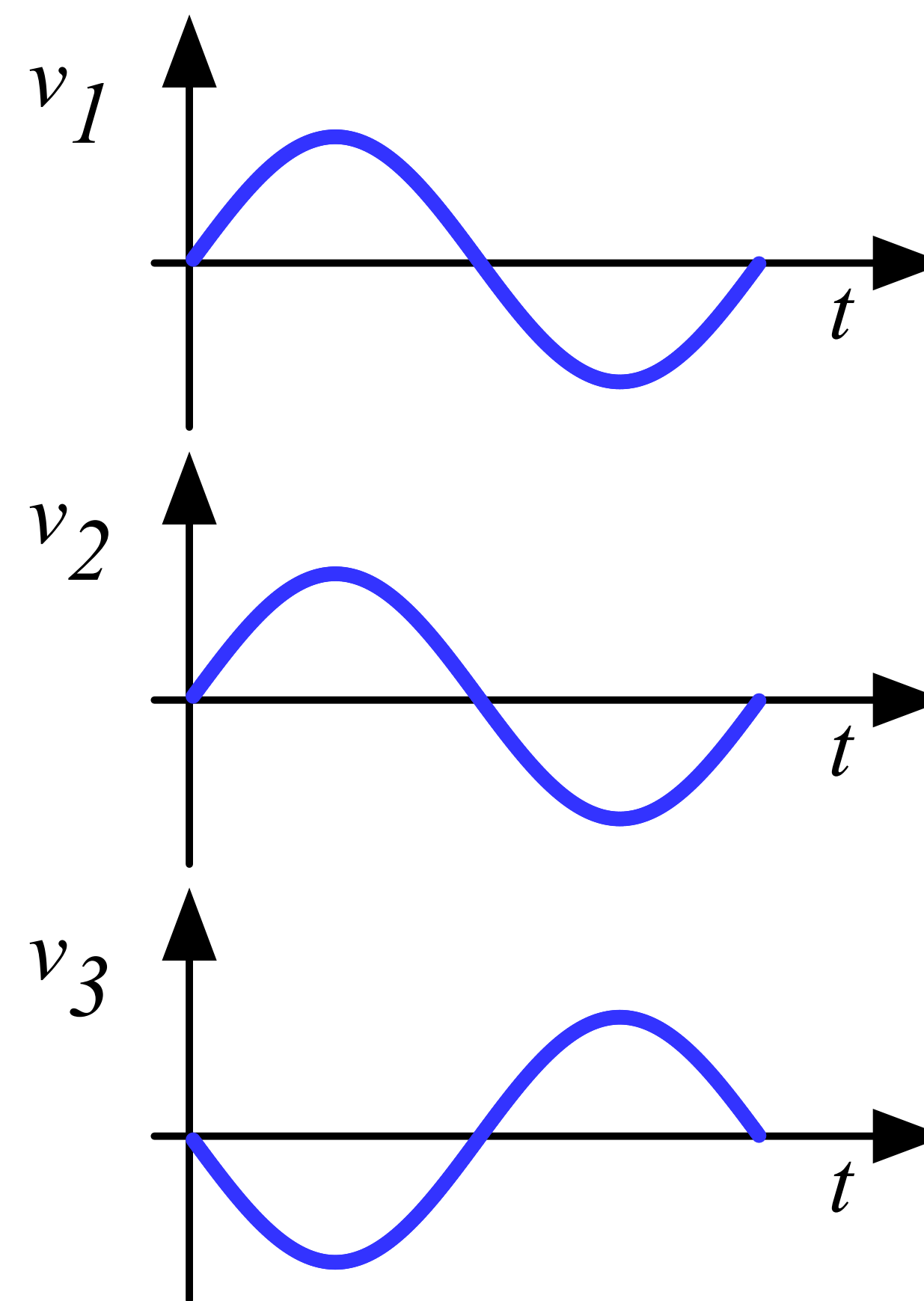
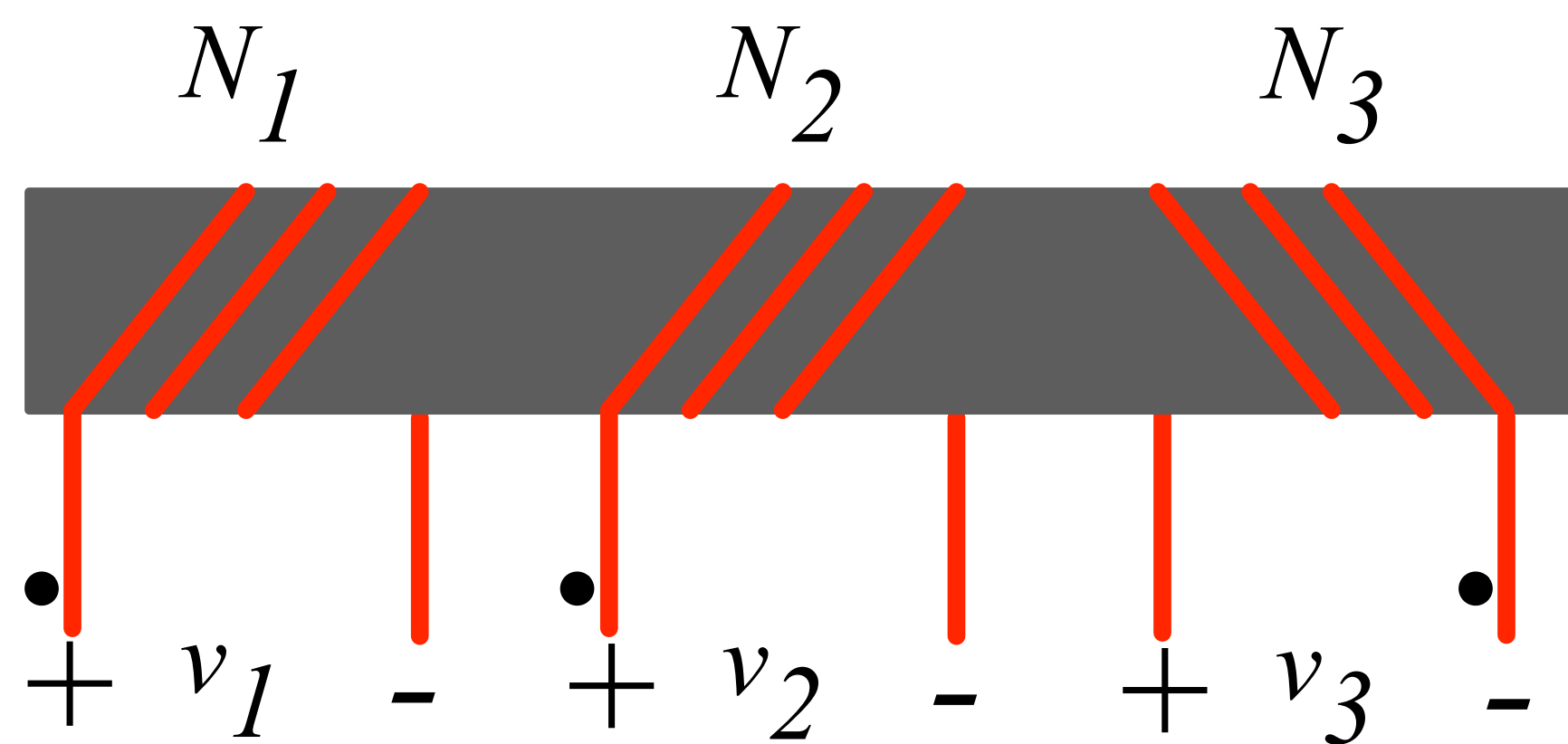
Sinais em fase



Sinais em antifase

Princípio de funcionamento dos transformadores

Polaridade dos enrolamentos de um transformador:

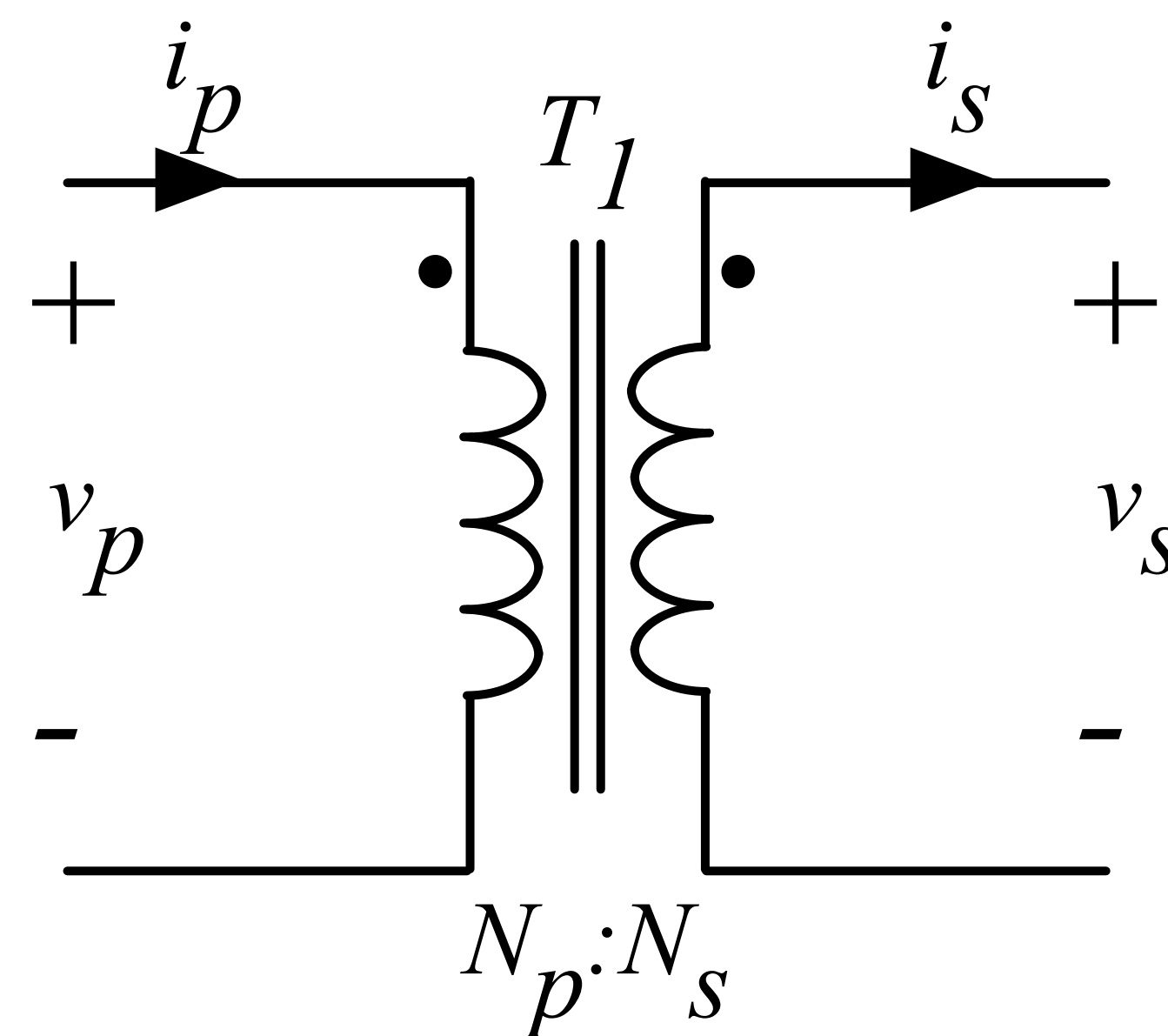


Principais relações nos transformadores

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

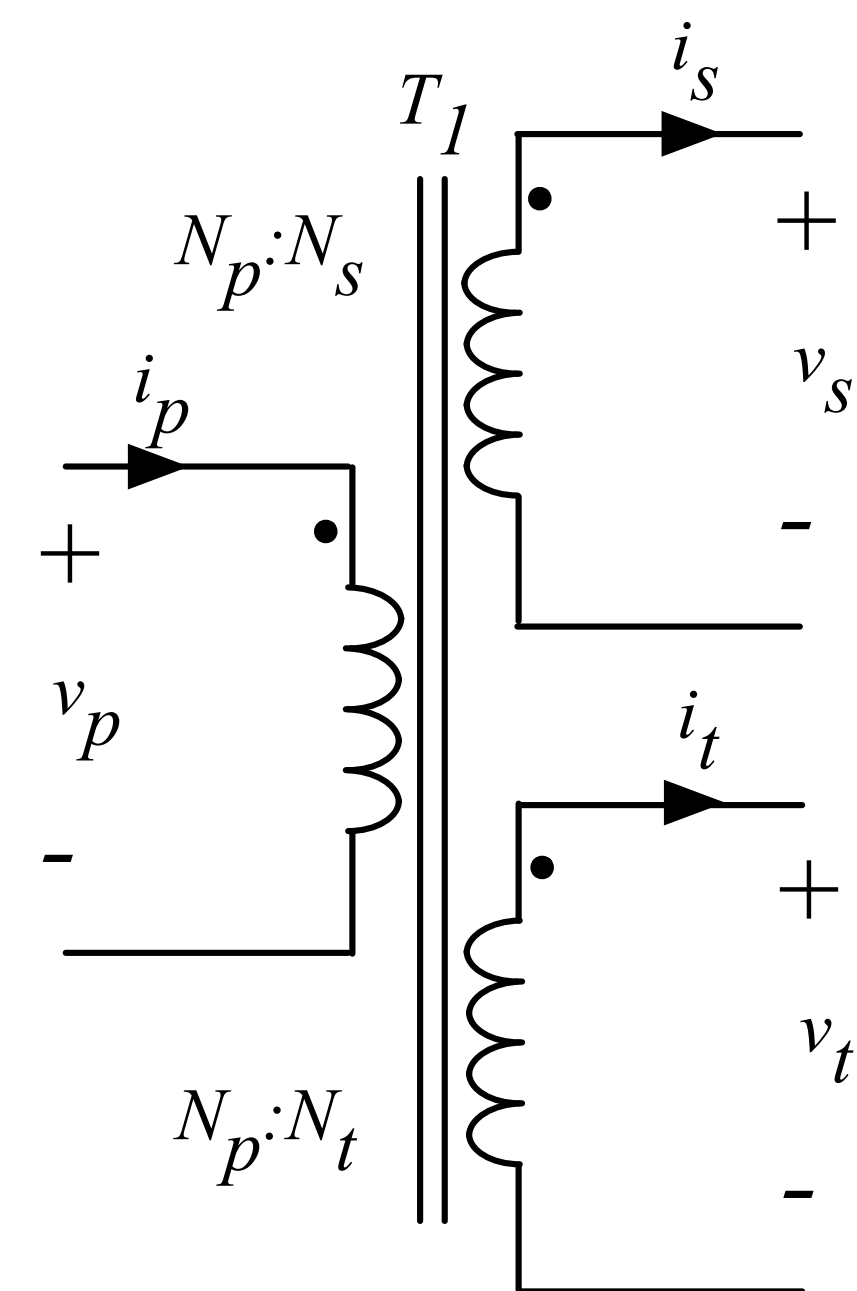
Principais relações nos transformadores

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

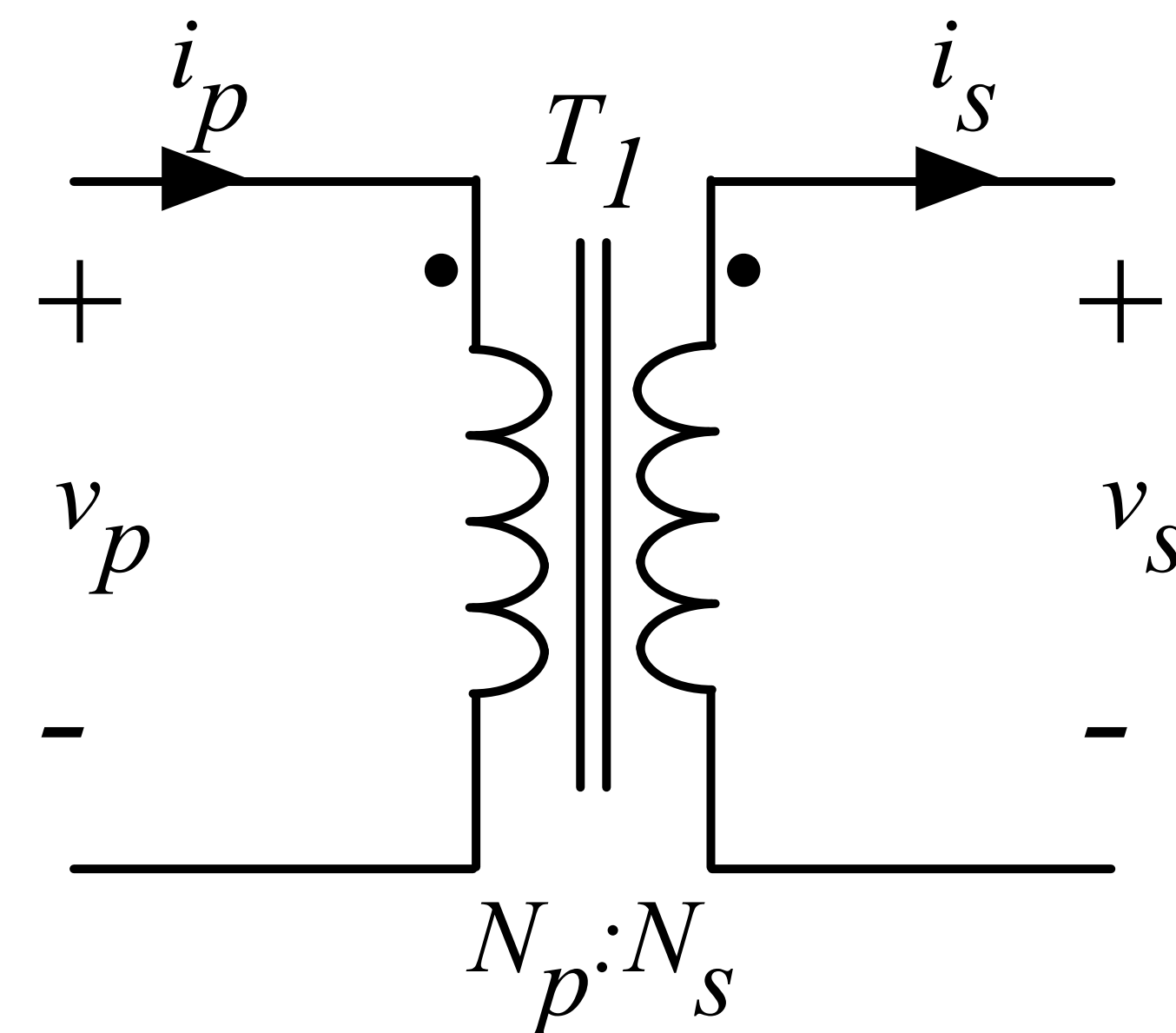
Principais relações nos transformadores

Relação entre as tensões de entrada e 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:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \frac{V_p}{V_t} = \frac{N_p}{N_t}$$



Transformador com dois enrolamentos

Principais relações nos transformadores

Relação entre as potências de entrada e saída:

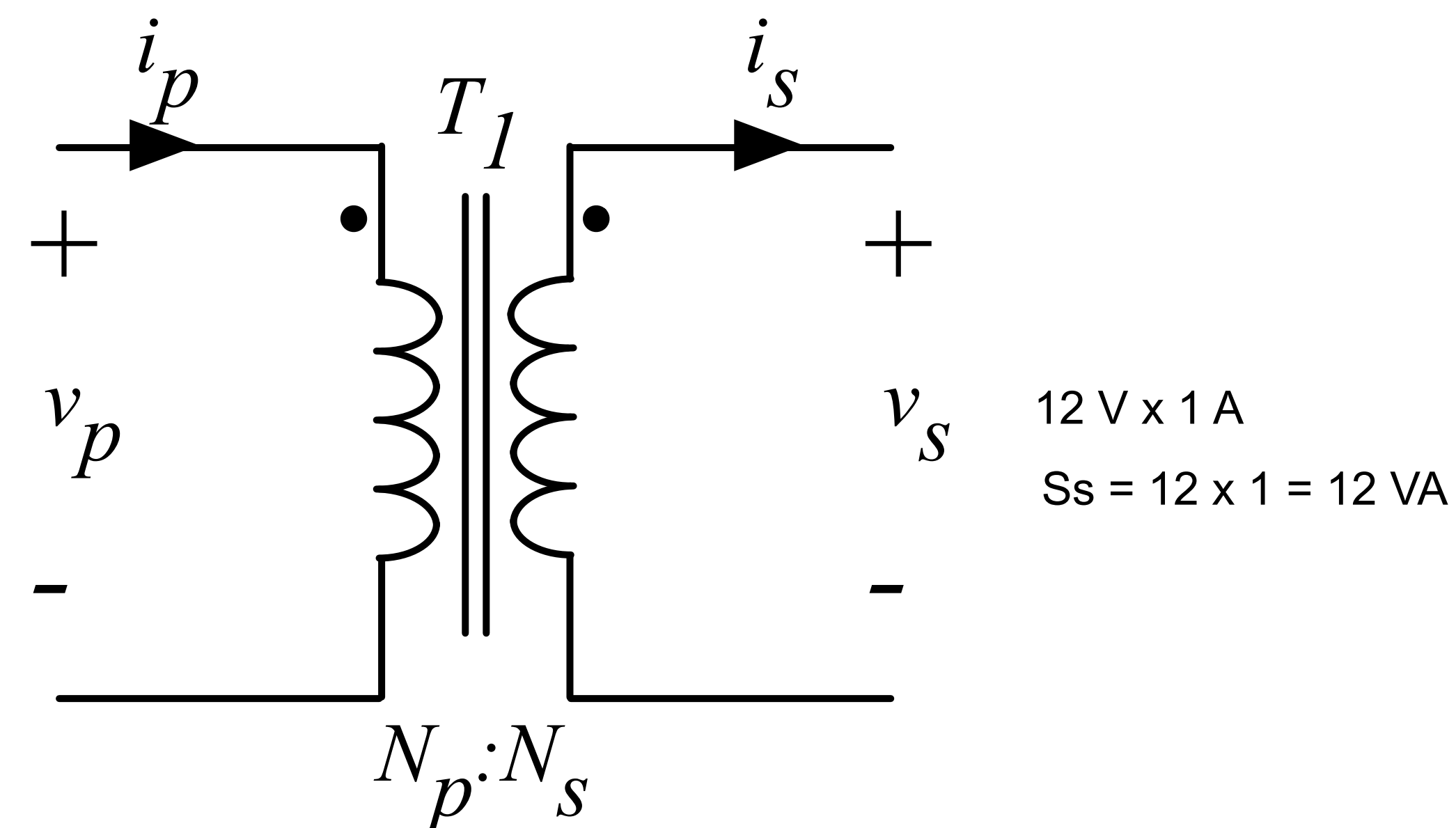
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \frac{P_s}{P_p} \rightarrow \eta = 1 \rightarrow P_p = P_s [W]$$

Em termos de potência aparente:

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

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

$$\begin{aligned} 220 \text{ V} \\ S_p = S_s = 12 \text{ VA} \\ I_p = S_p / V_s \\ I_p = 12 / 220 = 55 \text{ mA} \end{aligned}$$



Transformador com dois enrolamentos

Principais relações nos transformadores

Relação entre as correntes de entrada e saída:

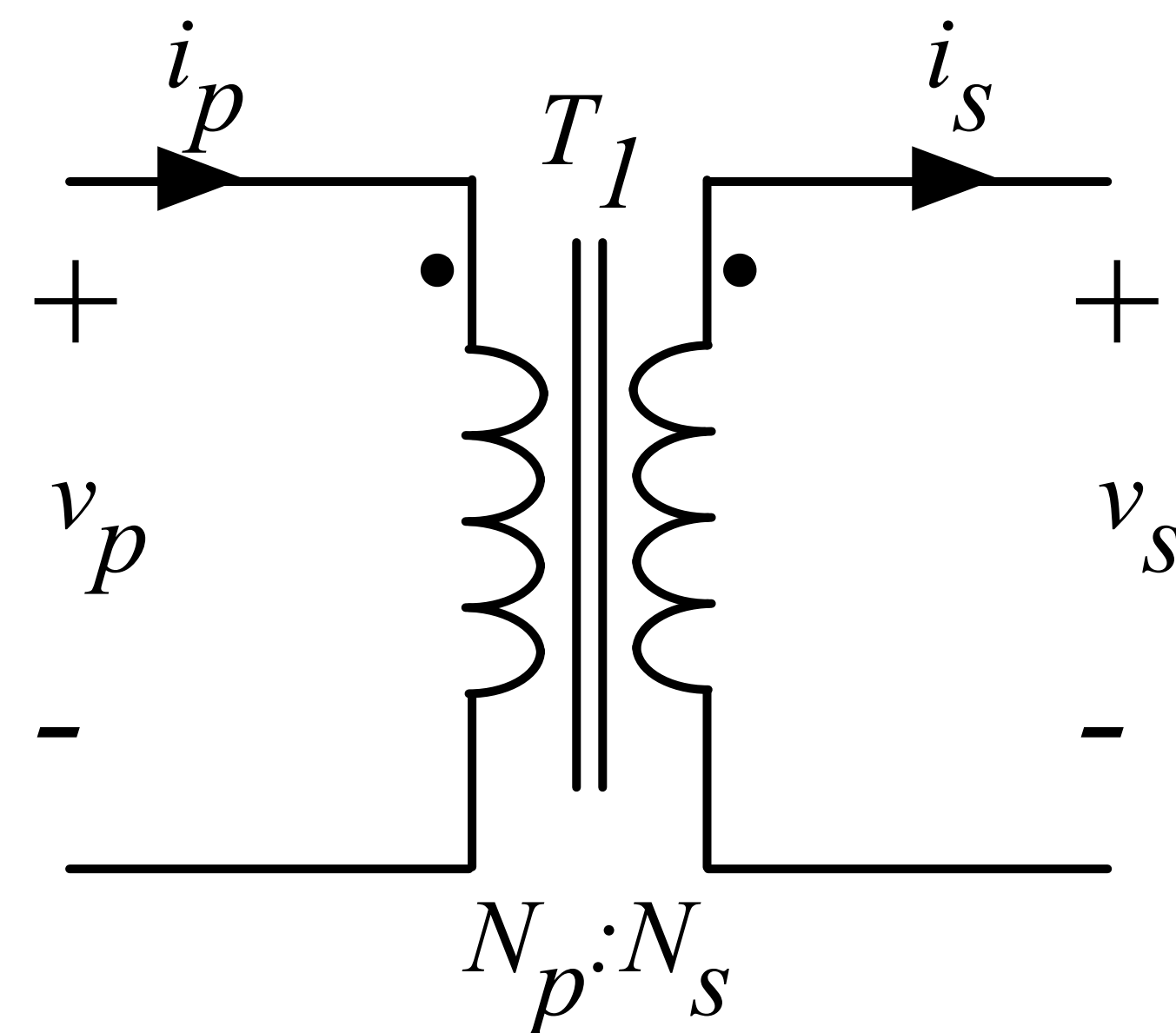
$$\begin{cases} S_s = V_s \cdot I_s \\ S_p = V_p \cdot I_p \end{cases} \rightarrow \eta = 1 \rightarrow S_p = S_s \rightarrow V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

Atenção:

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

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \rightarrow \quad \text{Relação direta}$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad \rightarrow \quad \text{Relação inversa}$$



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 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.



Exemplos de elementos magnéticos

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

Tipos de transformadores

Transformadores abaixadores:

$$RT > 1$$

$220V / 12V$



Exemplo de transformador abaixador

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

Tipos de transformadores

Transformadores elevadores:

$$RT < 1$$

$220V / 380V$



Exemplo de transformador elevador

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

Tipos de transformadores

Transformadores isoladores:

$$RT = 1$$

$220V / 220V$ 



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

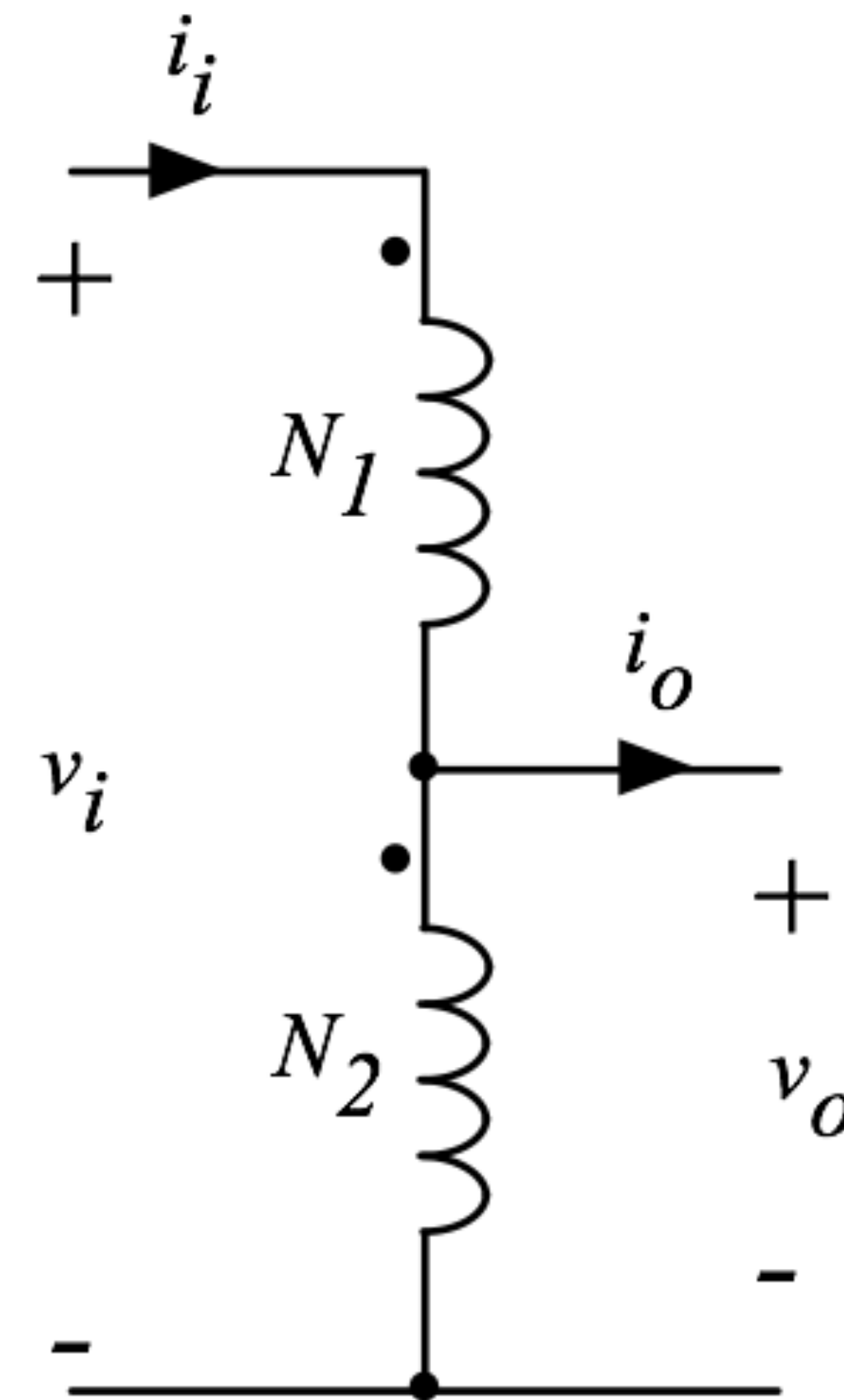
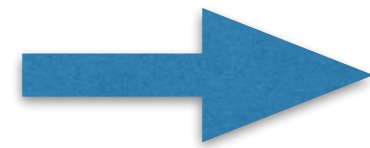
Tipos de transformadores

Autotransformadores:

$$N_1 = N_2$$

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

220V / 110V



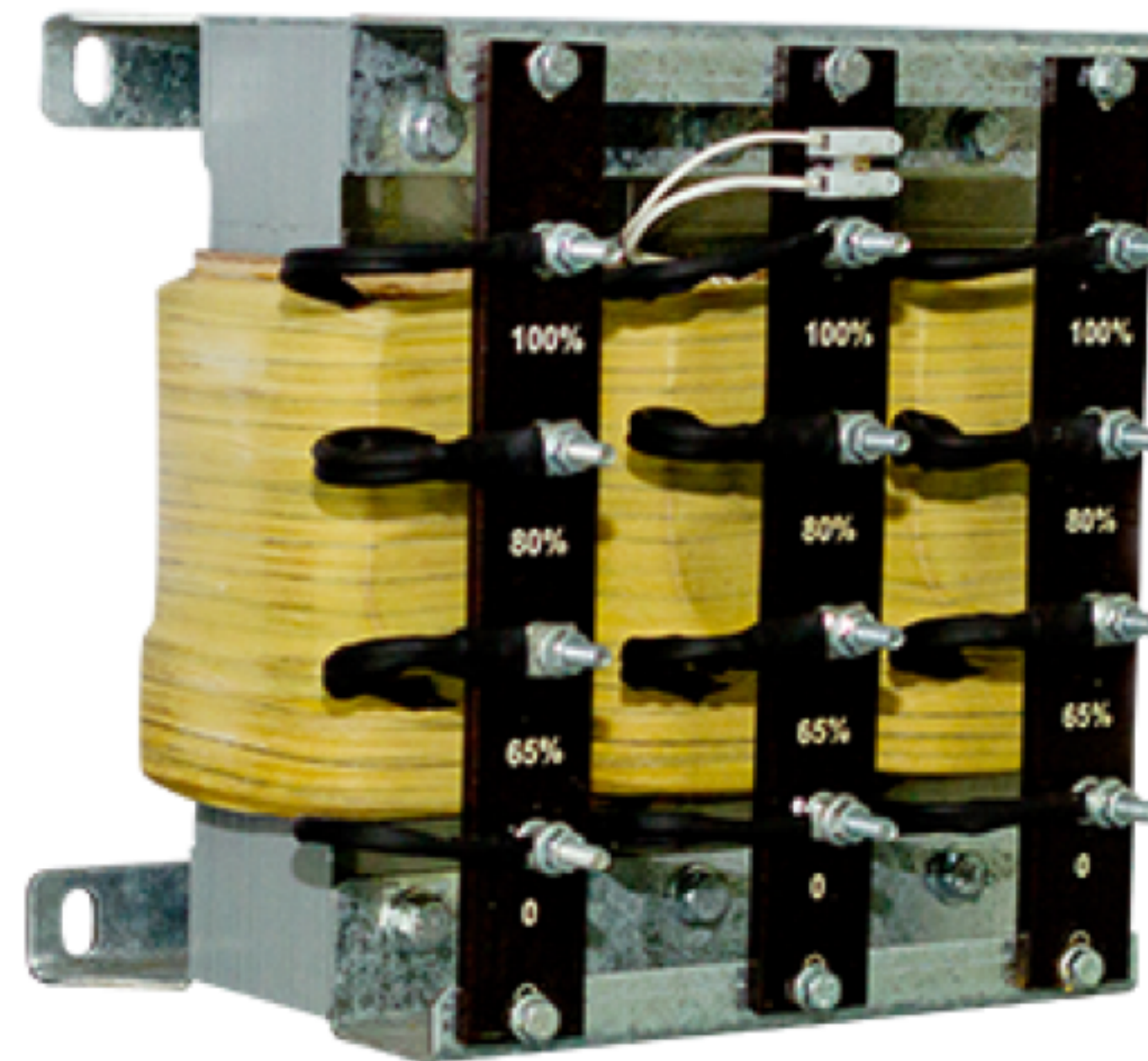
Autotransformador com uma derivação

Tipos de transformadores

Autotransformadores:

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

$380V / 380,304,247,0V$



Exemplo de autotransformador

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

Tipos de transformadores

Transformadores para fontes chaveadas:

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

$220V / 24V$



Exemplo de transformador para fontes chaveadas

Fonte: <https://chipsen.com>

Tipos de transformadores

Transformadores para casamento de impedâncias:

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

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

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

$$500\Omega / 4 + 4\Omega$$



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>

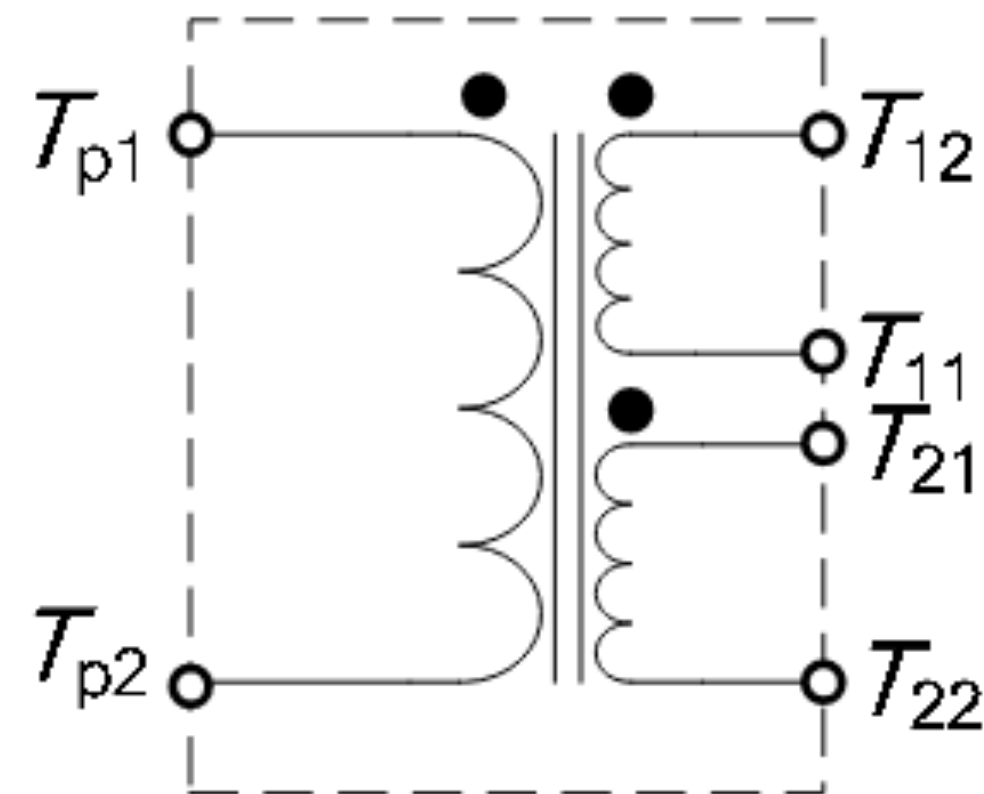
<https://www.viewtech.ind.br>

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

Tipos de transformadores

Transformadores de pulsos:

$27V / 5V$



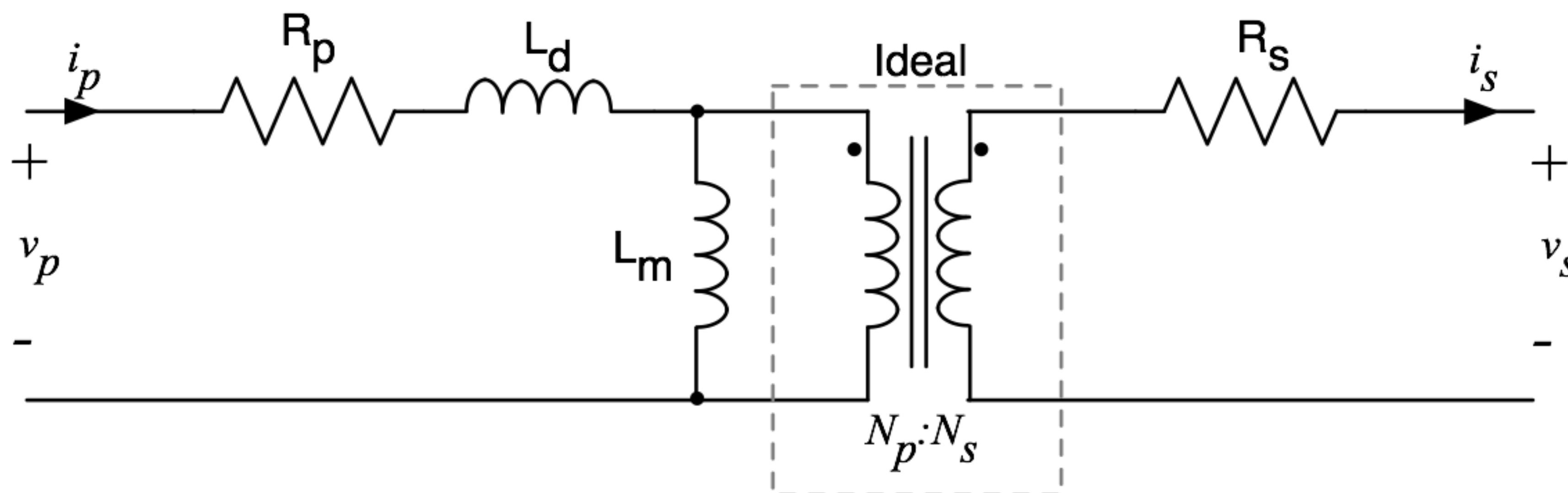
Exemplo de transformador de pulso

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

Parâmetros e ensaios de transformadores

Modelo elétrico de transformadores:

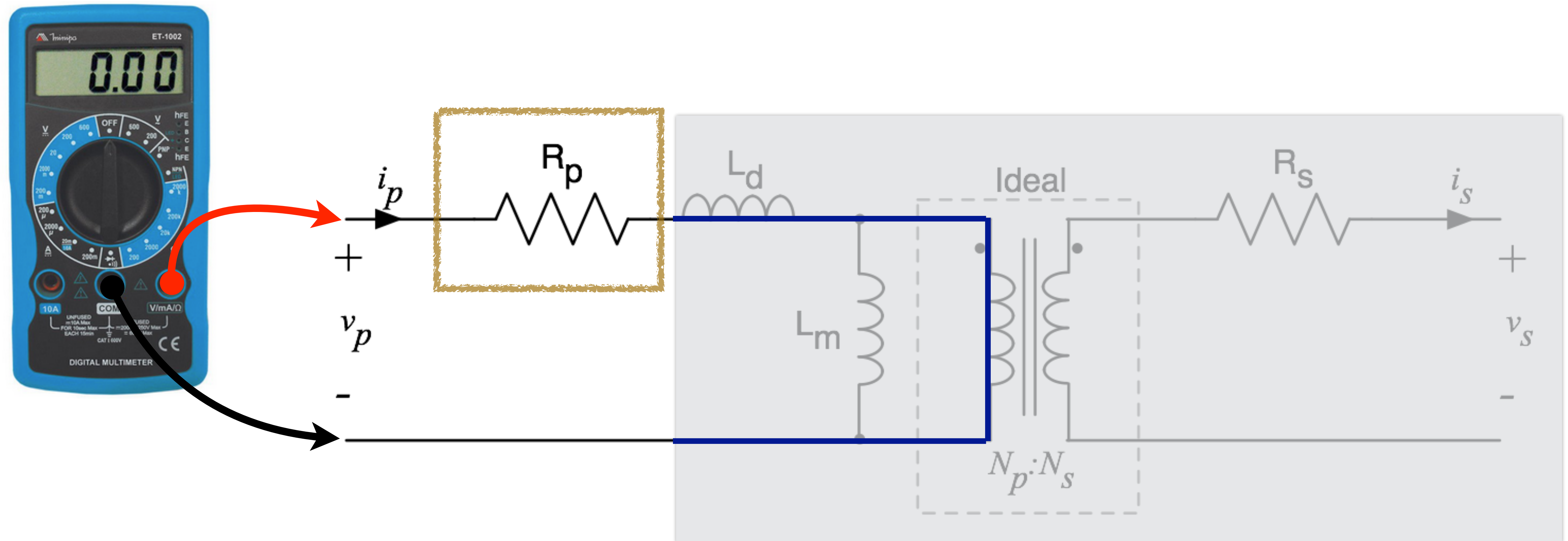
- R_p - Resistência dos condutores do primário;
- R_s - Resistência dos condutores do secundário;
- L_d - Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário;
- L_m - Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário;
- $N_p:N_s$ - Transformador ideal com a relação de transformação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



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

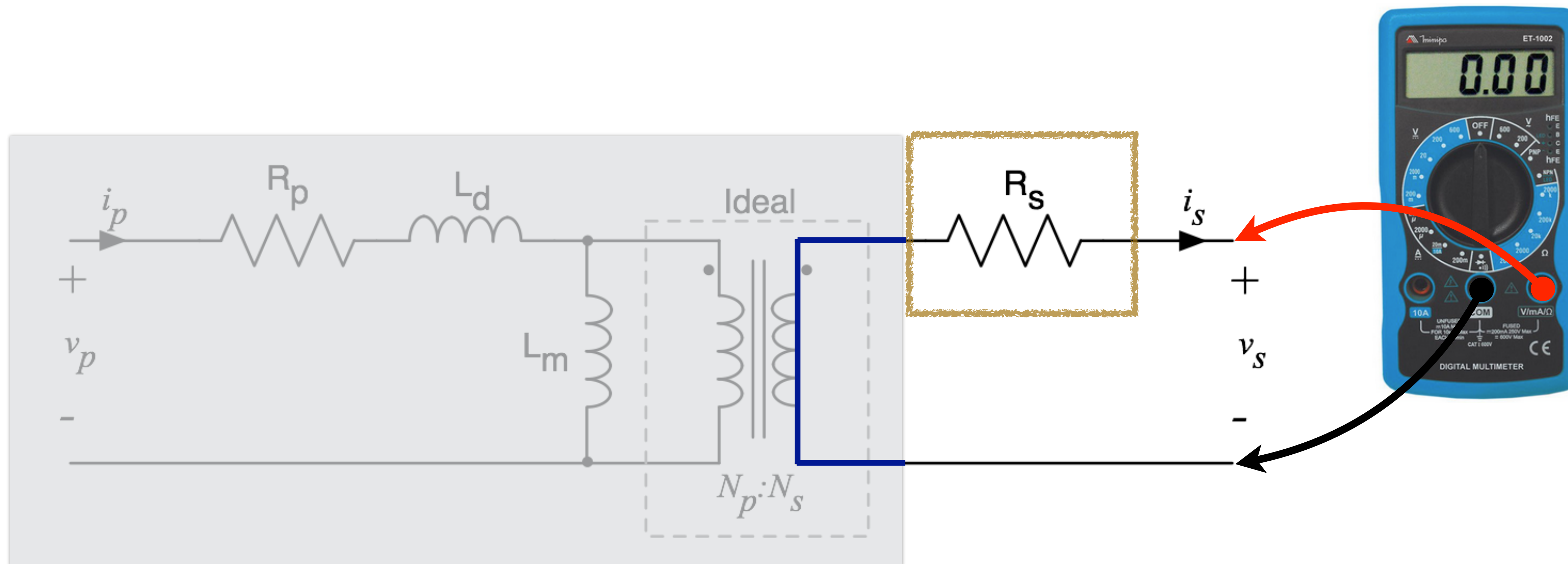
- R_p - Resistência dos condutores do primário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no primário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

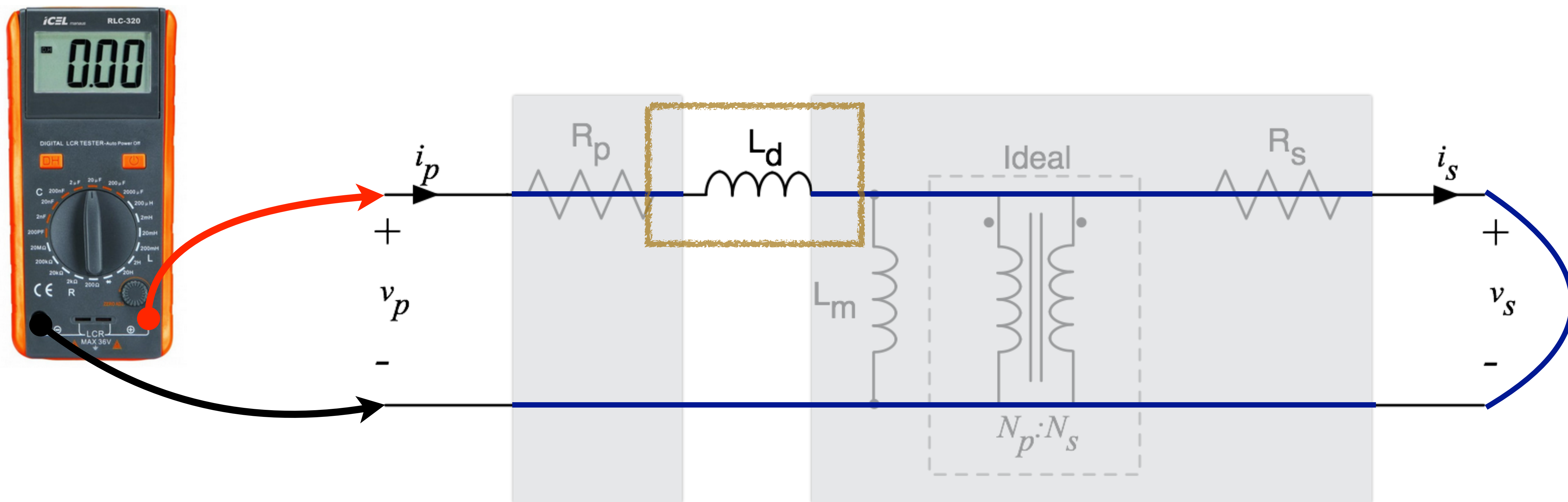
- R_s - Resistência dos condutores do secundário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no secundário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

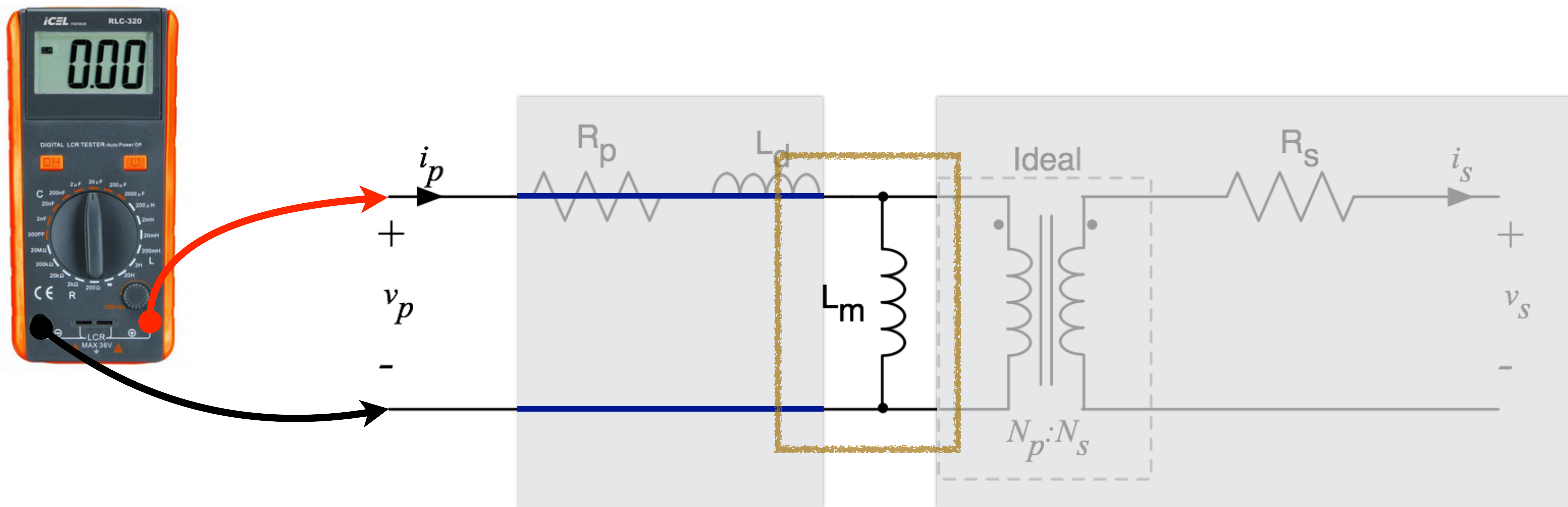
- L_d - Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário, deve ser medida curto-circuitando os terminais do secundário, medindo-se a indutância com um medidor RLC (multímetro ou ponte de medição de resistência, indutância e capacitância) pelo lado primário.



Parâmetros e ensaios de transformadores

Ensaio em transformadores:

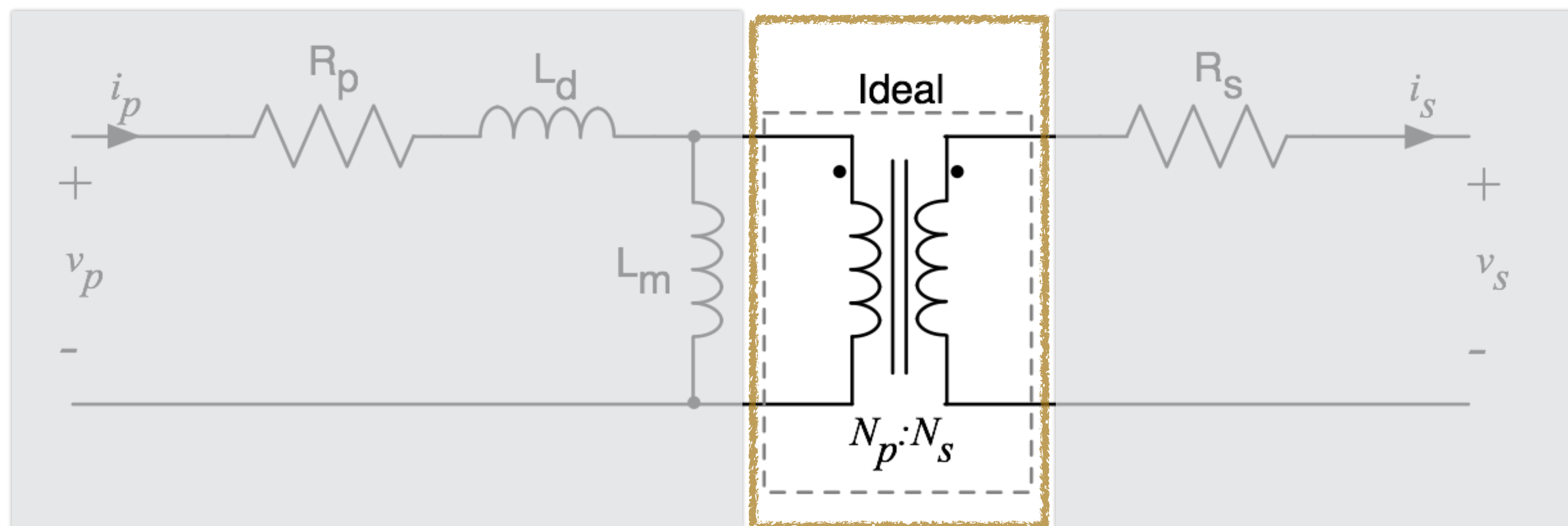
- L_m - Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário, será medida com um medidor RLC pelo lado primário, com o secundário em aberto.



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

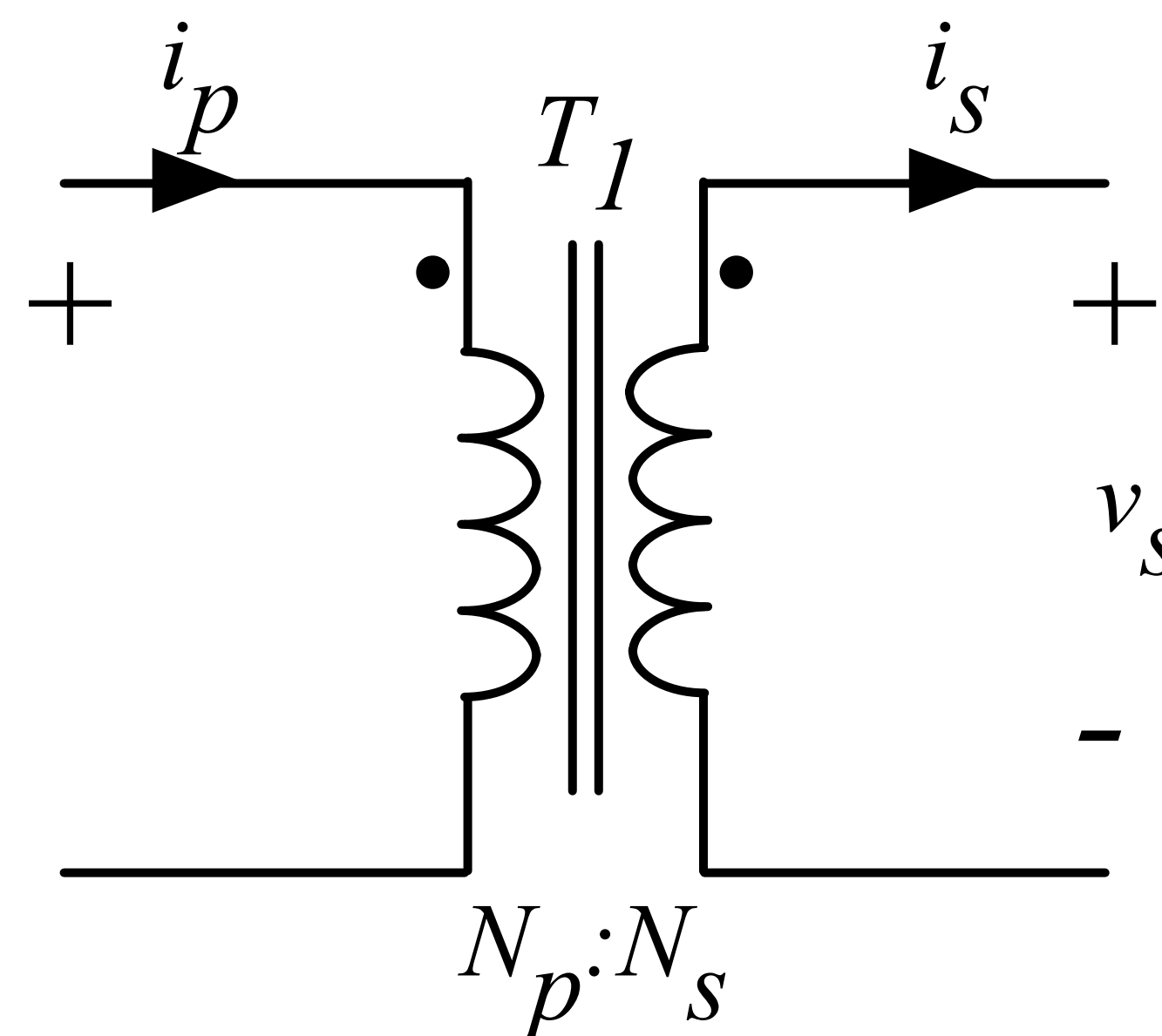
Regulação de um transformador:

- 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.

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

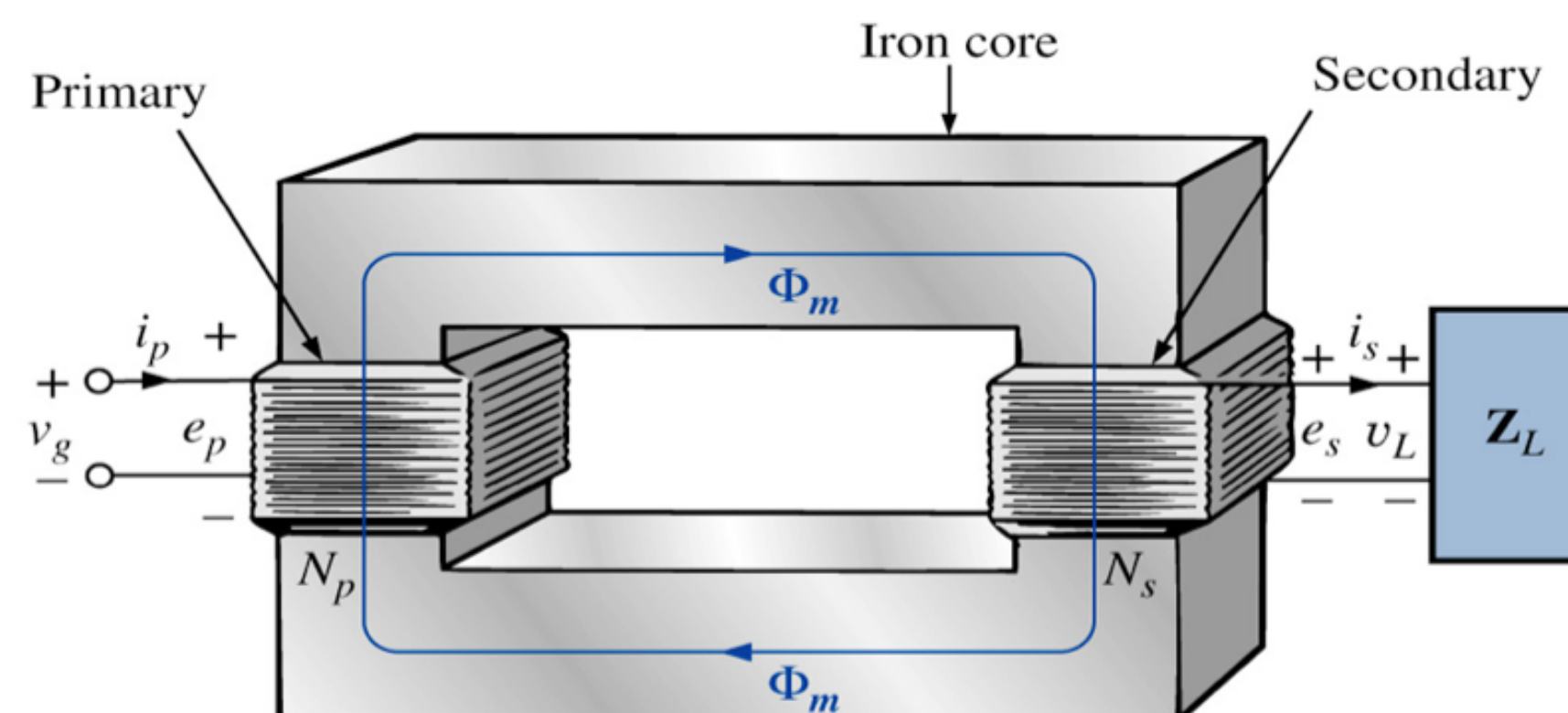
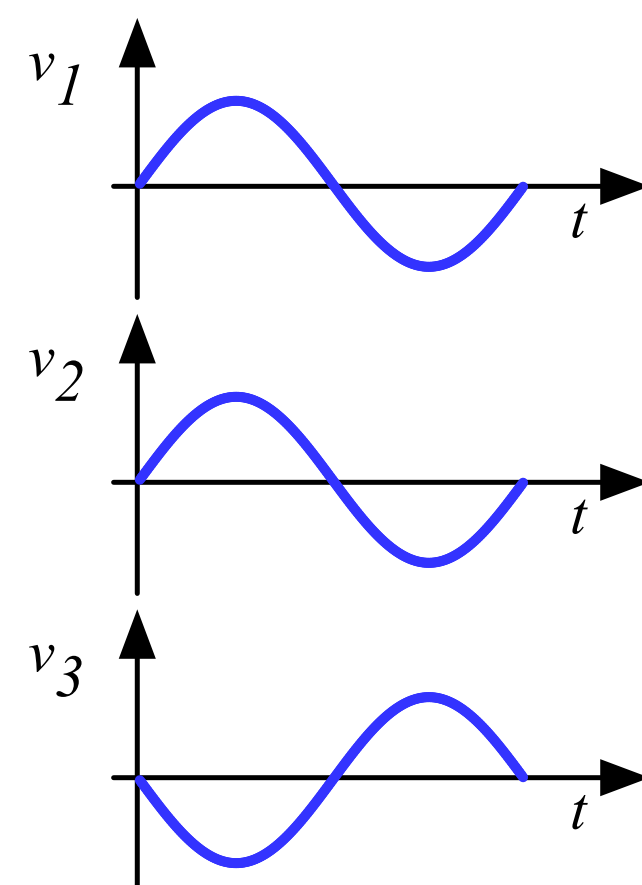
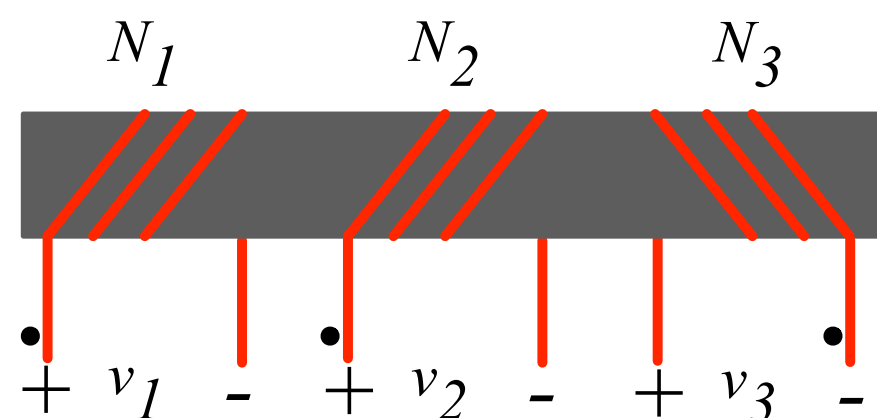
Onde:

- R_{eg} - 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.



Próxima Aula

Laboratório de transformadores



Transformador com núcleo ferromagnético

Fonte: (Boylestad, 2012)