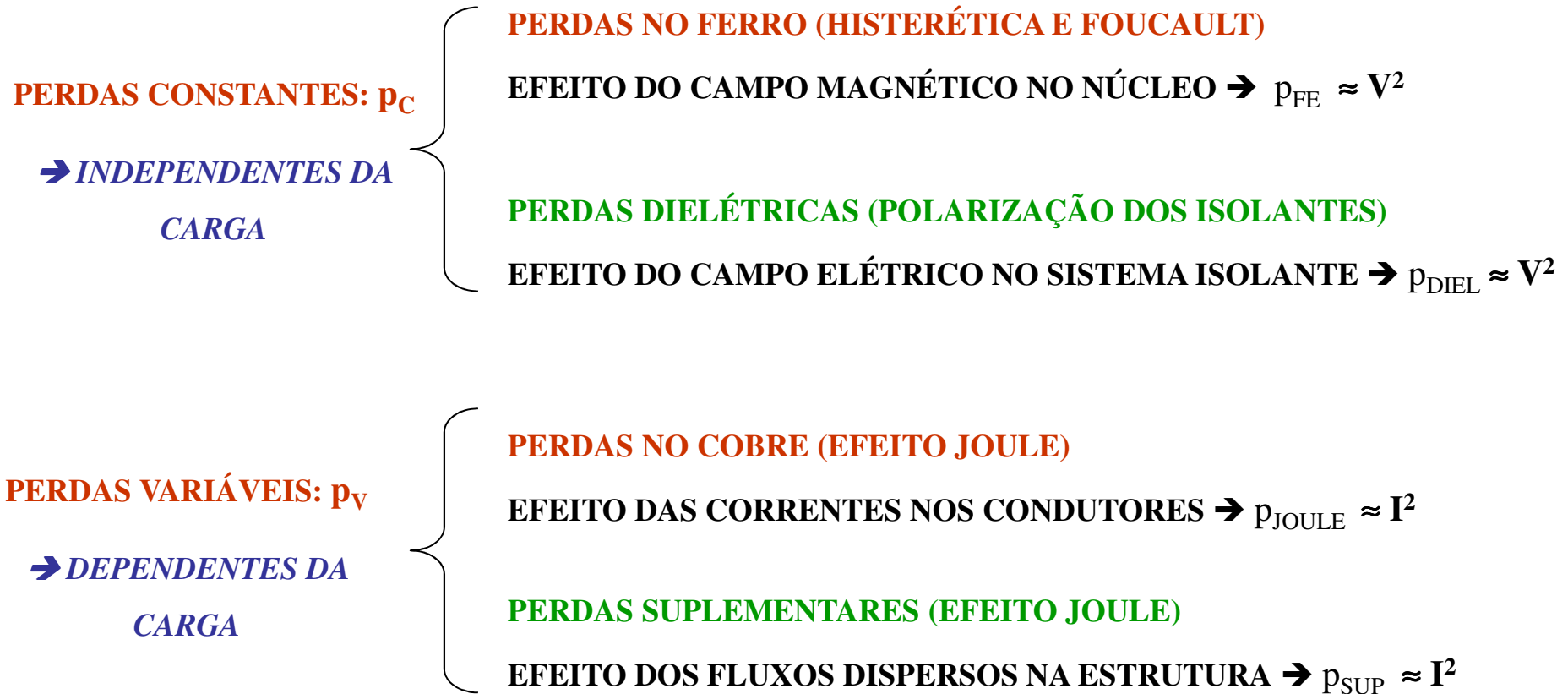
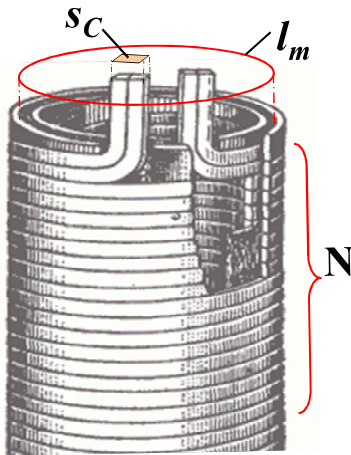


## CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS E RENDIMENTO NO TRANSFORMADOR EM CARGA:



**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* )

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

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

$l_m$  : COMPRIMENTO MÉDIO DO CONDUTOR

$N$  : N° 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 :  $p_{J2} = m \cdot r_2 \cdot I_2^2$

$m$  : N° 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  $T_1$

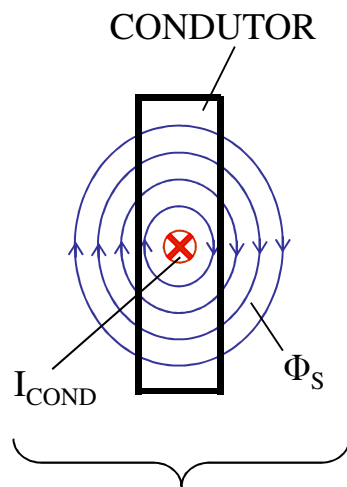
$234,5 = 1 / \alpha_{\text{COBRE}}$

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

## EFEITOS ADICIONAIS DA CORRENTE – ADENSAMENTO - PERDAS SUPLEMENTARES

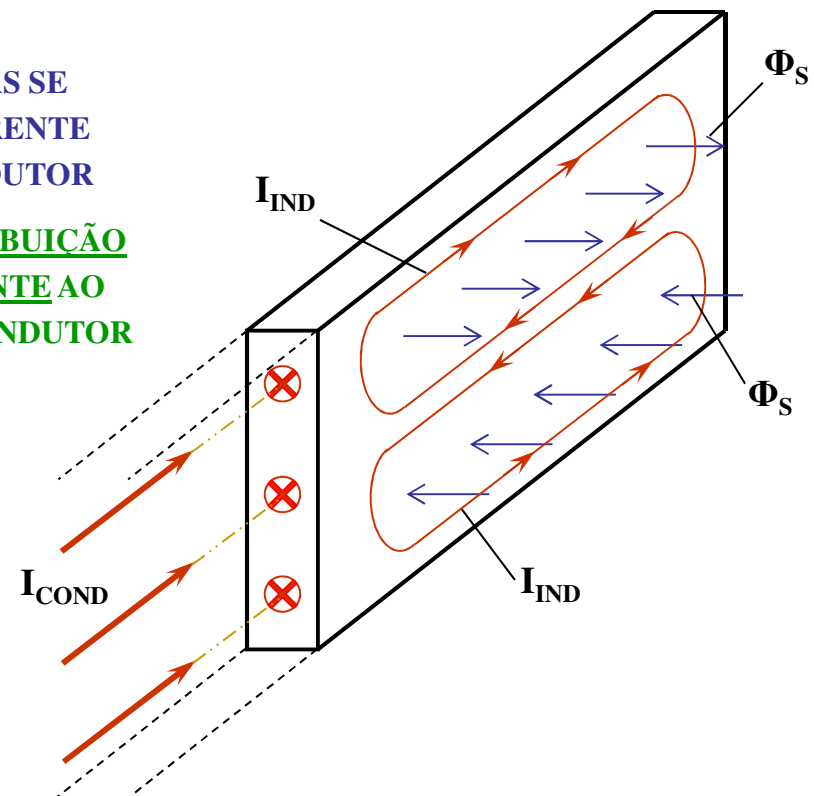
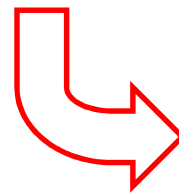
CONDUTOR CONDUZINDO CORRENTE ALTERNADA ( $I_{COND}$ ):→ FLUXO MAGNÉTICO ALTERNADO DISTRIBUÍDO DENTRO E FORA DO CONDUTOR, “NORMAL” AO PLANO DO MESMO ( $\Phi_S$ )

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

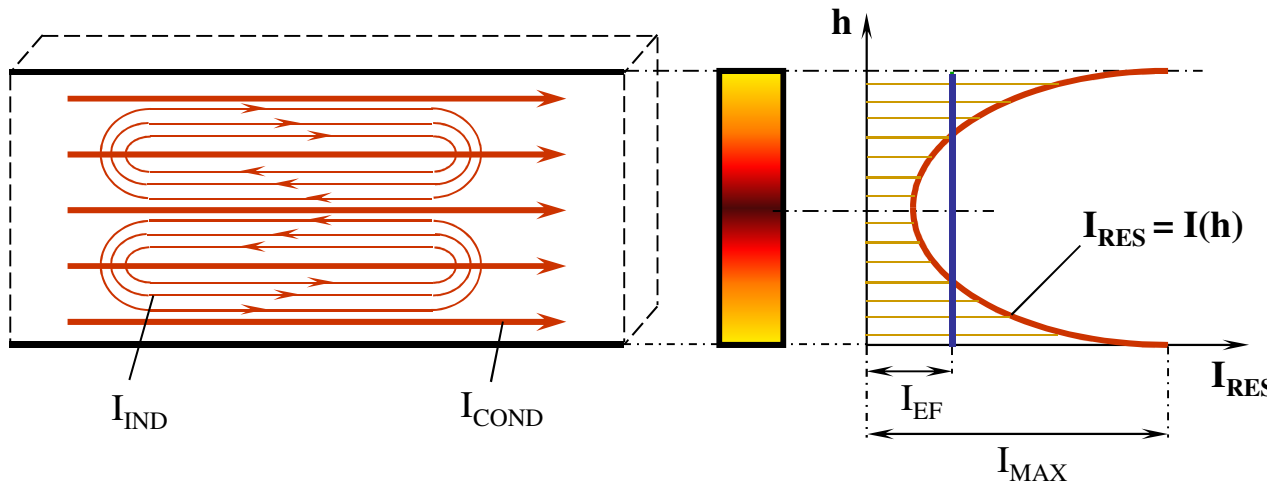
→ CORRENTES INDUZIDAS IMPOSTAS NO PLANO DO CONDUTOR, EM OPOSIÇÃO À VARIÇÃO DO FLUXO (LEI DE LENZ) ( $I_{IND}$ )

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<sub>dc</sub> : RESISTÊNCIA “DC” DO CONDUTOR**

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

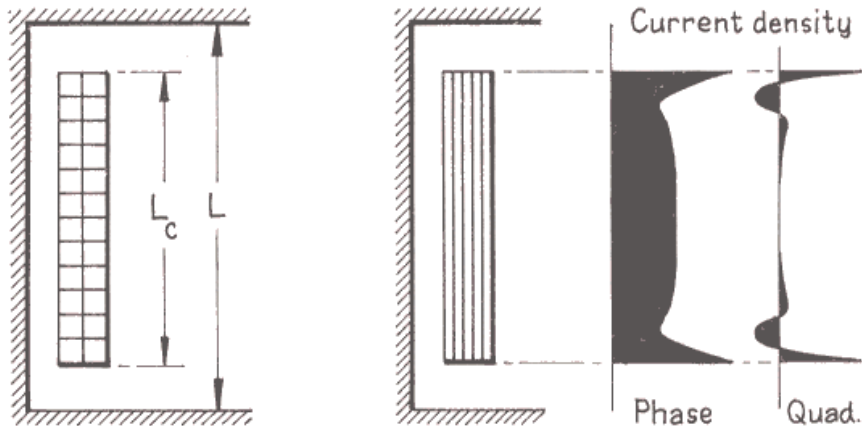
$$r_{ac} > r_{dc} \Rightarrow r_{ac} = r_{dc} \cdot \left[ g(h) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot f}{\rho_c}} \right]$$

**PERDA JOULE COM ADENSAMENTO DE CORRENTE**

**r<sub>ac</sub> : RESISTÊNCIA APARENTE EM “AC”**

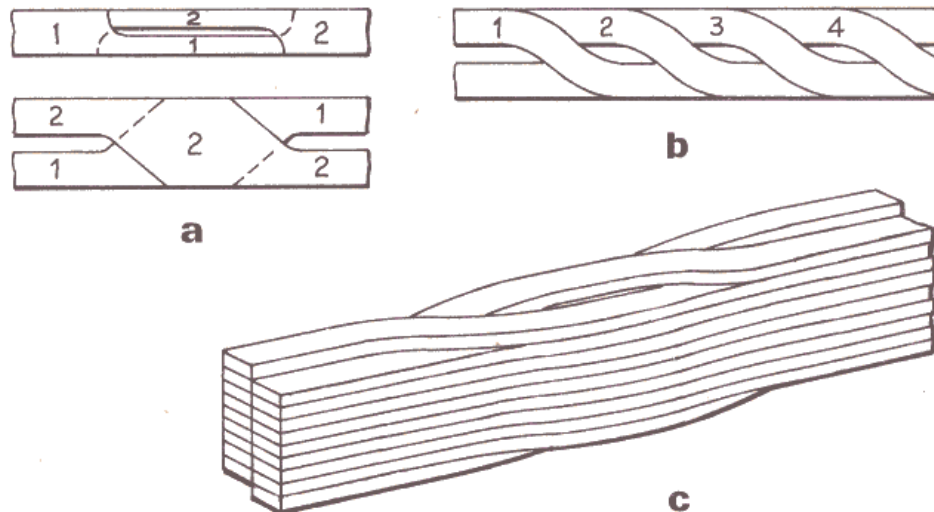
**ρ<sub>C</sub> : RESISTIVIDADE DO MATERIAL DO CONDUTOR - g(h) : FUNÇÃO COMPLEXA DA GEOMETRIA DO CONDUTOR**

**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 SECÇÃO ELEVADA**

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

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

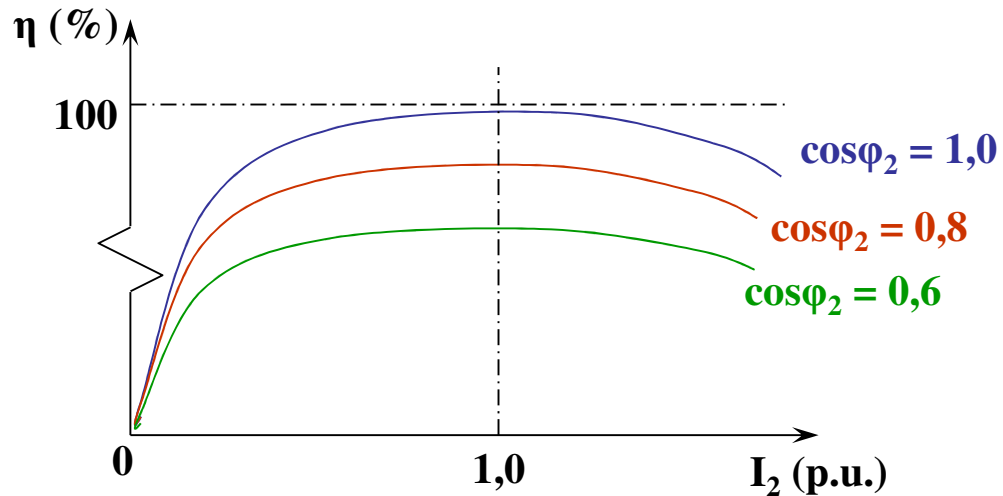
**RENDIMENTO EM POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR** **$P_U$  : POTÊNCIA ÚTIL (ATIVA) FORNECIDA PELO SECUNDÁRIO [kW]** **$P_{ABS}$  : POTÊNCIA TOTAL ABSORVIDA (ATIVA) PELO PRIMÁRIO [kW]**

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

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

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

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



$I_2 = 0 \rightarrow \eta = 0$  (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*

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

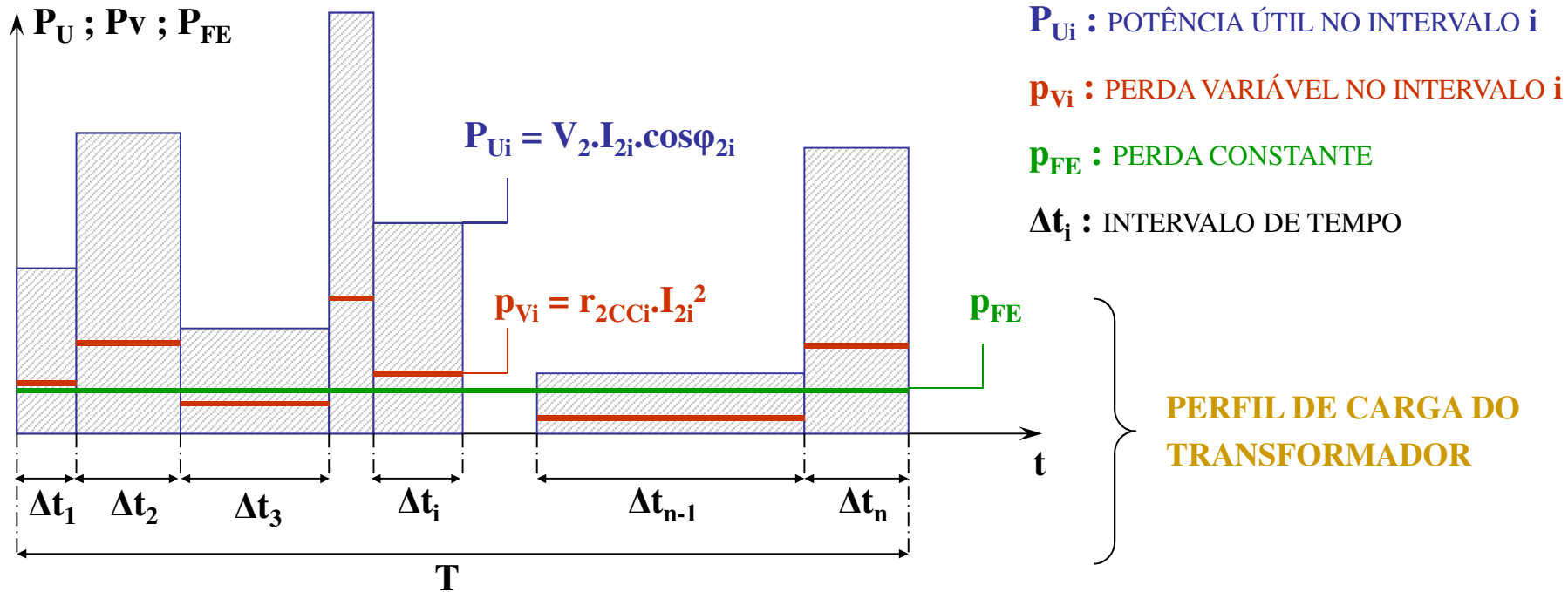
$E_{\text{ABS}}$  : ENERGIA ABSORVIDA NO MESMO PERÍODO T

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

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

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

→  $[p_v]_{\text{Pef}} = p_c$  : IGUALDADE ENTRE *PERDA VARIÁVEL* E *PERDA CONSTANTE* DEVE SE DAR PARA A POTÊNCIA EFETIVA E NÃO PARA A NOMINAL









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

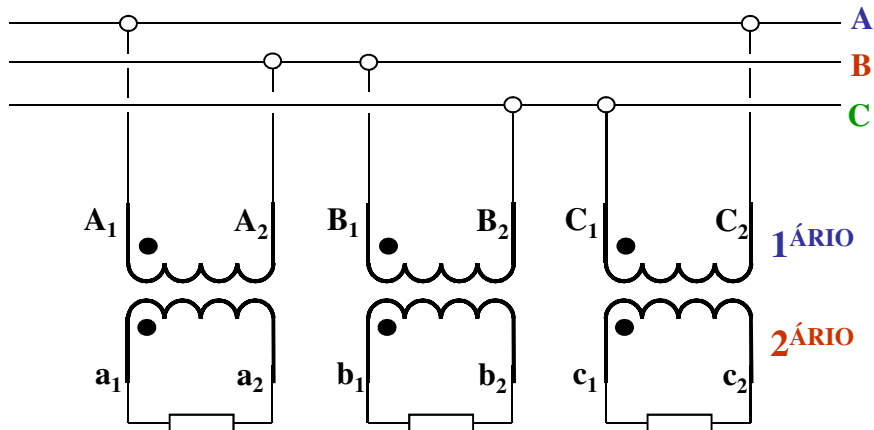
TRANSFORMADORES EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

SISTEMAS DE POTÊNCIA → GRANDES BLOCOS DE ENERGIA → GRANDES DISTÂNCIAS

*SISTEMA DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO TRIFÁSICO*ADOÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO → MAIS ECONÔMICO GLOBALMENTEGERADOR: 1Ø → VOLUME ELETROMAGNÉTICO:  $D^2 \cdot L$  → GERA POTÊNCIA:  $P_1$ GERADOR:  $m\text{Ø}$  → DE MESMO VOLUME → GERA POTÊNCIA:  $P_m = P_1 \cdot m \cdot \text{sen} [\pi / (2 \cdot m)]$ 

Nº DE FASES $m$	POTÊNCIA $P_m$	Nº DE <u>CONDUTORES NA LINHA</u>	
1	$P_1$	2	
2	$1,41 \cdot P_1$	3	
3	$1,50 \cdot P_1$	3	
4	$1,53 \cdot P_1$	4	
5	$1,55 \cdot P_1$	5	
$\infty$	$1,57 \cdot P_1$	$\infty$	

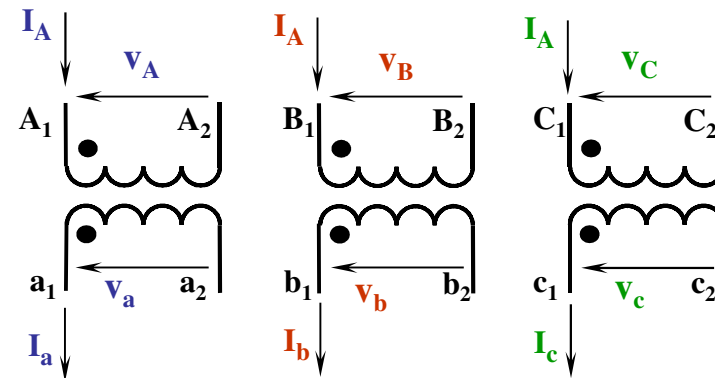
## O TRANSFORMADOR NO SISTEMA TRIFÁSICO



**TRANSFORMADOR TRIFÁSICO OU BANCO  
DE TRES TRANSFORMADORES  
MONOFÁSICOS**

**CARGAS INDIVIDUAIS EQUILIBRADAS OU  
CONECTADAS EM CONEXÃO PADRÃO**

**POLARIDADES RELATIVAS E CONVENÇÕES  
PARA TENSÕES E CORRENTES EM CADA LADO**



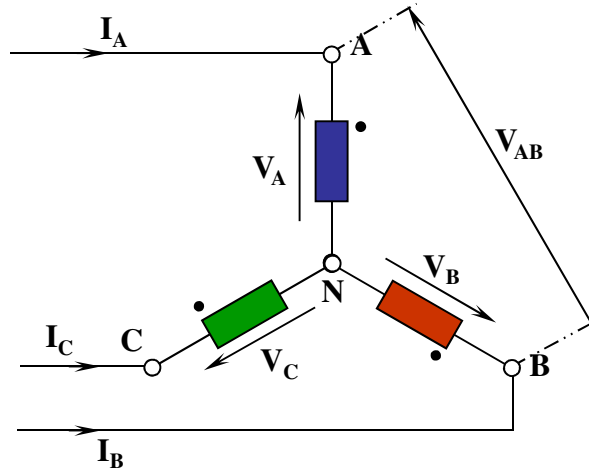
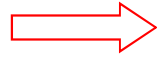
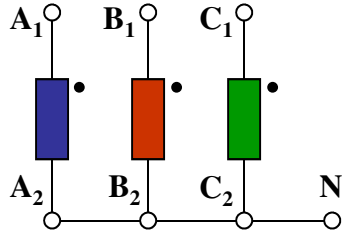
**FASES INDIVIDUAIS CONECTADAS  
ENTRE SI EM LIGAÇÕES PADRÃO DO  
SISTEMA TRIFÁSICO:**

**Y - ESTRELA - Δ - TRIÂNGULO**

**LIGAÇÕES ESPECIAIS:**

**ZIG-ZAG - TRIÂNGULO ESTENDIDO**

CONEXÃO TRIFÁSICA EM ESTRELA - Y



TENSÕES DE FASE:

$$V_A = V_{A-N} = V_A \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$$

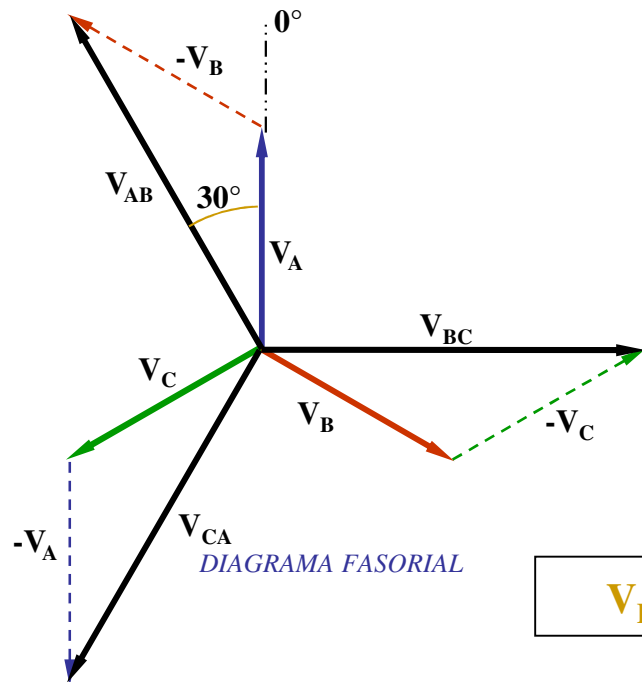
$$V_B = V_{B-N} = V_A \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}$$

$$V_C = V_{C-N} = V_A \cdot e^{-j \cdot 240^\circ}$$

NEUTRO PODE SER OU NÃO ACESSÍVEL

ACESSÍVEL  $\rightarrow I_N = I_A + I_B + I_C$  SEQUENCIA ZERO

SISTEMA EQUILIBRADO  $\rightarrow I_N = 0$



TENSÕES DE LINHA:

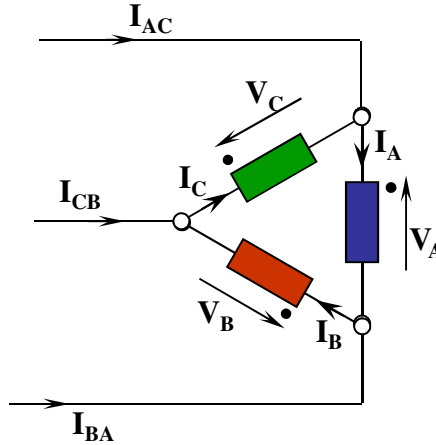
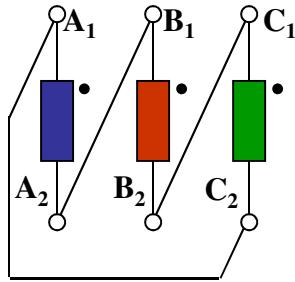
$$V_{AB} = V_A - V_B = V_A \cdot e^{j \cdot 0^\circ} - V_A \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} = \sqrt{3} \cdot V_A \cdot e^{+j \cdot 30^\circ}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = V_A \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} - V_A \cdot e^{-j \cdot 240^\circ} = \sqrt{3} \cdot V_A \cdot e^{-j \cdot 90^\circ}$$

$$V_{CA} = V_C - V_A = V_A \cdot e^{-j \cdot 240^\circ} - V_A \cdot e^{j \cdot 0^\circ} = \sqrt{3} \cdot V_A \cdot e^{-j \cdot 210^\circ}$$

$$V_{Linha} = \sqrt{3} \cdot V_{Fase} \rightarrow \text{ADIANTEADA } 30^\circ - I_{Linha} = I_{Fase}$$

CONEXÃO TRIFÁSICA EM TRIÂNGULO - Δ



CORRENTES DE FASE:

$$I_A = I_A \cdot e^{j \cdot (0^\circ - \varphi)}$$

$$I_B = I_A \cdot e^{-j \cdot (120^\circ + \varphi)}$$

$$I_C = I_A \cdot e^{-j \cdot (240^\circ + \varphi)}$$

CORRENTES DE LINHA:

$$I_{AC} = I_A - I_C = \sqrt{3} \cdot I_A \cdot e^{-j \cdot (30^\circ + \varphi)}$$

$$I_{BA} = I_B - I_A = \sqrt{3} \cdot I_A \cdot e^{-j \cdot (150^\circ + \varphi)}$$

$$I_{CB} = I_C - I_B = \sqrt{3} \cdot I_A \cdot e^{-j \cdot (270^\circ + \varphi)}$$

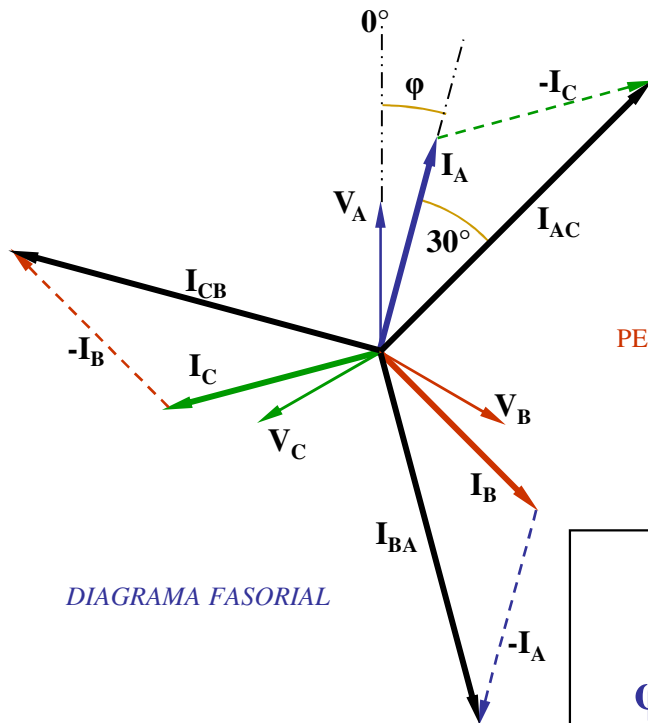


DIAGRAMA FASORIAL

PERMITE CIRCULAÇÃO INTERNA NO Δ DE CORRENTES DE SEQUENCIA ZERO

$$I_{LINHA} = \sqrt{3} \cdot I_{FASE} \rightarrow \text{ATRASADA } 30^\circ - V_{LINHA} = V_{FASE}$$

φ : ANGULO DE FASE DA CORRENTE EM RELAÇÃO À TENSÃO

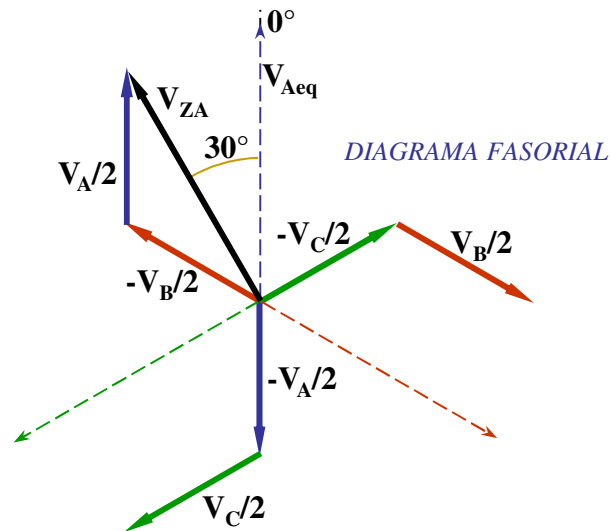
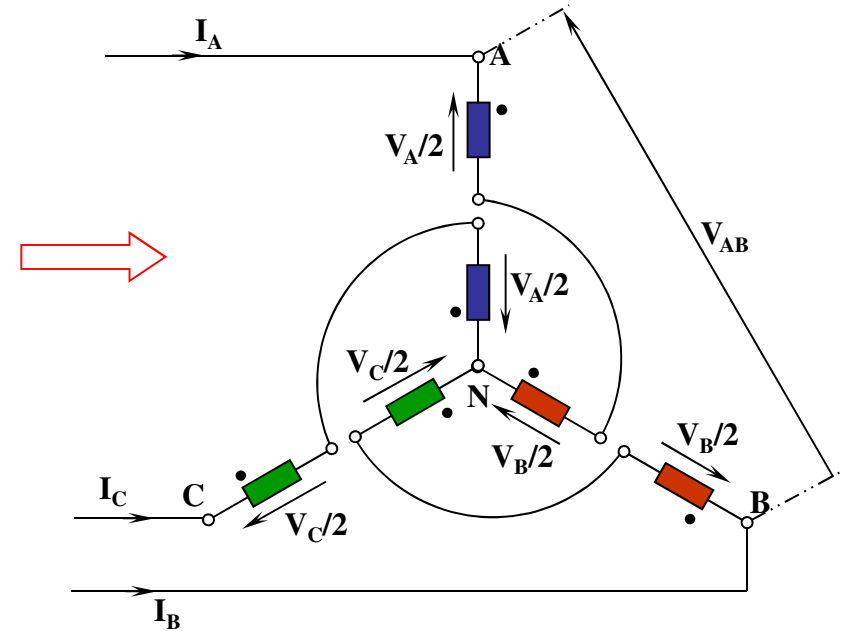
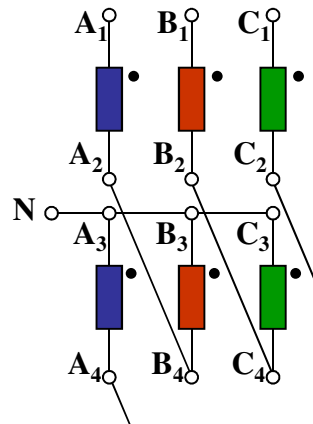
CONEXÃO TRIFÁSICA EM “ZIG - ZAG” - Z

TENSÕES DE FASE:

$$V_{ZA} = V_{A-N}$$

$$V_{ZB} = V_{B-N}$$

$$V_{ZC} = V_{C-N}$$



TENSÕES DE FASE:

$$V_{ZA} = V_{A-N} = V_A/2 - V_B/2 = V_A/2 \cdot e^{j \cdot 0^\circ} - V_A/2 \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}$$

$$V_{ZA} = (\sqrt{3})/2 \cdot V_A \cdot e^{+j \cdot 30^\circ}$$

LIGAÇÃO Z : ELIMINAÇÃO DE HARMÔNICAS TRIPLAS DA TENSÃO TOTAL DE FASE

UTILIZAÇÃO EM CARGAS DESEQUILIBRADAS E RETIFICADORES

$$V_{FASE-Z} = (\sqrt{3})/2 \cdot V_{FASE- eq} \text{ (DA ESTRELA CONVENCIONAL)}$$

$$V_{AB} = \sqrt{3} \cdot V_{ZA} = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{3})/2 \cdot V_{Aeq} = 1,5 \cdot V_{A-ESTRELA CONVENCIONAL}$$

**COMBINAÇÕES DE CONEXÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM**

**COMBINAÇÕES MAIS COMUNS → Y/Y - Δ/Δ - Δ/Y - Y/Δ - Y/Z - Δ/Z**

**COMBINAÇÕES INTRODUZEM DEFASAGEM ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO**

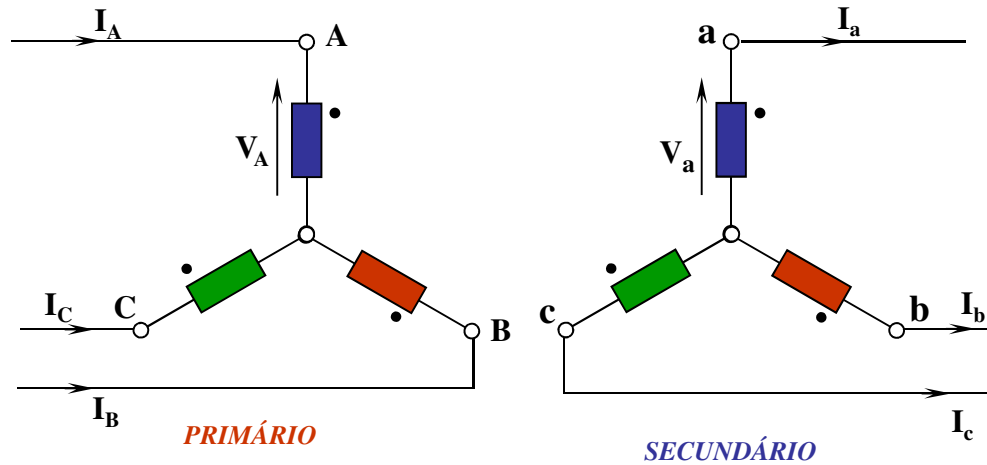
**GRUPOS DE DEFASAGEM → PADRONIZADOS E INDICADOS POR SEMELHANÇA COM OS PONTEIROS DO RELÓGIO**

**USO DO NEUTRO NAS CONEXÕES ESTRELA → ASSOCIADO À CIRCULAÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS DE 3ª ORDEM E CORRENTES DE SEQÜÊNCIA ZERO DURANTE FALTAS ASSIMÉTRICAS**



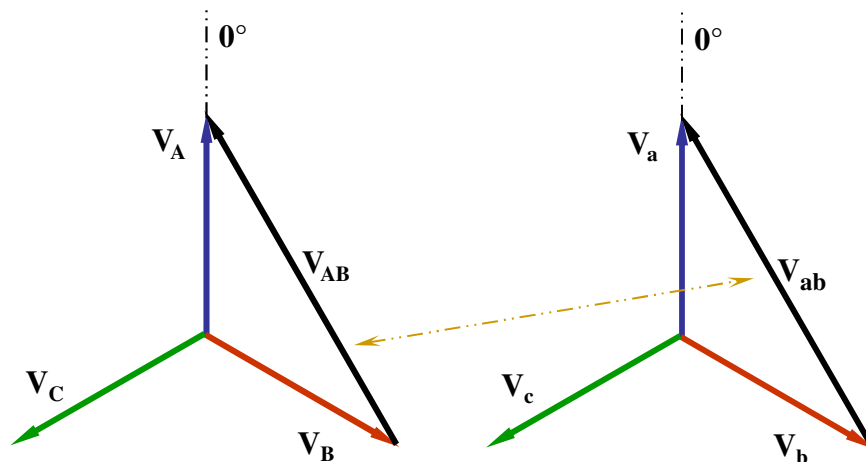
COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM

CONEXÃO Y/Y



$$V_A / V_a = a = V_{AB} / V_{ab}$$

$V_{ab}$  EM FASE COM  $V_{AB}$



DEFASAGEM NULA ENTRE TENSÕES  
DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Yy0**

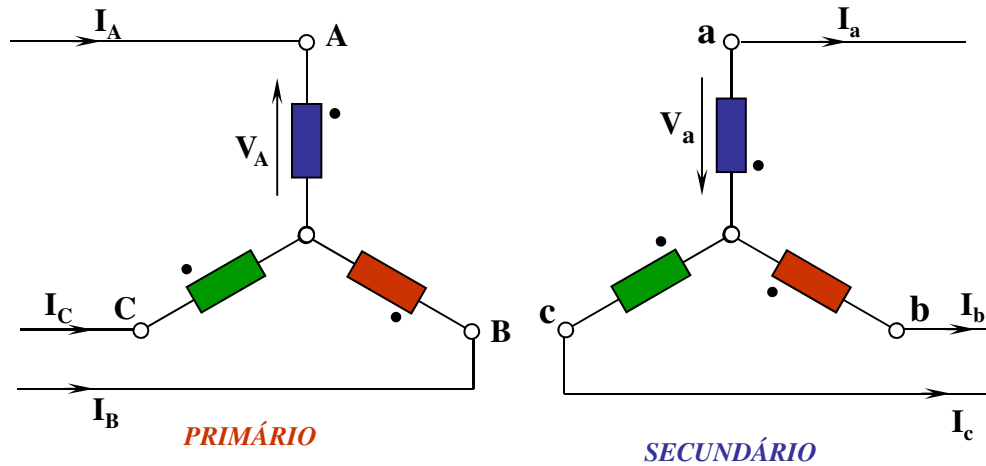
**Y** → PRIMÁRIO

**y** → SECUNDÁRIO

**0** → 0° DE DEFASAGEM

COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM

CONEXÃO Y / Y - ALTERNATIVA



$$V_A / V_a = a = V_{AB} / V_{ab}$$

$V_{ab}$  EM OPOSIÇÃO DE FASE COM  $V_{AB}$

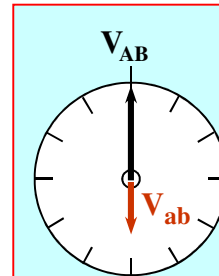
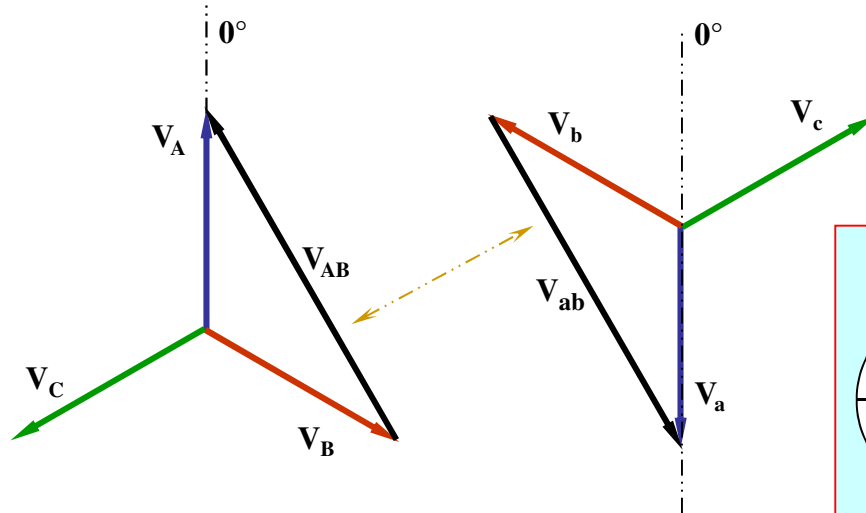
DEFASAGEM DE  $180^\circ$  ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1º RIO E DO 2º RIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Yy180**

**Y** → PRIMÁRIO

**y** → SECUNDÁRIO

**180** →  $180^\circ$  DE DEFASAGEM



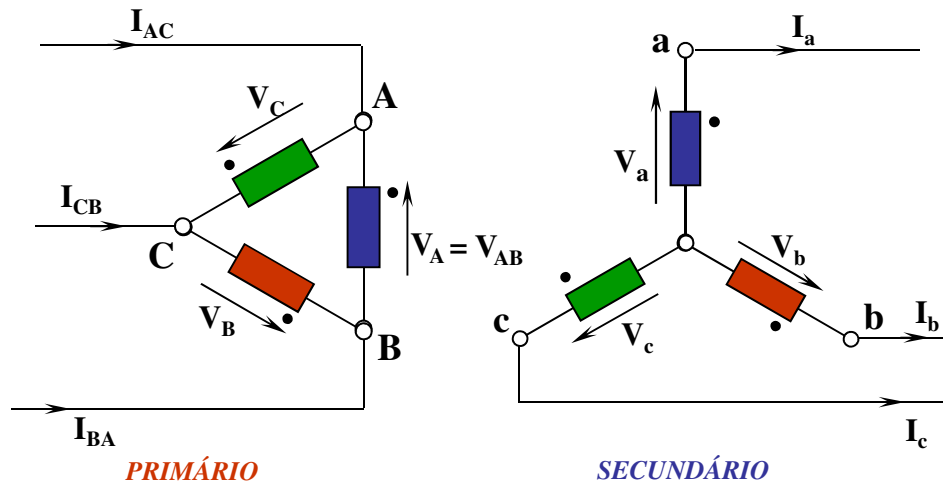
DESLOCAMENTO DE FASE: **Yy 6**

**Y** → 1º RIO  $V_{AB}$  "0" MINUTOS (SEMPRE)

**y** → 2º RIO  $V_{ab}$  "6" HORAS ( $180^\circ$ )

COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM

CONEXÃO Δ/Y



$$V_A / V_a = a - V_{AB} / V_{ab} = a / \sqrt{3}$$

$V_{ab}$  ADIANTADO EM RELAÇÃO A  $V_{AB}$

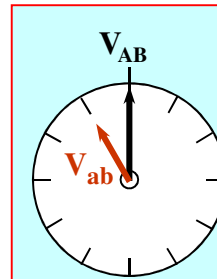
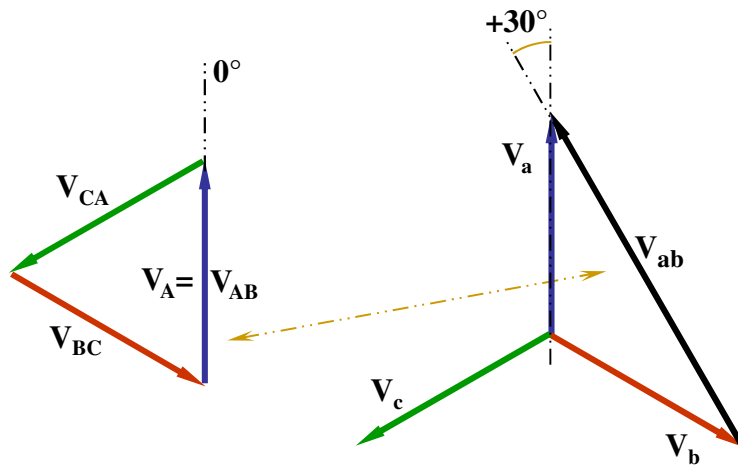
DEFASAGEM DE 30° ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy+30**

**D** → PRIMÁRIO

**y** → SECUNDÁRIO

**+30** → 30° DE DEFASAGEM EM AVANÇO



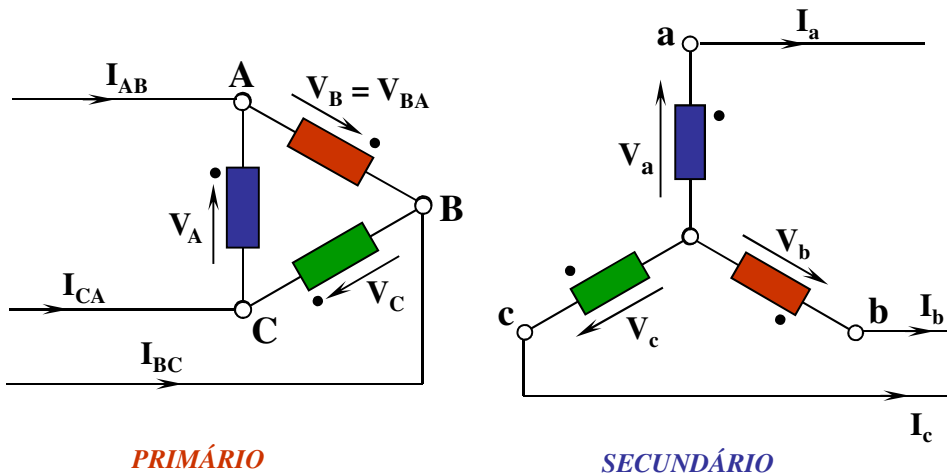
DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy 11**

**D** → 1ºÁRIO  $V_{AB}$  “0” MINUTOS (SEMPRE)

**y** → 2ºÁRIO  $V_{ab}$  “11” HORAS (+30°)

COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM

CONEXÃO Δ/Y - ALTERNATIVA COM ROTAÇÃO DE FASE



$$V_A / V_a = a - V_{BA} / V_{ba} = a / \sqrt{3}$$

$V_{ba}$  ATRASADA EM RELAÇÃO A  $V_{BA}$

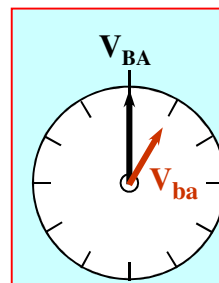
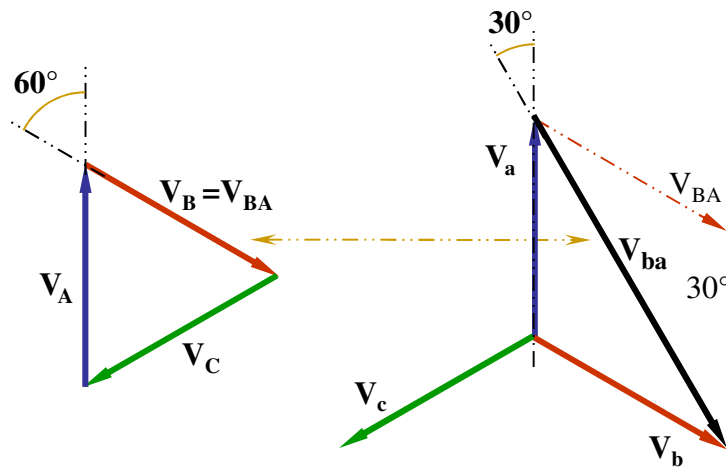
DEFASAGEM DE 30° ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy-30**

**D** → PRIMÁRIO

**y** → SECUNDÁRIO

**-30** → 30° DE DEFASAGEM EM ATRASO



DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy1**

**D** → 1ºÁRIO  $V_{BA}$  “0” MINUTOS (SEMPRE)

**y** → 2ºÁRIO  $V_{ba}$  “1” HORA (- 30°)

**COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM****COMBINAÇÕES  $\Delta/\Delta$  E  $Y/Y$  → DEFASAGENS PARES**

Dd0 - Dd2 - Dd4 - Dd6 - Dd8 - Dd10 E Yy0 - Yy2 - Yy4 - Yy6 - Yy8 - Yy10

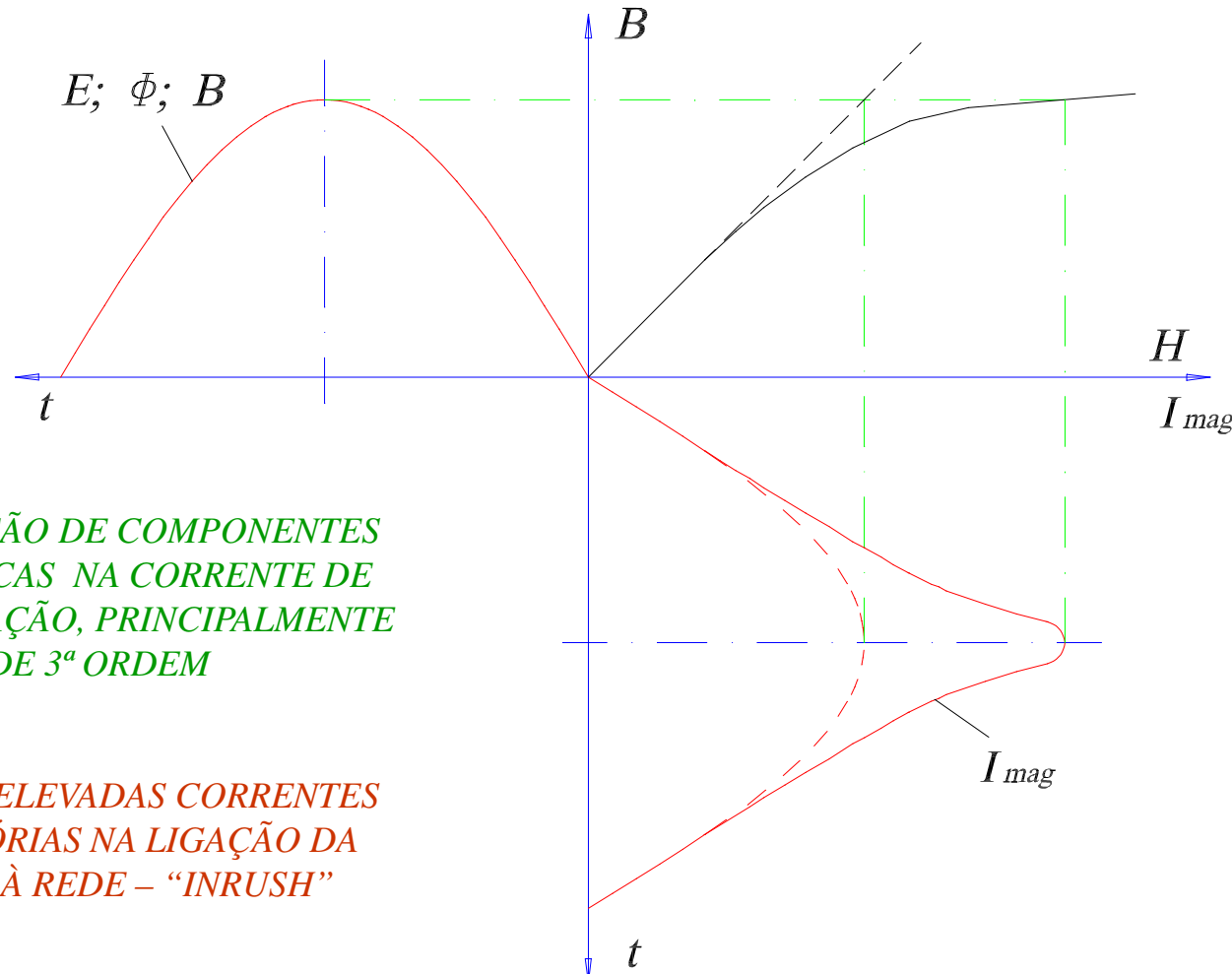
**COMBINAÇÕES  $\Delta/Y$  E  $Y/\Delta$  → DEFASAGENS IMPARES**

Dy1 - Dy3 - Dy5 - Dy7 - Dy9 - Dy11 E Yd1 - Yd3 - Yd5 - Yd7 - Yd9 - Yd11

## HARMÔNICAS EM TRANSFORMADORES

EFEITOS DA SATURAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DO CIRCUITO MAGNÉTICO:

→ **DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO, PARA ALIMENTAÇÃO COM TENSÃO SENOIDAL**



*INTRODUÇÃO DE COMPONENTES  
HARMÔNICAS NA CORRENTE DE  
MAGNETIZAÇÃO, PRINCIPALMENTE  
DE 3ª ORDEM*

*PROVOCA ELEVADAS CORRENTES  
TRANSITÓRIAS NA LIGAÇÃO DA  
BOBINA À REDE – “INRUSH”*

## CARACTERIZAÇÃO DO TRANSITÓRIO DE LIGAÇÃO

$V_1$ : TENSÃO APLICADA PELA LINHA

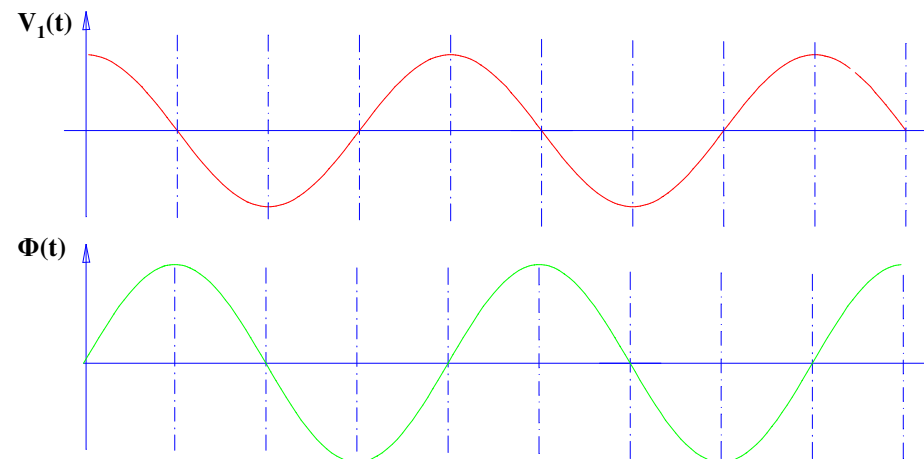
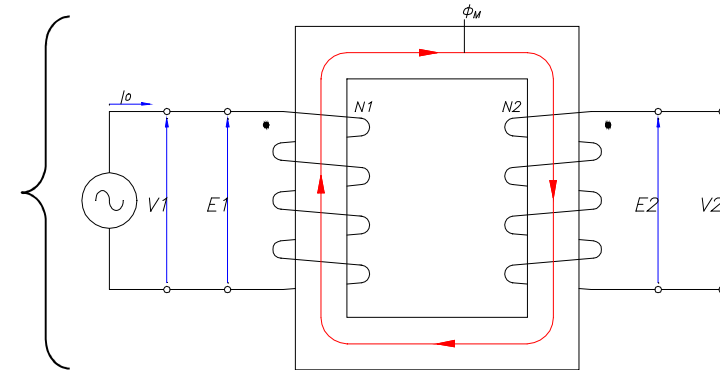
$E_1$ : TENSÃO INDUZIDA POR VARIAÇÃO DE FLUXO

LEI DE FARADAY:  $V_1 \cong E_1 = N_1 \cdot d / dt \Phi_m(t)$

$V_1(t) \cong E_1(t) = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$

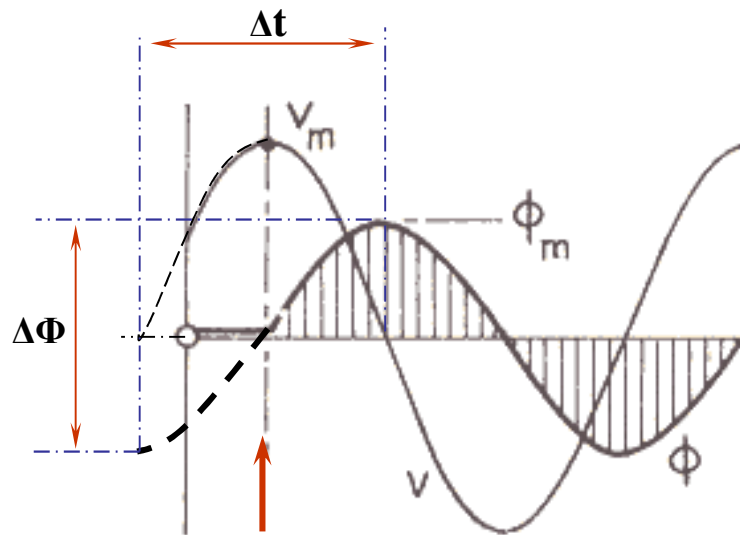
$\varphi_0$ : FASE DA TENSÃO - DEFINE O INSTANTE DE LIGAÇÃO

$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$ : FLUXO EM REGIME

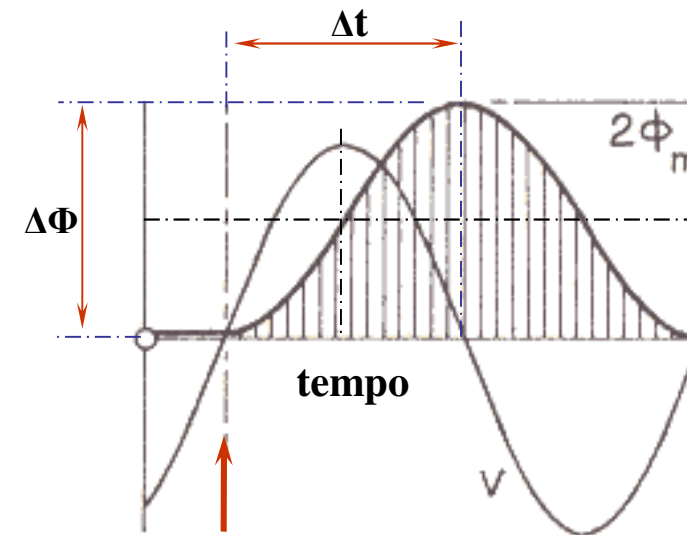


CONDIÇÃO INICIAL DO NÚCLEO NA LIGAÇÃO:  $\Phi(t=0) = 0$  PARA QUALQUER FASE DA TENSÃO

EVENTUALMENTE  $\Phi(t=0) = \Phi_{\text{REMANENTE}}$ : FLUXO RESIDUAL DEVIDO À HISTERESE



INSTANTE DA LIGAÇÃO:  $\phi_0 = 0^\circ$



INSTANTE DA LIGAÇÃO:  $\phi_0 = -90^\circ$

### LIGAÇÃO NO INSTANTE DE TENSÃO MÁXIMA:

$V_{MAX} \rightarrow$  TAXA DE VARIAÇÃO DE  $\Phi(t)$  É MÁXIMA

MEIO CICLO DE  $V(t)$  INDUZIDO NO TEMPO  $\Delta t$

$\rightarrow$  EXCURSÃO TOTAL DE FLUXO :  $\Delta\Phi$

$\rightarrow \Phi(t)$  INICIA EM REGIME, EXCURSIONA ATÉ  $\Phi_m$

### LIGAÇÃO NO INSTANTE DE TENSÃO NULA:

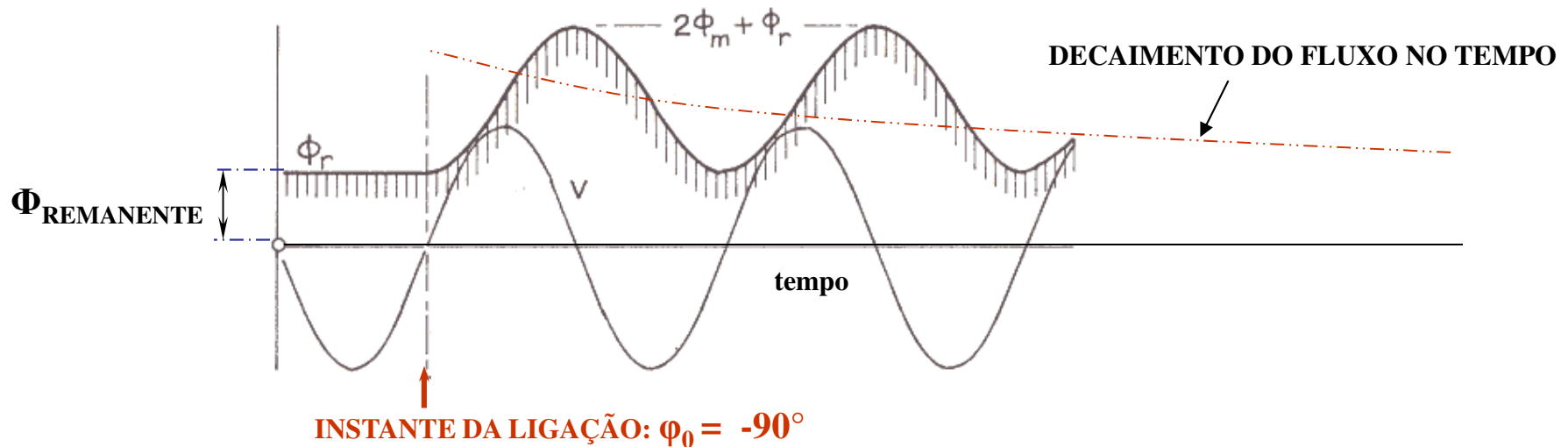
$V = 0 \rightarrow$  TAXA DE VARIAÇÃO DE  $\Phi(t)$  É NULA

MEIO CICLO DE  $V(t)$  INDUZIDO NO TEMPO  $\Delta t$

$\rightarrow$  EXCURSÃO TOTAL DE FLUXO :  $\Delta\Phi$

$\rightarrow \Phi(t)$  INICIA EM ZERO, EXCURSIONA ATÉ  $2\cdot\Phi_m$





NA EXISTÊNCIA DE FLUXO RESIDUAL NO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR,  
(RESULTANTE DE CONDIÇÃO PARTICULAR DO DESLIGAMENTO ANTERIOR):

→ FLUXO EXCURSIONA ATÉ ( $2 \cdot \Phi_m + \Phi_{\text{REMANENTE}} \cong 2,2 \cdot \Phi_m$ )

→ FLUXO DECAI NO TEMPO ATÉ ATINGIR O VALOR DE REGIME

→  $\Phi(t) = -\Phi_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_0) - \Phi_m \cdot \text{sen}(\varphi_0) \cdot e^{-(r/L) \cdot t} \pm \Phi_{\text{REM}} \cdot e^{-(r/L) \cdot t}$

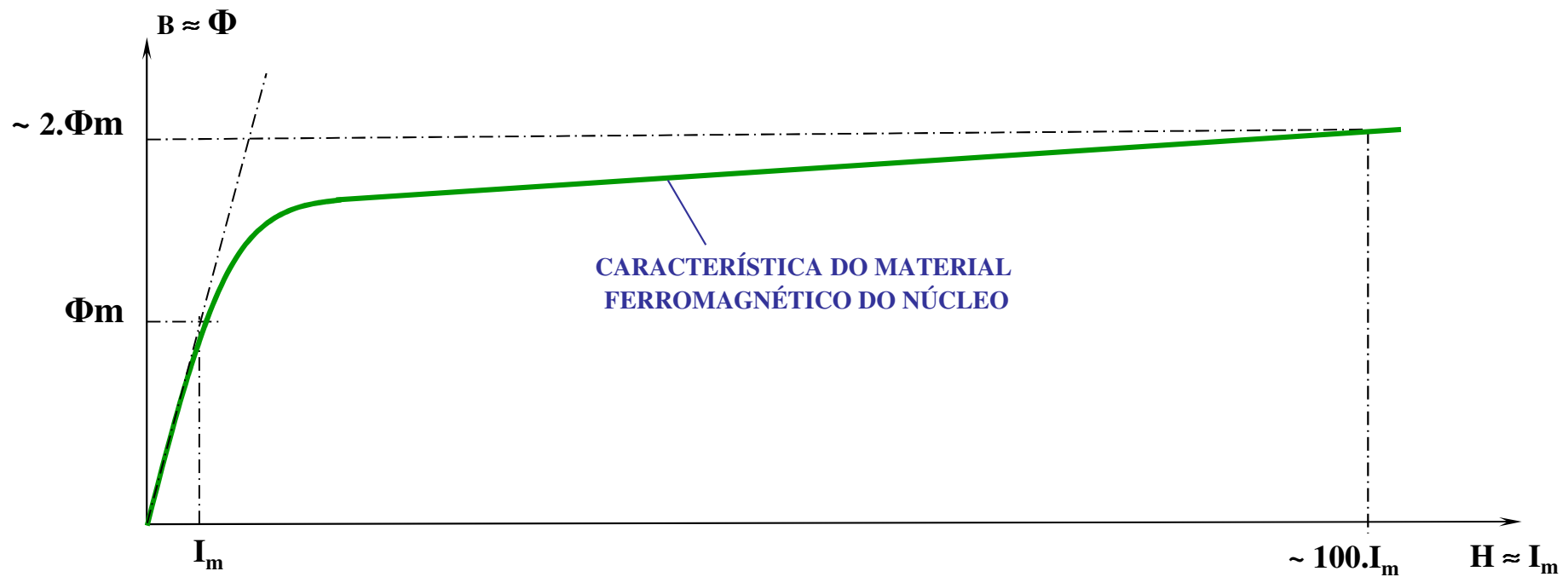
$r$  : RESISTÊNCIA DA BOBINA PRIMÁRIA ;  $L$  : INDUTÂNCIA TOTAL DO PRIMÁRIO

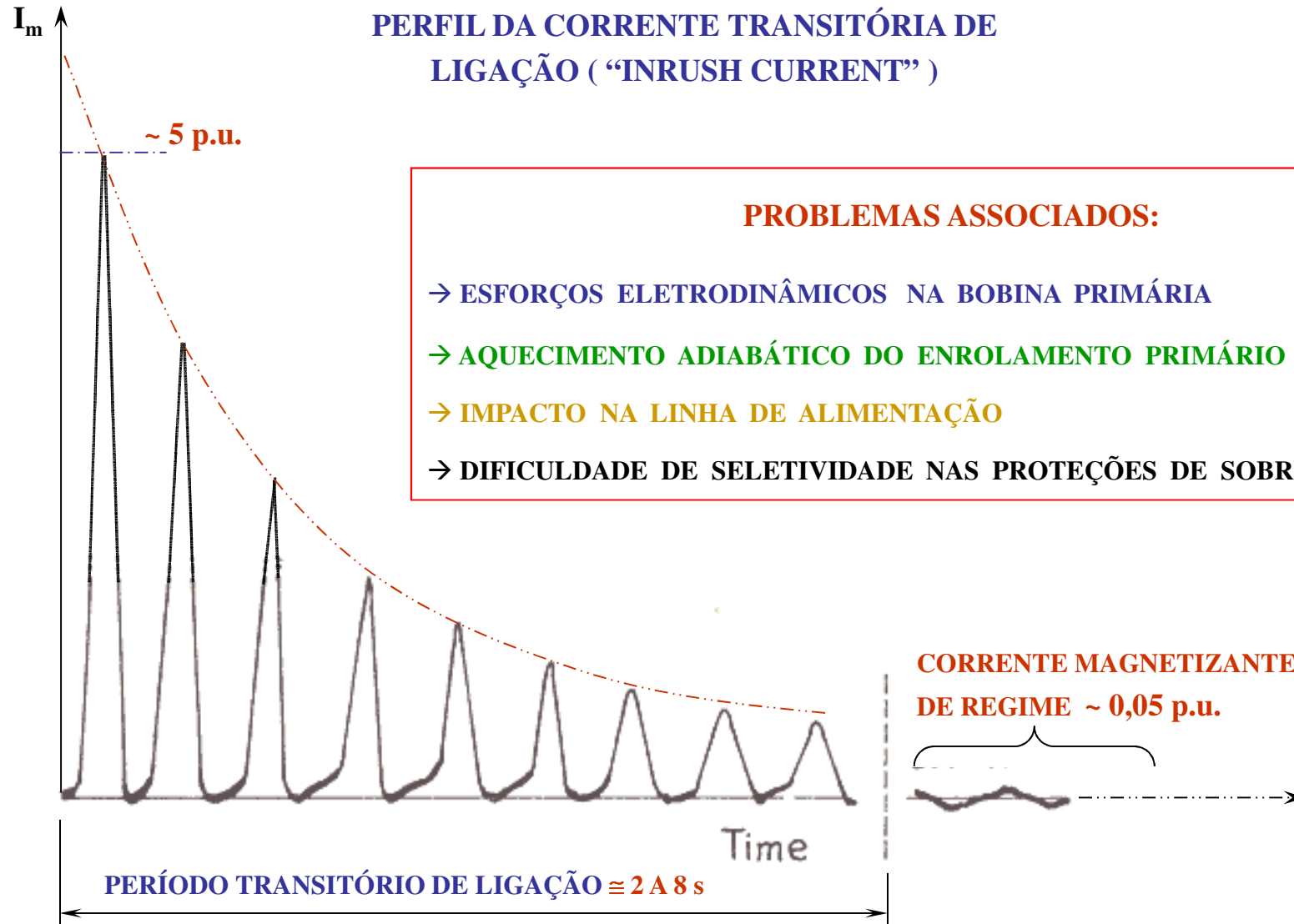
$L/r$  : CONSTANTE DE TEMPO DE DECAIMENTO  $\cong 2 \text{ A } 8 \text{ s}$

## EXCURSÃO RELATIVAMENTE “LIMITADA” DO FLUXO

→ INTENSA EXCURSÃO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DEVIDO À EXISTÊNCIA DE SATURAÇÃO MAGNÉTICA NO NÚCLEO

$$\rightarrow \Phi = B_{FE} \cdot S_{FE} \quad ; \quad \rightarrow H_{FE} \cdot L_{FE} = N_1 \cdot I_m$$





**CORRENTES HARMÔNICAS E DE SEQUÊNCIA ZERO EM TRANSFORMADORES**

**CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO → FORTE COMPONENTE DE 3ª HARMÔNICA PARA FLUXO SENOIDAL NO NÚCLEO E TENSÃO INDUZIDA SENOIDAL**

**NO SISTEMA TRIFÁSICO → HARMÔNICAS DE 3ª ORDEM ESTÃO EM FASE NO TEMPO E CONSTITUEM CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO DE FREQUÊNCIA TRIPLA**

**CORRENTES DE FALTA → CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICO OU CARGAS Desequilibradas PROVOCAM CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL**

**CIRCULAÇÃO DE COMPONENTES DE SEQUÊNCIA ZERO → DEPENDENTE DA LIGAÇÃO DO TRANSFORMADOR**

**CORRENTES HARMÔNICAS E DE SEQUÊNCIA ZERO EM TRANSFORMADORES**

**CONEXÕES: Y / Y COM NEUTROS ISOLADOS → NÃO PROVÊM CAMINHO PARA CIRCULAÇÃO DE COMPONENTES DE CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO. → **RESULTA :****

**DISTORÇÃO DO FLUXO NO NÚCLEO EM VAZIO → TENSÕES INDUZIDAS POR FASE NÃO**

**SENOIDAIS (COMPONENTE DE FREQUÊNCIA TRIPLA DE TENSÃO) → FLUTUAÇÃO DO NEUTRO**

**FORTE DESEQUILÍBRIO DA TENSÃO DE FASE PARA OPERAÇÃO COM CARGA DESEQUILIBRADA**

**CONEXÕES:  $\Delta / \Delta - \Delta / Y - Y / \Delta$  COM NEUTROS ISOLADOS → PERMITEM A CIRCULAÇÃO DE**

**HARMÔNICAS DE 3ª ORDEM NO CIRCUITO FECHADO DO LADO COM LIGAÇÃO  $\Delta$ . → **RESULTA:****

**RECUPERAÇÃO DO FLUXO SENOIDAL NO NÚCLEO E DA TENSÃO DE FASE TAMBÉM SENOIDAL E**

**LIMITAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DO NEUTRO**

**AINDA NÃO PERMITEM CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO DE FALTA →**

**EXCETO SE O NEUTRO ESTIVER ATERRADO E A FALTA OCORRER NO LADO CONECTADO EM Y**

## ENROLAMENTO TERCIÁRIO NOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

MESMO EM LIGAÇÕES QUE PERMITEM A CIRCULAÇÃO DE SEQUÊNCIA ZERO ( $Y/Y - \Delta/Y - Y/\Delta$  COM NEUTRO ATERRADO) → A IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO DO TRANSFORMADOR PODE LIMITAR ESSAS CORRENTES → MANIFESTAÇÃO DOS PROBLEMAS JÁ MENCIONADOS → COMPROMETIMENTO DAS PROTEÇÕES DO SISTEMA

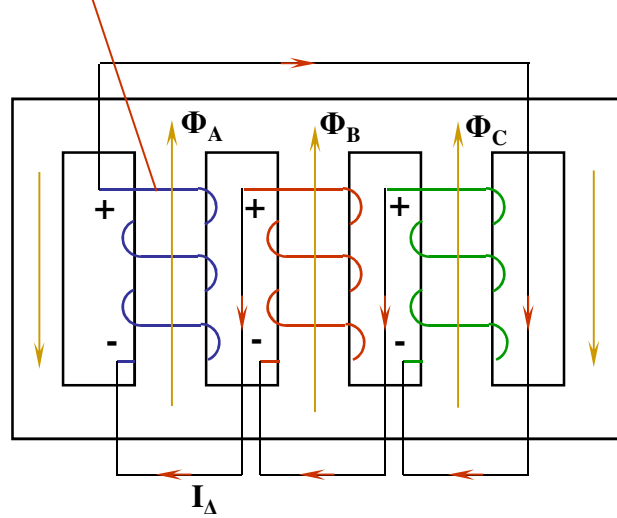
→ PROBLEMA MAIS GRAVE EM BANCOS TRIFÁSICOS COMPOSTOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DO TIPO ENCOURAÇADO (5 COLUNAS)

→ USO DE TRANSFORMADORES COM ENROLAMENTO TERCIÁRIO, OU ENROLAMENTO DE ESTABILIZAÇÃO

→ CONSTITUI-SE DE UM TERCEIRO ENROLAMENTO, MONTADO NAS COLUNAS JUNTO COM O 1<sup>ÁRIO</sup> E O 2<sup>ÁRIO</sup> E CONECTADO EM TRIÂNGULO → FORMA UM CAMINHO PARA A CIRCULAÇÃO INTERNA DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO → IMPOSTAS PELO FLUXO HOMOPOLAR CRIADO NO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR

ENROLAMENTO TERCIÁRIO NOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

ENROLAMENTO TERCIÁRIO EM Δ



CIRCUITOS DE SEQUENCIA ZERO COM E SEM TERCIÁRIO

- CORRENTES DE SEQUENCIA ZERO TEM MESMA FASE NO TEMPO
- PRODUZEM FLUXOS MAGNÉTICOS HOMOPOLARES NO NÚCLEO
- INDUZ TENSÕES SIMULTÂNEAS NAS 3 FASES
- TERCIÁRIO EM Δ FORMA CAMINHO FECHADO PARA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES
- REDUÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SEQUENCIA ZERO

