

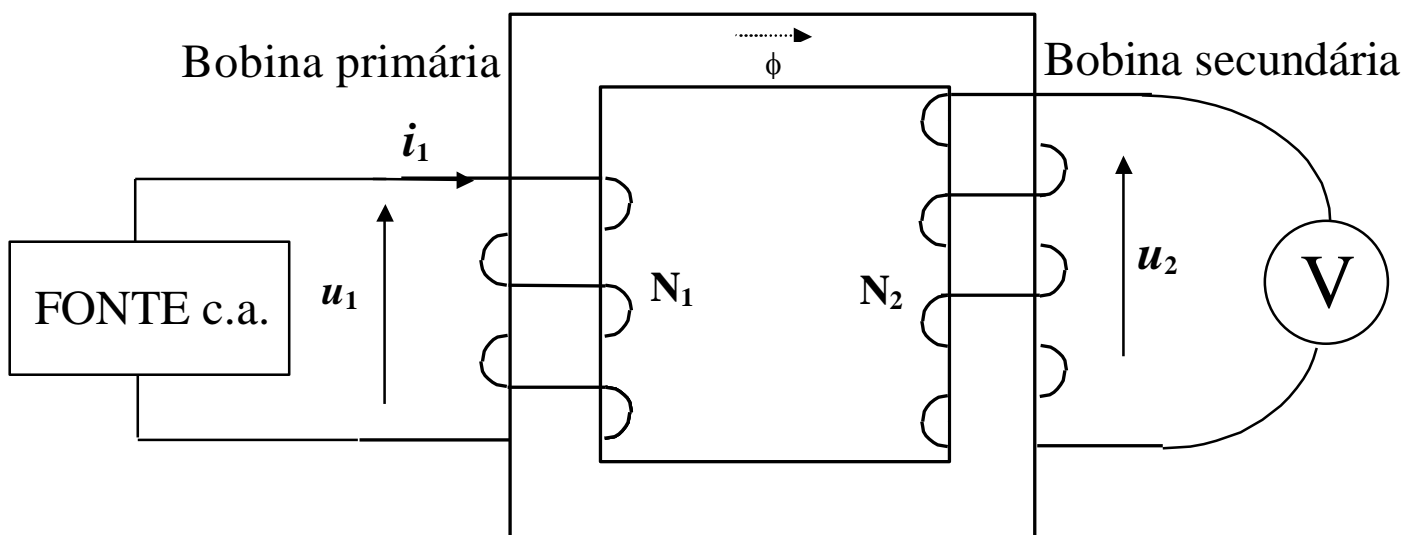
# Capítulo 10

## Transformadores



## COMPOSIÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

Essencialmente, um transformador é constituído por dois ou mais **enrolamentos** (**bobinas**) **concatenados** por um **campo magnético**, através um núcleo de material ferromagnético porque assim, a maior parte do fluxo estará **confinada** em um caminho bem definido.

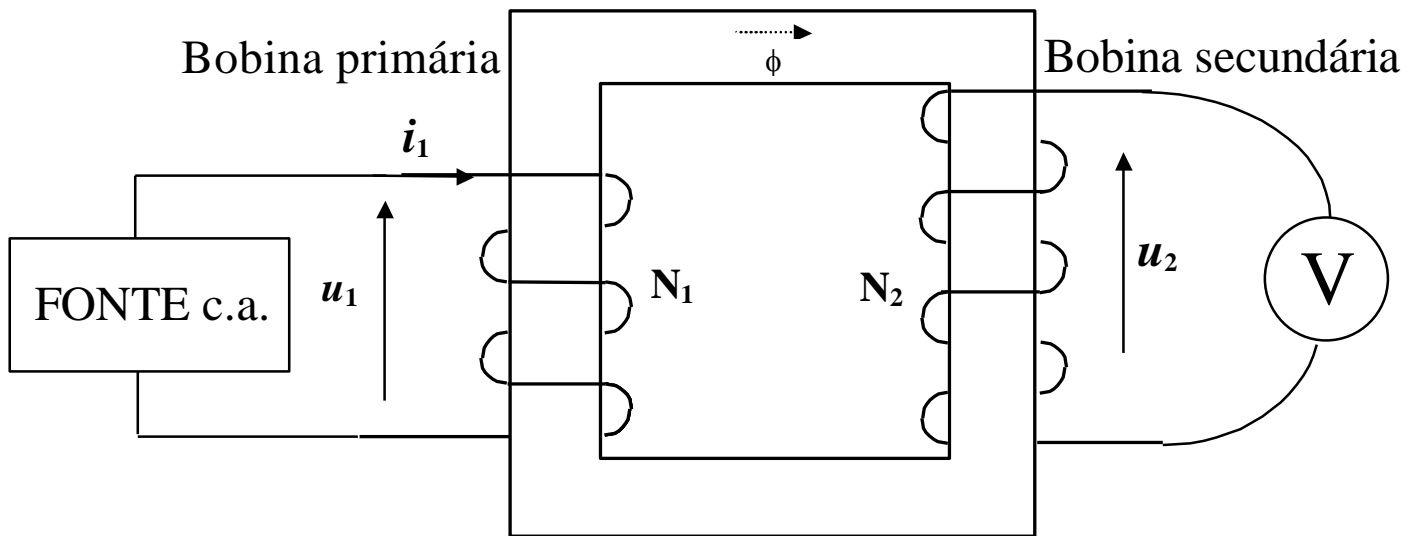


### Analise:

Se não há conexão elétrica da bobina secundária nem com a bobina primária e nem com a fonte, ou seja, há total **desacoplamento elétrico**, de onde provém a tensão medida no voltímetro?

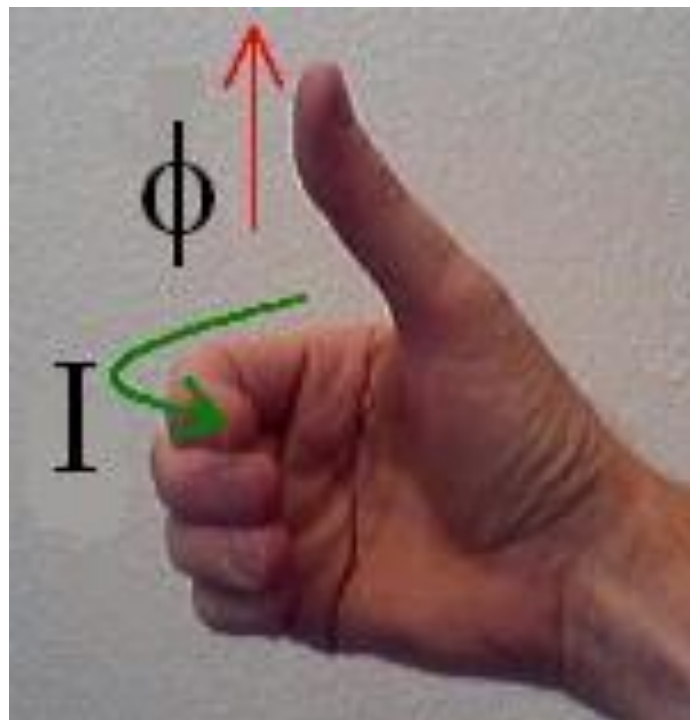
## Resp.: Lei da Indução de Faraday

DEVIDO ao **MOVIMENTO RELATIVO** entre o **CAMPO MAGNÉTICO** e o **CONDUTOR** há **INDUÇÃO** de **TENSÃO** na **BOBINA SECUNDÁRIA**.



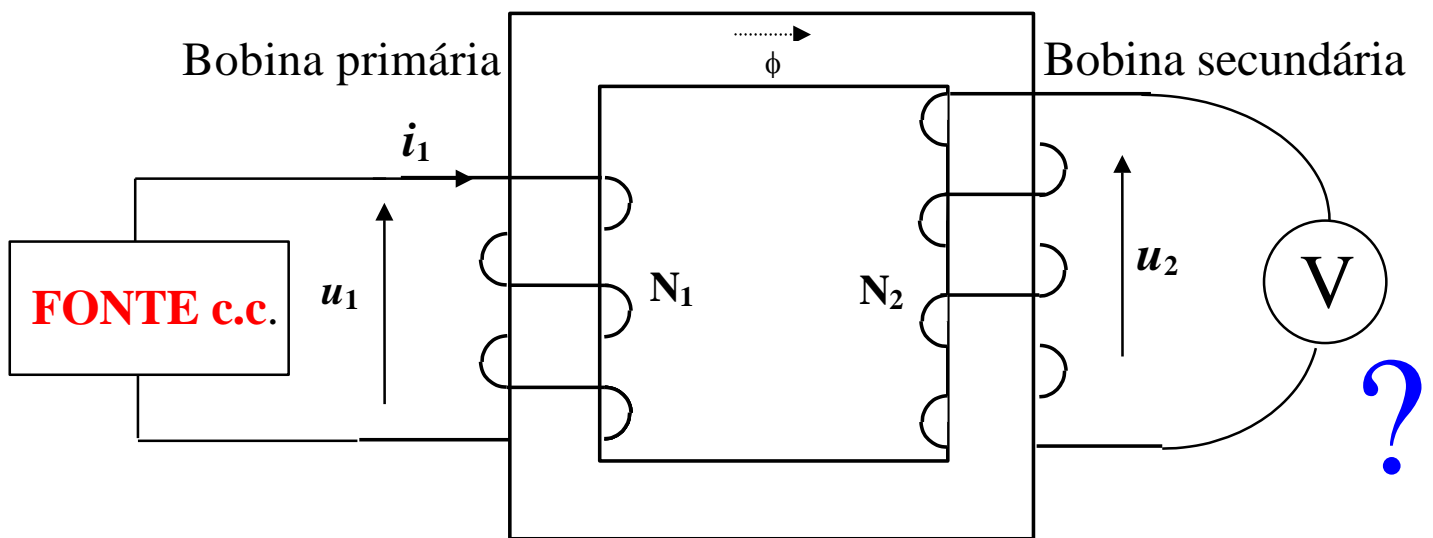
**SENTIDO DO FLUXO NO NÚCLEO:**

Associar com a "REGRA DO CARONA"



## Perguntas:

Se na bobina primária conectarmos uma fonte c.c. haverá tensão induzida na bobina secundária?



O que vem a ser fluxo enlaçado ou fluxo concatenado?

O que vem a ser fluxo disperso?

## 10.2 Transformador ideal

Quatro condições para se qualificar um transformador como ideal.

- **fluxo disperso nulo**;
- **perdas no núcleo desprezíveis** (correntes induzidas no núcleo);
- **perdas ôhmicas nulas** (resistências dos enrolamentos desprezíveis).
- **permeabilidade do núcleo ferromagnético** apresenta um valor muito grande, e a corrente necessária para produzir fluxo magnético é desprezível.

Relação entre a tensão aplicada no primário e a tensão induzida no secundário:

### RELAÇÃO de ESPIRAS

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

## Analise:

Ao se conectar uma carga ao secundário, constata-se que há um aumento na magnitude da corrente no primário. Por que isso ocorre, se os dois circuitos estão eletricamente isolados?

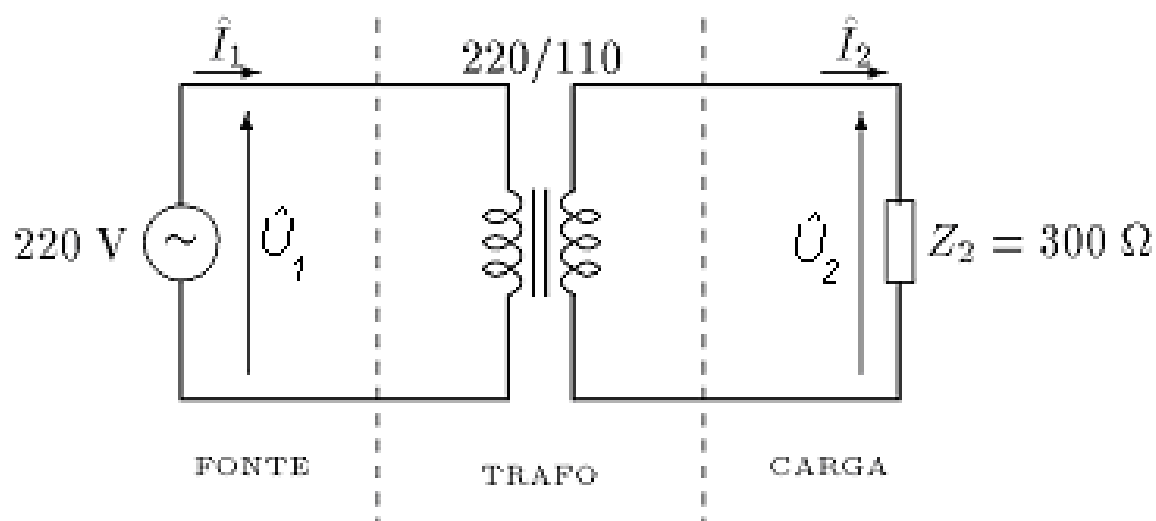
Se a carga e o enrolamento secundário não estão fisicamente ligados à fonte, então a transferência de energia da fonte para a carga ocorre através do acoplamento magnético entre os dois enrolamentos. Como no transformador ideal não há perda de potência, toda a potência fornecida pela fonte é entregue à carga. Assim:

$$S_1 = S_2 \quad \text{ou} \quad \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = \hat{U}_2 \cdot \hat{I}_2^*$$

$$|S_1| = |S_2| \Rightarrow |\hat{U}_1| \cdot |\hat{I}_1^*| = |\hat{U}_2| \cdot |\hat{I}_2^*| \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

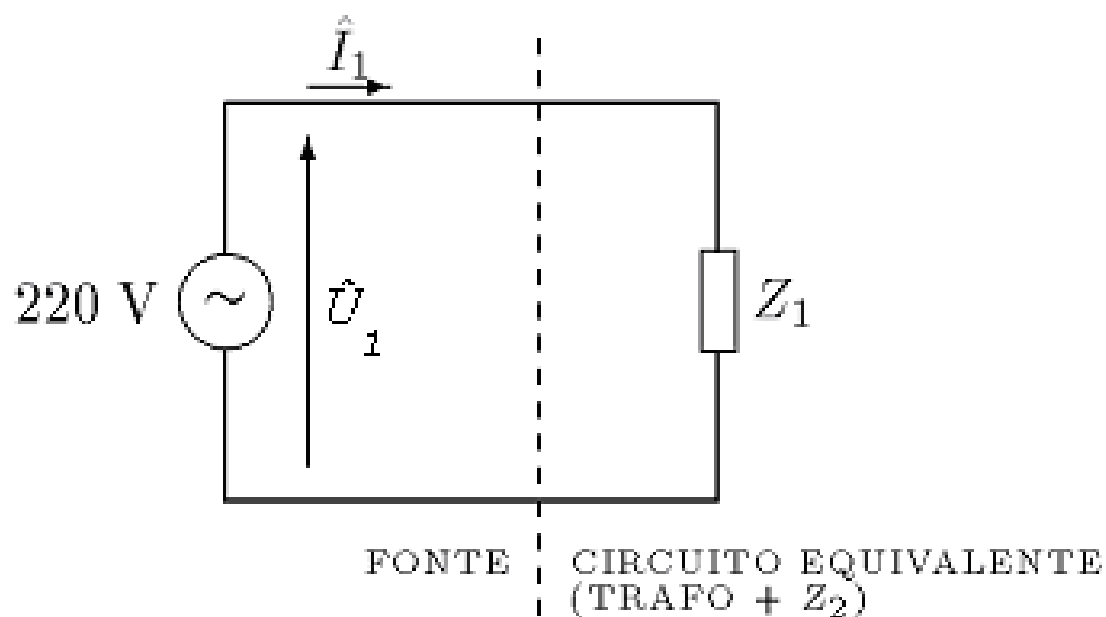
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

## CONCEITO DE IMPEDÂNCIA REFLETIDA



OBTER OS VALORES DE  $I_1$  e  $I_2$ .

PODEMOS SIMPLIFICAR O CIRCUITO ACIMA POR:



$$Z_1 = \frac{\hat{U}_1}{\hat{I}_1}$$

$$Z_1 = \frac{RE \cdot \hat{U}_2}{\hat{I}_2 / RE} = RE^2 \cdot \frac{\hat{U}_2}{\hat{I}_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2 \Rightarrow Z_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2$$

**$Z_1$  é a impedância refletida do secundário no primário.**

$$Z_1 = (2)^2 \cdot 300 = 1,2 \text{ k}\Omega$$

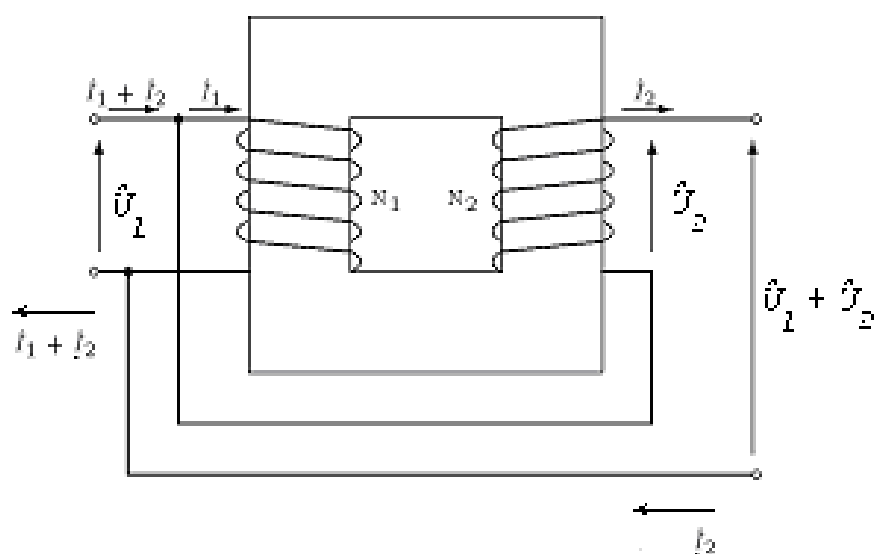
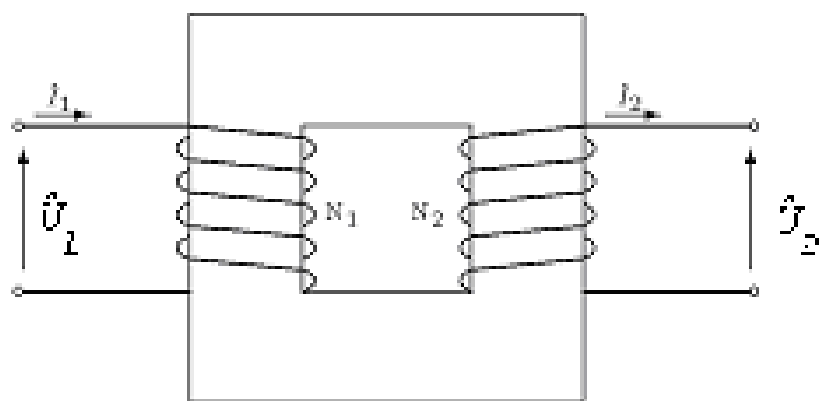
**A corrente fornecida pela fonte vale:**

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_1}{Z_1} = 183,33 \angle 0^\circ \text{ mA}$$



## 10.3 Autotransformador

COMPARE ESTAS FIGURAS:



O autotransformador caracteriza-se pela existência de uma conexão elétrica entre a bobina primária e a secundária e portanto, somente pode ser utilizado quando não é necessário o isolamento elétrico entre os dois enrolamentos.

Porque é usado ?

Porque apresenta vantagens com relação à potência transmitida e à eficiência, em relação ao transformador convencional, como veremos a seguir.

Para o transformador, tem-se:

$$S_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* \quad S_2 = \hat{U}_2 \cdot \hat{I}_2^* \quad \Rightarrow \quad S_1 = S_2 = S_T$$

$S_T$  corresponde à potência nominal do transformador.

Para o autotransformador, tem-se:

$$S_e = \hat{U}_1 \cdot (\hat{I}_1^* + \hat{I}_2^*) \quad \Rightarrow \quad \text{potência de entrada}$$

$$S_s = (\hat{U}_1 + \hat{U}_2) \cdot \hat{I}_2^* \quad \Rightarrow \quad \text{potência de saída}$$

NA LITERATURA ESTÁ DEMONSTRADO QUE:

$$S_s = \left( \frac{N_1}{N_2} + 1 \right) \cdot S_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} + 1 \right) \cdot S_T = \frac{N_1}{N_2} \cdot S_T + S_T$$

Conclui-se que a ligação como autotransformador amplia a capacidade de transferência de potência da fonte para a carga, de um fator de  $(N_1/N_2)+1$ .

Uma outra característica importante do autotransformador diz respeito à sua eficiência, quando comparada à do transformador.

Se os enrolamentos são os mesmos e o núcleo é o mesmo, então, as perdas são as mesmas nos dois casos.

Como para o autotransformador a potência de entrada é maior que para o transformador, conclui-se que a eficiência do autotransformador é maior que a do transformador.

VER NA LITERATURA EXEMPLO COMPARATIVO DO AUTOTRANSFORMADOR COM O TRANSFORMADOR CONVENCIONAL

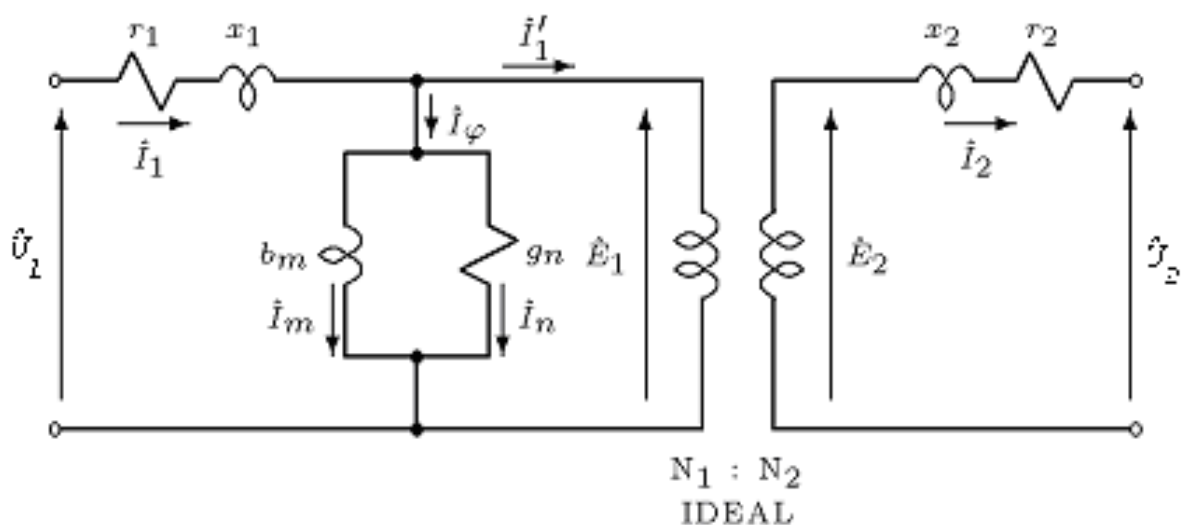
## 10.4 Transformador real - características de operação

Na prática, a operação de um transformador revela algumas características que **não são previstas** no modelo do transformador ideal.

- a) O enrolamento primário de um transformador real é uma bobina que, portanto, apresenta uma **impedância**. Logo, deve haver uma corrente no primário devido à aplicação da tensão, mesmo que o secundário esteja em aberto.
  
- b) A **tensão no secundário** de um transformador real **diminui com o aumento da carga** (aumento da corrente no secundário), mesmo que a tensão no primário seja mantida constante, indicando que a relação entre as tensões do primário e do secundário não é constante e igual à relação de espiras, mas varia de acordo com a carga.

c) Tanto as bobinas como o núcleo de um transformador real apresentam aquecimento. Este fato demonstra que **parte da potência de entrada do transformador é dissipada no próprio equipamento**, o que não é previsto pelo modelo do transformador ideal.

**Modelo apropriado para a análise de um transformador real que leve em conta todos esses efeitos:**

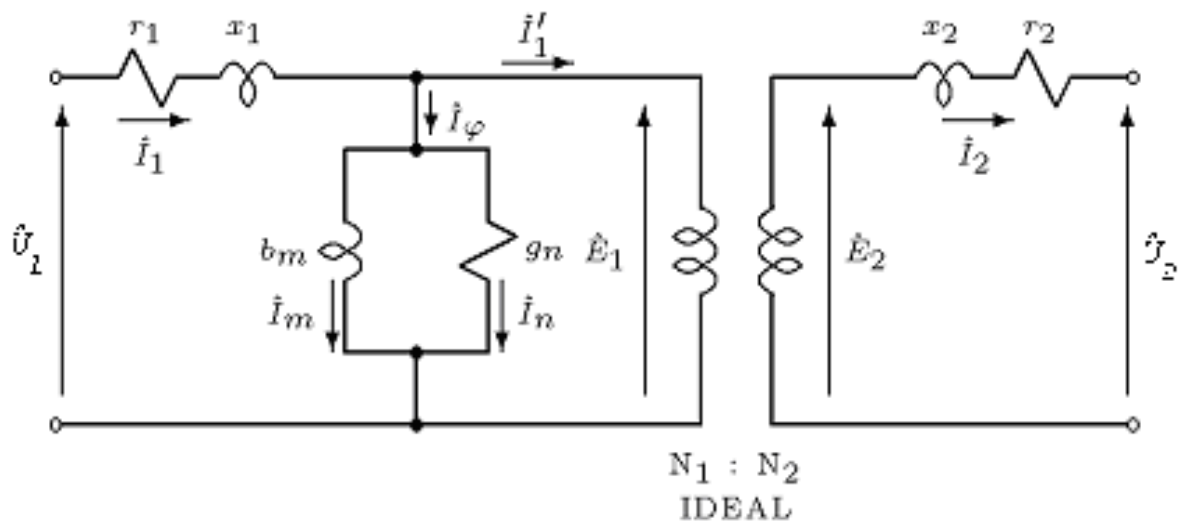


$r_1$  e  $r_2$  - perdas ôhmicas

$x_1$  e  $x_2$  - dispersão de fluxo

$g_n$  - (condutância) perdas no núcleo

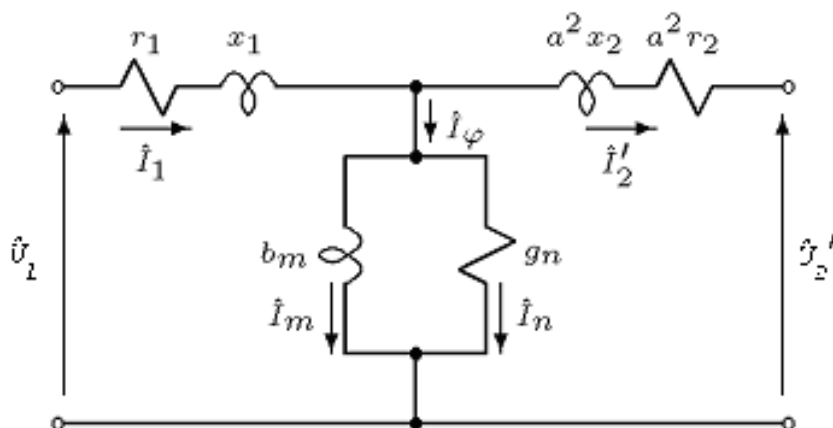
$b_m$  - (susceptância) magnetização do núcleo



Para compor o modelo do transformador, resistores e reatâncias são associados a um transformador ideal.

A relação de espiras é válida para  $\hat{E}_1$  e  $\hat{E}_2$  e não para  $\hat{U}_1$  e  $\hat{U}_2$ .

É possível eliminar o transformador ideal do circuito equivalente, refletindo-se os parâmetros  $r_2$  e  $x_2$  para o primário:



$$a = RE = \frac{N_1}{N_2}$$

## Rendimento

$$\eta = \frac{E_{saída}}{E_{entrada}} \times 100\%$$

$\eta \rightarrow$  rendimento expresso em porcentagem

Para um transformador pode-se calcular o rendimento através da medição da potência ativa no enrolamento primário e no enrolamento secundário, ou, através das potências aparentes, primário e secundário, obtidas pelos produtos das respectivas medidas de tensão e corrente.

### Exemplo 10.4

Para um determinado transformador foram realizadas as seguintes medidas:

Primário	Secundário
220 V	105 V
5,0 A	9,5 A
935 W	898 W



Com base nas potências ativas:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{898}{935} \times 100\% = 96,04\%$$

Com base na tensão e na corrente:

$$\eta = \frac{|S|_{saída}}{|S|_{entrada}} \times 100\% = \frac{105 \times 9,5}{220 \times 5,0} \times 100\% = 90,68\%$$

## Regulação

A tensão secundária como função da corrente de carga ( $U_2 \times I_2$ ) fornece a curva de regulação do transformador.

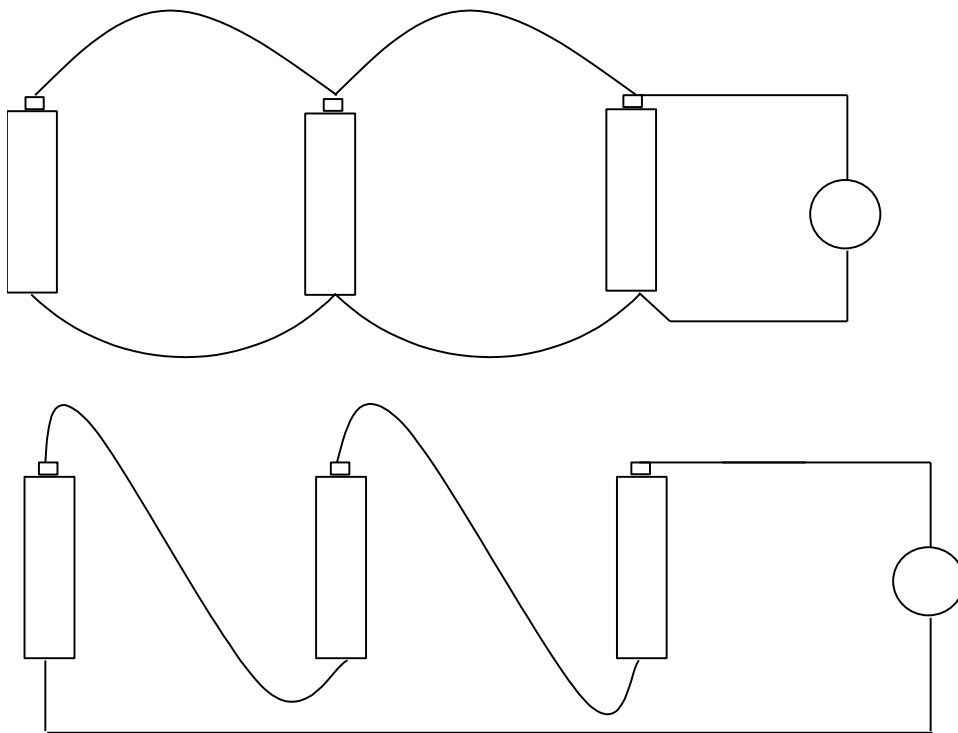
Percentualmente, a regulação (Reg) de tensão de um transformador pode ser obtida por:

$$Reg = \frac{U_{2(vazio)} - U_{2(plena\ carga)}}{U_{2(plena\ carga)}} \cdot 100\%$$

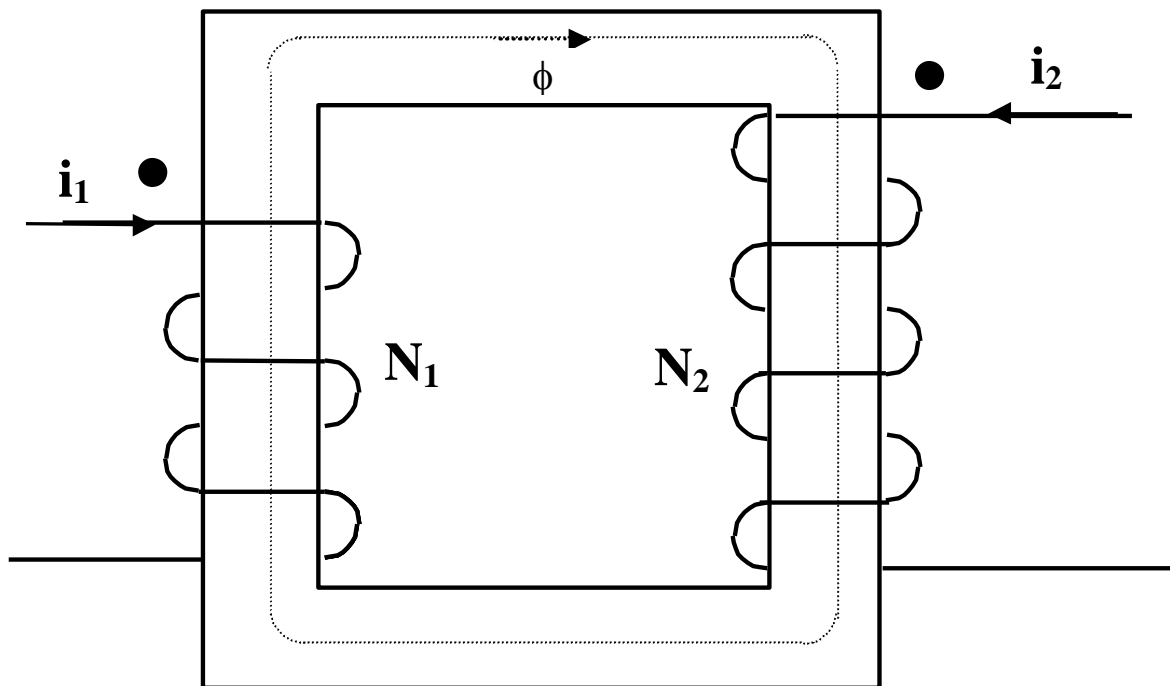
## 10.5 Polaridade dos enrolamentos

O conhecimento da polaridade dos terminais das bobinas em um transformador é fundamental quando for necessário, p.ex., conectar transformadores em paralelo ou ligar terminal da bobina primária ao da secundária para a configuração de autotransformador.

ASSOCIAR COM CONEXÃO PARALELA OU SÉRIE DE PILHAS



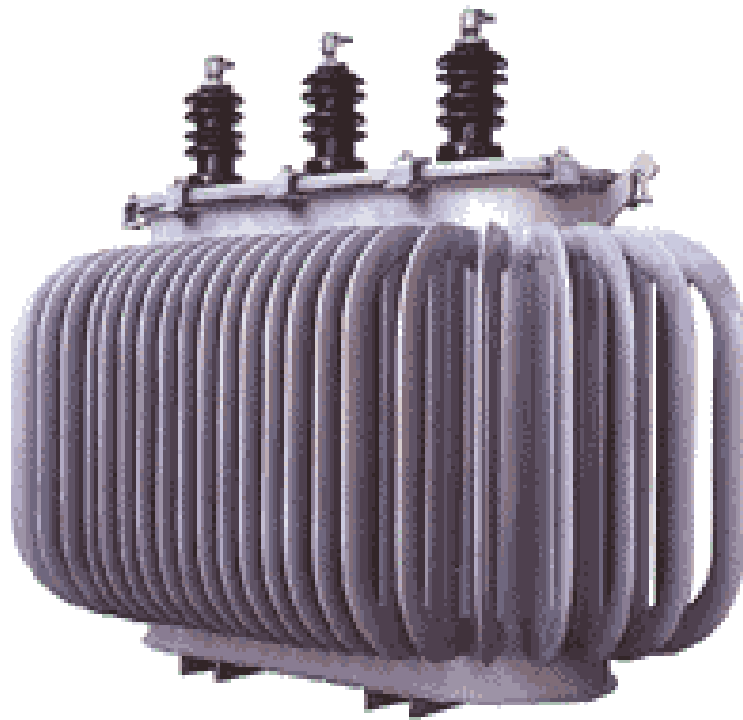
Notação usual para a identificação da polaridade:



A notação indicada na figura sugere que as correntes que circulam pelas bobinas, entrando pelos terminais marcados, geram fluxos magnéticos no mesmo sentido (coincidentes).

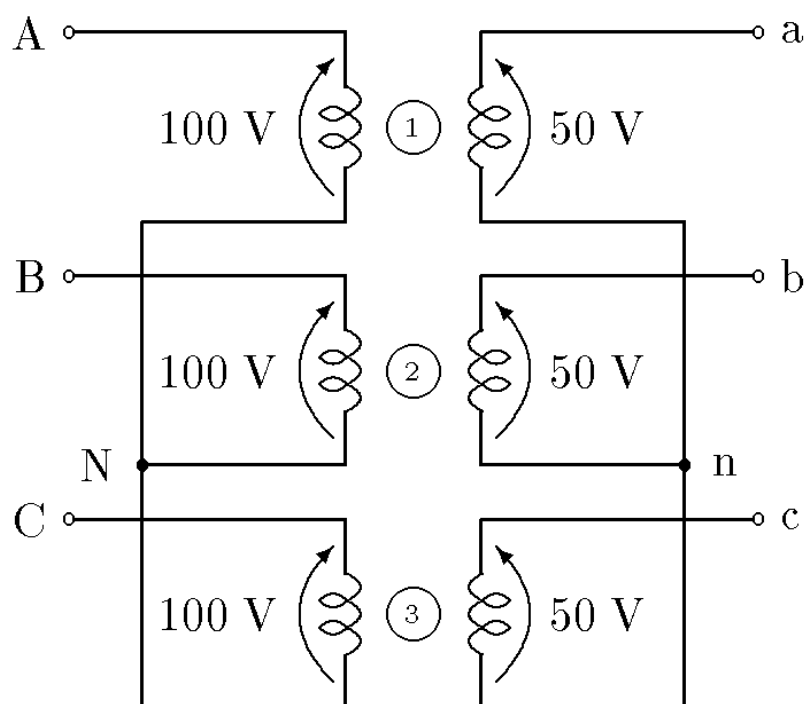
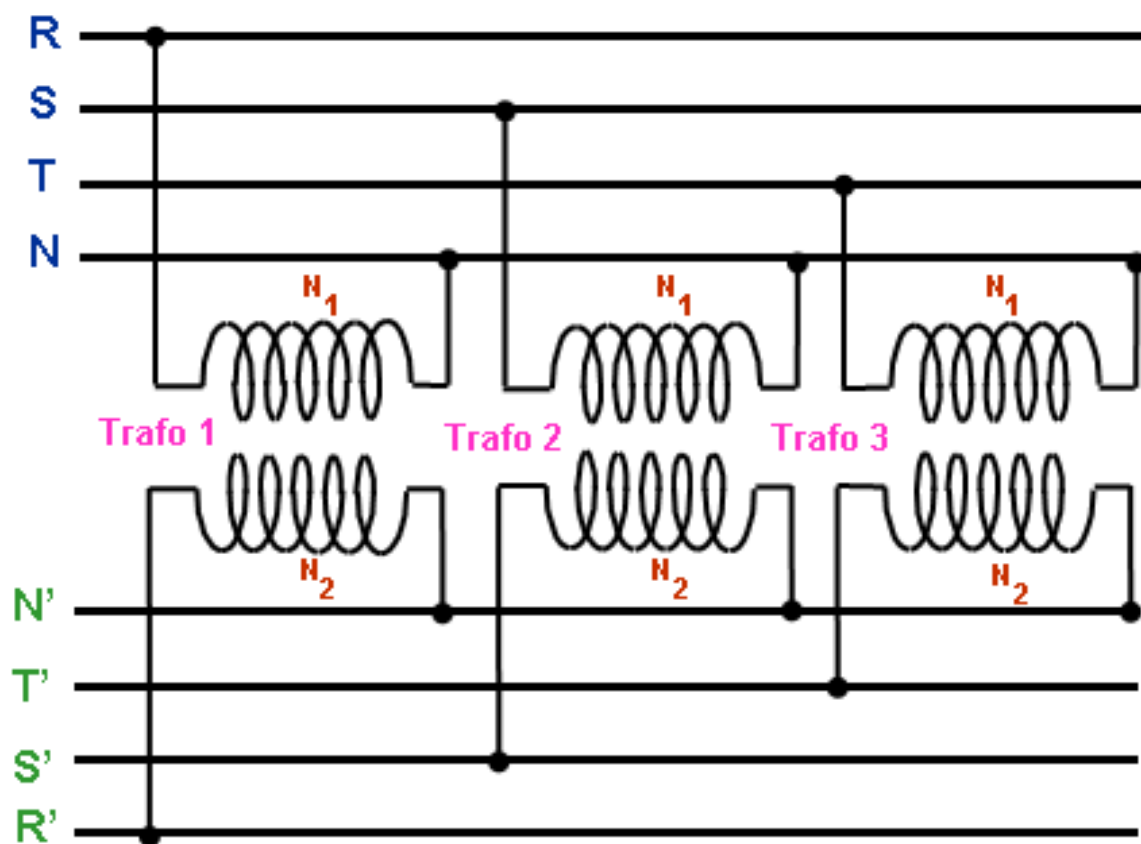
ATENÇÃO: ISTO É APENAS UMA CONVENÇÃO

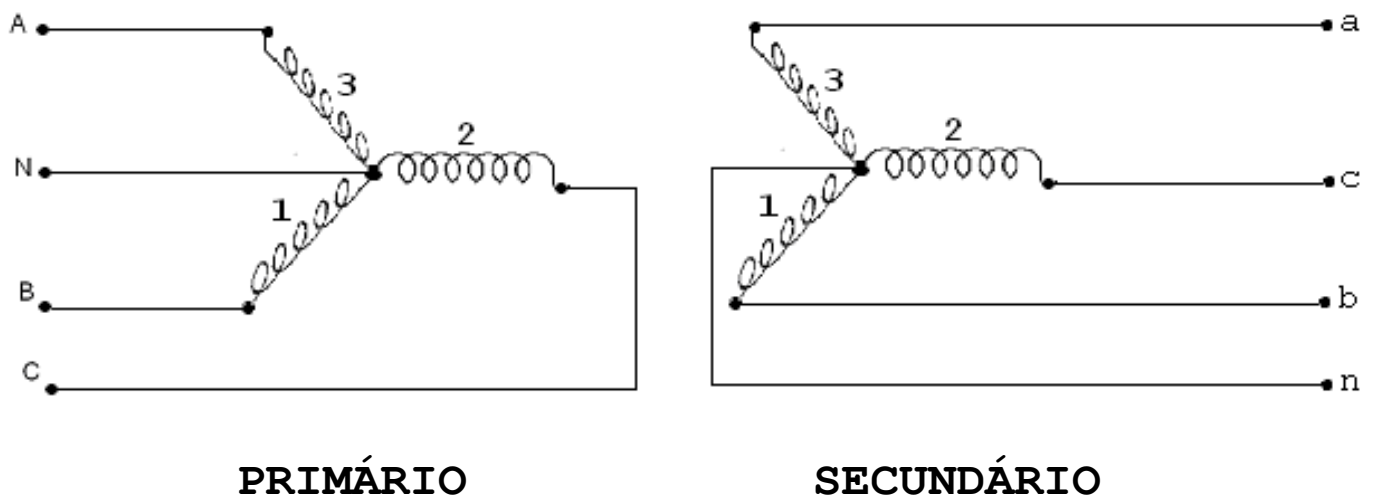
## 10.6 Transformador trifásico



Três transformadores monofásicos idênticos podem ser conectados de maneira conveniente resultando em um transformador trifásico.

Uma das ligações possíveis é a Y-Y:





## Esquema padrão para a ligação Y-Y

Para a sequência de fases ABC e a fase a como referência angular:

$$\hat{U}_{AN} = 100 \angle 0^\circ \text{ V} \qquad \hat{U}_{BN} = 100 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{CN} = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{AB} = 100\sqrt{3} \angle 30^\circ \text{ V} \qquad \hat{U}_{BC} = 100\sqrt{3} \angle -90^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{CA} = 100\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ V}$$

## PARA O TRANSFORMADOR TRIFÁSICO:

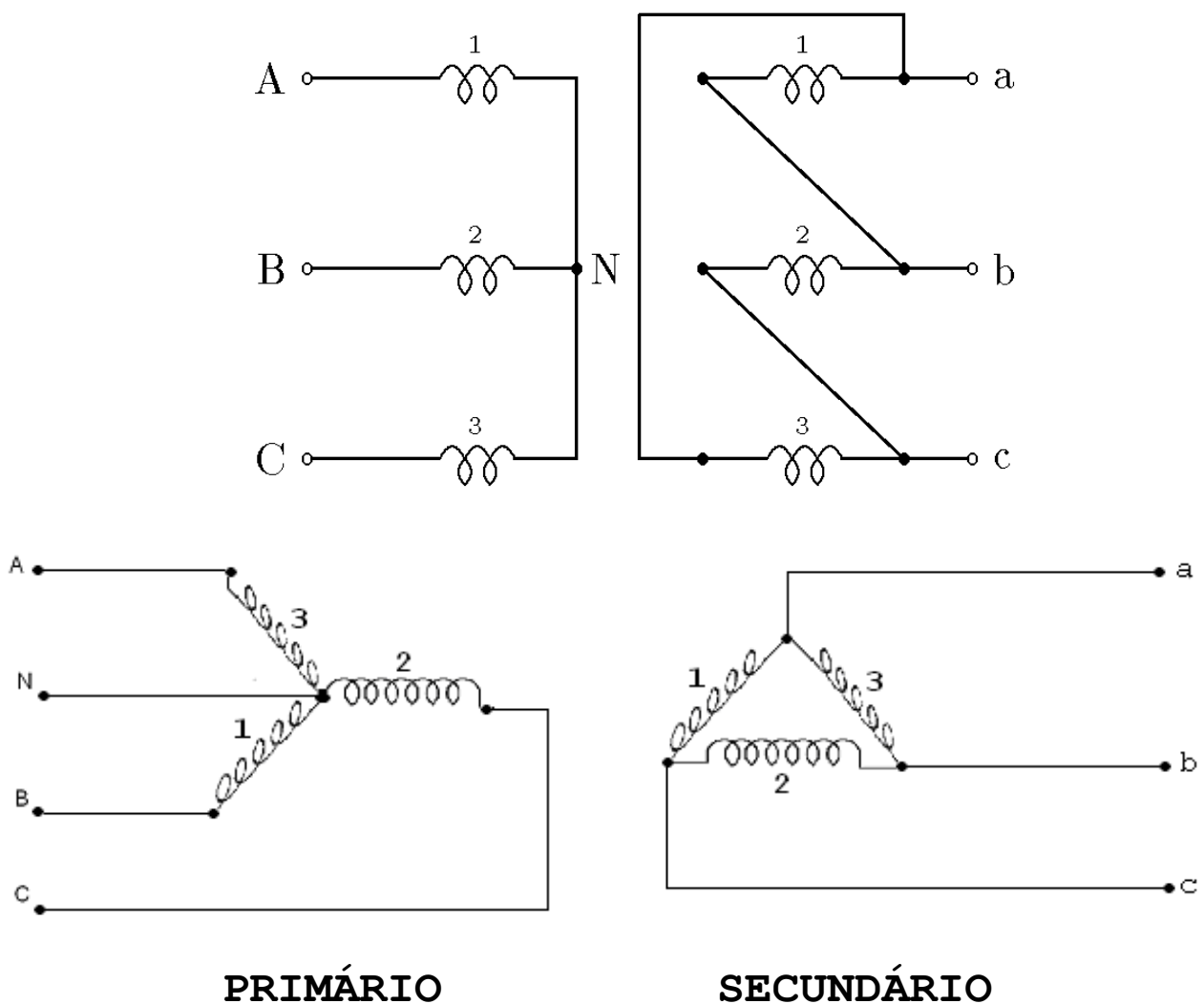
### RELAÇÃO de ESPIRAS

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{bob.prim.}}{U_{bob.sec.}}$$

### RELAÇÃO de TRANSFORMAÇÃO

$$RT = \frac{U_{linha prim.}}{U_{linha sec.}}$$

### Para a ligação Y-Δ:



### Esquema padrão para a ligação Y-Δ

Considerando a sequência de fases ABC e a fase A como referência angular, pode-se definir as tensões do primário como:

$$\hat{U}_{AN} = 100 \angle 0^\circ \text{ V} \qquad \hat{U}_{BN} = 100 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{CN} = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{AB} = 100\sqrt{3} \angle 30^\circ \text{ V} \qquad \hat{U}_{BC} = 100\sqrt{3} \angle -90^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{CA} = 100\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ V}$$

Conseqüentemente, no secundário tem-se:

$$\hat{U}_{ab} = 50 \angle 0^\circ \text{ V} \qquad \hat{U}_{bc} = 50 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$\hat{U}_{ca} = 50 \angle 120^\circ \text{ V}$$

RELAÇÃO de ESPIRAS	RELAÇÃO de TRANSFORMAÇÃO
$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{bob.prim}}{U_{bob.sec.}} = \frac{100}{50} = 2$	$RT = \frac{U_{linha prim.}}{U_{linha sec.}} = \frac{100\sqrt{3}}{50} = 2\sqrt{3}$