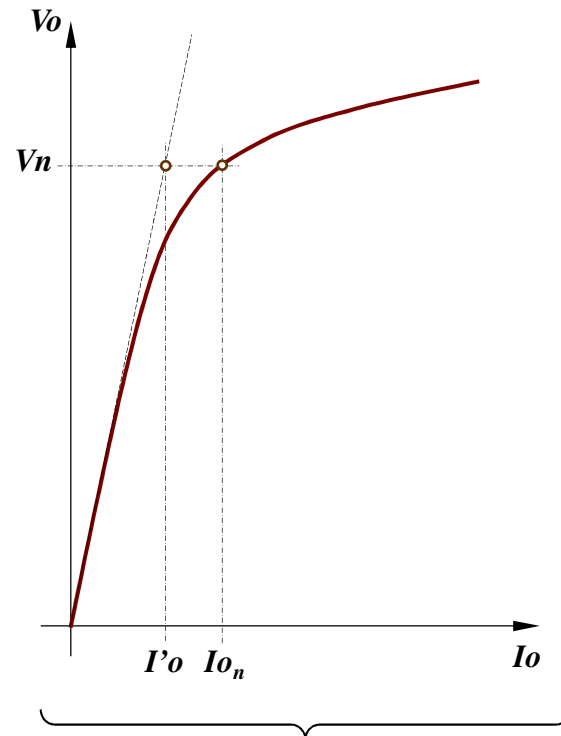


INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES OBTIDAS A PARTIR DO ENSAIO EM VAZIO:

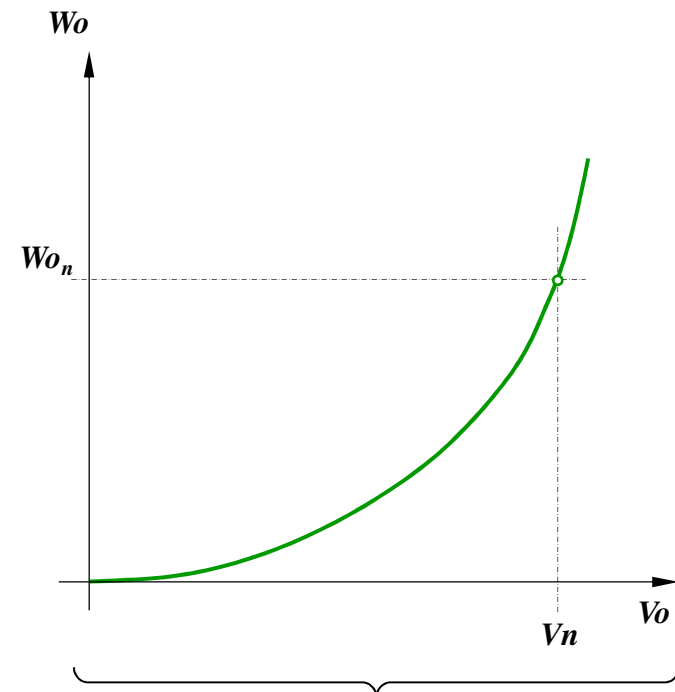
O ENSAIO EM VAZIO É REALIZADO COM TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL, AJUSTADA USUALMENTE DESDE 0,1 pu ATÉ APROX. 1,2 pu → COM MEDIÇÃO DA CORRENTE E POTÊNCIA ATIVA ABSORVIDAS:

$V_o$	$I_o$	$W_o$
1,2 $V_n$	$I_{o_{12}}$	$W_{o_{12}}$
1,1 $V_n$	$I_{o_{11}}$	$W_{o_{11}}$
1,0 $V_n$	$I_{o_n}$	$W_{o_n}$
0,9 $V_n$	$I_{o_9}$	$W_{o_9}$
0,8 $V_n$	$I_{o_8}$	$W_{o_8}$
0,7 $V_n$	$I_{o_7}$	$W_{o_6}$
0,6 $V_n$	$I_{o_6}$	$W_{o_6}$
0,5 $V_n$	$I_{o_5}$	$W_{o_5}$
0,4 $V_n$	$I_{o_4}$	$W_{o_4}$
0,3 $V_n$	$I_{o_3}$	$W_{o_3}$
0,2 $V_n$	$I_{o_2}$	$W_{o_2}$
0,1 $V_n$	$I_{o_1}$	$W_{o_1}$



CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO OU DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR

FATOR DE SATURAÇÃO:  $K_s = I_{o_n} / I'o$



CURVA DE PERDAS EM VAZIO DO TRANSFORMADOR

VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO RAMO MAGNETIZANTE:  $X_{mag}$  E  $R_p$

**ENSAIO PARA SEPARAÇÃO DOS COMPONENTES DE PERDA NO FERRO DO TRANSFORMADOR:**

**PERDAS NO FERRO APRESENTAM DUAS PARCELAS DISTINTAS:**

→ UMA PARCELA DEVIDA AO EFEITO DA HISTERÉSE MAGNÉTICA DO MATERIAL

→ UMA PARCELA DEVIDA À CIRCULAÇÃO DE CORRENTES PARASITAS NA MASSA METÁLICA DO MATERIAL

$$P_{Fe} = K_h \cdot f \cdot B^\alpha + K_f \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot e^2$$

→ MANTIDA CONSTANTE A DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO NÚCLEO:

$$P_{Fe} = K_1 \cdot f + K_2 \cdot f^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{P_{Fe}}{f} = K_1 + K_2 \cdot f$$

PARCELA DE PERDAS POR HISTERÉSE →  $P_H$   
 PARCELA DE PERDAS FOUCAULT →  $P_F$

[  $P_{Fe} / f$  ] → FUNÇÃO LINEAR COM A FREQUÊNCIA

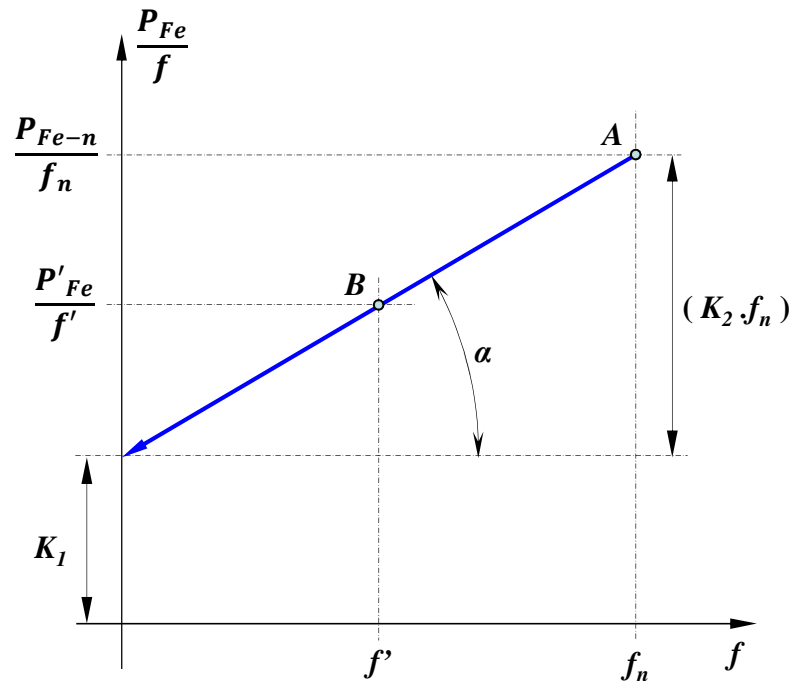
→ ENSAIO COM FREQUÊNCIAS DIFERENTES PERMITE A DETERMINAÇÃO DE  $K_1$  E  $K_2$

1º ENSAIO: FREQUÊNCIA NOMINAL  $f_n$  → MEDIÇÃO DA PERDA NO FERRO NOMINAL :  $P_{Fe-n} \rightarrow P_{Fe-n} / f_n$

2º ENSAIO: FREQUÊNCIA REDUZIDA  $f'$  → MEDIÇÃO DA NOVA PERDA NO FERRO:  $P'_{Fe} \rightarrow P'_{Fe} / f'$

**OBS: NO ENSAIO COM FREQUÊNCIA REDUZIDA, A TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DEVE ESTAR REDUZIDA NA MESMA PROPORÇÃO PARA**

**GARANTIR O FLUXO CONSTANTE NO NÚCLEO :  $V \approx E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi \rightarrow B = cte. \rightarrow \phi = cte. \rightarrow V / f = cte.$**

ENSAIO PARA SEPARAÇÃO DOS COMPONENTES DE PERDA NO FERRO DO TRANSFORMADOR:

1º ENSAIO:  $(f_n; P_{Fe-n}) \rightarrow$  PONTO “A”

2º ENSAIO:  $(f'; P'_{Fe}) \rightarrow$  PONTO “B”

→ EXTRAPOLANDO A RETA  $A - B$  ATÉ A ORIGEM:  
 RESULTA NO EIXO DAS ORDENADAS O VALOR  $K_1$

$$\rightarrow K_2 = \operatorname{tg} \alpha \rightarrow (K_2 \cdot f_n) = \frac{P_{Fe-n}}{f_n} - K_1$$

DETERMINADOS  $K_1$  E  $K_2$ :

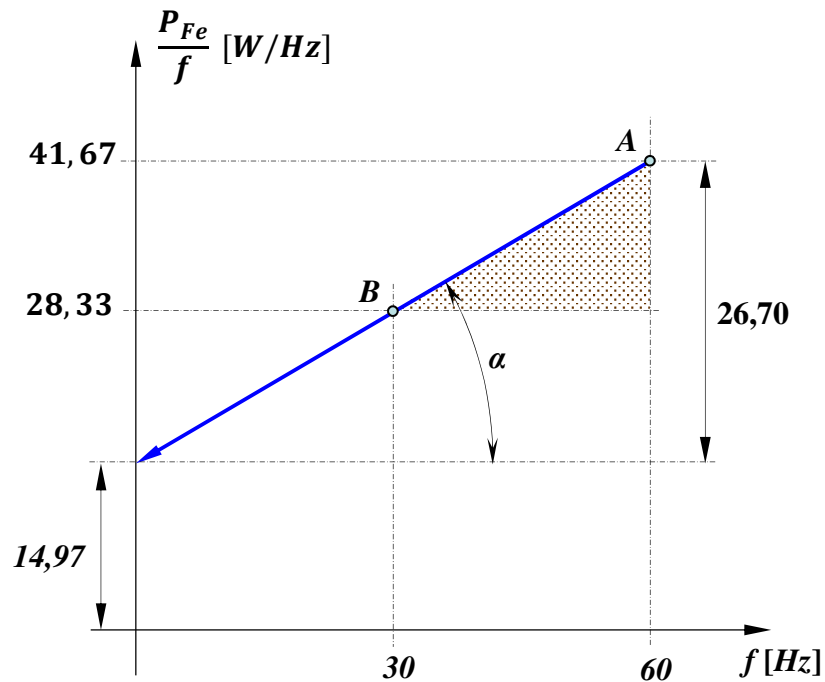
→  $P_H = K_1 \cdot f_n$  : PARCELA DE PERDA POR HISTERÉSE

→  $P_F = (K_2 \cdot f_n) \cdot f_n$  : PARCELA DE PERDA FOUCAULT

ENSAIO PARA SEPARAÇÃO DOS COMPONENTES DE PERDA NO FERRO DO TRANSFORMADOR:**EXEMPLO NUMÉRICO:**

**TRANSFORMADOR COM PERDAS NO FERRO TOTAIS, MEDIDAS A 60 Hz = 2.500 W**  $\rightarrow \frac{P_{Fe-n}}{f_n} = \frac{2500}{60} = 41,67 \text{ [W/Hz]}$

**ENSAIO COM FREQUÊNCIA REDUZIDA PARA 30 Hz**  $\rightarrow$  **PERDAS MEDIDAS = 850 W**  $\rightarrow \frac{P'_{Fe}}{f'} = \frac{850}{30} = 28,33 \text{ [W/Hz]}$



$$K_2 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{41,67 - 28,33}{60 - 30} = 0,445$$

$$K_1 = 41,67 - 0,445 \times 60 = 14,97$$

$$(K_2 \cdot f_n) = 41,67 - 14,97 = 26,70$$

**PARCELA DE PERDA POR HISTERÉSE**

$$\rightarrow P_H = K_1 \cdot f_n = 14,97 \times 60 = 898 \text{ W (36 \% } P_{Fe})$$

**PARCELA DE PERDA FOUCAULT**

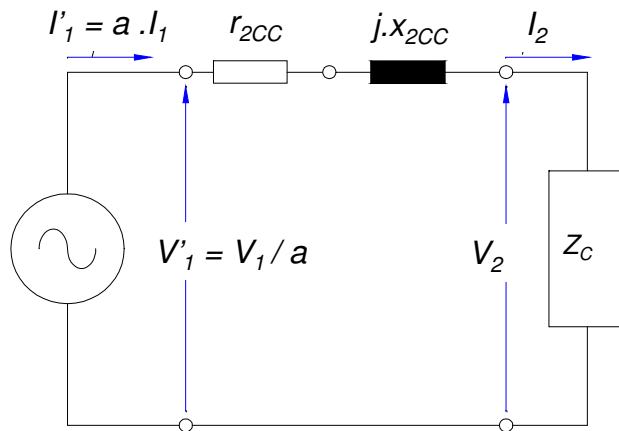
$$\rightarrow P_F = (K_2 \cdot f_n) \cdot f_n = 26,70 \times 60 = 1602 \text{ W (64 \% } P_{Fe})$$

## REGULAÇÃO DE TENSÃO DO TRANSFORMADOR EM CARGA

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

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

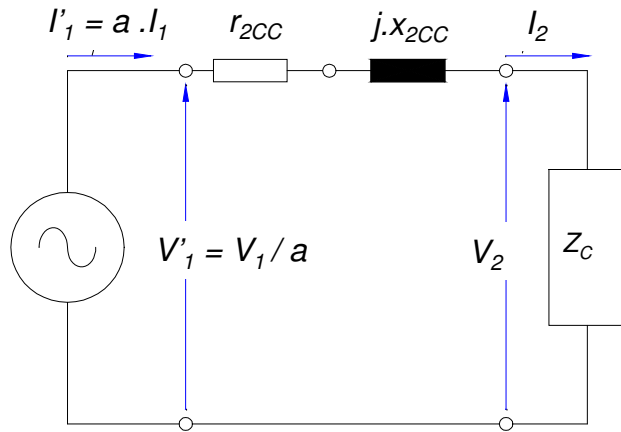
$V_{20}$  : TENSÃO SECUNDÁRIA EM VAZIO ;  $V_{2C}$  : TENSÃO SECUNDÁRIA EM CARGA



→  $V_{2C} = V_2$  : 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

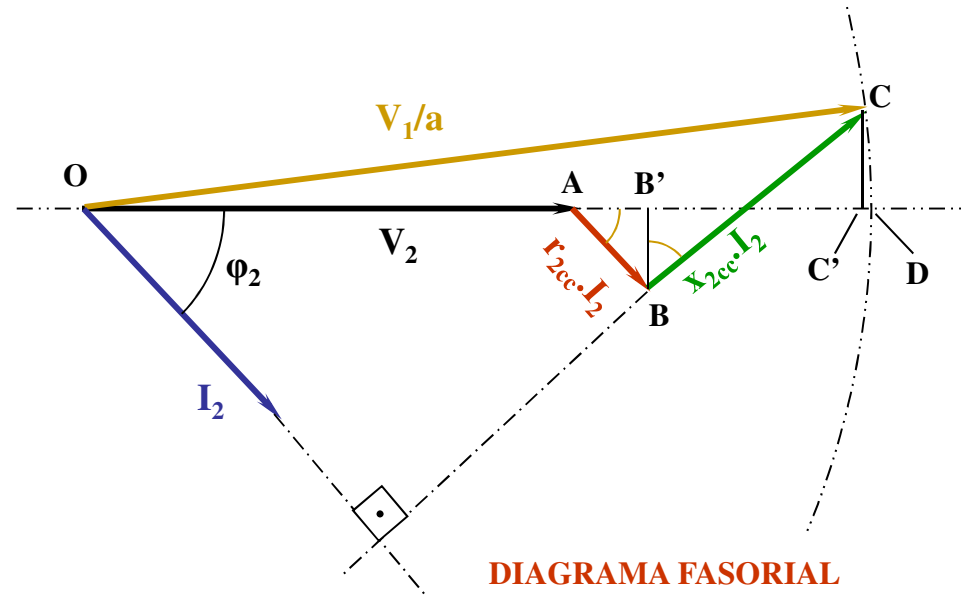


DIAGRAMA FASORIAL

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

PARA VALORES USUAIS DOS PARÂMETROS →

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

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

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

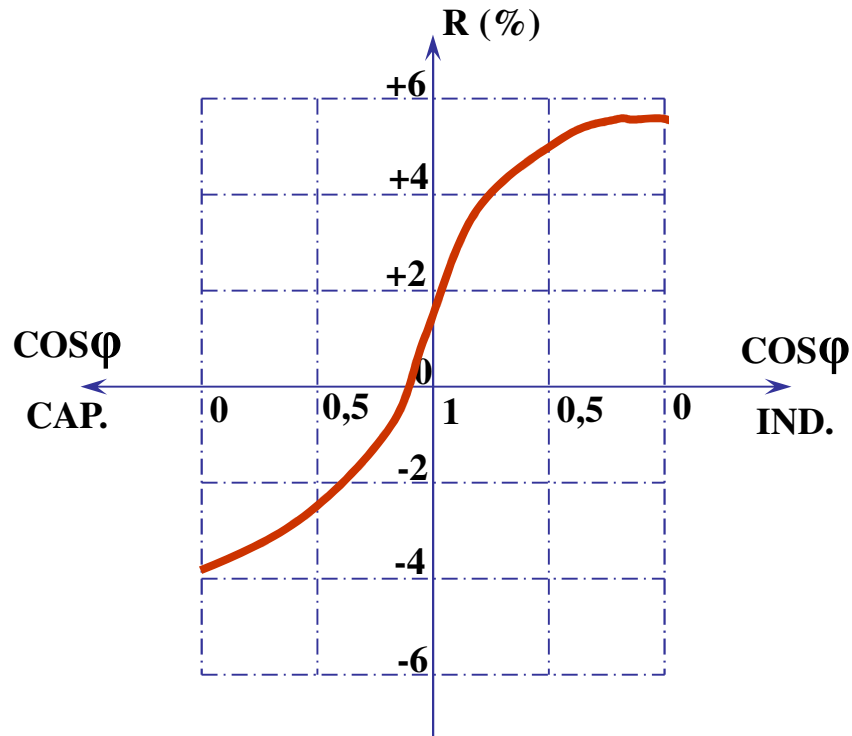
$V_2 / I_2 = Z_{B2} \rightarrow$  IMPEDÂNCIA DE BASE DO SECUNDÁRIO ;  $r_{2CC} / Z_{B2} = (r_{2CC})_{p.u.}$  ;  $x_{2CC} / Z_{B2} = (x_{2CC})_{p.u.}$

**REGULAÇÃO DO TRANSFORMADOR EM p.u.**  $\Rightarrow$   $R = (r_{2CC})_{p.u.} \cdot \cos \varphi_2 + (x_{2CC})_{p.u.} \cdot \sin \varphi_2$

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

**PERDAS CONSTANTES:  $p_C$**

**→ INDEPENDENTES DA  
CARGA**

**PERDAS NO FERRO (HISTERÉTICA E FOUCAULT)**

EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO NO NÚCLEO →  $p_{FE} \approx V^2$

**PERDAS DIELÉTRICAS (POLARIZAÇÃO DOS ISOLANTES)**

EFEITO DO CAMPO ELÉTRICO NO SISTEMA ISOLANTE →  $p_{DIEL} \approx V^2$

**PERDAS VARIÁVEIS:  $p_V$**

**→ DEPENDENTES DA  
CARGA**

**PERDAS NO COBRE (EFEITO JOULE)**

EFEITO DAS CORRENTES NOS CONDUTORES →  $p_{JOULE} \approx I^2$

**PERDAS SUPLEMENTARES (EFEITO JOULE)**

EFEITO DOS FLUXOS DISPERSOS NA ESTRUTURA →  $p_{SUP} \approx I^2$

**PERDAS TOTAIS EM CARGA :  $\Sigma p = p_C + p_V$**

CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS NO FERRO (revisão)

$$p_{FE} = \frac{1}{\gamma_{FE}} \cdot (k_H \cdot B_{FE}^\alpha \cdot f + k_F \cdot B_{FE}^2 \cdot f^2 \cdot e^2) \cdot G_{FE}$$

**PERDA ESPECÍFICA NO FERRO ( W / kg )**

$$\left. \begin{array}{l} \gamma_{FE} = \text{DENSIDADE DO FERRO} \\ G_{FE} = \text{MASSA DE FERRO DO NÚCLEO} \end{array} \right\}$$

**PERDA POR HISTERÉSE:**  $p_H = \frac{G_{fe}}{\gamma_{fe}} \cdot k_H \cdot B_{fe}^\alpha \cdot f \rightarrow \alpha \cong 2 \rightarrow p_H = \frac{G_{fe}}{\gamma_{fe}} \cdot k_H \cdot B_{fe}^2 \cdot f = K \cdot B_{fe}^2$

**PERDA POR CORRENTES PARASITAS:**  $p_F = \frac{G_{fe}}{\gamma_{fe}} \cdot k_F \cdot B_{fe}^2 \cdot f^2 \cdot e^2 = K' \cdot B_{fe}^2$

**PERDA NO FERRO TOTAL:**  $p_{Fe-tot} = p_H + p_F = K'' \cdot B_{fe}^2$

$\rightarrow B_{fe} = \frac{\phi}{S_{fe}} \rightarrow V \approx E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi \rightarrow B_{fe} = k \cdot V \rightarrow p_{Fe-tot} = k \cdot V^2$

**PERDA NO FERRO DEPENDE APENAS DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO**

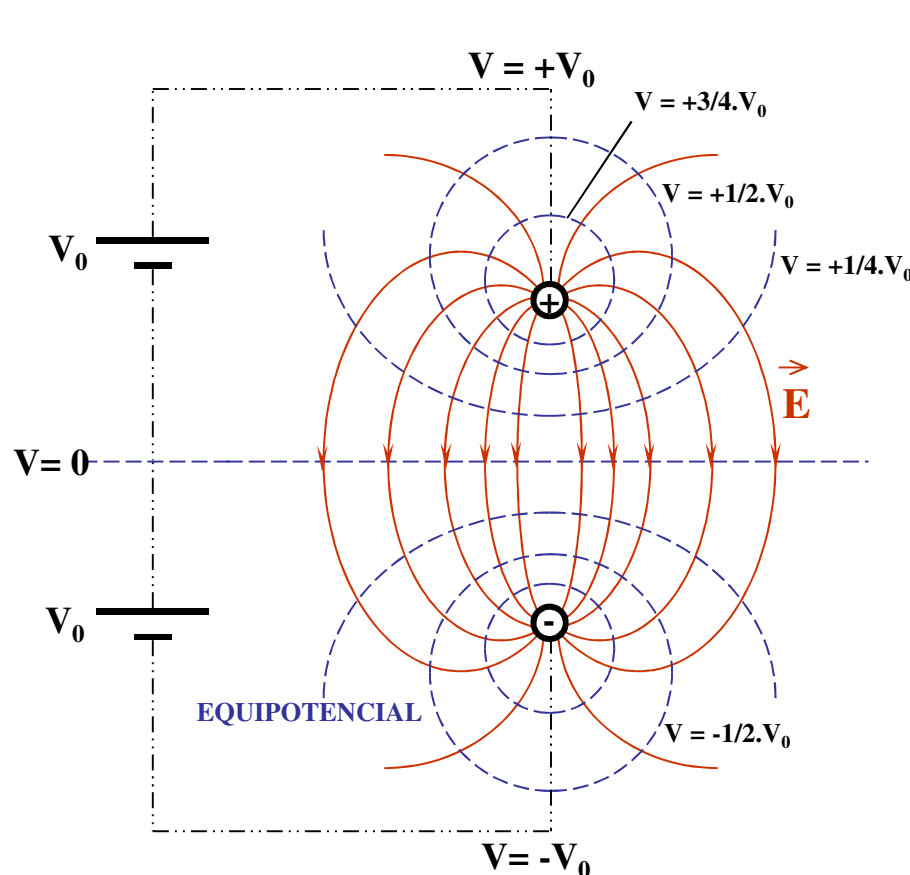
**INDEPENDE PORTANTO DA CARGA DO TRANSFORMADOR  $\rightarrow$  PERDA CONSTANTE**

CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS DIELÉTRICAS**O SISTEMA ISOLANTE – MATERIAIS DIELÉTRICOS**

**CONDUTORES SUBMETIDOS A DIFERENÇA DE POTENCIAL ELÉTRICO “V” [V] IMPOSTA POR FONTES ADEQUADAS:**

→ **AFLUXO DE CARGAS ELÉTRICAS DE SINAIS OPOSTOS ACUMULADAS NO MATERIAL DE CADA CONDUTOR**

→ **ESTABELECIMENTO DE CAMPO ELÉTRICO “E” [V/m] NO ESPAÇO EM TORNO DOS CONDUTORES**



$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} \Rightarrow \vec{E} = -\text{grad} \cdot \vec{V}$$

RELAÇÃO ENTRE POTENCIAL E CAMPO ELÉTRICO É NO CASO GERAL COMPLEXA

→ **DETERMINAÇÃO ANALÍTICA É POSSÍVEL EM CASOS DE GEOMETRIAS SIMPLES**

→ **PLACAS PARALELAS AFASTADAS DE DISTÂNCIA “d”**

$$\rightarrow E = V / d \rightarrow E = k \cdot V$$

RELAÇÃO ENTRE CARGAS ELÉTRICAS ACUMULADAS E O POTENCIAL QUE AS ESTABELECE DEFINE :

→ **CAPACITÂNCIA DO SISTEMA:**

$$C = q / V = \epsilon \cdot f(\text{GEOMETRIA}) = \epsilon \cdot (A_{\text{eq}} / d_{\text{eq}}) \quad [\text{F}]$$

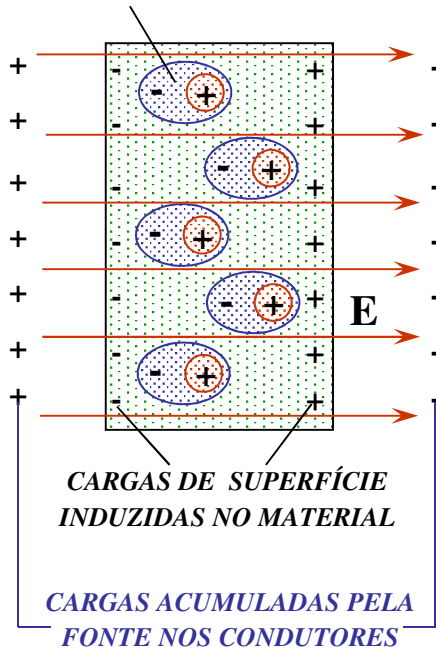
**ε: PERMISSIVIDADE OU CONSTANTE DIELÉTRICA DO MEIO**

$$\text{PARA O VÁCUO: } \epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\text{PARA ÓLEO MINERAL: } \epsilon \sim 4,5 \cdot \epsilon_0$$

RESPOSTA DOS MATERIAIS DIELÉTRICOS NA PRESENÇA DE CAMPO ELÉTRICO

ESTRUTURAS MOLECULARES DO MATERIAL POLARIZADAS



POLARIZAÇÃO :  
DESLOCAMENTO DOS CENTROS DE CARGA ATÔMICOS OU MOLECULARES DO MATERIAL

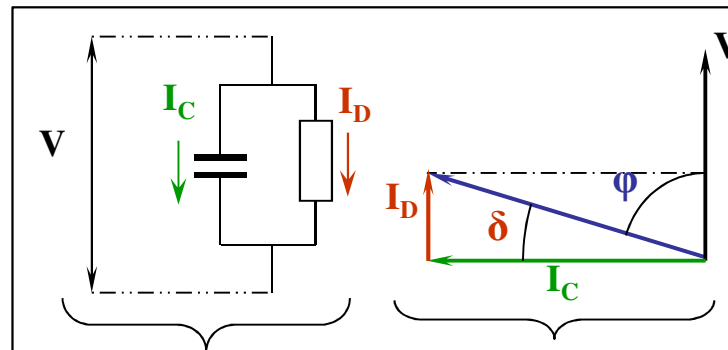
MATERIAL DIELÉTRICO SUBMETIDO A CAMPO ELÉTRICO EXTERNO “E” :

- **POLARIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS MOLECULARES DO MATERIAL**
- FORMAÇÃO DE DIPOLos ELÉTRICOS NO MEIO MATERIAL

**SISTEMA ISOLANTE SOB TENSÃO ALTERNADA ( CAMPO ELÉTRICO VARIÁVEL ) :**

POLARIZAÇÃO CÍCLICA DO MEIO ISOLANTE

- **CORRENTES DE DESLOCAMENTO DE REGIME**
- **ABSORÇÃO DE CORRENTE CAPACITIVA -  $I_C$**
- **MANIFESTAÇÃO DE PERDAS DIELÉTRICAS → CORRENTE ATIVA DE PERDAS -  $I_D$**



MODELO APROXIMADO DO SISTEMA ISOLANTE      DIAGRAMA DE FASORES DO SISTEMA ISOLANTE

C: CAPACITÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA ISOLANTE

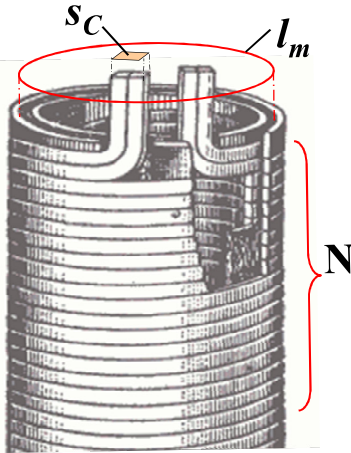
$R_D$  : RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE PERDAS DIELÉTRICAS

$$I_D = V / R_D ; I_C = V / X_C = V \cdot \omega \cdot C$$

FATOR DE PERDAS DIELÉTRICAS:  $I_D / I_C = \tan \delta$

PERDA DIELÉTRICA:  $P_d = \frac{V^2}{R_D} = k \cdot V^2$

PERDA DIELÉTRICA DEPENDE APENAS DA TENSÃO → PERDA CONSTANTE

CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS JOULE – RESISTÊNCIAS EM C.C.RESISTÊNCIA ÔHMICA DOS ENROLAMENTOS : ( RESISTÊNCIA “C.C.” OU EM *CORRENTE CONTÍNUA* )

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

$\rho$  : 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  $T_1$

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

$\alpha_{\text{COBRE}}$  = COEFICIENTE DE VARIAÇÃO TÉRMICA DA RESISTIVIDADE

RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR  $\rightarrow$  PERDAS JOULE REFERIDAS A UMA TEMPERATURA PADRÃO: 75°C OU 90°C

EXEMPLO: { RESISTÊNCIA ÔHMICA MEDIDA A 25°C:  $R_{25} = 0,0150 \Omega$   $\rightarrow I = 600 \text{ A}$   $\rightarrow P_J = 5400 \text{ W}$

{ RESISTÊNCIA ÔHMICA REFERIDA A 75°C:  $R_{75} = 0,0179 \Omega$   $\rightarrow I = 600 \text{ A}$   $\rightarrow P_J = 6440 \text{ W}$   $\rightarrow$  19,3% MAIOR !!

$P_J = k \cdot I^2$   $\rightarrow$  PERDA JOULE FUNÇÃO DA CORRENTE  $\rightarrow$  DEPENDE DA CARGA  $\rightarrow$  PERDA VARIÁVEL

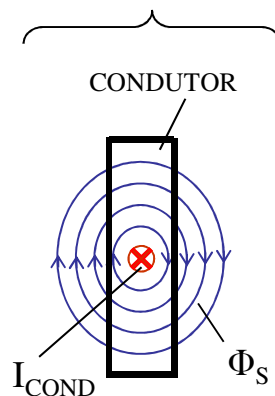
CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES – RESISTÊNCIAS EM C.A.

## EFEITOS ADICIONAIS DA CORRENTE – ADENSAMENTO NAS EXTREMIDADES DO CONDUTOR

CONDUTOR CONDUZINDO CORRENTE ALTERNADA ( $I_{COND}$ ):

- FLUXO MAGNÉTICO ALTERNADO DISTRIBUÍDO DENTRO E FORA DO CONDUTOR, “NORMAL” AO PLANO DO MESMO ( $\Phi_S$ )
- **VARIAÇÃO DO FLUXO NO TEMPO** → TENSÕES INDUZIDAS AO LONGO DO CONDUTOR (LEI DE FARADAY)
- CORRENTES INDUZIDAS IMPOSTAS NO PLANO DO CONDUTOR, EM OPOSIÇÃO À VARIAÇÃO DO FLUXO (LEI DE LENZ) ( $I_{IND}$ )

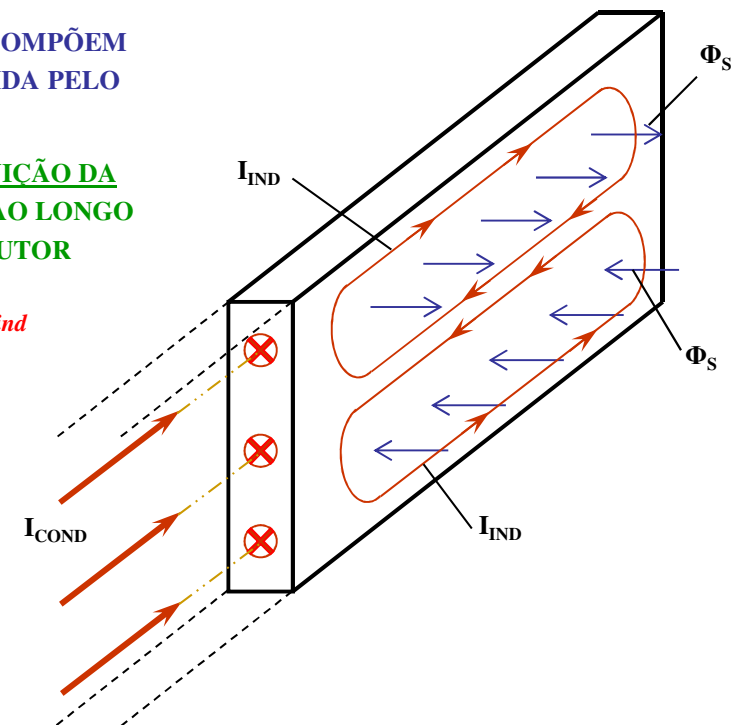
DISTRIBUIÇÃO “APROXIMADA” DO FLUXO  
CRIADO PELA PRÓPRIA CIRCULAÇÃO DA  
CORRENTE NO CONDUTOR



CORRENTES INDUZIDAS SE COMPÕEM  
COM A CORRENTE CONDUZIDA PELO  
CONDUTOR

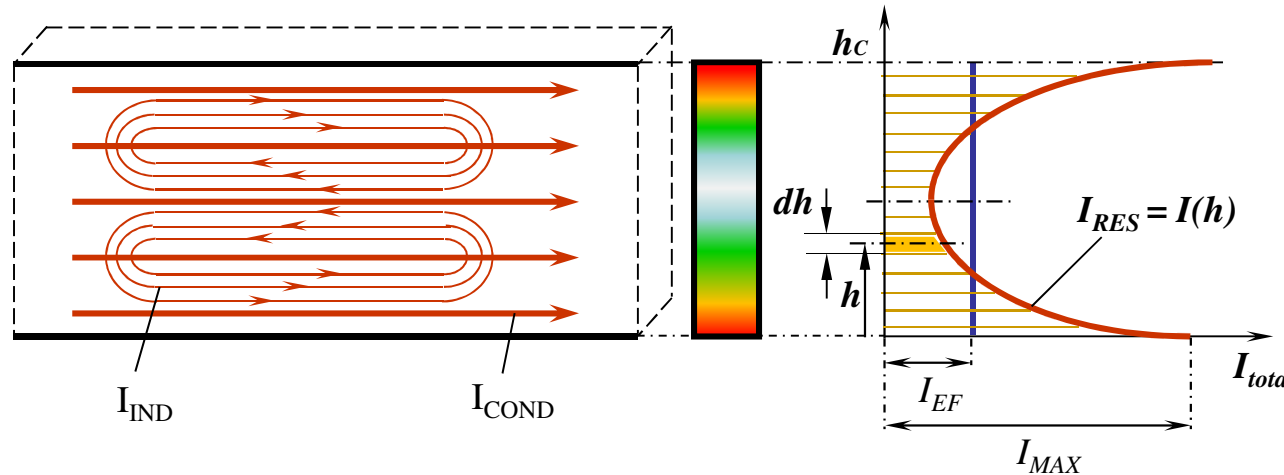
→ DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA  
CORRENTE RESULTANTE AO LONGO  
DA SEÇÃO DO CONDUTOR

$$\rightarrow I_{total} = I_{cond} + I_{ind}$$



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

**CORRENTE ADENSADA NO CONDUTOR → MAIOR CONCENTRAÇÃO NAS EXTREMIDADES**



**DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE AO LONGO DA ALTURA DO CONDUTOR**

**→ AFETA A DISTRIBUIÇÃO DA PERDA JOULE NO CONDUTOR**

**PERDA JOULE SEM ADENSAMENTO:**  $p_{Jdc} = r_{dc} \cdot I_{EF}^2$

$r_{dc}$ : RESISTÊNCIA “DC” DO CONDUTOR -  $r_{dc}/h$  → “densidade de resistência do condutor”

**PARA CORRENTE CONTÍNUA IGUAL À CORRENTE ALTERNADA EM VALOR EFICAZ (  $I_{dc} = I_{ac} = I_{ef}$  ) →  $P_{jac} > P_{jdc}$**

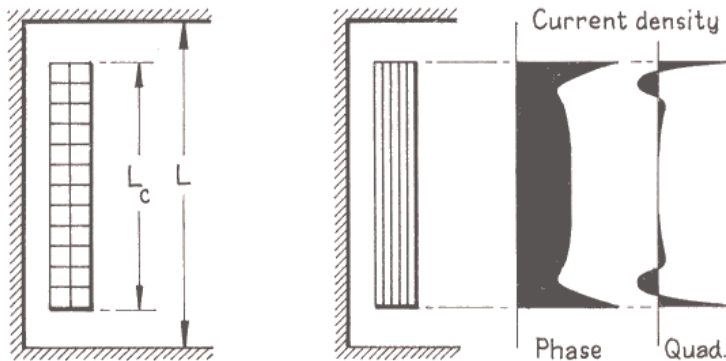
$$p_{Jac} = \int_0^{h_c} \frac{r_{dc}}{h} \cdot I^2(h) \cdot dh = r_{ac} \cdot I_{EF}^2 > p_{Jdc}$$

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

**PERDA JOULE COM ADENSAMENTO DE CORRENTE**

$r_{ac}$ : RESISTÊNCIA APARENTE EM “AC”

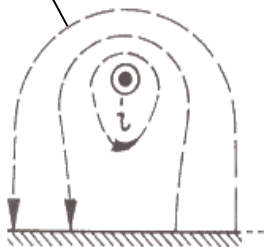
$\rho_c$ : RESISTIVIDADE DO MATERIAL DO CONDUTOR -  $g(h)$ : FUNÇÃO COMPLEXA DA GEOMETRIA DO CONDUTOR



ADENSAMENTO DA DENSIDADE DE CORRENTE VARIA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA BOBINA E DA CONSTRUÇÃO DA MESMA

→ INTENSA NAS BOBINAS FEITAS EM FOLHA CONDUTORA CONTÍNUA

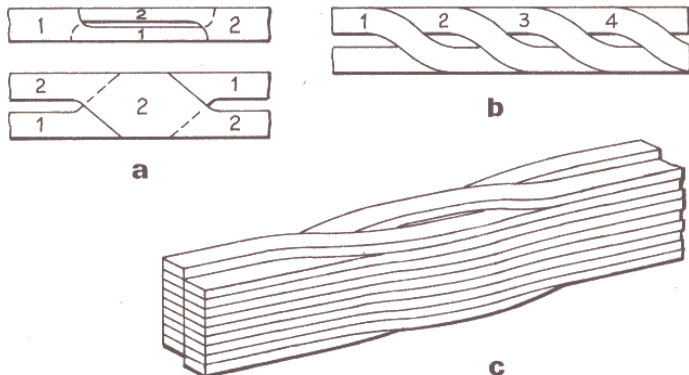
FLUXO DISPERSO IMERSO NA ESTRUTURA



PARTE ESTRUTURAL EM MATERIAL FERROMAGNÉTICO

### CORRENTES INDUZIDAS NA ESTRUTURA DO TRANSFORMADOR:

- BOBINAS GERAM FLUXO DISPERSO (FORA DO NÚCLEO)
- CONDUTORES, CABOS OU BARRAS DE CONEXÃO PRODUZEM FLUXO MAGNÉTICO NO SEU ENTORNO
- FLUXOS ENLACAM PARTES ESTRUTURAIS EM MATERIAL FERROMAGNÉTICO, COMO TANQUE, VIGAS DE APERTO, TIRANTES DE FIXAÇÃO, ETC
- FLUXOS ALTERNATIVOS CONCATENADOS NA ESTRUTURA INDUZEM CORRENTES PARASITAS
- GERAÇÃO DE PERDAS POR EFEITO JOULE NESSAS PARTES



ADENSAMENTO DE CORRENTE NOS CONDUTORES E CORRENTES INDUZIDAS NA ESTRUTURA MECÂNICA → CARACTERIZADAS COMO PERDAS SUPLEMENTARES

$$P_{supl} = k \cdot I^2 \rightarrow \text{PERDAS VARIÁVEIS COM A CARGA}$$

MECANISMOS PARA LIMITAR EFEITOS DO ADENSAMENTO:

- SUBDIVISÃO DE CONDUTORES DE SECÇÃO 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]**

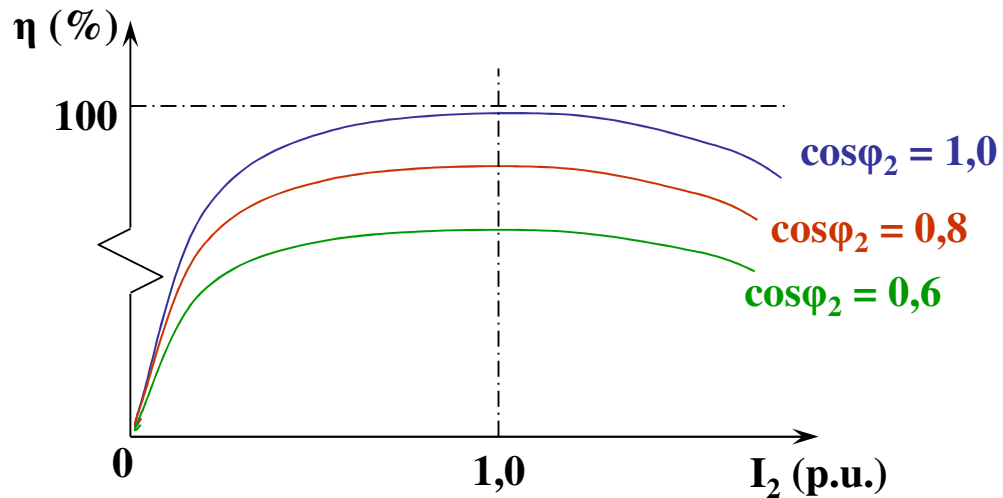
$$\eta = P_U / P_{ABS} = P_U / (P_U + \Sigma p) = P_U / (P_U + p_C + p_V)$$

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

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

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

## COMPORTAMENTO DO RENDIMENTO COM A CARGA DO TRANSFORMADOR E COM O FATOR DE POTÊNCIA



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

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

$\rightarrow$  EXISTE PORTANTO UM PONTO DE MÁXIMO

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

PREFERENCIALMENTE PARA:  $I_2 \cong I_{2N}$

(QUANDO O TRANSFORMADOR OPERA COM CARGA CONSTANTE AO LONGO DO TEMPO)

## CONDIÇÃO DE MÁXIMO RENDIMENTO NO TRANSFORMADOR:

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

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

$$\frac{df(I_2)}{dI_2} = \frac{d}{dI_2} \left( \frac{p_{FE}}{V_2 \cdot \cos\phi_2} \cdot \frac{1}{I_2} + \frac{r_{2cc}}{V_2 \cdot \cos\phi_2} \cdot I_2 \right) = 0 \rightarrow -\frac{1}{I_2^2} \cdot \frac{p_{FE}}{V_2 \cdot \cos\phi_2} + \frac{r_{2cc}}{V_2 \cdot \cos\phi_2} = 0$$

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

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

CONDIÇÃO DE PERDA CONSTANTE = PERDA VARIÁVEL GARANTE RENDIMENTO MÁXIMO EM QUALQUER FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA

$\rightarrow$  PARA FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO O RENDIMENTO SERÁ O MÁXIMO ABSOLUTO

**CARGA VARIÁVEL NO TEMPO** (tipicamente transformadores de distribuição) :

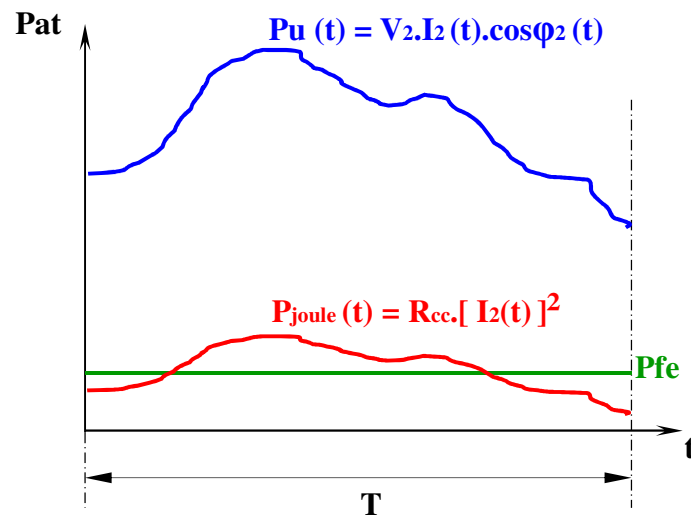
→ **OBJETIVA-SE MINIMIZAR A POTÊNCIA DE PERDAS AO LONGO DO TEMPO**

→ **RENDIMENTO EM ENERGIA**

**$E_{\text{FORN}}$  : ENERGIA FORNECIDA NUM PERÍODO T**

**$E_{\text{ABS}}$  : ENERGIA ABSORVIDA NO MESMO PERÍODO T**

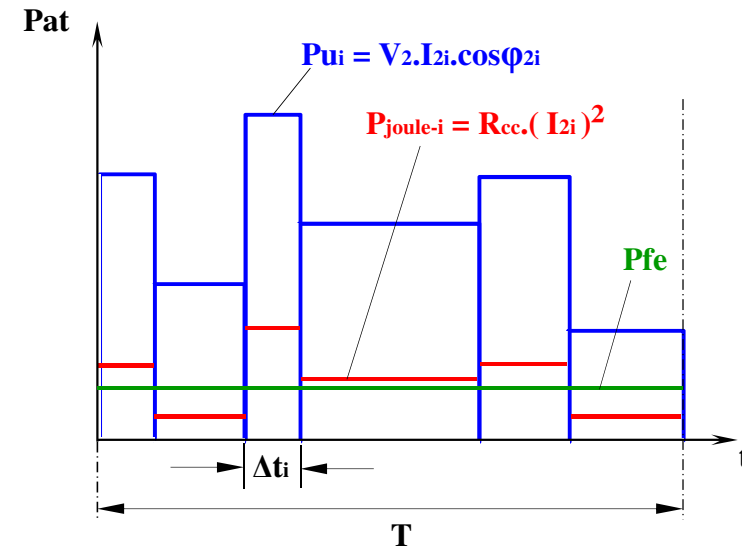
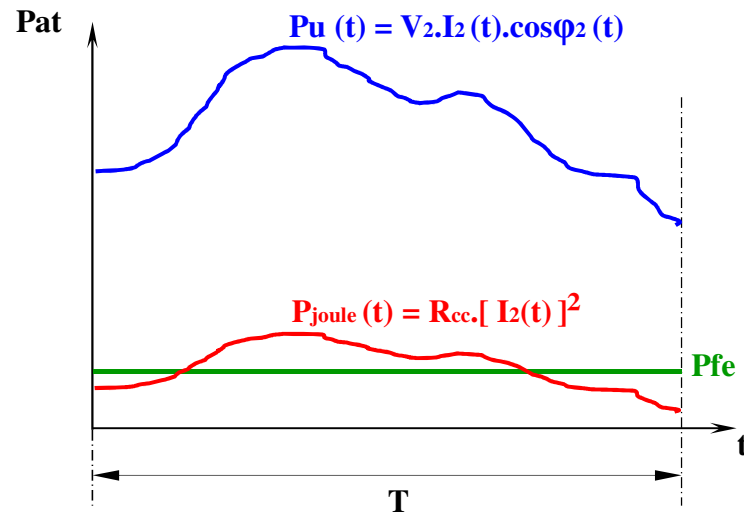
$$\rightarrow \eta_E = E_{\text{FORN}} / E_{\text{ABS}}$$



ANDAMENTO GENÉRICO, AO LONGO DO TEMPO, DAS POTÊNCIAS ÚTIL ENTREGUE À CARGA E DA PERDAS CORRESPONDENTES

**T**: PERÍODO EM QUE O PERFIL DE CARGA SE REPETE ( 24 horas tipicamente para distribuição)

**RENDIMENTO EM ENERGIA**  $\rightarrow \eta_e = \frac{\text{ENERGIA FORNECIDA NO PERÍODO } T}{\text{ENERGIA ABSORVIDA NO MESMO } T}$



$$\eta_e = \frac{\int_0^T P_u(t) \cdot dt}{\int_0^T P_u(t) \cdot dt + P_{fe} \cdot T + \int_0^T P_{joule}(t) \cdot dt}$$

$$\eta_e = \frac{V_2 \cdot \int_0^T I_2(t) \cdot \cos\phi_2(t) \cdot dt}{V_2 \cdot \int_0^T I_2(t) \cdot \cos\phi_2(t) \cdot dt + P_{fe} \cdot T + \int_0^T R_{cc} \cdot I_2^2(t) \cdot dt}$$

$$\eta_e = \frac{\sum_i P_{ui} \cdot \Delta t_i}{\sum_i P_{ui} \cdot \Delta t_i + P_{fe} \cdot T + \sum_i P_{joulei} \cdot \Delta t_i}$$

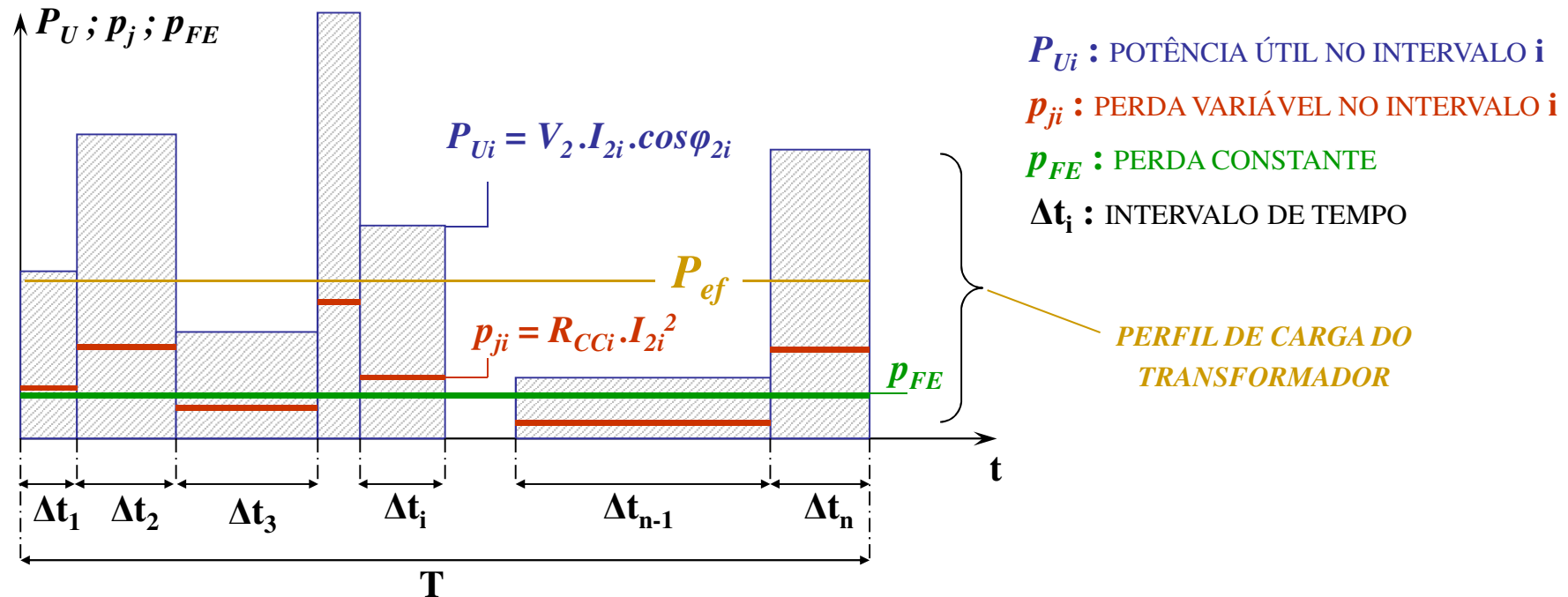
$$\eta_e = \frac{V_2 \sum_i I_{2i} \cdot \cos\phi_{2i} \cdot \Delta t_i}{V_2 \sum_i I_{2i} \cdot \cos\phi_{2i} \cdot \Delta t_i + P_{fe} \cdot T + \sum_i R_{cc} \cdot I_{2i}^2 \cdot \Delta t_i}$$

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

$$P_{EF} < P_N$$

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

CARACTERIZAÇÃO DA POTÊNCIA EFICAZ NO PERÍODO, PARA CARGA VARIÁVEL NO TEMPO



PERDA JOULE (VARIÁVEL COM A CARGA) → 
$$p_{Vi} = r_2 \cdot I_{2i}^2 = r_2 \cdot \left( \frac{P_{Ui}}{V_2 \cdot \cos \varphi_{2i}} \right)^2 = k \cdot P_{Ui}^2$$

POTÊNCIA EFICAZ → POTÊNCIA CONTÍNUA EQUIVALENTE QUE PRODUZ A MESMA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO REGIME REAL INTERMITENTE → MESMA PERDA MÉDIA → MESMA ENERGIA TÉRMICA

ENERGIA DAS PERDAS DO REGIME  
REAL INTERMITENTE

ENERGIA DAS PERDAS DO REGIME  
CONTÍNUO EQUIVALENTE

$$p_{FE} \cdot T + k \cdot \sum P_{Ui}^2 \cdot \Delta t_i = p_{FE} \cdot T + k \cdot P_{ef}^2 \cdot T$$

POTÊNCIA EFICAZ DO  
REGIME INTERMITENTE

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum P_{Ui}^2 \cdot \Delta t_i}{T}}$$

TRANSFORMADOR PARA REGIME INTERMITENTE OU VARIÁVEL

→ DIMENSIONADO PELA POTÊNCIA EFICAZ