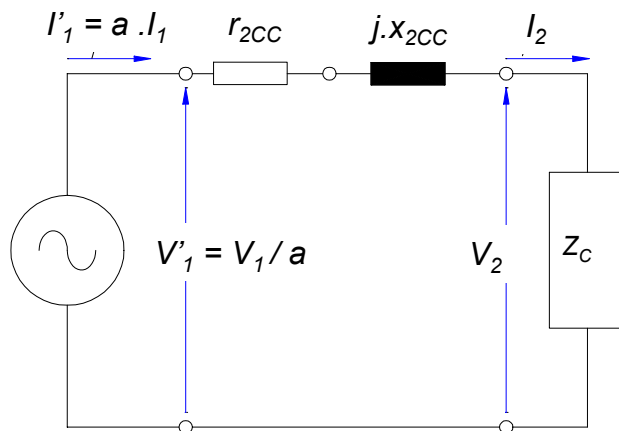


REGULAÇÃO DE TENSÃO DO TRANSFORMADOR EM CARGA

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

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

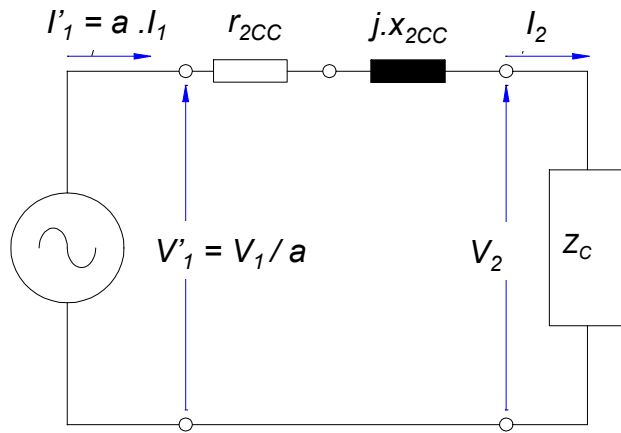
V_{20} : TENSÃO SECUNDÁRIA EM VAZIO ; V_{2c} : TENSÃO SECUNDÁRIA EM CARGA



→ $V_{2c} = V_2$: 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 2ºÁRIO

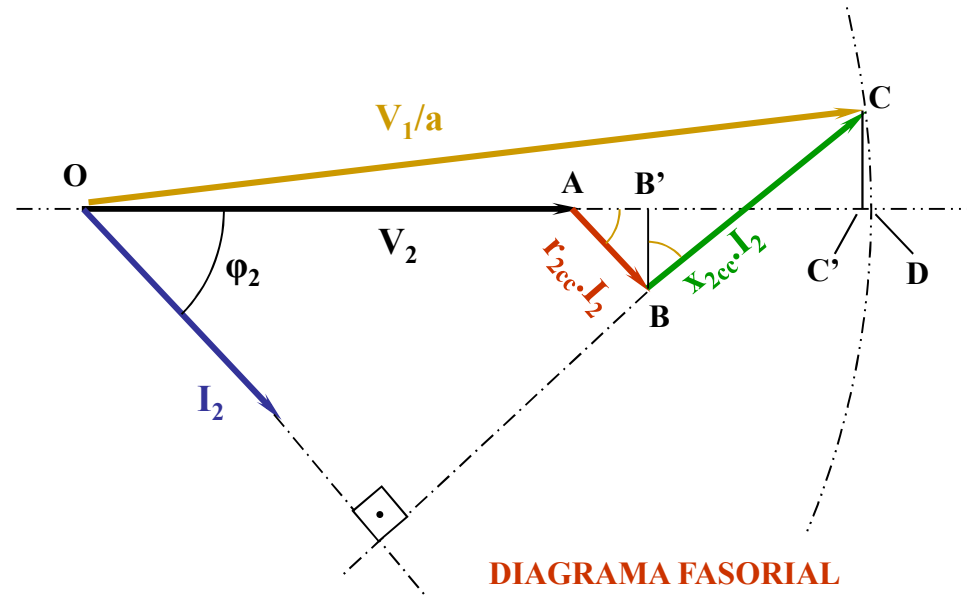


DIAGRAMA FASORIAL

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

PARA VALORES USUAIS DOS PARÂMETROS →

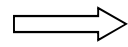
$$\frac{\overline{C'D}}{\overline{OA}} \ll 1 \cong 0$$

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

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

$V_2 / I_2 = Z_{B2} \rightarrow$ 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.**

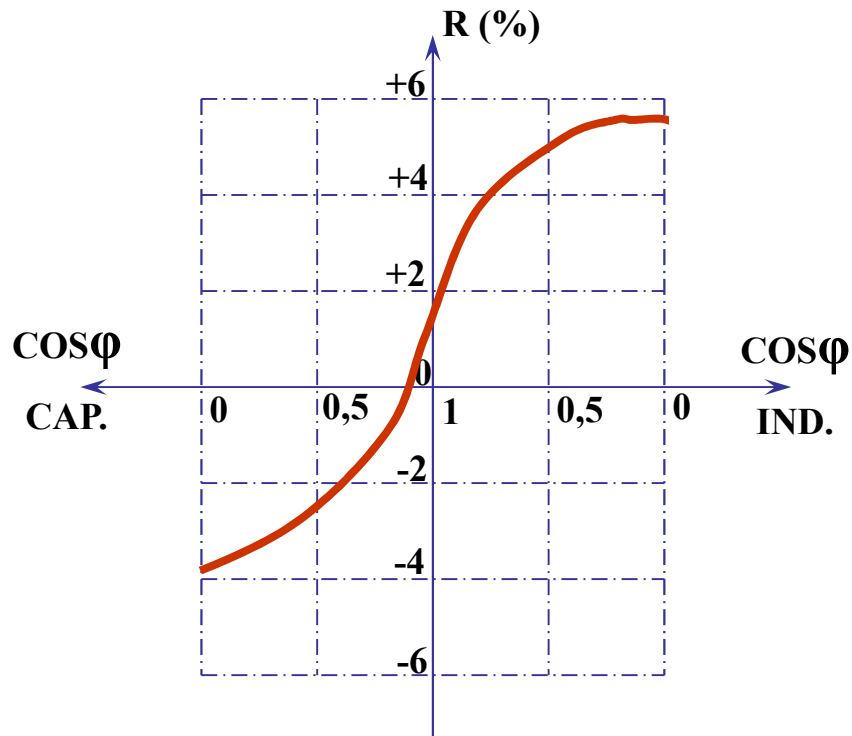


$$R = (r_{2CC})_{p.u.} \cdot \cos \varphi_2 + (x_{2CC})_{p.u.} \cdot \sin \varphi_2$$

$\cos \varphi_2 = 1 \rightarrow R = (r_{2CC})_{p.u.}$: 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 : $R = 0$

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

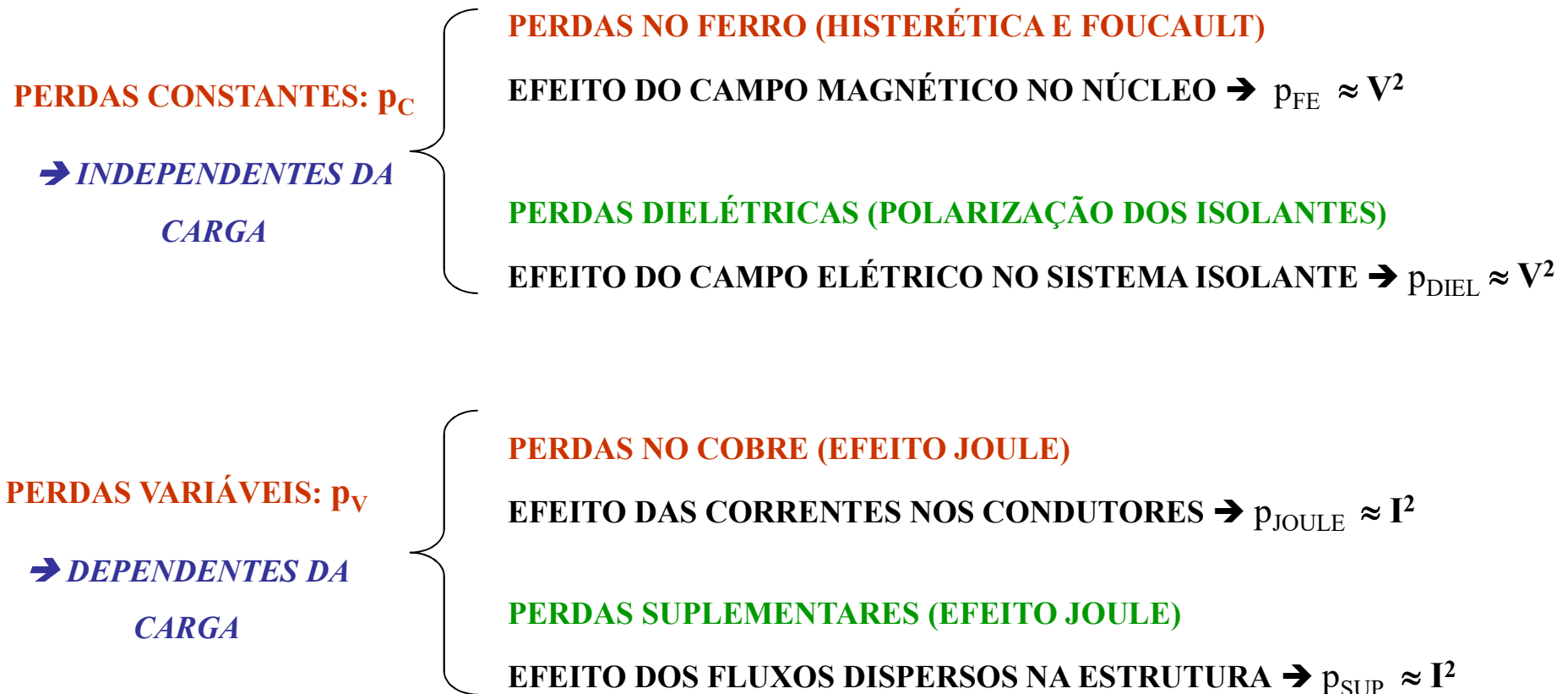
VALORES USUAIS DE PARÂMETROS:

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

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

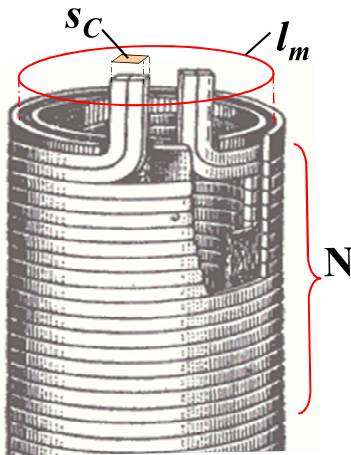
$$Z_{2CC} = \sqrt{(r_{2CC})^2 + (x_{2CC})^2} \cong x_{2CC}$$

CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS E RENDIMENTO NO TRANSFORMADOR EM CARGA:



$$\text{PERDAS TOTAIS EM CARGA: } \Sigma p = p_C + p_V$$

CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS JOULE – RESISTÊNCIAS EM C.C.

RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS : (RESISTÊNCIA “C.C.” OU EM *CORRENTE CONTÍNUA*)

$$R = \frac{\rho \cdot l_m \cdot N}{S_C}$$

ρ : RESISTIVIDADE DO COBRE $\rightarrow 1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ @ 20°C

l_m : COMPRIMENTO MÉDIO DO CONDUTOR

N : Nº DE ESPIRAS EM *SÉRIE* DA BOBINA

S_C : SECÇÃO RETA DO CONDUTOR *EQUIVALENTE*

$$p_J = R \cdot I^2$$

\rightarrow PERDA JOULE PRIMÁRIA : $p_{J1} = m \cdot r_1 \cdot I_1^2$

\rightarrow PERDA JOULE SECUNDÁRIA : $p_{J2} = m \cdot r_2 \cdot I_2^2$

m : Nº DE FASES DOS ENROLAMENTOS

RESISTÊNCIAS ÔHMICAS E PERDAS JOULE DEPENDEM DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO

$$r_{T_2} = r_{T_1} \cdot \frac{234,5 + T_2}{234,5 + T_1}$$

r_{T_2} : RESISTÊNCIA NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA T_2

r_{T_1} : RESISTÊNCIA NA TEMPERATURA DE MEDIÇÃO T_1

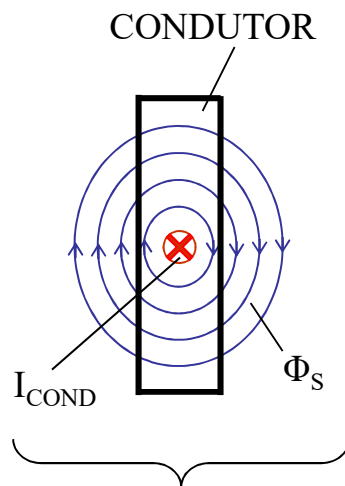
$234,5 = 1 / \alpha_{\text{COBRE}}$

α_{COBRE} = COEFICIENTE DE VARIAÇÃO TÉRMICA DA RESISTIVIDADE

EFEITOS ADICIONAIS DA CORRENTE – ADENSAMENTO - PERDAS SUPLEMENTARES

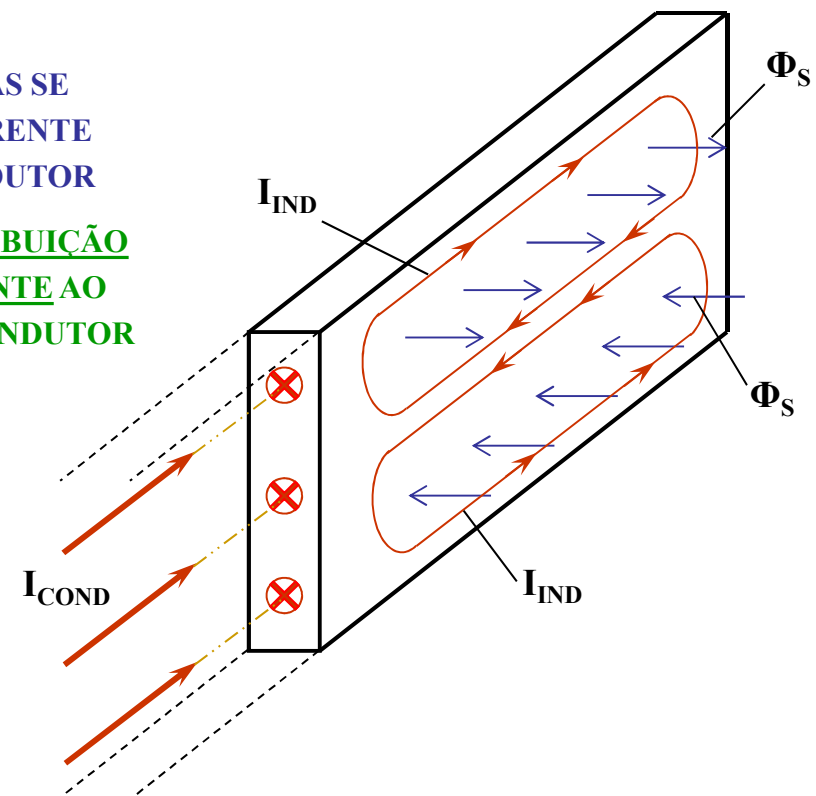
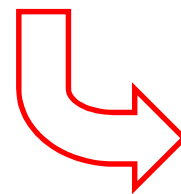
CONDUTOR CONDUZINDO CORRENTE ALTERNADA (I_{COND}):→ FLUXO MAGNÉTICO ALTERNADO DISTRIBUÍDO DENTRO E FORA DO CONDUTOR, “NORMAL” AO PLANO DO MESMO (Φ_S)

→ VARIÇÃO DO FLUXO NO TEMPO → TENSÕES INDUZIDAS AO LONGO DO CONDUTOR (LEI DE FARADAY)

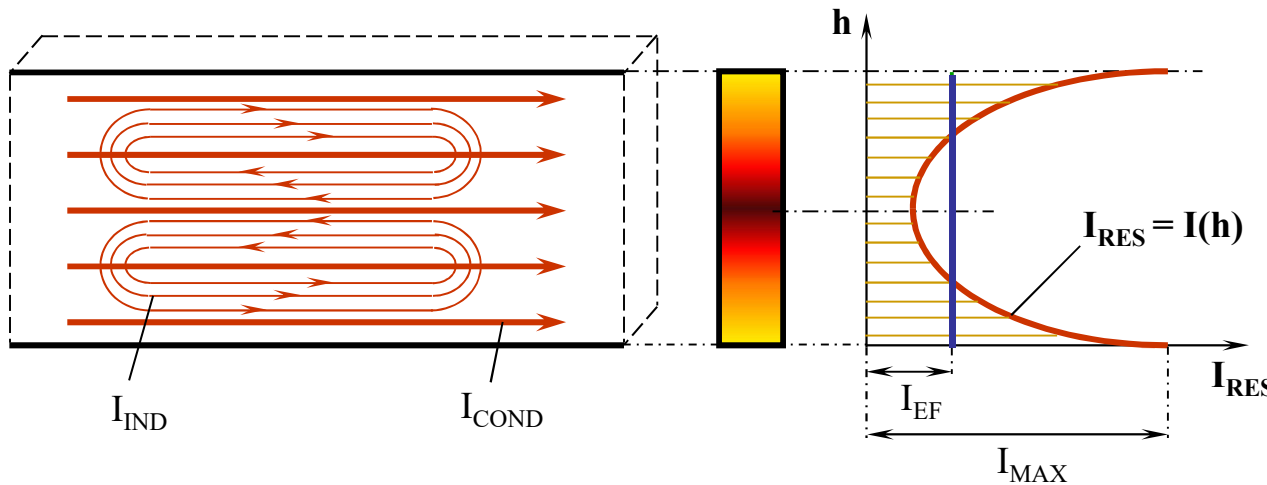
→ CORRENTES INDUZIDAS IMPOSTAS NO PLANO DO CONDUTOR, EM OPOSIÇÃO À VARIÇÃO DO FLUXO (LEI DE LENZ) (I_{IND})

DISTRIBUIÇÃO “APROXIMADA” DO
FLUXO CRIADO PELA PRÓPRIA
CIRCULAÇÃO DA CORRENTE NO
CONDUTOR

CORRENTES INDUZIDAS SE
COMPÕEM COM A CORRENTE
CONDUZIDA PELO CONDUTOR
→ DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO
DA CORRENTE RESULTANTE AO
LONGO DA SECÇÃO DO CONDUTOR



CORRENTE ADENSADA NO CONDUTOR → MAIOR CONCENTRAÇÃO NAS EXTREMIDADES



DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE AFETA A DISTRIBUIÇÃO DA PERDA JOULE

$$p_{Jdc} = r_{dc} \cdot I_{EF}^2$$

PERDA JOULE SEM ADENSAMENTO

DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE AO LONGO DA ALTURA DO CONDUTOR

r_{dc} : RESISTÊNCIA “DC” DO CONDUTOR

$$p_{Jac} = \int_0^{h_c} \frac{r_{dc}}{h} \cdot I^2(h) \cdot dh = r_{ac} \cdot I_{EF}^2 > p_{Jdc}$$

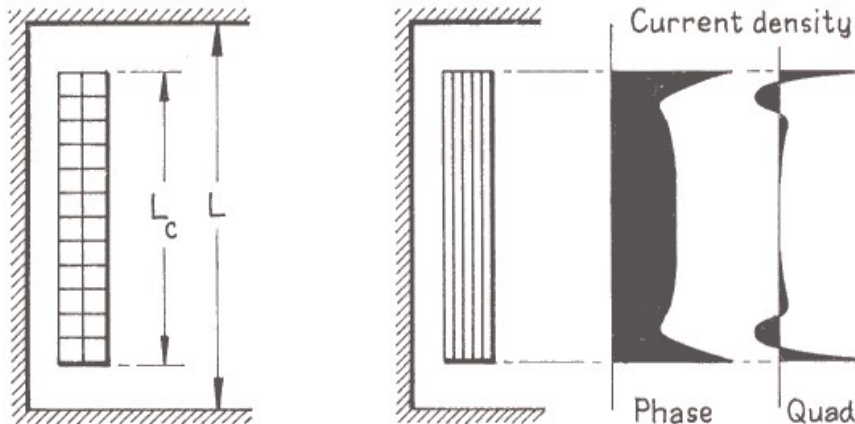
$$r_{ac} > r_{dc} \Rightarrow r_{ac} = r_{dc} \cdot \left[g(h) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot f}{\rho_c}} \right]$$

PERDA JOULE COM ADENSAMENTO DE CORRENTE

r_{ac} : RESISTÊNCIA APARENTE EM “AC”

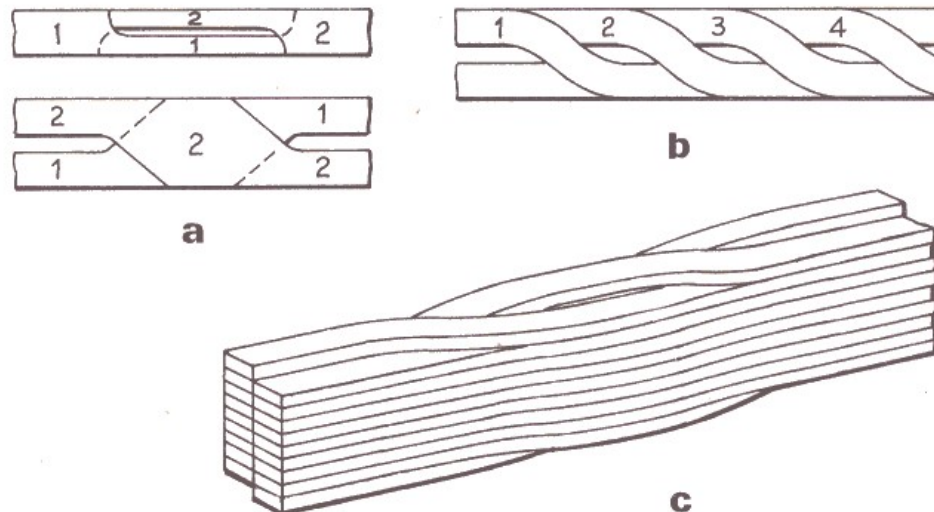
ρ_C : RESISTIVIDADE DO MATERIAL DO CONDUTOR - g(h) : FUNÇÃO COMPLEXA DA GEOMETRIA DO CONDUTOR

ADENSAMENTO DE CORRENTE OCORRE TAMBÉM DEVIDO À IMERSÃO DO CONDUTOR NO FLUXO DE DISPERSÃO PRESENTE NA VIZINHANÇA DAS BOBINAS



DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE VARIA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA BOBINA

→ **INTENSA NAS BOBINAS FEITAS EM FOLHA CONDUTORA CONTÍNUA**



MECANISMOS PARA LIMITAR EFEITOS DO ADENSAMENTO:

→ **SUBDIVISÃO DE CONDUTORES DE SEÇÃO ELEVADA**

→ **DISTRIBUIÇÃO DE BOBINAS EM PARALELO ADEQUADAMENTE CONECTADAS**

→ **USO DE CONDUTORES OU BARRAS COM TRANSPOSIÇÃO**

RENDIMENTO EM POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR

P_U : POTÊNCIA ÚTIL (ATIVA) FORNECIDA PELO SECUNDÁRIO [kW]

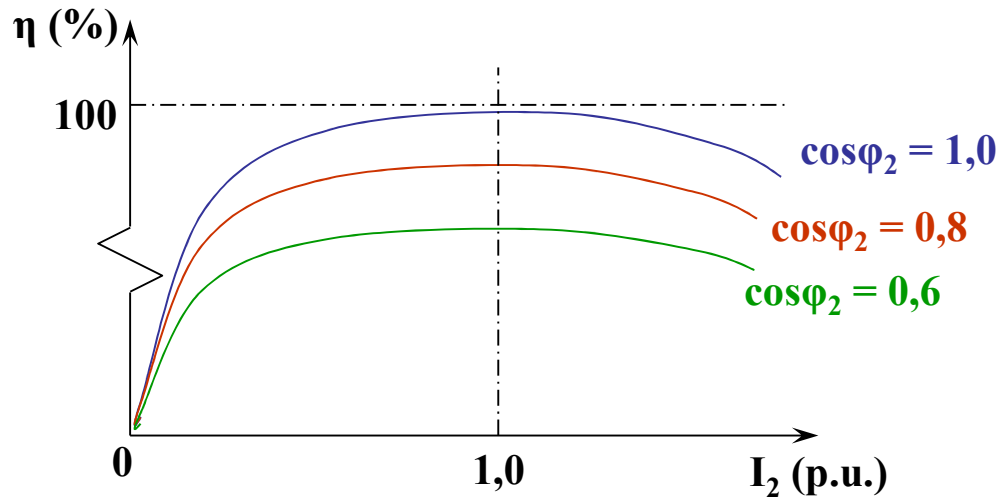
P_{ABS} : POTÊNCIA TOTAL ABSORVIDA (ATIVA) PELO PRIMÁRIO [kW]

$$\eta = P_U / P_{ABS} = P_U / (P_U + \Sigma p) = P_U / (P_U + p_C + p_V)$$

$$p_C \cong p_{FE} \quad ; \quad p_V = r_{2CC} \cdot I_2^2$$

r_{2CC} : RESISTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO EQUIVALENTE, COM PERDAS SUPLEMENTARES INCLUÍDAS, REFERIDA AO SECUNDÁRIO

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_{FE} + r_{2CC} \cdot I_2^2}$$



$I_2 = 0 \rightarrow \eta = 0$ (VAZIO)

$I_2 = I_{CC} \rightarrow \eta = 0$ (CURTO - $V_2 = 0$)

$\eta_{MAX} \rightarrow 0 < I_2 \cong I_{2N} < I_{CC}$

PREFERENCIALMENTE

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_{FE} + r_{2CC} \cdot I_2^2} = \frac{1}{1 + \frac{p_{FE}}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2} + \frac{r_{2CC} \cdot I_2}{V_2 \cdot \cos \varphi_2}}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + f(I_2)} \therefore \eta_{MAX} \Rightarrow [f(I_2)]_{MIN.} \Rightarrow \frac{df(I_2)}{dI_2} = 0$$

$$\frac{d}{dI_2} \left(\frac{1}{1 + \frac{p_{FE}}{V_2 \cdot \cos \varphi_2} \cdot \frac{1}{I_2} + \frac{r_{2CC}}{V_2 \cdot \cos \varphi_2} \cdot I_2} \right) = 0 \Rightarrow -\frac{1}{I_2^2} \cdot \frac{p_{FE}}{V_2 \cdot \cos \varphi_2} + \frac{r_{2CC}}{V_2 \cdot \cos \varphi_2} = 0$$

$$r_{2CC} \cdot I_2^2 = p_{FE}$$

CONDIÇÃO PARA MÁXIMO RENDIMENTO: $p_V = p_C$

OPERAÇÃO DO TRANSFORMADOR COM CARGA CONSTANTE, I_{2N} (NOMINAL):

PROJETADO PARA $r_{2CC} \cdot (I_{2N})^2 = p_{FE} \rightarrow$ MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO EM POTÊNCIA

CARGA VARIÁVEL NO TEMPO :

→ OBJETIVA-SE MINIMIZAR A POTÊNCIA DE PERDAS AO LONGO DO TEMPO

→ *RENDIMENTO EM ENERGIA*

E_{FORN} : ENERGIA FORNECIDA NUM PERÍODO T

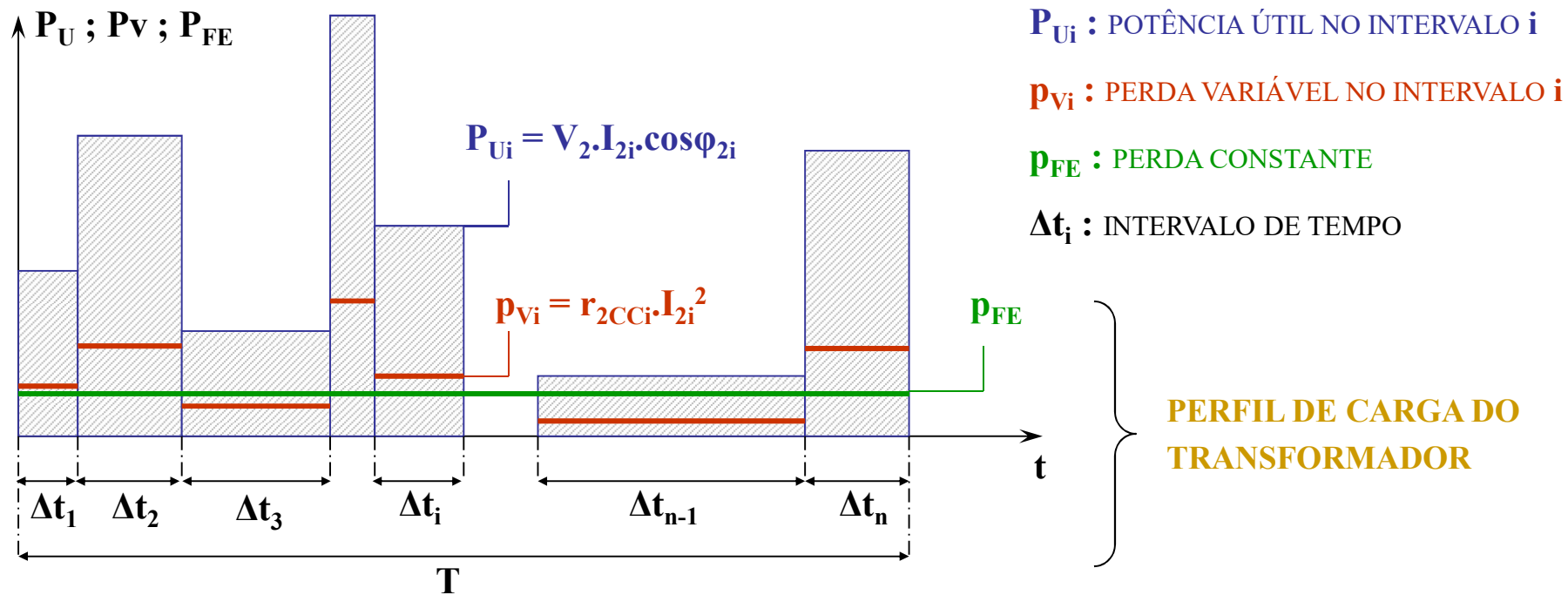
E_{ABS} : ENERGIA ABSORVIDA NO MESMO PERÍODO T

$$\rightarrow \eta_E = E_{\text{FORN}} / E_{\text{ABS}}$$

MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO DEVE SE DAR EM UMA *POTÊNCIA ÚTIL EFETIVA NO PERÍODO*:

$$P_{\text{EF}} < P_{\text{N}}$$

→ $[p_V]_{P_{\text{ef}}} = p_C$: IGUALDADE ENTRE *PERDA VARIÁVEL* E *PERDA CONSTANTE* DEVE SE DAR PARA A POTÊNCIA EFETIVA E NÃO PARA A NOMINAL



$$\eta_E = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ui} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n P_{Ui} \cdot \Delta t_i + p_{FE} \cdot T + \sum_{i=1}^n p_{Vi} \cdot \Delta t_i} = \frac{\int_0^T P_U \cdot dt}{\int_0^T P_U \cdot dt + p_{FE} \cdot T + \int_0^T p_V \cdot dt}$$