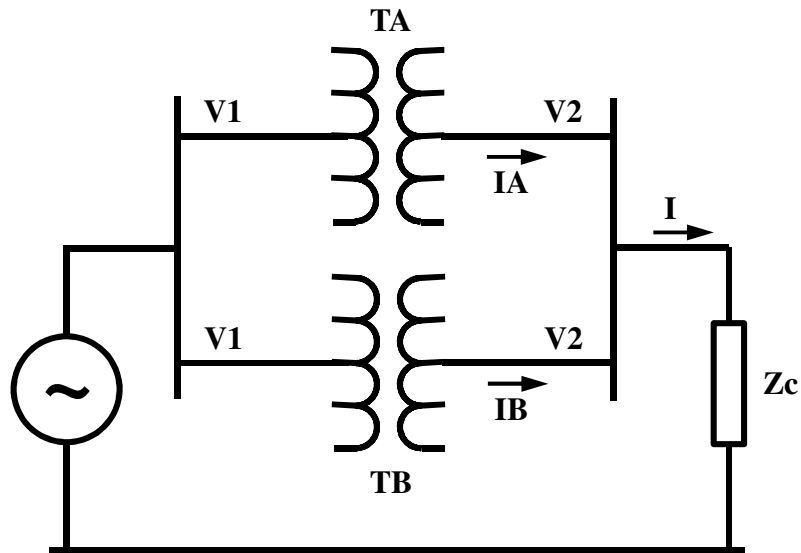


### PARALELISMO DE TRANSFORMADORES



TRANSF. - TA :  $S_A$  ;  $a_A$  ;  $Z_A$

TRANSF. - TB :  $S_B$  ;  $a_B$  ;  $Z_B$

$$S_T \leq S_A + S_B$$

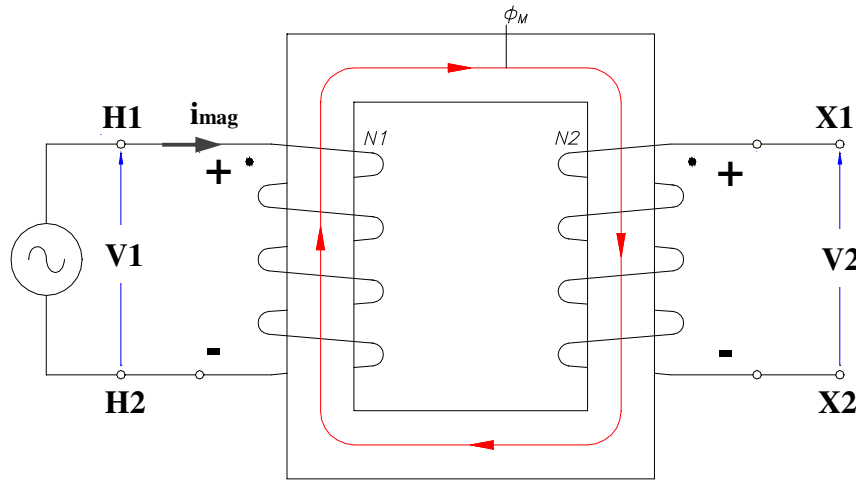
### RAZÕES PARA COLOCAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM PARALELO:

- **NECESSIDADE OU POSSIBILIDADE DE AMPLIAÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA**
- **CONFIABILIDADE DE OPERAÇÃO**
- **MENOR CUSTO DE UNIDADES RESERVA**
- **OPERAÇÃO DO CONJUNTO COM RENDIMENTO OTIMIZADO**
- **LIMITAÇÃO DE PROJETO PARA POTÊNCIAS UNITÁRIAS MUITO ELEVADAS**

### CONDIÇÕES NECESSÁRIAS E SUFICIENTES PARA O PARALELISMO:

- **MESMA POLARIDADE (MESMO DESLOCAMENTO ANGULAR PARA 3 $\phi$ ) → OBRIGATÓRIO**
- **MESMAS TENSÕES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA - MESMA RELAÇÃO  $N_1/N_2$  → DESEJÁVEL**
- **MESMA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE EM p.u. → DESEJÁVEL**

**POLARIDADE DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR**



**H1 ; H2 : DESIGNAÇÃO GENÉRICA DOS TERMINAIS DE AT**

**X1 ; X2 : DESIGNAÇÃO GENÉRICA DOS TERMINAIS DE BT**

**POLARIDADE → CARACTERÍSTICA ASSOCIADA AO:**

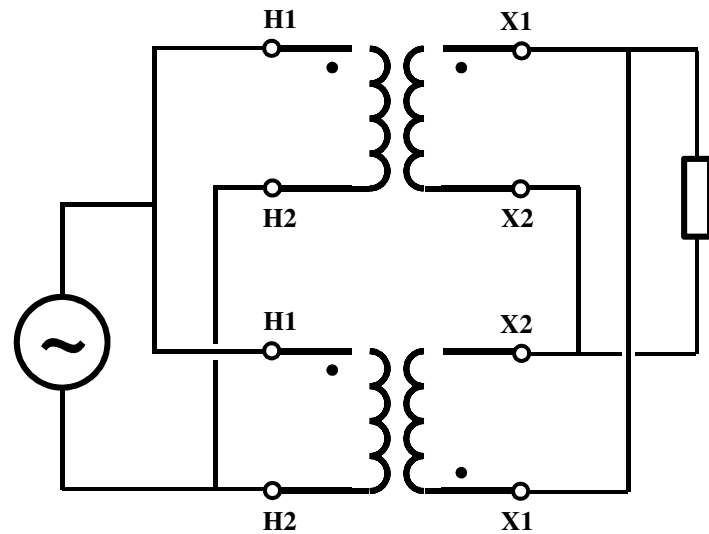
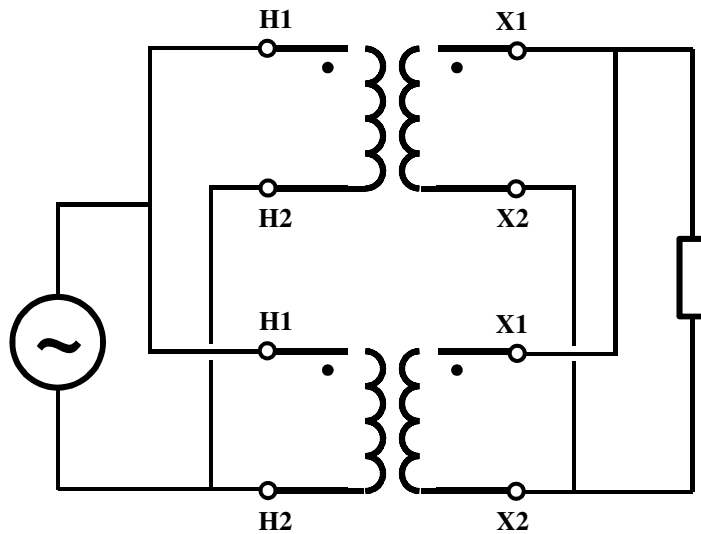
**SENTIDO DE ENROLAMENTO DAS BOBINAS**

**SENTIDO RELATIVO DE CONCATENAÇÃO DO FLUXO  $\Phi_M$  COM  $N_1$  E  $N_2$**

**PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR A POLARIDADE:**

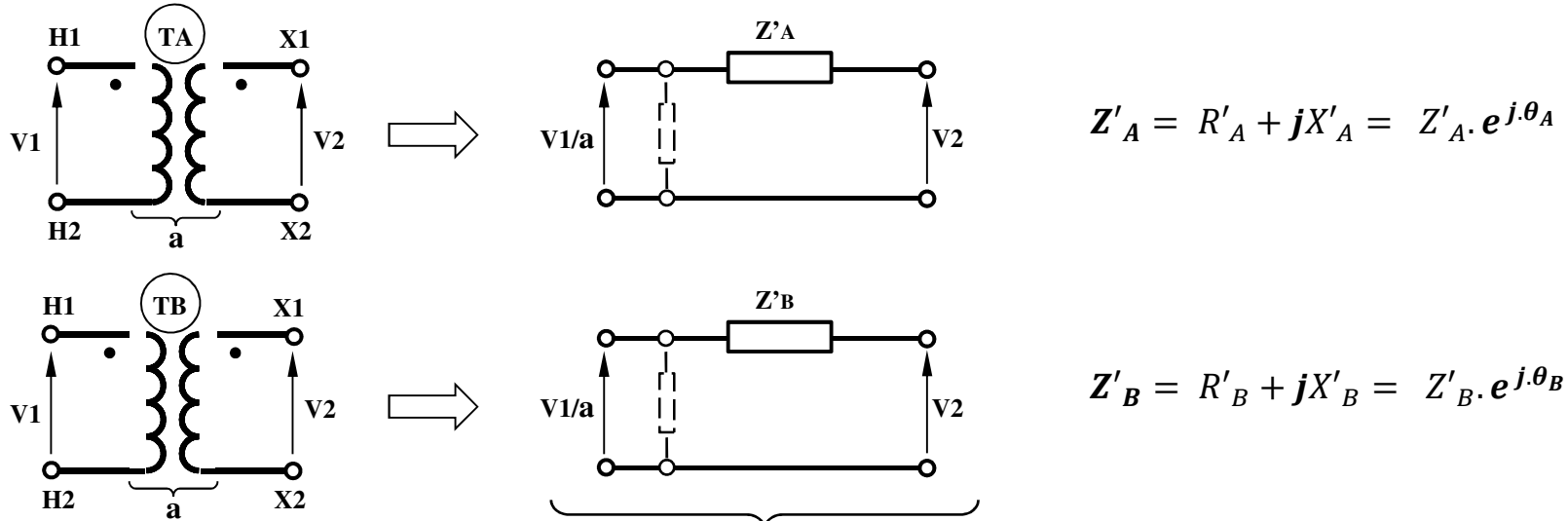
SE  $|V| \approx |V_1| - |V_2| \rightarrow \alpha = X_1 ; \beta = X_2$   
 → “•” EM  $\alpha$

SE  $|V| \approx |V_1| + |V_2| \rightarrow \alpha = X_2 ; \beta = X_1$   
 → “•” EM  $\beta$

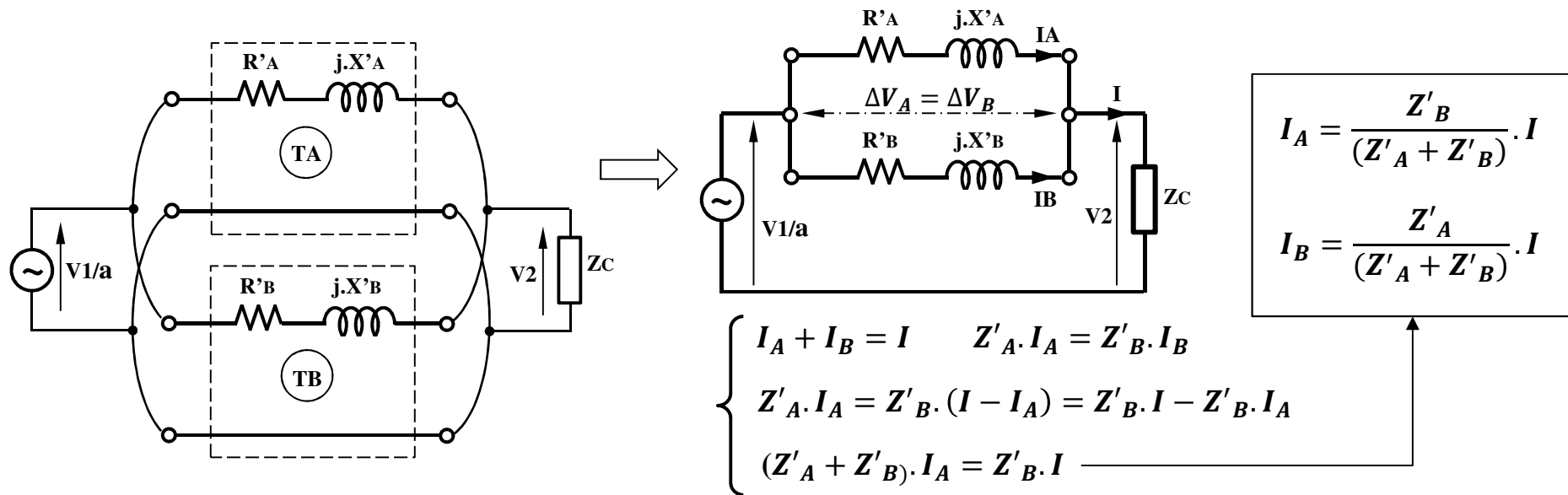


**CONEXÕES EM PARALELO EM FUNÇÃO DAS POLARIDADES DAS BOBINAS**

PARALELISMO DE TRANSFORMADORES COM MESMA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO  $a = N_1/N_2$



**CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AO SECUNDÁRIO:**



## ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA IMPEDÂNCIA NO CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES EM PARALELO

$$I_A = \frac{Z'_B}{(Z'_A + Z'_B)} \cdot I \quad I_B = \frac{Z'_A}{(Z'_A + Z'_B)} \cdot I \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{I_A}{I_B} = \frac{Z'_B}{Z'_A} = \frac{Z'_B \cdot e^{j\theta_B}}{Z'_A \cdot e^{j\theta_A}} = \frac{Z'_B}{Z'_A} \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)}} \quad (1)$$

## IMPEDÂNCIAS EM VALOR p.u. :

$$z'_{B(pu)} = \frac{Z'_B}{Z_{Bbase}} \quad ; \quad Z_{Bbase} = \frac{V_2}{I_{B_N}} = \frac{V_2^2}{S_{B_N}} \quad \Rightarrow \quad z'_{B(pu)} = \frac{Z'_B \cdot I_{B_N}}{V_2} = \frac{Z'_B \cdot S_{B_N}}{V_2^2} \quad \Rightarrow \quad Z'_B = z'_{B(pu)} \cdot \frac{V_2}{I_{B_N}} = z'_{B(pu)} \cdot \frac{V_2^2}{S_{B_N}}$$

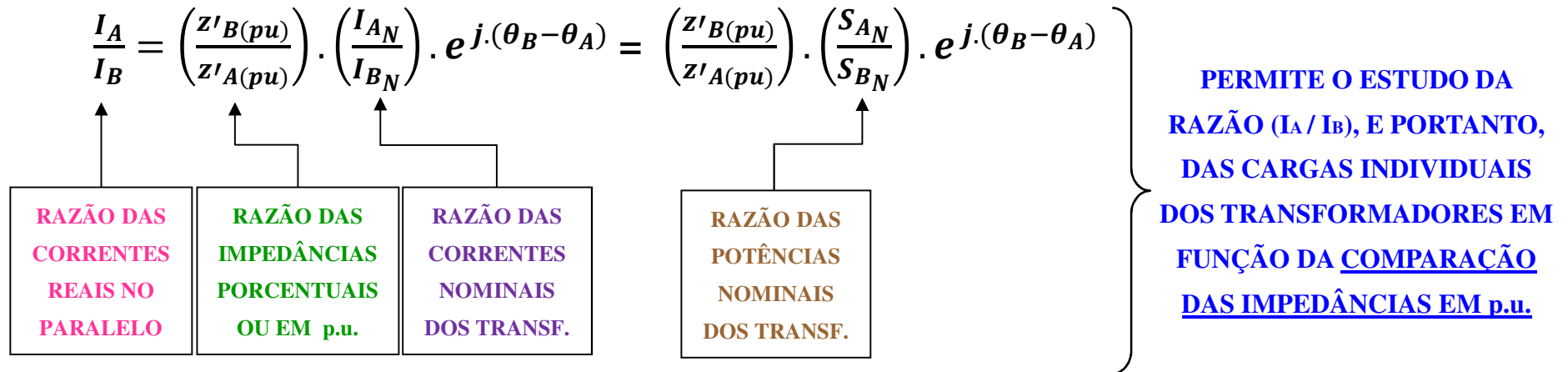
$$z'_{A(pu)} = \frac{Z'_A}{Z_{Abase}} \quad ; \quad Z_{Abase} = \frac{V_2}{I_{A_N}} = \frac{V_2^2}{S_{A_N}} \quad \Rightarrow \quad z'_{A(pu)} = \frac{Z'_A \cdot I_{A_N}}{V_2} = \frac{Z'_A \cdot S_{A_N}}{V_2^2} \quad \Rightarrow \quad Z'_A = z'_{A(pu)} \cdot \frac{V_2}{I_{A_N}} = z'_{A(pu)} \cdot \frac{V_2^2}{S_{A_N}}$$

IMPEDÂNCIAS EXPRESSAS EM FUNÇÃO  
DE SEUS RESPECTIVOS VALORES p.u.

## SUBSTITUÍNDO AS IMPEDÂNCIAS EXPRESSAS EM FUNÇÃO DOS VALORES p.u. NA EXPRESSÃO (1) :

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{z'_{B(pu)} \cdot \frac{V_2}{I_{B_N}}}{z'_{A(pu)} \cdot \frac{V_2}{I_{A_N}}} \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} = \left( \frac{z'_{B(pu)}}{z'_{A(pu)}} \right) \cdot \frac{I_{A_N}}{I_{B_N}} \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} = \left( \frac{z'_{B(pu)}}{z'_{A(pu)}} \right) \cdot \frac{S_{A_N}}{S_{B_N}} \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)}$$

$$\boxed{\frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{z'_{B(pu)}}{z'_{A(pu)}} \right) \cdot \left( \frac{I_{A_N}}{I_{B_N}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} = \left( \frac{z'_{B(pu)}}{z'_{A(pu)}} \right) \cdot \left( \frac{S_{A_N}}{S_{B_N}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)}}$$

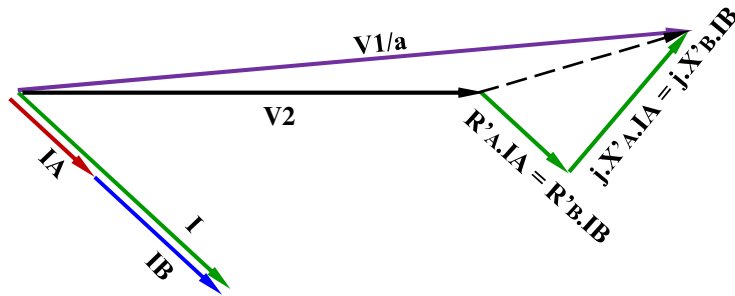


#### EXISTEM 4 SITUAÇÕES POSSÍVEIS:

- 1)  $Z'_{B(pu)} = Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B = \theta_A \rightarrow$  **MÓDULOS E FASES IGUAIS  $\rightarrow$  CASO IDEAL**
- 2)  $Z'_{B(pu)} = Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B \neq \theta_A \rightarrow$  **MÓDULOS IGUAIS E FASES DIFERENTES**
- 3)  $Z'_{B(pu)} \neq Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B = \theta_A \rightarrow$  **MÓDULOS DIFERENTES E FASES IGUAIS**
- 4)  $Z'_{B(pu)} \neq Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B \neq \theta_A \rightarrow$  **MÓDULOS E FASES DIFERENTES  $\rightarrow$  CASO USUAL**

1º CASO)  $Z'_B(\text{pu}) = Z'_A(\text{pu})$  e  $\theta_B = \theta_A \rightarrow$  MÓDULOS E FASES IGUAIS  $\rightarrow$  CASO IDEAL

$$\frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{Z'_B(\text{pu})}{Z'_A(\text{pu})} \right) \cdot \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} \Rightarrow \frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) = \text{NÚMERO REAL}$$



**CORRENTES REAIS NO PARALELO TÊM A MESMA FASE:**

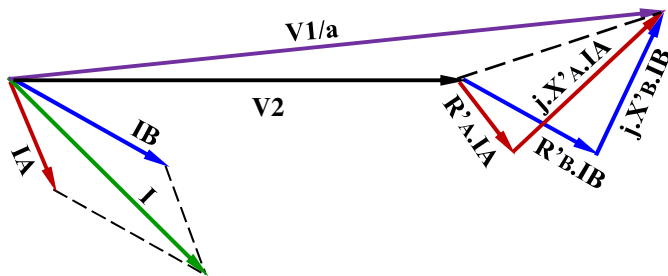
$$I = I_A + I_B \rightarrow |I| = |I_A| + |I_B| \rightarrow S_{\text{TOT}} = S_A + S_B$$

$I_A / I_B = I_{AN} / I_{BN} \rightarrow$  **CORRENTES EM CADA TRANSFORMADOR PROPORCIONAIS A SEUS VALORES NOMINAIS**

$\rightarrow$  **CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES PROPORCIONAL ÀS POTÊNCIAS NOMINAIS DE CADA UM**

2º CASO)  $Z'_B(\text{pu}) = Z'_A(\text{pu})$  e  $\theta_B \neq \theta_A \rightarrow$  MÓDULOS IGUAIS E FASES DIFERENTES

$$\frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} \Rightarrow = \text{NÚMERO COMPLEXO}$$



**CORRENTES REAIS NO PARALELO NÃO ESTÃO EM FASE:**

$$I = I_A + I_B \rightarrow |I| < |I_A| + |I_B| \rightarrow S_{\text{TOT}} < S_A + S_B$$

$I_A / I_B = (I_{AN} / I_{BN}) / \theta \rightarrow$  **CORRENTES EM CADA TRANSFORMADOR PROPORCIONAIS A SEUS VALORES NOMINAIS**

$\rightarrow$  **CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES PROPORCIONAL ÀS POTÊNCIAS NOMINAIS DE CADA UM**

3º CASO)  $Z'_{B(pu)} \neq Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B = \theta_A \rightarrow$  MÓDULOS DIFERENTES E FASES IGUAIS

$$\frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{Z'_{B(pu)}}{Z'_{A(pu)}} \right) \cdot \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) \Rightarrow \frac{I_A}{I_B} = K \cdot \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) ; K \neq 1$$

$$Z'_B < Z'_A \rightarrow \frac{I_A}{I_B} < \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \rightarrow \frac{I_B}{I_A} > \frac{I_{BN}}{I_{AN}}$$

**TRANSFORMADOR COM MENOR IMPEDÂNCIA  
SE CARREGA PROPORCIONALMENTE MAIS DO  
QUE O DE MAIOR IMPEDÂNCIA**

**CORRENTES REAIS NO PARALELO TÊM A MESMA FASE:**

$$I = I_A + I_B \rightarrow |I| = |I_A| + |I_B| \rightarrow S_{TOT} = S_A + S_B$$

$I_A / I_B = K \cdot (I_{AN} / I_{BN}) \rightarrow$  **CORRENTES EM CADA  
TRANSFORMADOR NÃO SÃO PROPORCIONAIS A SEUS  
VALORES NOMINAIS**

$\rightarrow$  **CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES NÃO É  
PROPORCIONAL ÀS POTÊNCIAS NOMINAIS DE CADA UM**

4º CASO)  $Z'_{B(pu)} \neq Z'_{A(pu)}$  e  $\theta_B \neq \theta_A \rightarrow$  MÓDULOS E FASES DIFERENTES

$$\frac{I_A}{I_B} = \left( \frac{Z'_{B(pu)}}{Z'_{A(pu)}} \right) \cdot \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} \Rightarrow \frac{I_A}{I_B} = K \cdot \left( \frac{I_{AN}}{I_{BN}} \right) \cdot e^{j(\theta_B - \theta_A)} ; K \neq 1$$

**TRANSFORMADOR COM MENOR IMPEDÂNCIA  
SE CARREGA PROPORCIONALMENTE MAIS DO  
QUE O DE MAIOR IMPEDÂNCIA**

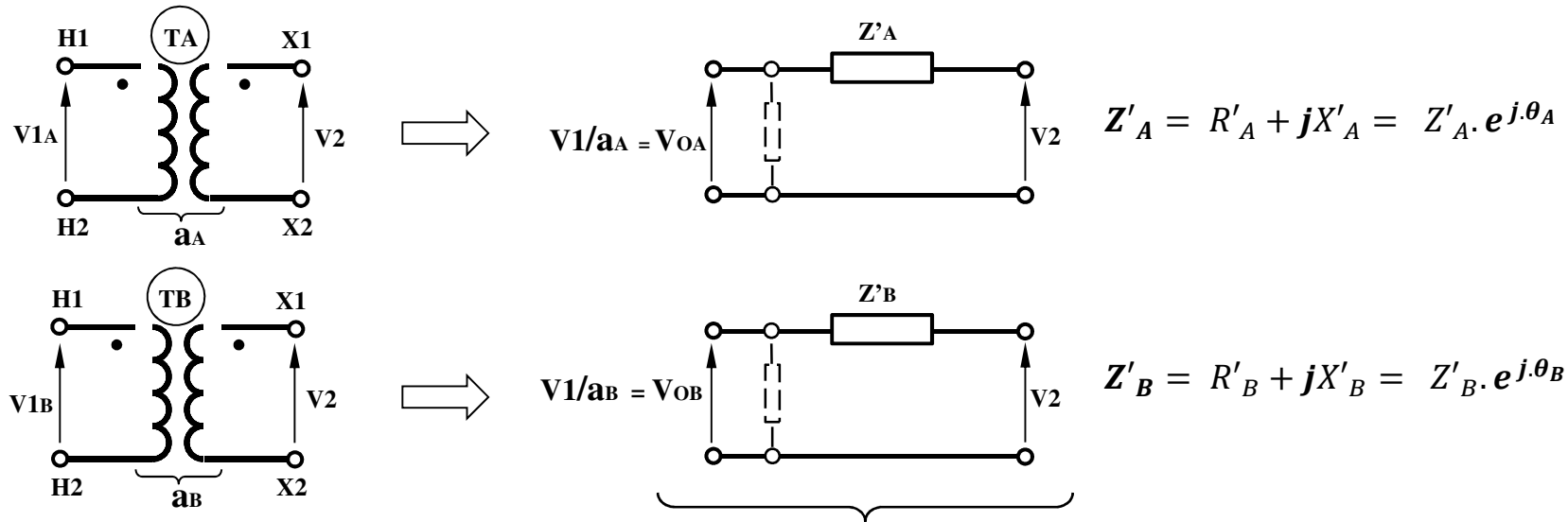
**CORRENTES REAIS NO PARALELO NÃO ESTÃO EM FASE:**

$$I = I_A + I_B \rightarrow |I| < |I_A| + |I_B| \rightarrow S_{TOT} < S_A + S_B$$

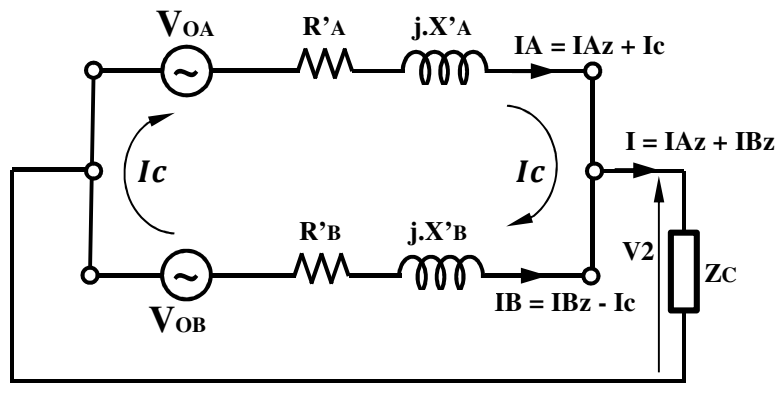
$I_A / I_B = K \cdot (I_{AN} / I_{BN}) / \theta \rightarrow$  **CORRENTES EM CADA  
TRANSFORMADOR NÃO SÃO PROPORCIONAIS A SEUS  
VALORES NOMINAIS**

$\rightarrow$  **CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES NÃO É  
PROPORCIONAL ÀS POTÊNCIAS NOMINAIS DE CADA UM**

PARALELISMO DE TRANSFORMADORES COM DIFERENTES RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO  $a = N1/N2$

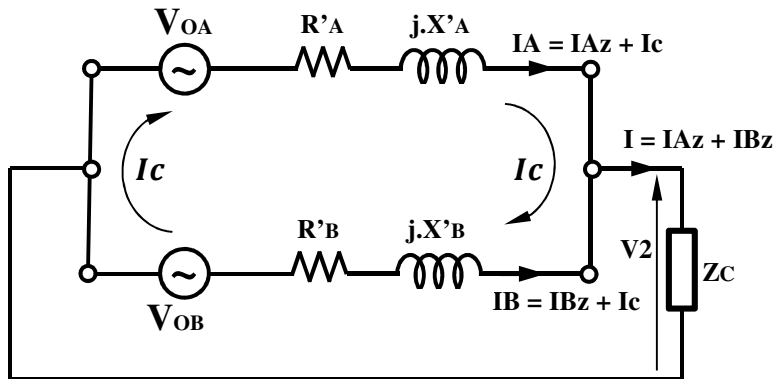


**CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AO SECUNDÁRIO:  $a_A \neq a_B \rightarrow V_{OA} \neq V_{OB}$**



- $I_{Az}$  : CORRENTE DO TRANSF. TA QUE É TRANSFERIDA À CARGA
- $I_{Bz}$  : CORRENTE DO TRANSF. TB QUE É TRANSFERIDA À CARGA
- $I_c$  : CORRENTE DE CIRCULAÇÃO ENTRE TRANSF. TA e TB
- $I = I_{Az} + I_{Bz}$  : CORRENTE NA CARGA
- $I_A$  e  $I_B$  : CORRENTES TOTAIS DOS TRANSFORMADORES TA e TB





EQUAÇÕES DA  
MALHA FORMADA  
PELO PARALELO:

$$\begin{cases} I_A + I_B = I \\ V_{0A} - Z'_A \cdot I_A = V_{0B} - Z'_B \cdot I_B \end{cases}$$

$$V_{0A} - Z'_A \cdot I_A = V_{0B} - Z'_B \cdot (I - I_A) = V_{0B} - Z'_B \cdot I + Z'_B \cdot I_A$$

$$I_A \cdot (Z'_A + Z'_B) = V_{0A} - V_{0B} + Z'_B \cdot I$$

$$I_A = \frac{Z'_B}{(Z'_A + Z'_B)} \cdot I + \frac{(V_{0A} - V_{0B})}{(Z'_A + Z'_B)} = I_{Az} + I_C$$

$$I_B = \frac{Z'_A}{(Z'_A + Z'_B)} \cdot I - \frac{(V_{0A} - V_{0B})}{(Z'_A + Z'_B)} = I_{Bz} + I_C$$

**2 COMPONENTES DE CORRENTE EM CADA TRANSFORMADOR:**

$I_{Az}$  e  $I_{Bz}$  → CONTRIBUIÇÃO DE CADA TRANSF. PARA A CARGA

$I_C$  : CORRENTE DE CIRCULAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES

→ SE:  $a_A = a_B$  →  $V_{0A} = V_{0B}$  →  $I_C = 0$

→ SE:  $a_A \neq a_B$  EM GRANDE PROPORÇÃO →  $I_C$  TORNA-SE INTENSA, PROVOCANDO SOBRECARGA NOS TRANSFORMADORES SEM CONTRIBUIÇÃO PARA A CARGA

→  $I_C$  ADMISSÍVEL ATÉ  $\approx 15\%$  DA CORRENTE NOMINAL DO TRANSFORMADOR DE MENOR POTÊNCIA INSTALADO NO PARALELO