

**PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR - ACOPLAMENTO COM O SECUNDÁRIO****FLUXO MÚTUO NO TRANSFORMADOR – RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO**

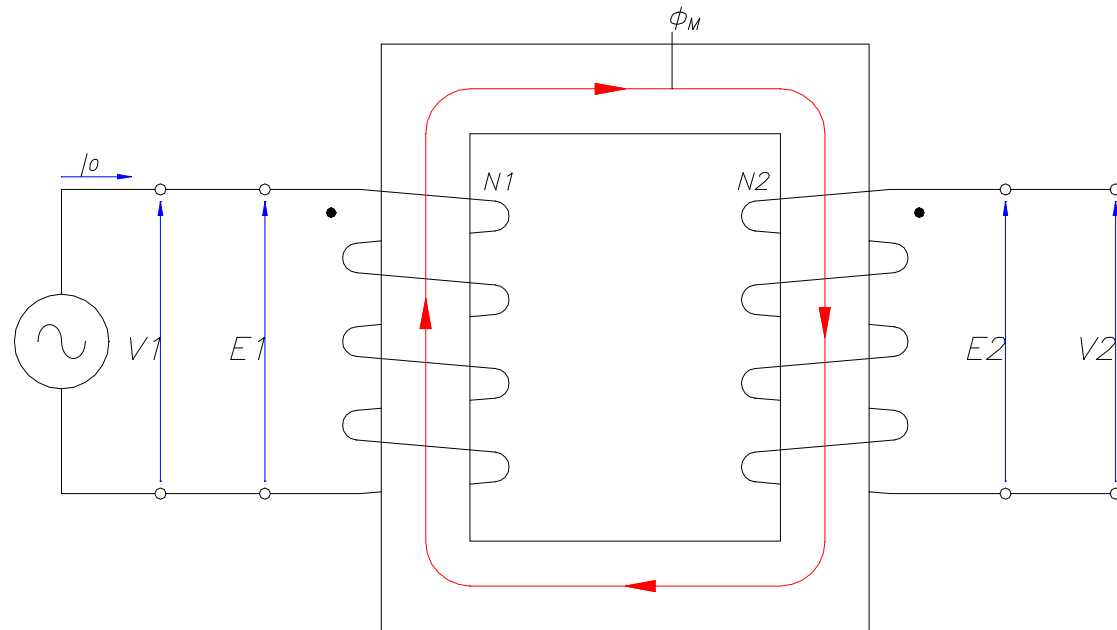
**TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA PRIMÁRIA (LEI DE FARADAY):**

$$\rightarrow V_1 \cong E_1 = 4,44.f.N_1 \cdot \Phi_M$$

**FLUXO CONFINADO NO NÚCLEO É COMUM ÀS DUAS BOBINAS (FLUXO MÚTUO):**

**TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA SECUNDÁRIA (LEI DE FARADAY):**

$$\rightarrow V_2 = E_2 = 4,44.f.N_2 \cdot \Phi_M$$



$$\text{RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: } a = E_1 / E_2 = N_1 / N_2$$

## FLUXOS DE REAÇÃO NO TRANSFORMADOR – CONFRONTO DE FORÇAS MAGNETOMOTRIZES

EM CARGA:  $I_2 = V_2 / Z_C$

$$F_{MM2} = N_2 \cdot I_2 \rightarrow \Phi_{R2}$$

TRANSITORIAMENTE:

$$\Phi_{RES} = \Phi_M - \Phi_{R2} < \Phi_M$$

DESMAGNETIZAÇÃO DO NÚCLEO:

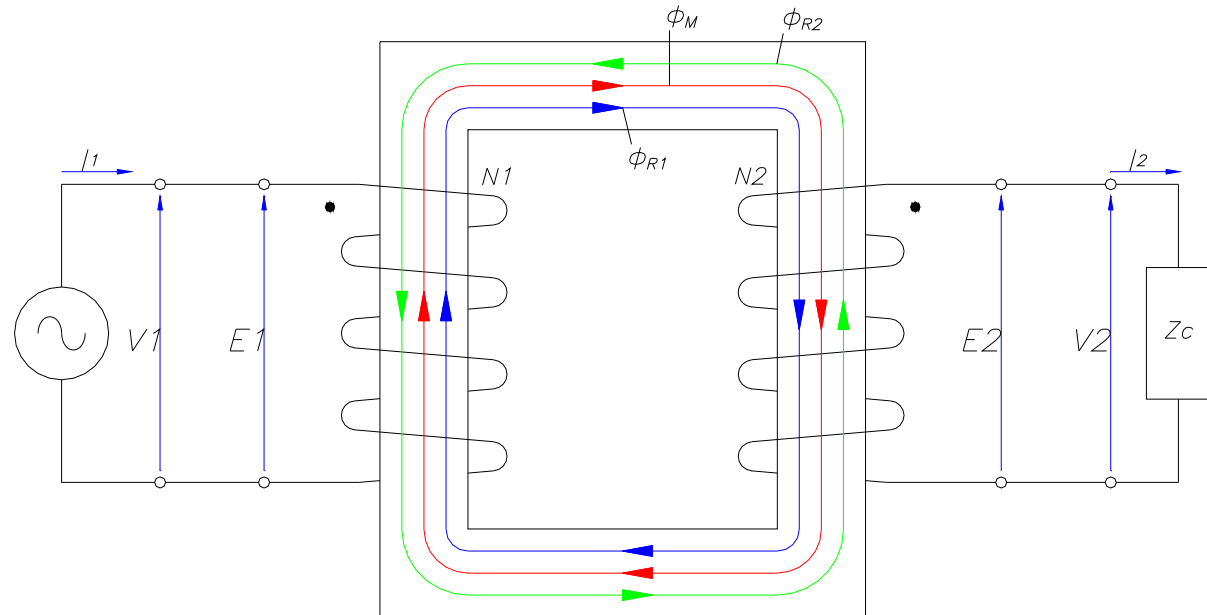
$$\rightarrow E_1 = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{RES}) < V_1$$

SISTEMA REAGE ABSORVENDO  $I_1$

$$\rightarrow F_{MM1} = N_1 \cdot I_1 \rightarrow \Phi_{R1} = \Phi_{R2}$$

RELUTÂNCIA É CONSTANTE:

$$\Phi_{R1} = \Phi_{R2} \rightarrow F_{MM1} = F_{MM2}$$



TRANSFORMADOR IDEAL EM CARGA

$$F_{MM1} = F_{MM2} \rightarrow N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \rightarrow I_1 / I_2 = N_2 / N_1 = 1 / a$$

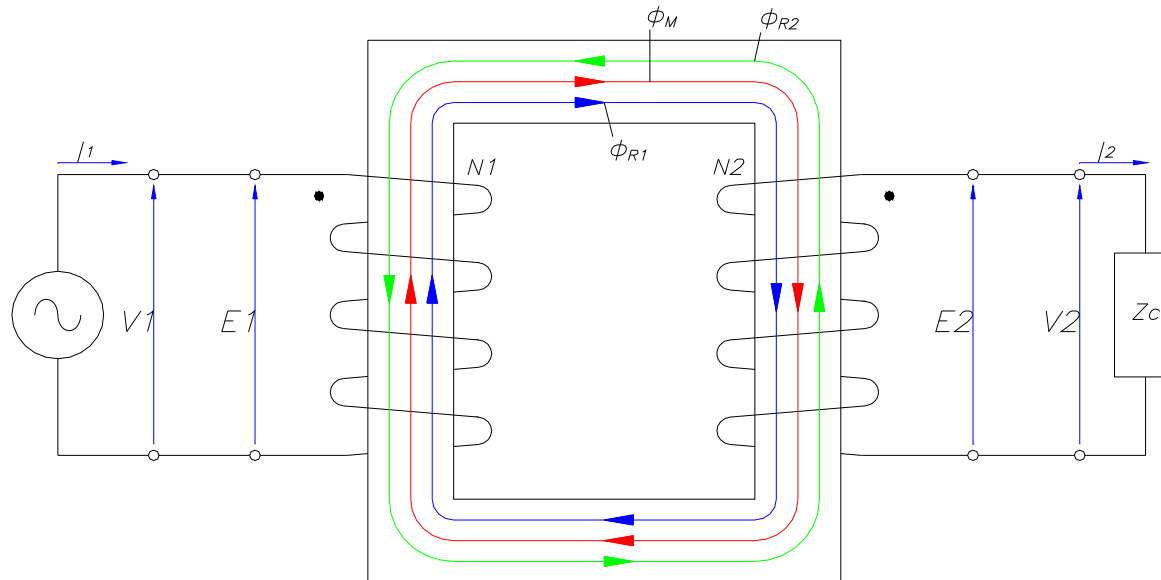
## POTÊNCIAS APARENTES NO TRANSFORMADOR – REFLEXÃO DA CARGA

POTÊNCIA APARENTE PRIMÁRIA:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 \cong E_1 \cdot I_1 = a \cdot E_2 \cdot I_2 / a = E_2 \cdot I_2 = S_2$$

POTÊNCIA APARENTE SECUNDÁRIA:

$$S_2 = V_2 \cdot I_2 \cong E_2 \cdot I_2$$



TRANSFORMADOR  
IDEAL EM CARGA

IMPEDÂNCIA DE CARGA VISTA PELA REDE:

$$Z_1 = V_1 / I_1 \cong E_1 / I_1 = a \cdot E_2 / (I_2 / a) = a^2 \cdot (E_2 / I_2) = a^2 \cdot Z_C$$

IMPEDÂNCIA DO SECUNDÁRIO  
REFLETIDA AO PRIMÁRIO:

$$Z'_C = a^2 \cdot Z_C$$

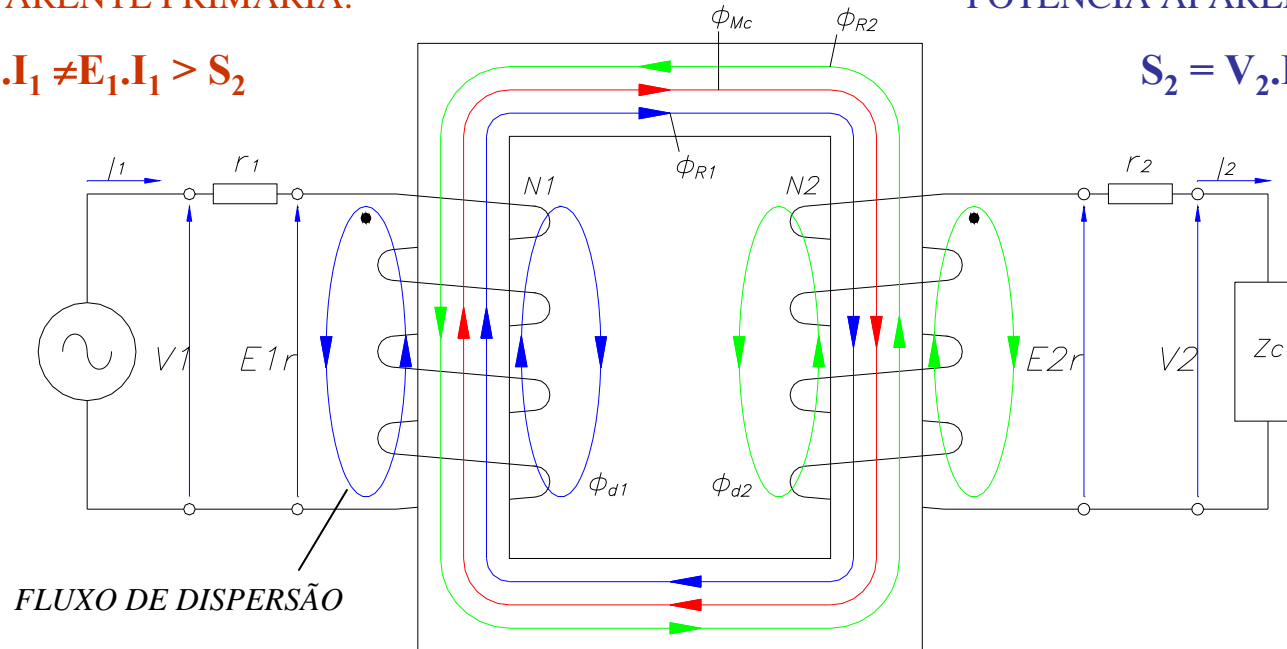
## INCORPORAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS NO TRANSFORMADOR REAL

POTÊNCIA APARENTE PRIMÁRIA:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 \neq E_1 \cdot I_1 > S_2$$

POTÊNCIA APARENTE SECUNDÁRIA:

$$S_2 = V_2 \cdot I_2 \neq E_2 \cdot I_2$$



EFEITOS ADICIONAIS DAS RESISTÊNCIAS (ALÉM DAS PERDAS JOULE):

→ **QUEDAS DE TENSÃO ÔHMICAS** -  $r_1 \cdot I_1$  NO PRIMÁRIO -  $r_2 \cdot I_2$  NO SECUNDÁRIO

EFEITOS ADICIONAIS DOS FLUXOS DE DISPERSÃO:

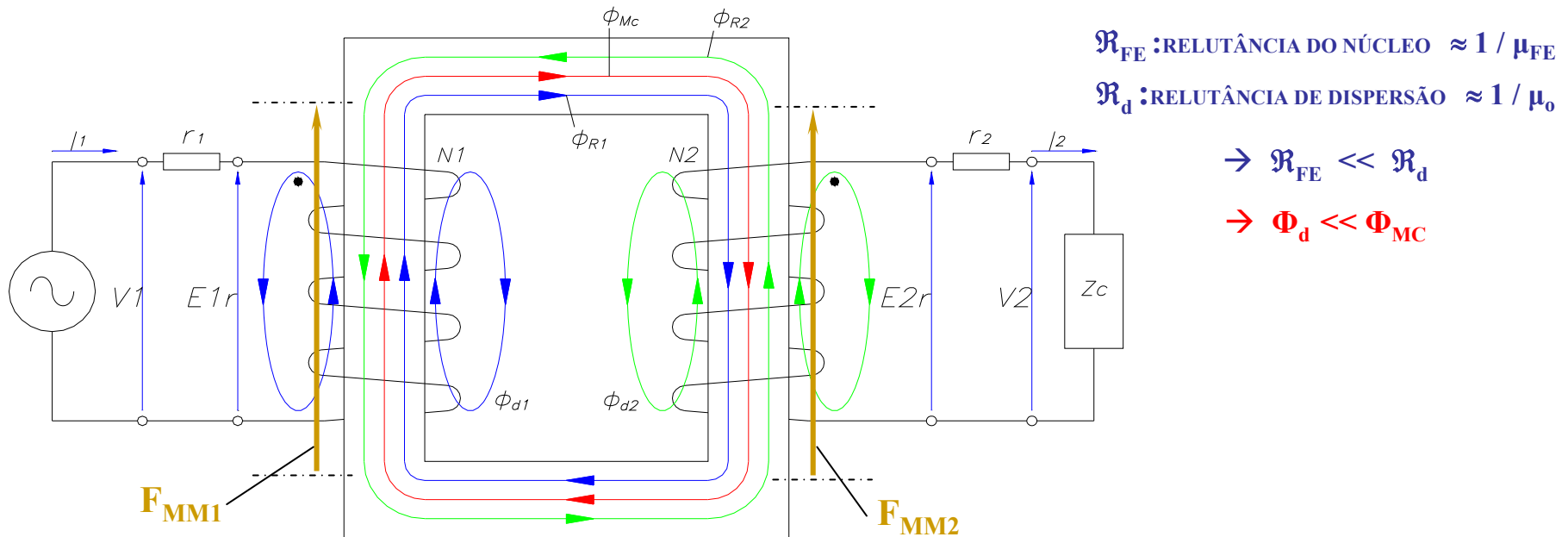
→ **QUEDAS DE TENSÃO REATIVAS** NO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

## CARACTERIZAÇÃO DA DISPERSÃO DE FLUXO NO TRANSFORMADOR EM CARGA

$F_{MM2} = N_2 \cdot I_2 \rightarrow$  APLICADA AO CIRCUITO MAGNÉTICO TOTAL : NÚCLEO + AR NO ENTORNO DA BOBINA 2<sup>ÁRIA</sup>

RESULTA FLUXO DE REAÇÃO TOTAL DO SECUNDÁRIO:  $\Phi_{R2T} = \Phi_{R2} + \Phi_{d2}$

$\rightarrow \Phi_{d2}$  NÃO CONCATENA COM O 1<sup>ÁRIO</sup> MAS APENAS COM O 2<sup>ÁRIO</sup>  $\rightarrow$  FLUXO DISPERSO SECUNDÁRIO



$F_{MM1} = N_1 \cdot I_1 \rightarrow$  APLICADA AO CIRCUITO MAGNÉTICO TOTAL : NÚCLEO + AR NO ENTORNO DA BOBINA 1<sup>ÁRIA</sup>

RESULTA FLUXO DE REAÇÃO TOTAL DO PRIMÁRIO:  $\Phi_{R1T} = \Phi_{R1} + \Phi_{d1}$

$\rightarrow \Phi_{d1}$  NÃO CONCATENA COM O 2<sup>ÁRIO</sup> MAS APENAS COM O 1<sup>ÁRIO</sup>  $\rightarrow$  FLUXO DISPERSO PRIMÁRIO

## EFEITOS DOS FLUXOS DE DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR EM CARGA

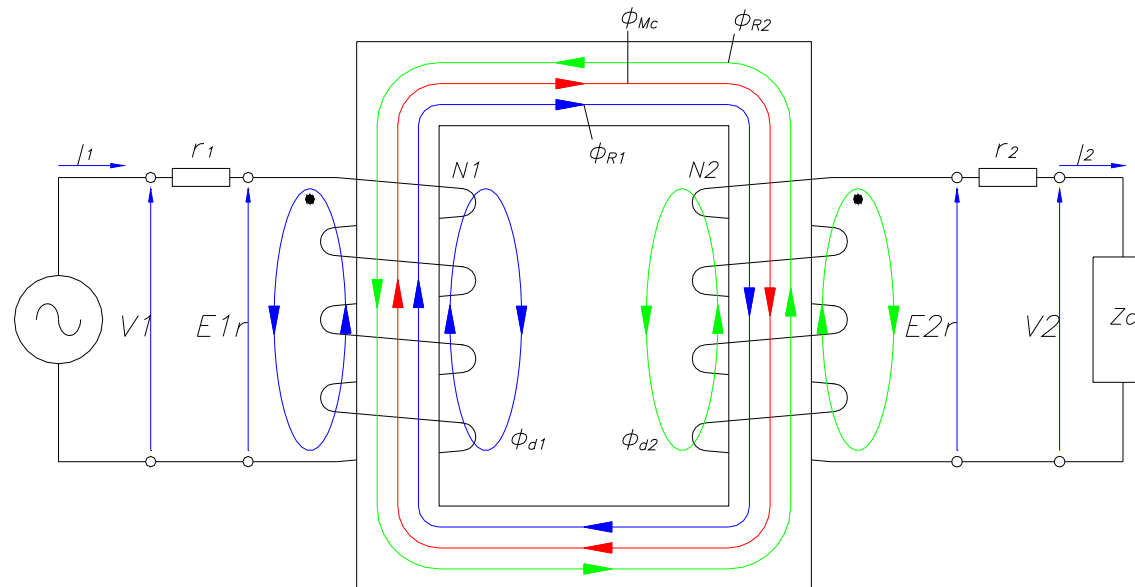
EM VAZIO: TENSÃO INDUZIDA NO PRIMÁRIO :  $E_{1r} = N_1 \cdot d/dt(\Phi_M) \cong V_1 \rightarrow \Phi_M$  : FLUXO MÚTUO ORIGINAL

EM CARGA:  $E_{1r} = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{TOT}) = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{MC} + \Phi_{d1}) \rightarrow \Phi_{TOT}$  : FLUXO TOTAL QUE CONCATENA  $N_1$  ( $= \Phi_M$ )

$\rightarrow$  FLUXO DISPERSO DO 1<sup>º</sup>ÁRIO -  $\Phi_{d1}$  - CONTRIBUI PARA TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA PRIMÁRIA

RESULTA:  $\Phi_{MC} = \Phi_{TOT} - \Phi_{d1} = \Phi_M - \Phi_{d1} < \Phi_M \rightarrow$  FLUXO MÚTUO EM CARGA MENOR QUE O ORIGINAL (VAZIO)

$\rightarrow$  FLUXO NO NÚCLEO NÃO É MAIS RIGOROSAMENTE CONSTANTE



## QUEDAS DE TENSÃO REATIVAS NO TRANSFORMADOR EM CARGA

NO PRIMÁRIO,  $\Phi_{d1}$  TEM MESMO SENTIDO DE  $\Phi_{MC}$  :

NO SECUNDÁRIO,  $\Phi_{d2}$  TEM SENTIDO CONTRÁRIO A  $\Phi_{MC}$  :

$$E_{1r} = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{MC} + \Phi_{d1})$$

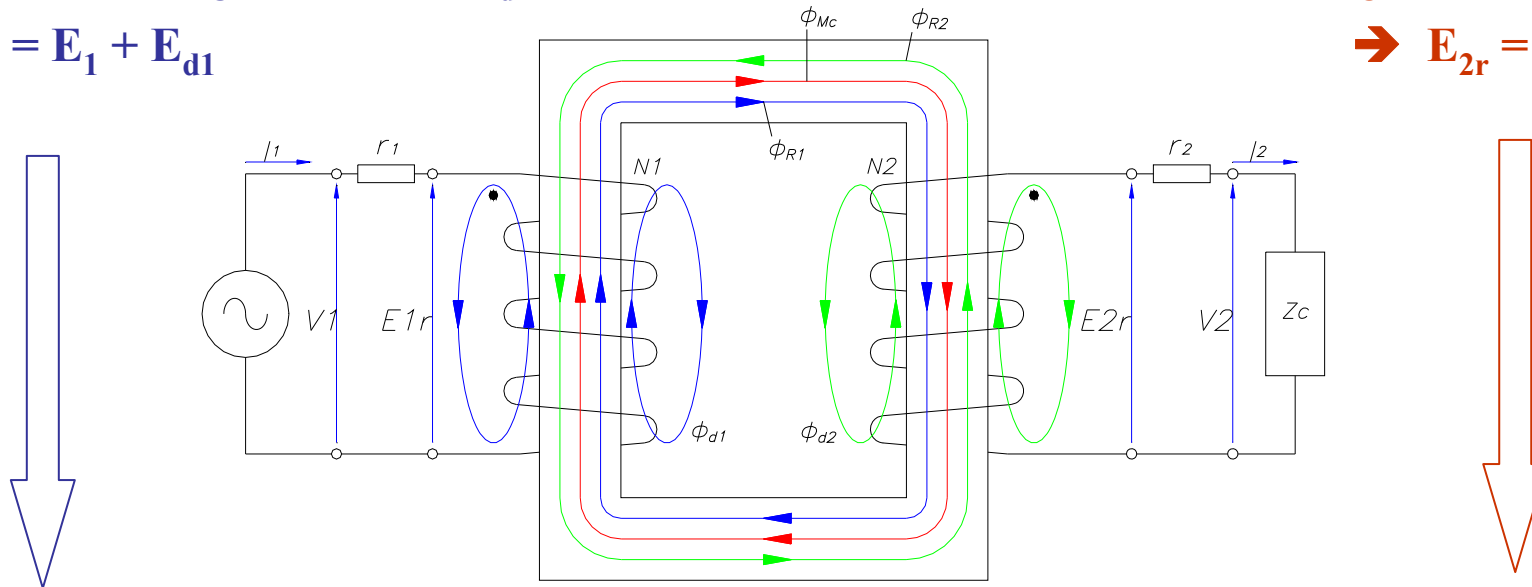
$$E_{2r} = N_2 \cdot d/dt(\Phi_{MC} - \Phi_{d2})$$

$$E_{1r} = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{MC}) + N_1 \cdot d/dt(\Phi_{d1})$$

$$E_{2r} = N_2 \cdot d/dt(\Phi_{MC}) - N_2 \cdot d/dt(\Phi_{d2})$$

$$\rightarrow E_{1r} = E_1 + E_{d1}$$

$$\rightarrow E_{2r} = E_2 - E_{d2}$$



$E_1$ : f.e.m. INTERNA INDUZIDA NA BOBINA PRIMÁRIA

$E_2$ : f.e.m. INTERNA INDUZIDA NA BOBINA SECUNDÁRIA

$E_{d1}$ : QUEDA DE TENSÃO REATIVA NO PRIMÁRIO

$E_{d2}$ : QUEDA DE TENSÃO REATIVA NO SECUNDÁRIO

**CARACTERIZAÇÃO DAS REATÂNCIAS DE DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR****QUEDAS DE TENSÃO REATIVAS → ASSOCIADAS AOS FLUXOS DE DISPERSÃO:**

$$E_{d1} = N_1 \cdot d/dt(\Phi_{d1}) \quad ; \quad E_{d2} = N_2 \cdot d/dt(\Phi_{d2})$$

**FLUXOS DE DISPERSÃO PRODUZIDOS PELAS CORRENTES DE CARGA:**

$$\Phi_{d1} = F_{MM1} / \mathcal{R}_{1d} = N_1 \cdot I_1 / \mathcal{R}_{1d} \quad ; \quad \Phi_{d2} = F_{MM2} / \mathcal{R}_{2d} = N_2 \cdot I_2 / \mathcal{R}_{2d}$$

$$E_{d1} \approx I_1 \rightarrow E_{d1} = x_1 \cdot I_1 \quad ; \quad E_{d2} \approx I_2 \rightarrow E_{d2} = x_2 \cdot I_2$$

 **$x_1$  : REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO PRIMÁRIO** **$x_2$  : REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO SECUNDÁRIO**

FLUXOS DE DISPERSÃO EM FASE COM AS CORRENTE QUE OS GERARAM

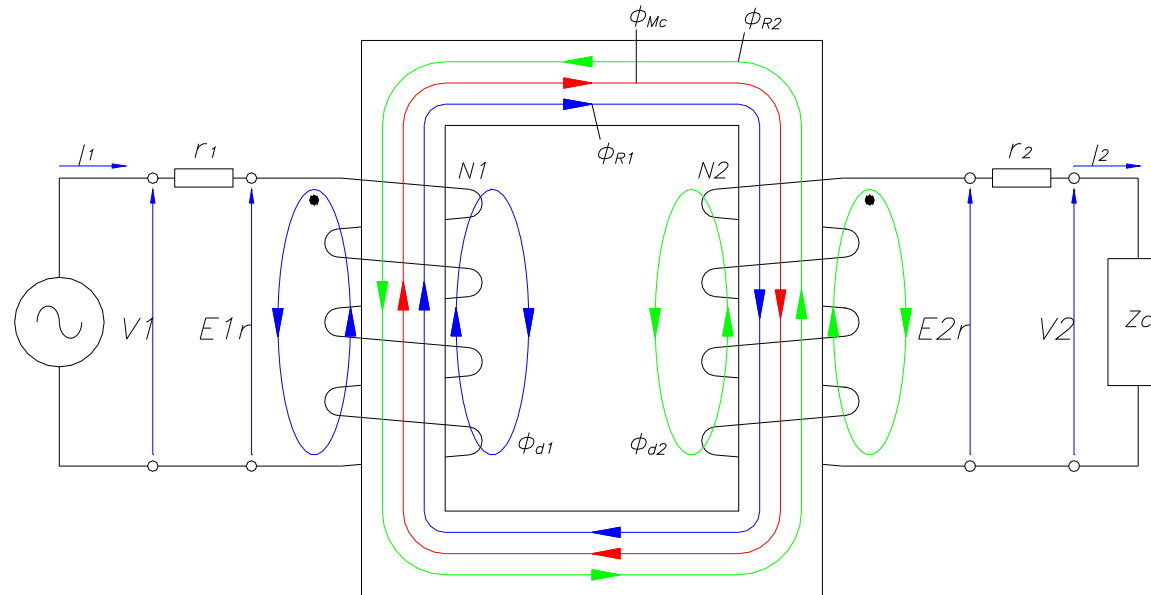
QUEDAS DE TENSÃO OBTIDAS POR DERIVAÇÃO DOS FLUXOS DISPERSOS (TENSÕES REATIVAS)

QUEDAS DE TENSÃO ADIANTADAS DE 90° EM RELAÇÃO ÀS CORRENTES -  $E_{d1} = j \cdot x_1 \cdot I_1$  ;  $E_{d2} = j \cdot x_2 \cdot I_2$ PRODUTO :  $E_{d1} \cdot I_1 = Q_{Rd1} = x_1 \cdot I_1^2$  : POTÊNCIA REATIVA DE DISPERSÃO DO PRIMÁRIO $E_{d2} \cdot I_2 = Q_{Rd2} = x_2 \cdot I_2^2$  : POTÊNCIA REATIVA DE DISPERSÃO DO SECUNDÁRIO



## EQUACIONAMENTO DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

TENSÕES E  
CORRENTES  
FASORIAIS



$$V_1 = r_1 \cdot I_1 + j \cdot x_1 \cdot I_1 + E_1$$

$$I_1 = I'_2 + I_0$$

$I'_2$  : CORRENTE SECUNDÁRIA REFERIDA  
AO PRIMÁRIO  $\rightarrow I'_2 = I_2 / a$

$$I_0 = I_p + j \cdot I_m \text{ : CORRENTE EM VAZIO}$$

$$V_2 = E_2 - r_2 \cdot I_2 - j \cdot x_2 \cdot I_2$$

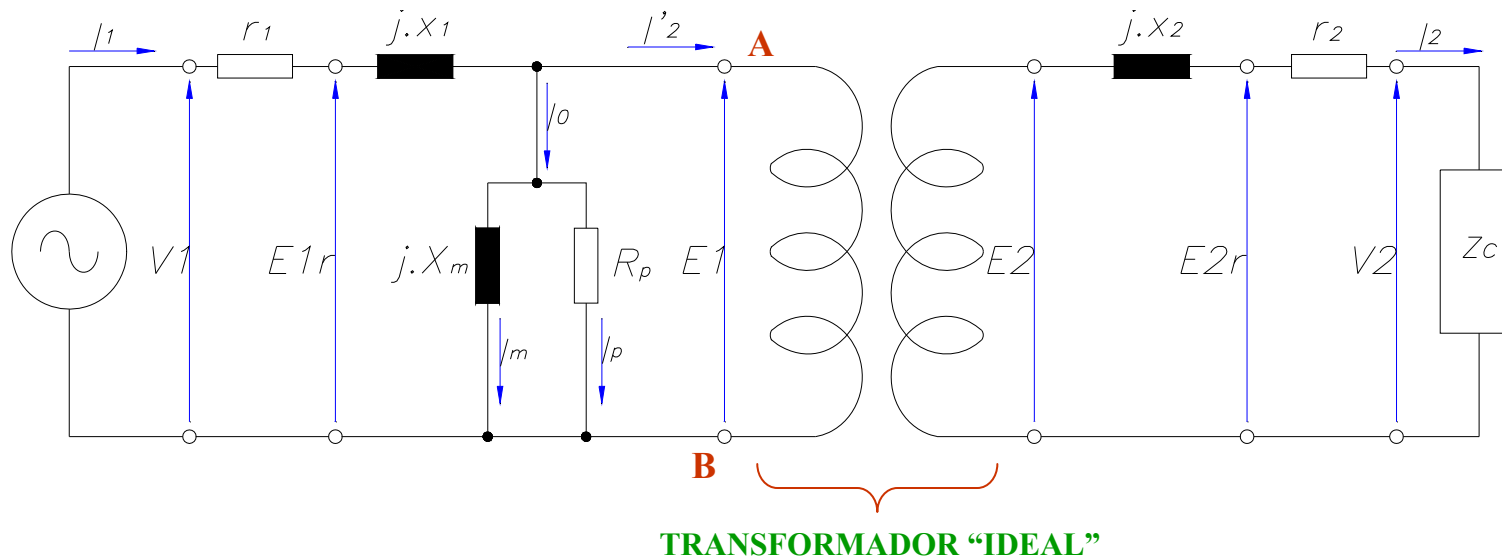
$$E_1 = a \cdot E_2$$

$a = N_1 / N_2$  : RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

$E_1 ; E_2$  : TENSÕES INTERNAS INDUZIDAS NO  
PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

EQUAÇÕES DO TRANSFORMADOR SUGEREM UM CIRCUITO ELÉTRICO REPRESENTATIVO DE SEU FUNCIONAMENTO EM CARGA:

→ CIRCUITO EQUIVALENTE



$$E_1 / E_2 = N_1 / N_2 = a$$

CIRCUITO EQUIVALENTE → MODELO MATEMÁTICO QUANTITATIVO  
PARA ANÁLISE DO TRANSFORMADOR



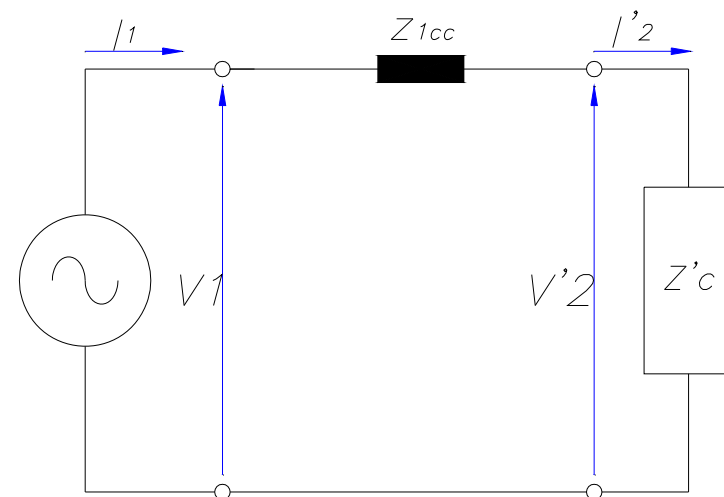
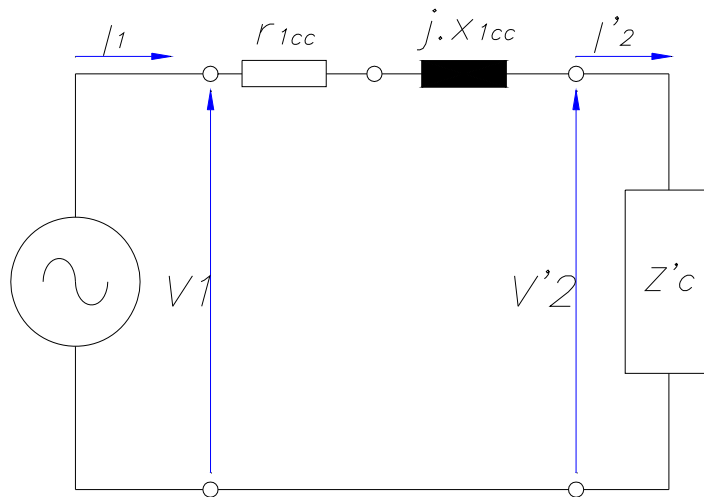
## CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO

NORMALMENTE:  $I_0 \ll I'_2 \rightarrow$  RAMO MAGNETIZANTE DESPREZADO

$r_1 + r'_2 = r_{CC} \rightarrow$  RESISTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

$x_1 + x'_2 = x_{CC} \rightarrow$  REATÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO

$z_{CC} = r_{CC} + j \cdot x_{CC} \rightarrow$  IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE CURTO-CIRCUITO



## CIRCUITOS EQUIVALENTES REFERIDOS AOS LADOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

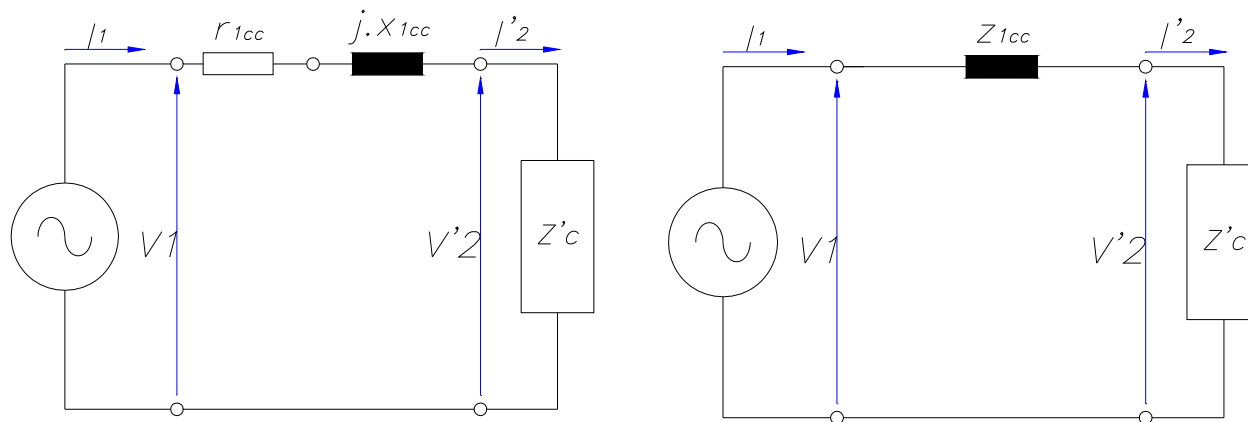
→ REFLEXÃO DOS PARÂMETROS PODE SER FEITA A QUALQUER DOS LADOS DO TRANSFORMADOR ARBITRARIAMENTE

$r_1 + r'_2 = r_{1CC}$  → RESISTÊNCIA DE CURTO – CIRCUITO REFERIDA AO PRIMÁRIO

$x_1 + x'_2 = x_{1CC}$  → REATÂNCIA DE CURTO – CIRCUITO REFERIDA AO PRIMÁRIO

$z_{1CC} = r_{1CC} + j \cdot x_{1CC} = r_1 + r'_2 + j \cdot (x_1 + x'_2) = (r_1 + j \cdot x_1) + (r'_2 + j \cdot x'_2) = z_1 + z'_2 = z_1 + a^2 \cdot z_2$

$z_{1CC}$  → IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE CURTO-CIRCUITO REFERIDA AO PRIMÁRIO



$$V'_2 = a \cdot V_2$$

$$I'_2 = (1/a) \cdot I_2$$

$$a = N_1 / N_2$$

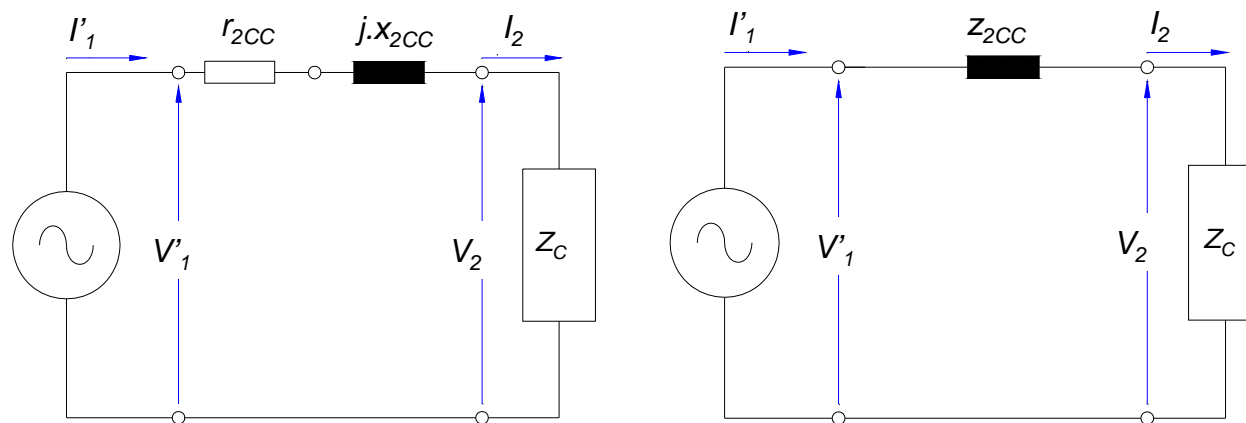
**ANÁLISE FEITA PELO LADO DA LINHA**

$r'_1 + r_2 = r_{2CC}$  → RESISTÊNCIA DE CURTO – CIRCUITO REFERIDA AO SECUNDÁRIO

$x'_1 + x_2 = x_{2CC}$  → REATÂNCIA DE CURTO – CIRCUITO REFERIDA AO SECUNDÁRIO

$$z_{2CC} = r_{2CC} + j \cdot x_{2CC} = r'_1 + r_2 + j \cdot (x'_1 + x_2) = (r'_1 + j \cdot x'_1) + (r_2 + j \cdot x_2) = z'_1 + z_2 = (1 / a^2) \cdot z_1 + z_2$$

$z_{2CC}$  → IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE CURTO-CIRCUITO REFERIDA AO SECUNDÁRIO



$$V'_1 = (1 / a) \cdot V_1$$

$$I'_1 = a \cdot I_1$$

$$z_{2CC} = z_{1CC} / a^2$$

$$a = N_1 / N_2$$

### ANÁLISE FEITA PELO LADO DA CARGA

VALORES ABSOLUTOS DE TENSÕES (EM VOLTS), CORRENTES (EM AMPERES) E IMPEDÂNCIAS (EM OHMS) FICAM DIFERENTES DEPENDENDO DO LADO DA REFLEXÃO

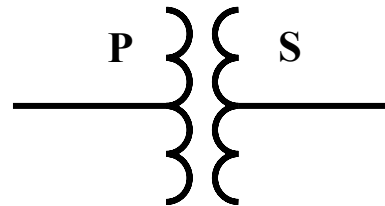
MODELO MAIS GERAL DO TRANSFORMADOR PARA EFEITO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

→ INDEPENDENTE DO LADO DA REFLEXÃO DOS PARÂMETROS E GRANDEZAS DE LINHA

→ VALORES POR UNIDADE (p.u.) OU PORCENTUAIS

VALORES ABSOLUTOS DO PRIMÁRIO:

$V_1$  (V) ;  $I_1$  (A) ;  $S_1$  (V.A) ;  $Z_1$  ( $\Omega$ )



VALORES ABSOLUTOS DO SECUNDÁRIO:

$V_2$  (V) ;  $I_2$  (A) ;  $S_2$  (V.A) ;  $Z_2$  ( $\Omega$ )

VALORES DE BASE DO TRANSFORMADOR (OU DO SISTEMA)

→ NORMALMENTE IDENTIFICADOS COM OS VALORES NOMINAIS

$V_B$  - TENSÃO DE BASE

$S_B$  - POTÊNCIA APARENTE DE BASE

$I_B = S_B / V_B$  - CORRENTE DE BASE

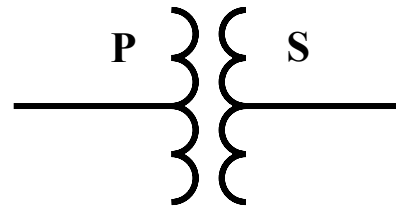
$Z_B = V_B / I_B = V_B^2 / S_B$  - IMPEDÂNCIA DE BASE

**ATRIBUIÇÃO DOS VALORES DE BASE DO TRANSFORMADOR****VALORES DE BASE DO PRIMÁRIO:**

$$V_{B1} \text{ (V)} ; S_{B1} \text{ (V.A)} ; I_{B1} \text{ (A)} ; Z_{B1} \text{ (}\Omega\text{)}$$

**VALORES DE BASE DO SECUNDÁRIO:**

$$V_{B2} \text{ (V)} ; S_{B2} \text{ (V.A)} ; I_{B2} \text{ (A)} ; Z_{B2} \text{ (}\Omega\text{)}$$

**“VALORES NOMINAIS” PRIMÁRIOS****“VALORES NOMINAIS” SECUNDÁRIOS****RELAÇÃO ENTRE VALORES DE BASE PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS**

$$V_{B1} / V_{B2} = V_{1N} / V_{2N} = N_1 / N_2 = a$$

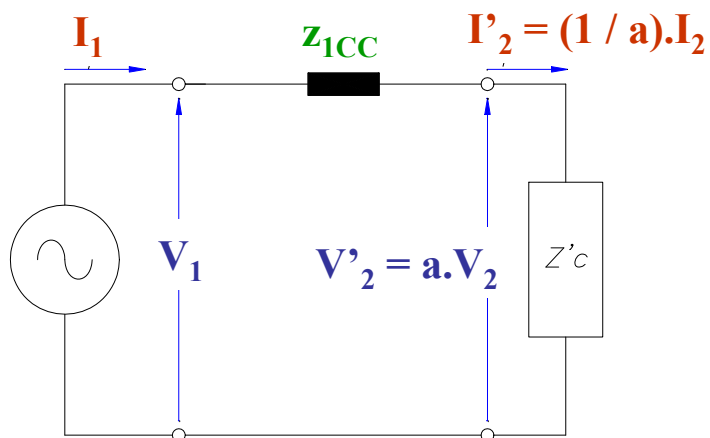
$$S_{B1} = S_{1N} = S_{2N} = S_{B2}$$

$$I_{B2} = S_{B2} / V_{B2} = S_{B1} / (V_{B1} / a) = a \cdot I_{B1}$$

$$Z_{B2} = V_{B2}^2 / S_{B2} = (1 / a)^2 \cdot V_{B1}^2 / S_{B1} = Z_{B1} / a^2$$



DEFINIÇÃO DE VALOR POR UNIDADE ( p.u.) :  $valor(p.u.) = \frac{valor(ABSOLUTO)}{valor(BASE)}$



$V'_2 =$  TENSÃO 2<sup>ÁRIA</sup> REFERIDA AO 1<sup>ÁRIO</sup>

$V_2 =$  TENSÃO ABSOLUTA DO 2<sup>ÁRIO</sup>

$I'_2 =$  CORRENTE 2<sup>ÁRIA</sup> REFERIDA AO 1<sup>ÁRIO</sup>

$I_2 =$  CORRENTE ABSOLUTA DO 2<sup>ÁRIO</sup>

$z_{1CC} =$  IMPEDÂNCIA REFERIDA AO 1<sup>ÁRIO</sup>

$z_{2CC} =$  IMPEDÂNCIA REFERIDA AO 2<sup>ÁRIO</sup>

EXPRIMINDO OS VALORES EM p.u.

$$v'_2 (p.u.) = V'_2 / V_{B1} = a.V_2 / a.V_{B2} = V_2 / V_{B2} = v_2 (p.u.)$$

$$i'_2 (p.u.) = I'_2 / I_{B1} = (I'_2 / a) / (I_{B2} / a) = I_2 / I_{B2} = i_2 (p.u.)$$

$$z_{1CC} (p.u.) = z_{1CC} / Z_{B1} = a^2.z_{2CC} / a^2.Z_{B2} = z_{2CC} / Z_{B2} = z_{2CC} (p.u.)$$

**CONCLUSÃO:**

- EXPRESSOS EM VALOR p.u., AS TENSÕES, CORRENTES E IMPEDÂNCIAS DO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO SÃO IDÊNTICAS
- TRANSFORMADOR TRATADO EM p.u. APRESENTA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO SEMPRE UNITÁRIA ( a = 1 )
- REFLEXÃO DOS PARÂMETROS E GRANDEZAS A QUALQUER DOS LADOS É A MESMA

$$\text{VALOR PORCENTUAL (\%)} = (\text{VALOR p.u.}) \times 100$$

VALOR PORCENTUAL (OU p.u.) DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE É *INDICADOR IMPORTANTE* DO TRANSFORMADOR:

- NUMERICAMENTE IGUAL AO INVERSO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO EM p.u.
  - “NUMERICAMENTE” IGUAL À REGULAÇÃO DE TENSÃO DO TRANSFORMADOR EM CARGA
- IMPEDÂNCIA PORCENTUAL (OU p.u.) “INDEPENDENTE” DA POTÊNCIA E TENSÃO DO TRANSFORMADOR

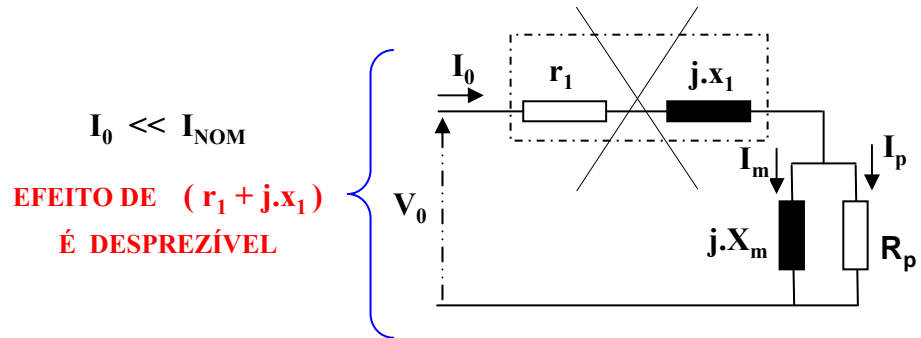
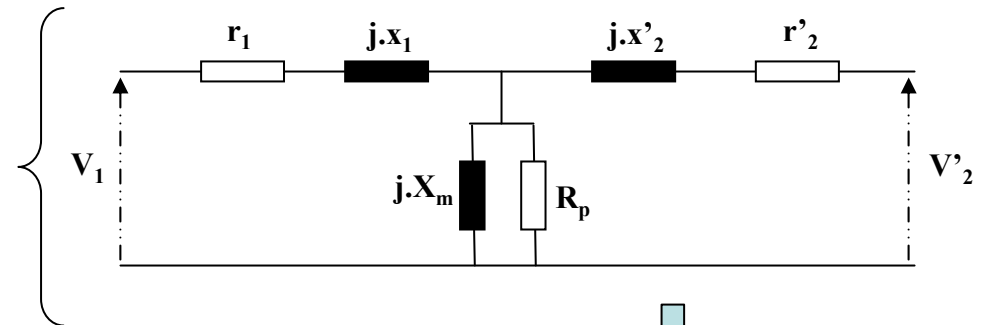
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE - ENSAIOS EM VAZIO E EM CURTO

**PARÂMETROS DETERMINADOS EM PROJETO**

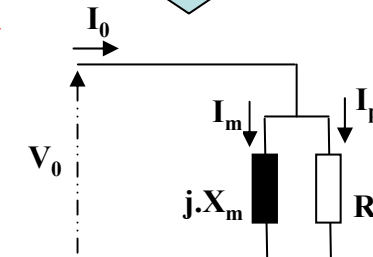
→ DISPONÍVEL APENAS AO FABRICANTE DO TRANSFORMADOR

**PARÂMETROS DETERMINADOS POR MEDIÇÃO, A PARTIR DE 2 ENSAIOS TÍPICOS**

→ DISPONÍVEL A QUALQUER TEMPO, EM LABORATÓRIO



**MODELO SIMPLIFICADO PARA A CONDIÇÃO DE VAZIO**



**1 - ENSAIO EM VAZIO**

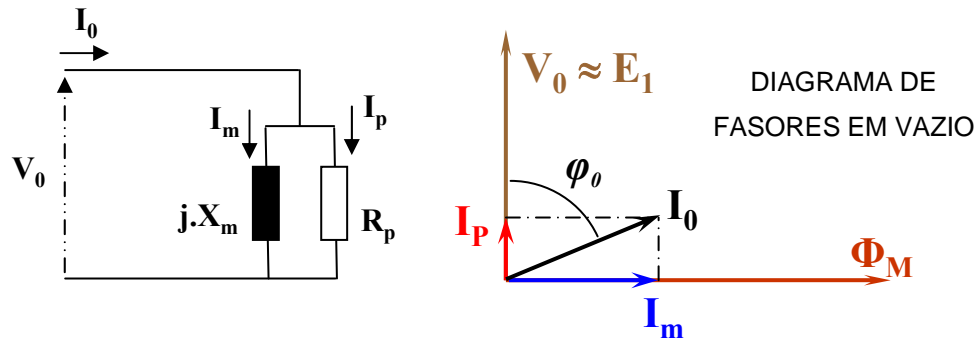
→ SECUNDÁRIO MANTIDO EM *CIRCUITO ABERTO*

→ ENSAIO REALIZADO USUALMENTE PELO LADO DA BAIXA TENSÃO

→ MEDIDAS AQUISITADAS (*SOB TENSÃO NOMINAL*):

TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	→ $V_0$	} $p / V_0 = V_{\text{NOM}}$
CORRENTE ABSORVIDA	→ $I_0$	
POTÊNCIA CONSUMIDA	→ $W_0$	

**PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO EM VAZIO:**



$$\cos \varphi_0 = \frac{W_0}{V_0 \cdot I_0}$$

$$I_p = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \Rightarrow R_p = \frac{V_0}{I_p}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \Rightarrow X_m = \frac{V_0}{I_m}$$

**2 - ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO**

→ SECUNDÁRIO MANTIDO EM *CURTO-CIRCUITO*

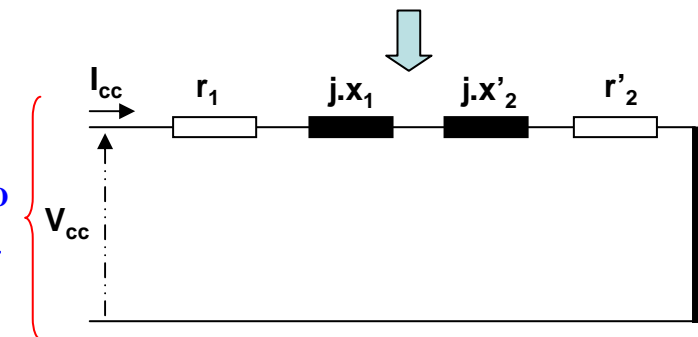
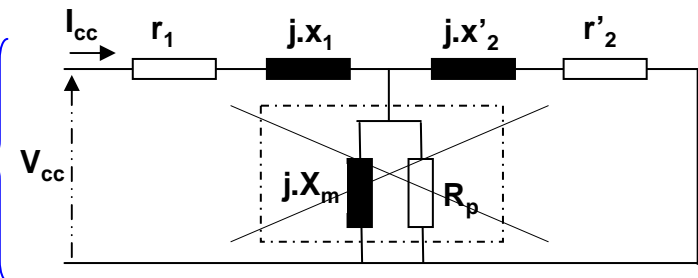
→ ENSAIO REALIZADO USUALMENTE PELO LADO DA ALTA TENSÃO

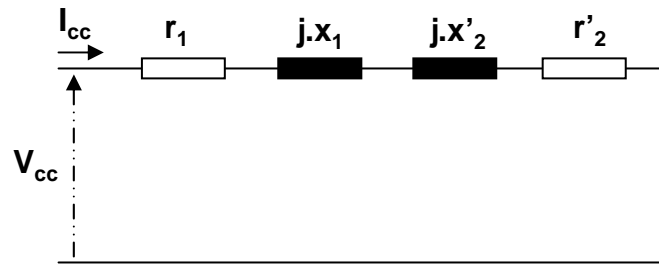
→ MEDIDAS AQUISITADAS (*SOB CORRENTE NOMINAL*):

TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	→ $V_{cc}$	} $p / I_{cc} = I_{NOM}$
CORRENTE ABSORVIDA	→ $I_{cc}$	
POTÊNCIA CONSUMIDA	→ $W_{cc}$	

$V_0 \ll V_{NOM}$   
 $I_0 \ll I_{cc}$

MODELO SIMPLIFICADO PARA CURTO-CIRCUITO



**PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO:**

$$r_1 + r'_2 = r_{cc}$$

$$x_1 + x'_2 = x_{cc}$$

$$r_{cc} + j \cdot x_{cc} = z_{cc}$$

$$z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

$$r_{cc} = \frac{W_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$x_{cc} = \sqrt{(z_{cc}^2 - r_{cc}^2)}$$

$$r_1 \cong r'_2 = \frac{r_{cc}}{2}$$

$$x_1 \cong x'_2 = \frac{x_{cc}}{2}$$

**NOTA: OS PARÂMETROS RESULTAM REFERIDOS AOS LADOS EM QUE OS RESPECTIVOS ENSAIOS FORAM REALIZADOS**

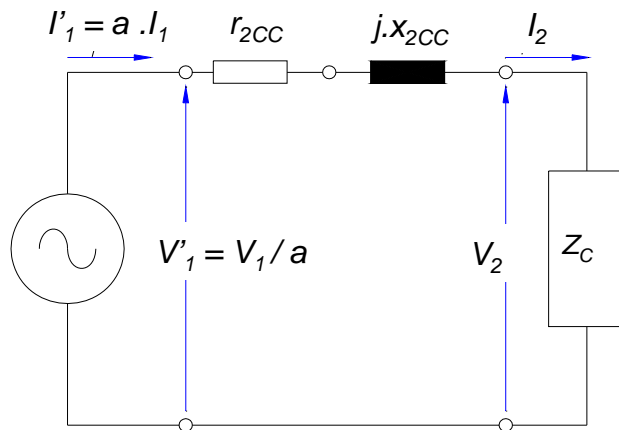
**PARA COMPOR O CIRCUITO EQUIVALENTE CORRETAMENTE, DEVE-SE REFERIR TODOS OS PARÂMETROS A UM ÚNICO LADO**

## REGULAÇÃO DE TENSÃO DO TRANSFORMADOR EM CARGA

REGULAÇÃO → “VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA SOB CARGA, A PARTIR DE VAZIO”

**DEFINIÇÃO FORMAL :**  $R = (|V_{20}| - |V_{2C}|) / |V_{2C}|$

$V_{20}$  : TENSÃO SECUNDÁRIA EM VAZIO ;  $V_{2C}$  : TENSÃO SECUNDÁRIA EM CARGA



→  $V_{2C} = V_2$  : TENSÃO SECUNDÁRIA IMPOSTA EM SEU VALOR NOMINAL POR  $V_1$  PARA OPERAÇÃO SOB CARGA

→  $V_{20} = V_1 / a$  : TENSÃO RESULTANTE EM VAZIO NO SECUNDÁRIO, PARA ALIMENTAÇÃO DO PRIMÁRIO COM  $V_1$

$$R = [(V_1 / a) - V_2] / V_2$$

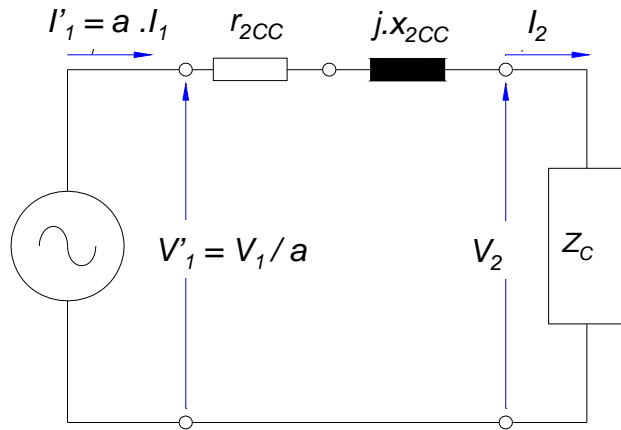
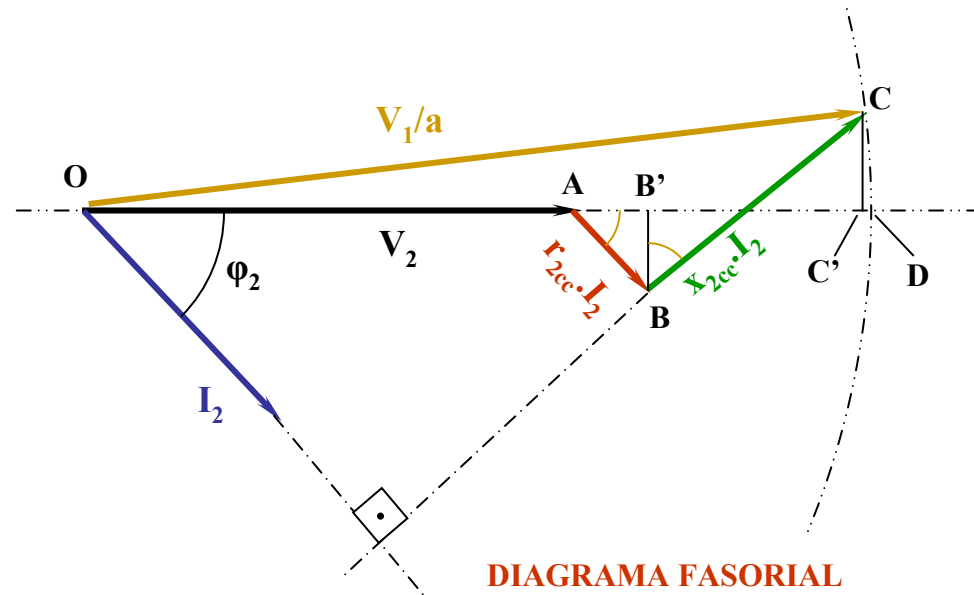
CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AO 2<sup>º</sup>ÁRIO

DIAGRAMA FASORIAL

$$R = \frac{|\dot{V}_1/a| - |\dot{V}_2|}{|\dot{V}_2|} = \frac{\overline{OC} - \overline{OA}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{OD} - \overline{OA}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{AB'} + \overline{B'C'} + \overline{C'D}}{\overline{OA}}$$

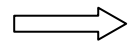
PARA VALORES USUAIS DOS PARÂMETROS  $\rightarrow \frac{\overline{C'D}}{\overline{OA}} \ll 1 \cong 0$

$$R \cong \frac{\overline{AB'} + \overline{B'C'}}{\overline{OA}} = \frac{r_{2CC} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + x_{2CC} \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2}{V_2}$$

$$R = r_{2CC} \cdot \frac{I_2}{V_2} \cdot \cos \varphi_2 + x_{2CC} \cdot \frac{I_2}{V_2} \cdot \sin \varphi_2 = \frac{r_{2CC}}{Z_{B2}} \cdot \cos \varphi_2 + \frac{x_{2CC}}{Z_{B2}} \cdot \sin \varphi_2$$

$V_2 / I_2 = Z_{B2} \rightarrow$  IMPEDÂNCIA DE BASE DO SECUNDÁRIO ;  $r_{2CC} / Z_{B2} = (r_{2CC})_{p.u.}$  ;  $x_{2CC} / Z_{B2} = (x_{2CC})_{p.u.}$

**REGULAÇÃO DO  
TRANSFORMADOR EM p.u.**



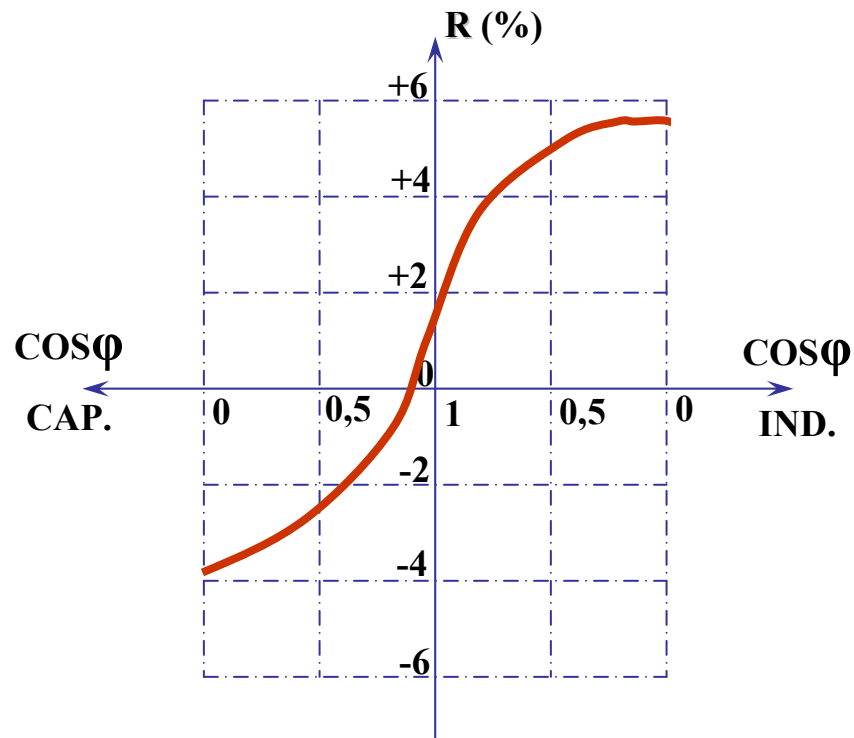
$$R = (r_{2CC})_{p.u.} \cdot \cos \varphi_2 + (x_{2CC})_{p.u.} \cdot \sin \varphi_2$$

$\cos \varphi_2 = 1 \rightarrow R = (r_{2CC})_{p.u.}$  : REGULAÇÃO NUMERICAMENTE IGUAL À RESISTÊNCIA EM p.u. PARA CARGA *PURAMENTE ATIVA*

$\cos \varphi_2 = 0 \rightarrow R = (x_{2CC})_{p.u.}$  : REGULAÇÃO NUMERICAMENTE IGUAL À REATÂNCIA EM p.u. PARA CARGA *PURAMENTE REATIVA*



## COMPORTAMENTO DA REGULAÇÃO COM O FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA



**COSφ CAPACITIVO TAL QUE :  $R = 0$**

$$\rightarrow \phi \cong \arctg (r_{2CC} / x_{2CC})$$

**VALORES USUAIS DE PARÂMETROS:**

$$r_{2CC} : 0,005 - 0,03 \text{ p.u.}$$

$$x_{2CC} : 0,02 - 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_{2CC} = \sqrt{(r_{2CC})^2 + (x_{2CC})^2} \cong x_{2CC}$$