







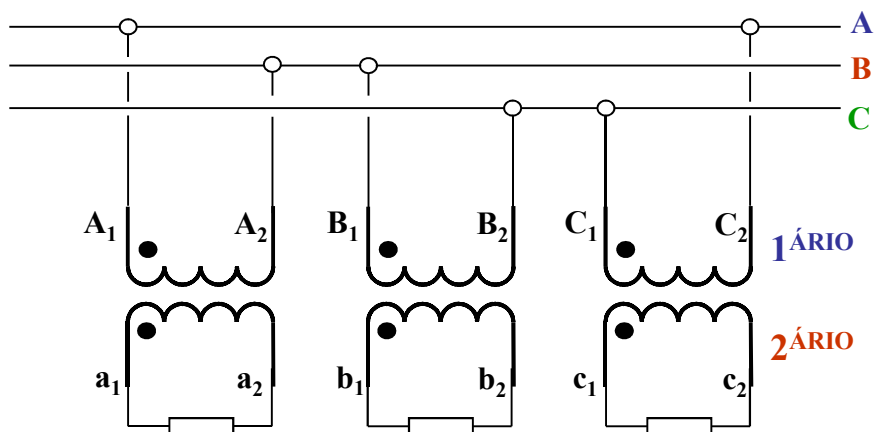
TRANSFORMADORES EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

SISTEMAS DE POTÊNCIA → GRANDES BLOCOS DE ENERGIA → GRANDES DISTÂNCIAS

*SISTEMA DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO TRIFÁSICO*ADOÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO → MAIS ECONÔMICO GLOBALMENTEGERADOR: $1\emptyset$ → VOLUME ELETROMAGNÉTICO: $D^2.L$ → GERA POTÊNCIA: P_1 GERADOR: $m\emptyset$ → 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	
∞	$1,57 \cdot P_1$	∞	

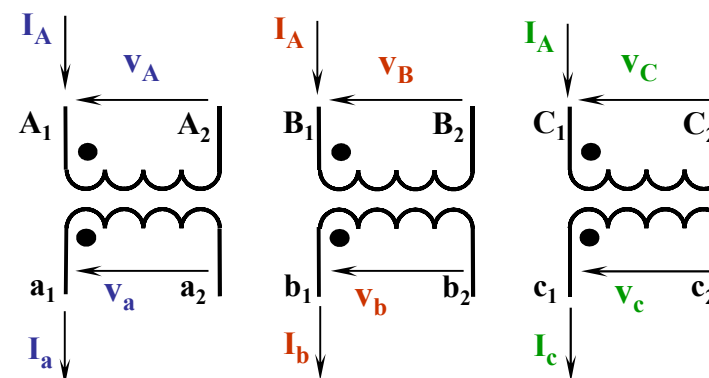
O TRANSFORMADOR NO SISTEMA TRIFÁSICO



**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**



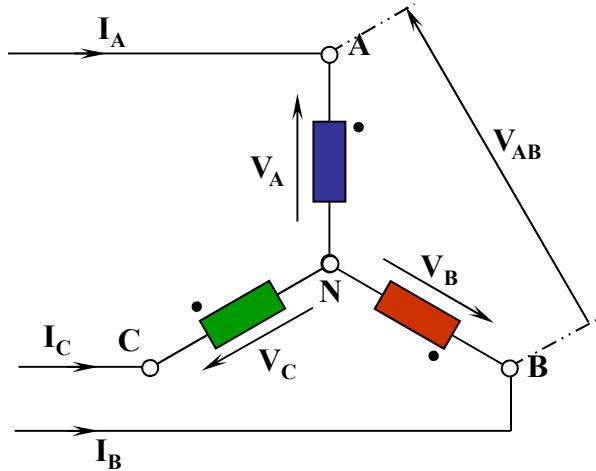
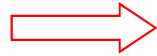
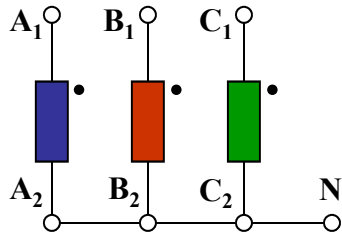
**FASES INDIVIDUAIS CONECTADAS
ENTRE SI EM LIGAÇÕES PADRÃO DO
SISTEMA TRIFÁSICO:**

Y - ESTRELA - Δ - TRIÂNGULO

LIGAÇÕES ESPECIAIS:

ZIG-ZAG - TRIÂNGULO ESTENDIDO

CONEXÃO TRIFÁSICA EM ESTRELA - Y



TENSÕES DE FASE:

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

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

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

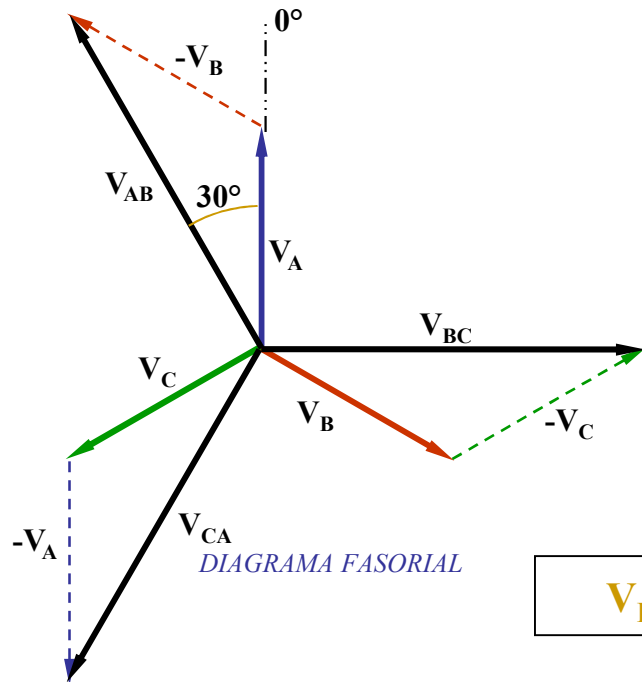
NEUTRO PODE SER OU NÃO ACESSÍVEL
 ACESSÍVEL $\rightarrow I_N = I_A + I_B + I_C$ SEQUENCIA ZERO
 SISTEMA EQUILIBRADO $\rightarrow I_N = 0$

TENSÕES DE LINHA:

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

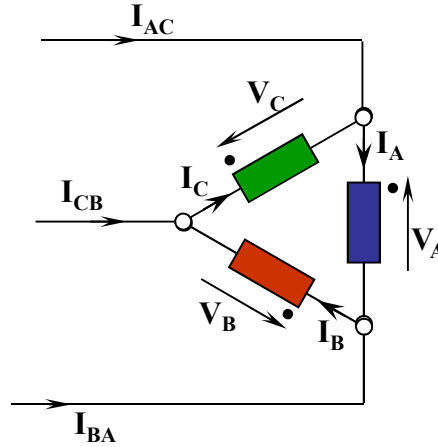
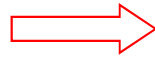
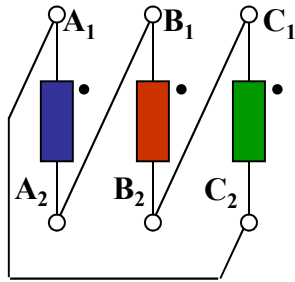
$$V_{BC} = V_B - V_C = V_A \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} - V_A \cdot e^{-j \cdot 240^\circ} = \sqrt{3} \cdot V_A \cdot e^{-j \cdot 90^\circ}$$

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



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

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:

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

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

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

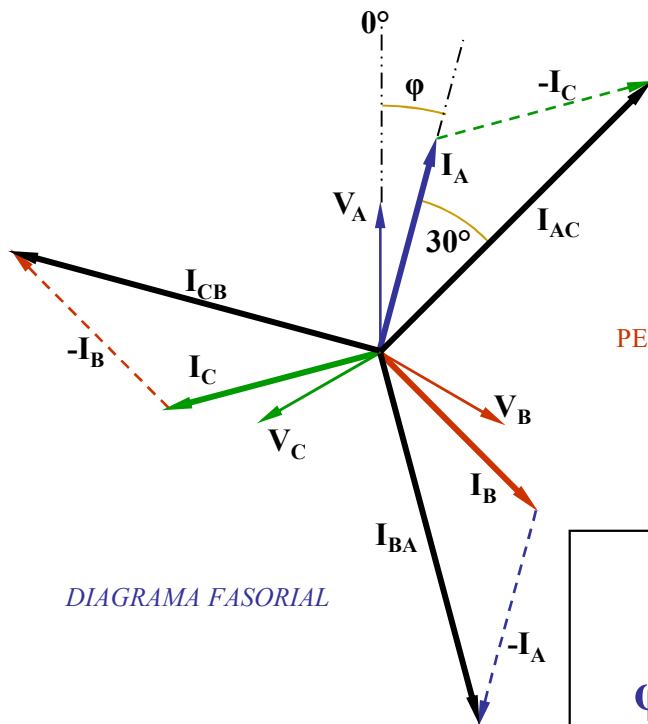


DIAGRAMA FASORIAL

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 : ÂNGULO DE FASE DA CORRENTE EM RELAÇÃO À TENSÃO

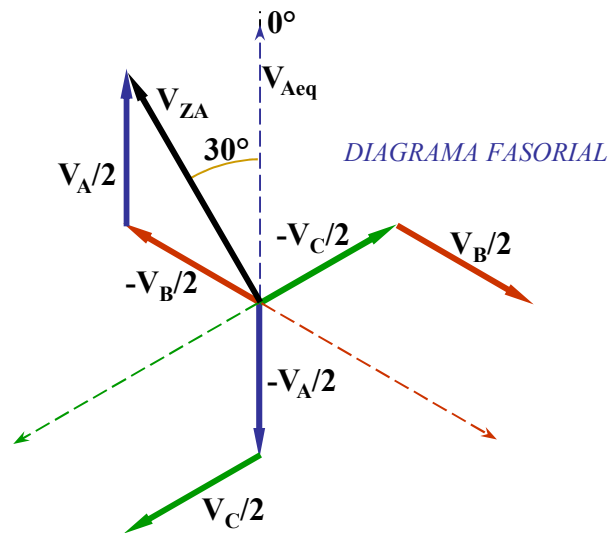
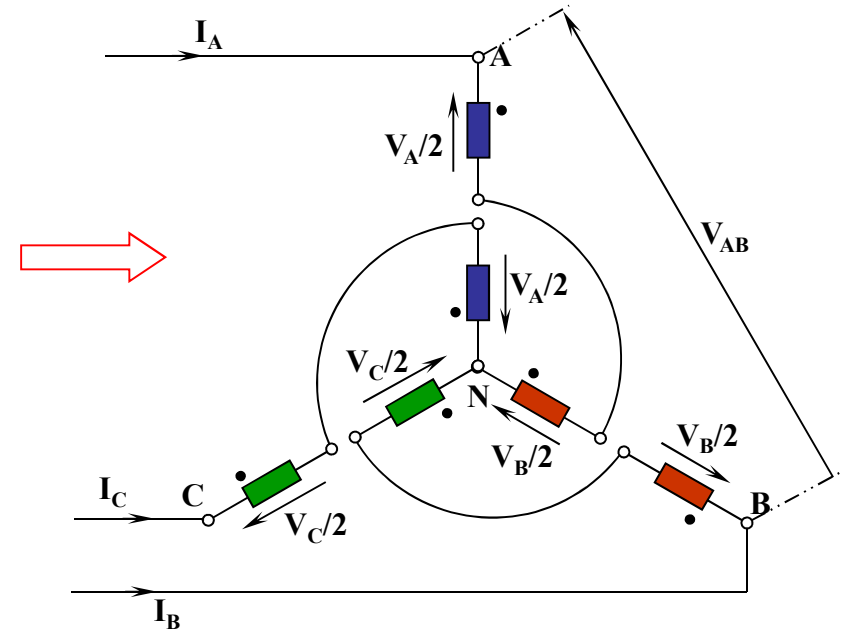
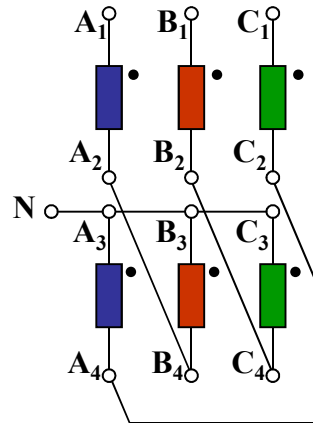
CONEXÃO TRIFÁSICA EM “ZIG – ZAG” - Z

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

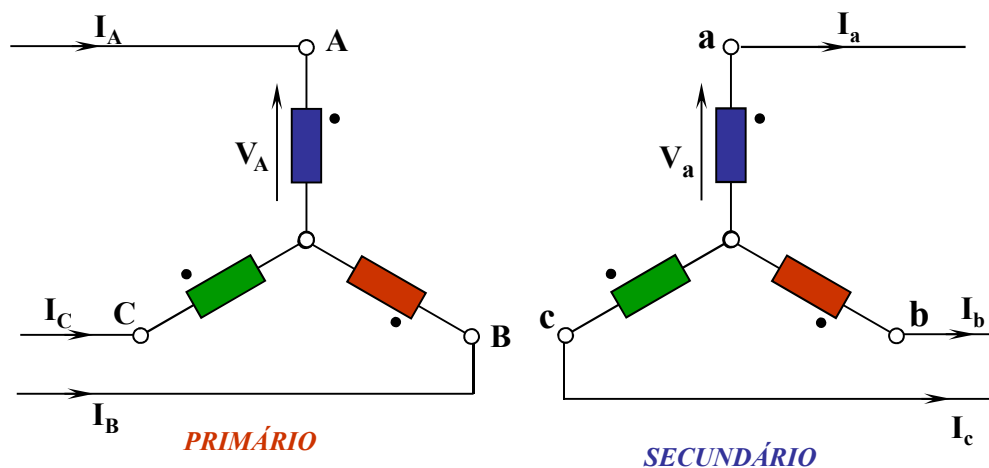
COMBINAÇÕES INTRODUZEM DEFASAGEM ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

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 SEQUÊNCIA ZERO DURANTE FALTAS ASSIMÉTRICAS

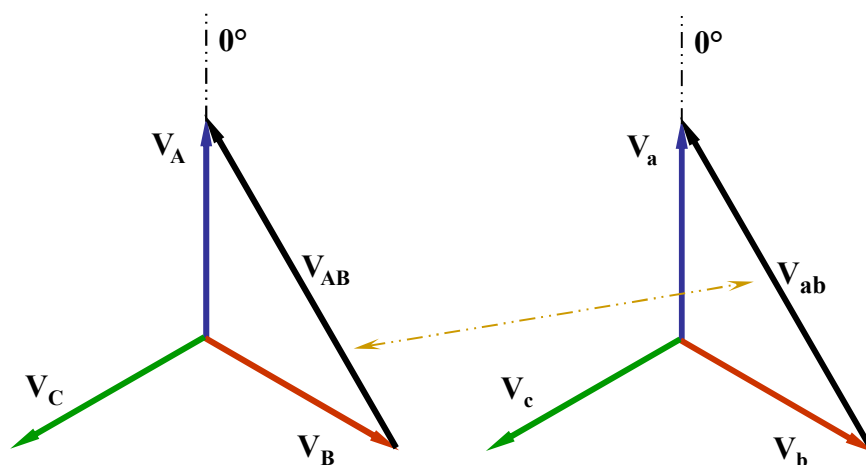
COMBINAÇÕES ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO - DEFASAGEM

CONEXÃO Y / Y



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

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



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

DESLOCAMENTO DE FASE: **Yy0**

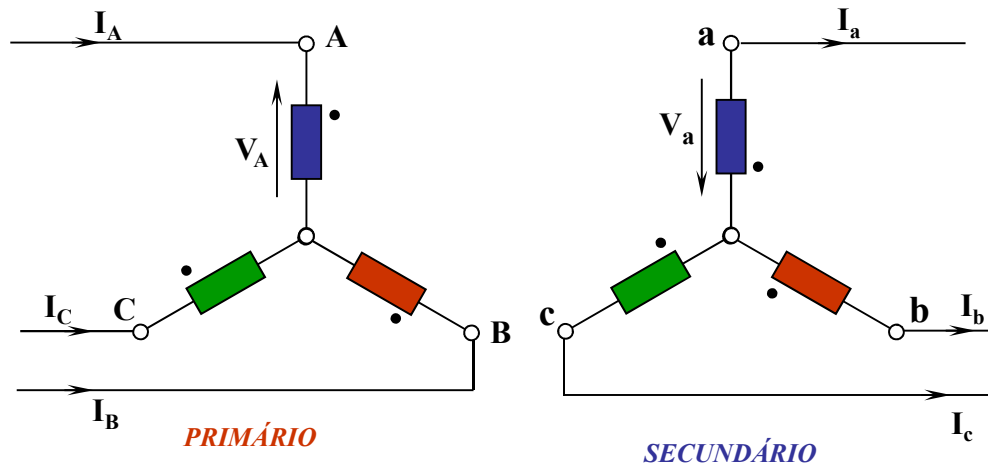
Y → PRIMÁRIO

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}

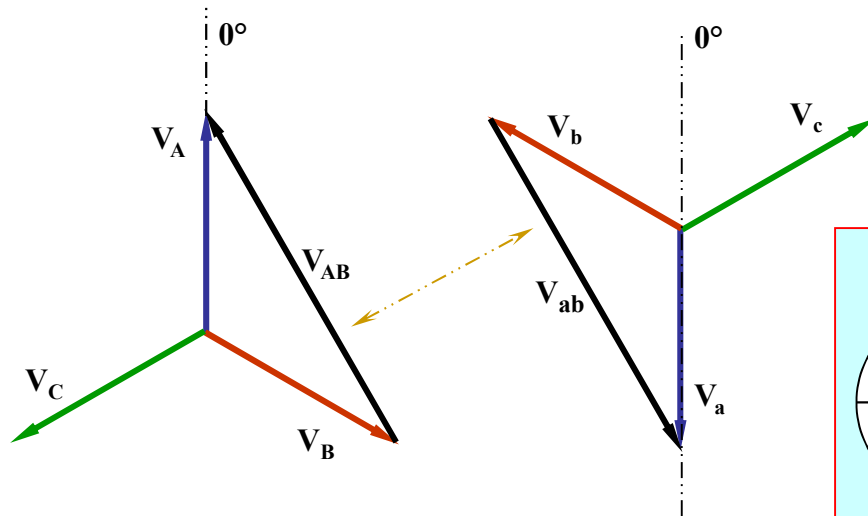
DEFASAGEM DE 180° ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1º RIO E DO 2º RIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Yy180**

Y → PRIMÁRIO

y → SECUNDÁRIO

180 → 180° DE DEFASAGEM



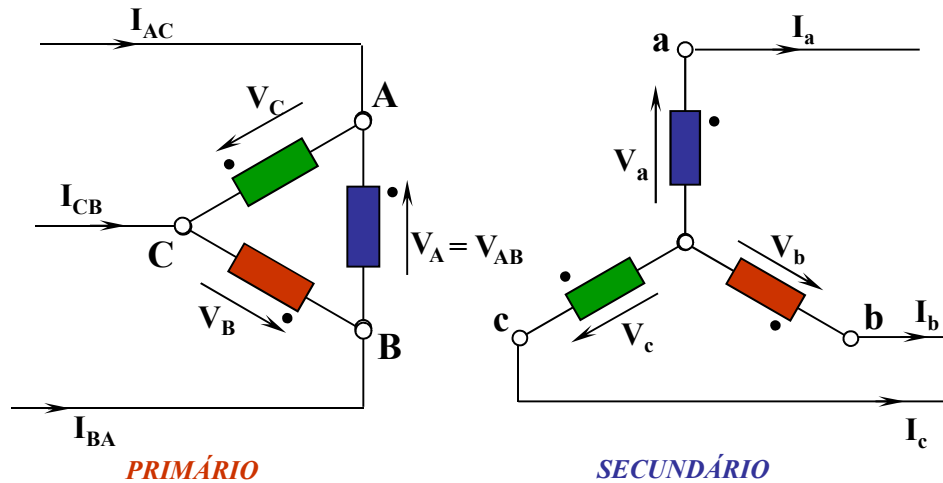
DESLOCAMENTO DE FASE: Yy 6

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

y → 2º RIO V_{ab} "6" HORAS (180°)

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}

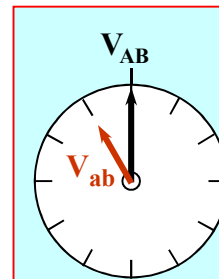
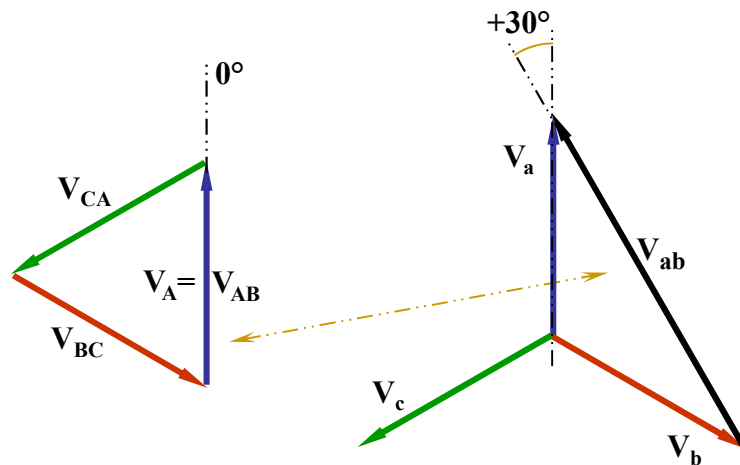
DEFASAGEM DE 30° ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy+30**

D → PRIMÁRIO

y → SECUNDÁRIO

+30 → 30° DE DEFASAGEM EM AVANÇO



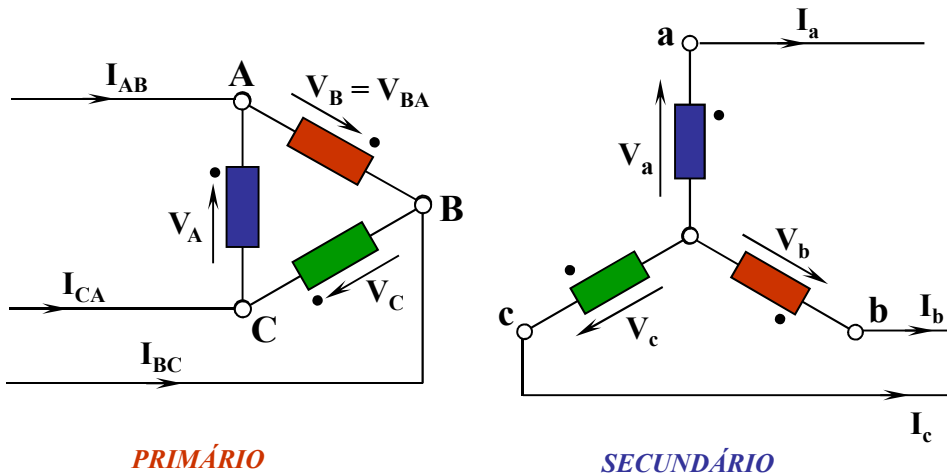
DESLOCAMENTO DE FASE: **Dy 11**

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}

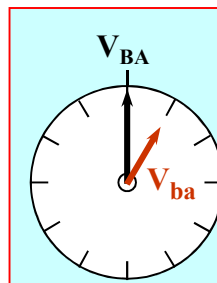
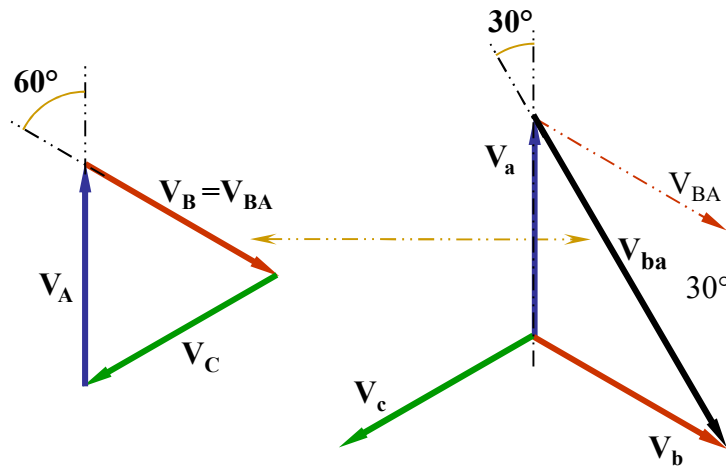
DEFASAGEM DE 30° ENTRE TENSÕES DE LINHA DO 1ºÁRIO E DO 2ºÁRIO

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 Δ/Δ E Y/Y → DEFASAGENS PARES**

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

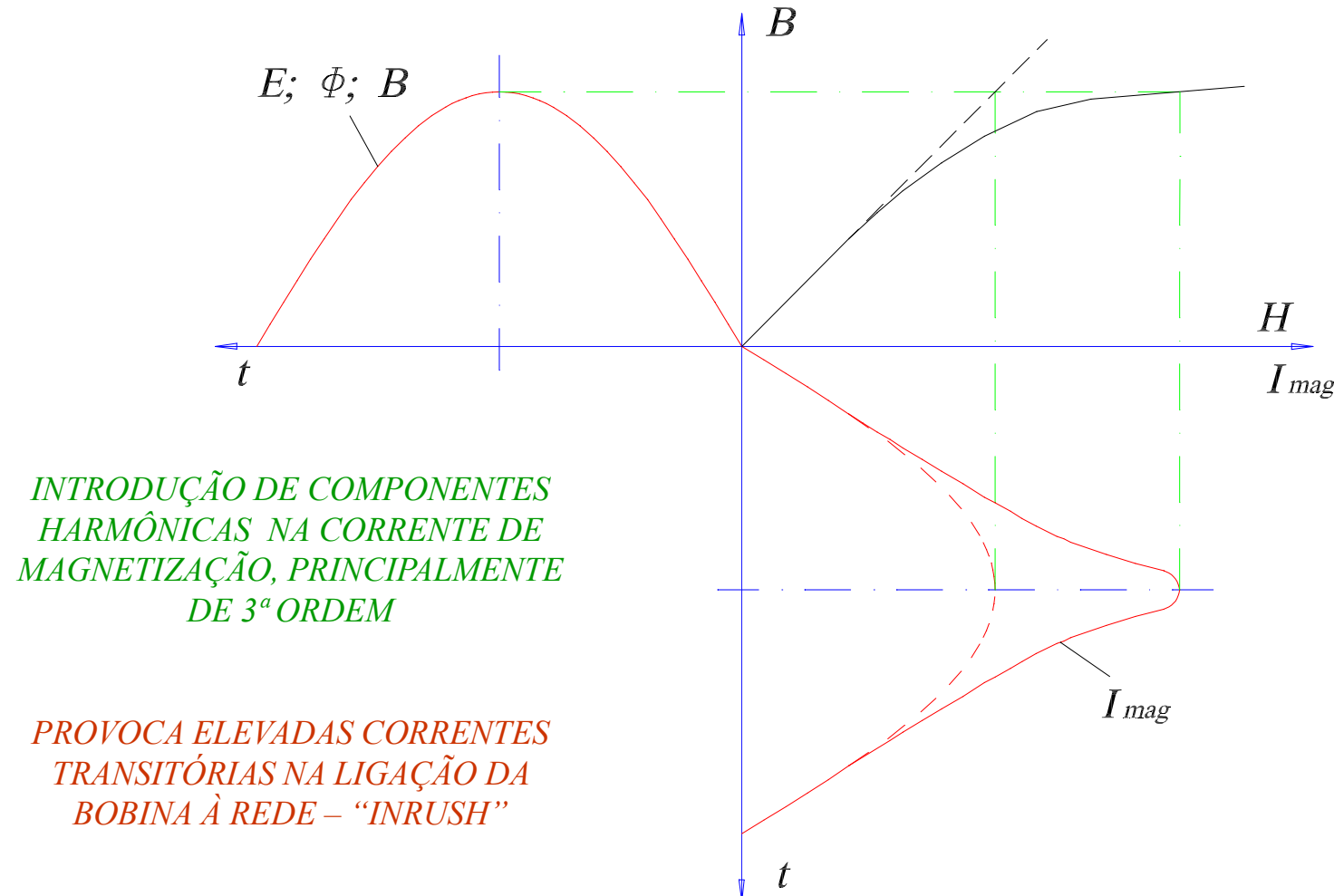
COMBINAÇÕES Δ/Y E Y/Δ → DEFASAGENS IMPARES

$Dy1$ - $Dy3$ - $Dy5$ - $Dy7$ - $Dy9$ - $Dy11$ 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**



CARACTERIZAÇÃO DO TRANSITÓRIO DE LIGAÇÃO

V_1 : TENSÃO APLICADA PELA LINHA

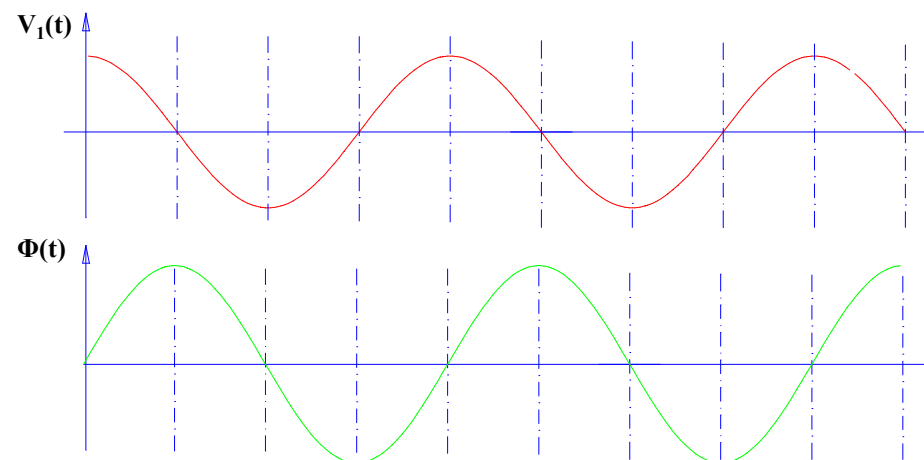
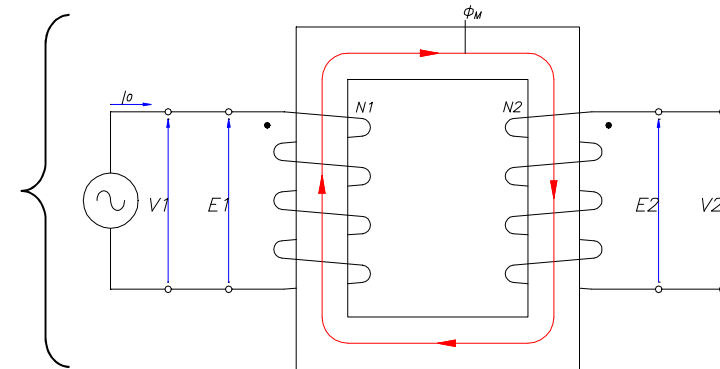
E_1 : TENSÃO INDUZIDA POR VARIAÇÃO DE FLUXO

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

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

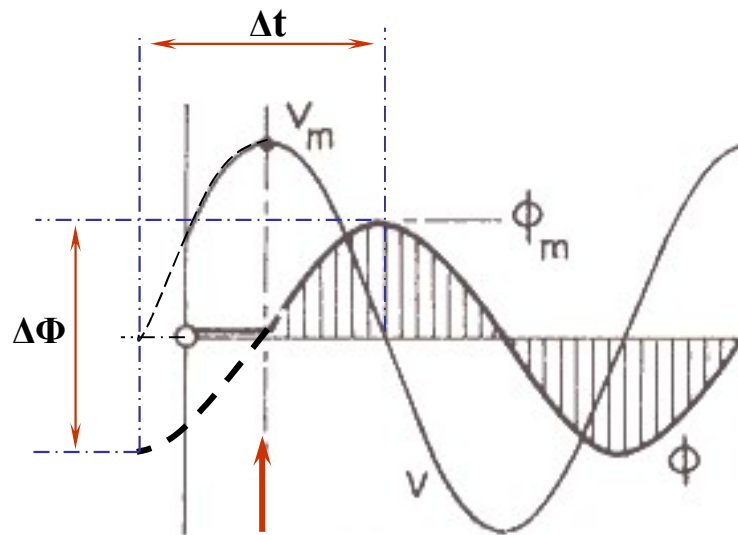
φ_0 : FASE DA TENSÃO - DEFINE O INSTANTE DE LIGAÇÃO

$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi_0)$: FLUXO EM REGIME

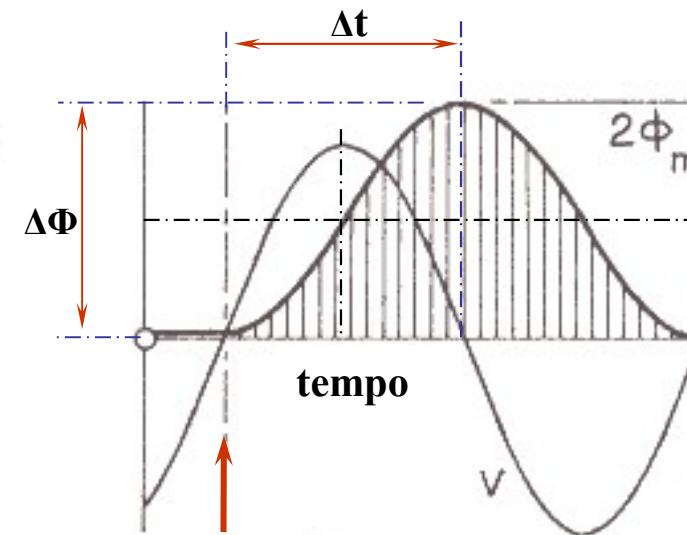


CONDIÇÃO INICIAL DO NÚCLEO NA LIGAÇÃO: $\Phi(t=0) = 0$ PARA QUALQUER FASE DA TENSÃO

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



INSTANTE DA LIGAÇÃO: $\varphi_0 = 0^\circ$



INSTANTE DA LIGAÇÃO: $\varphi_0 = -90^\circ$

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 Δt

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

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

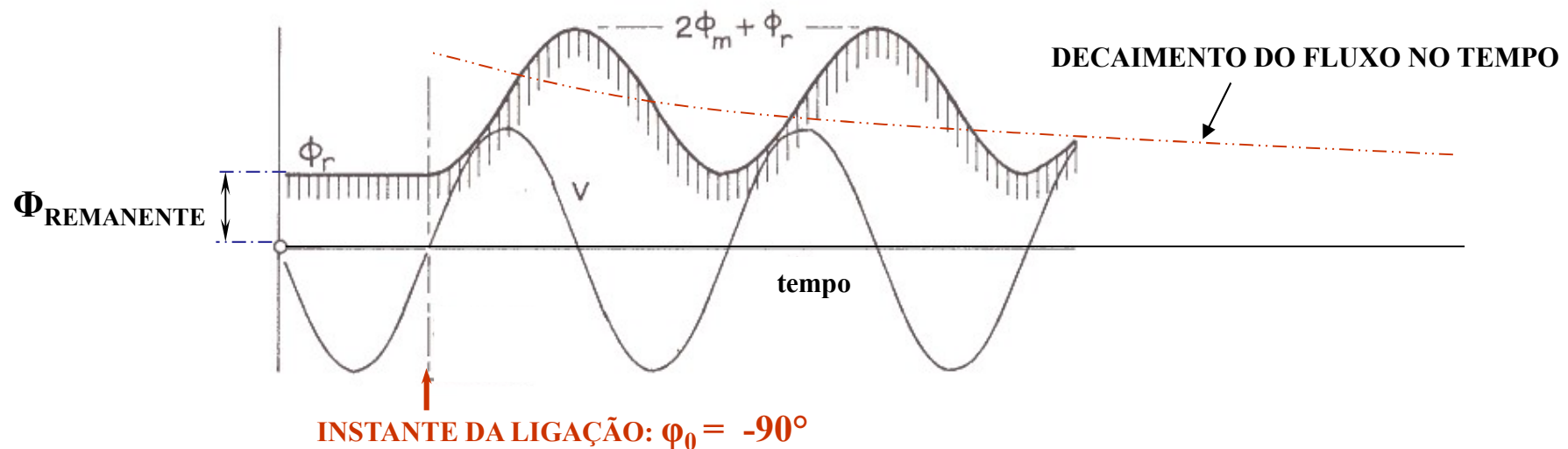
LIGAÇÃO NO INSTANTE DE TENSÃO NULA:

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

MEIO CICLO DE $V(t)$ INDUZIDO NO TEMPO Δt

\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 ($2 \cdot \Phi_m + \Phi_{REMANENTE} \cong 2,2 \cdot \Phi_m$)

→ FLUXO DECAI NO TEMPO ATÉ ATINGIR O VALOR DE REGIME

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

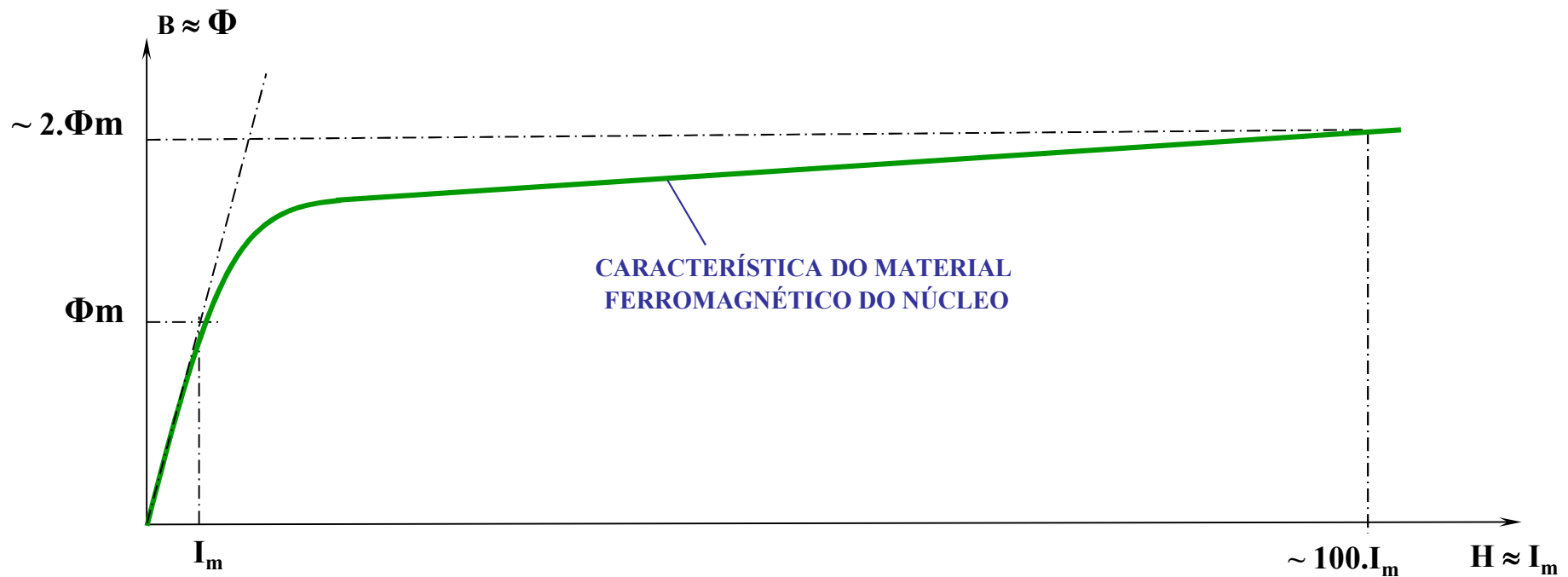
r : RESISTÊNCIA DA BOBINA PRIMÁRIA ; L : INDUTÂNCIA TOTAL DO PRIMÁRIO

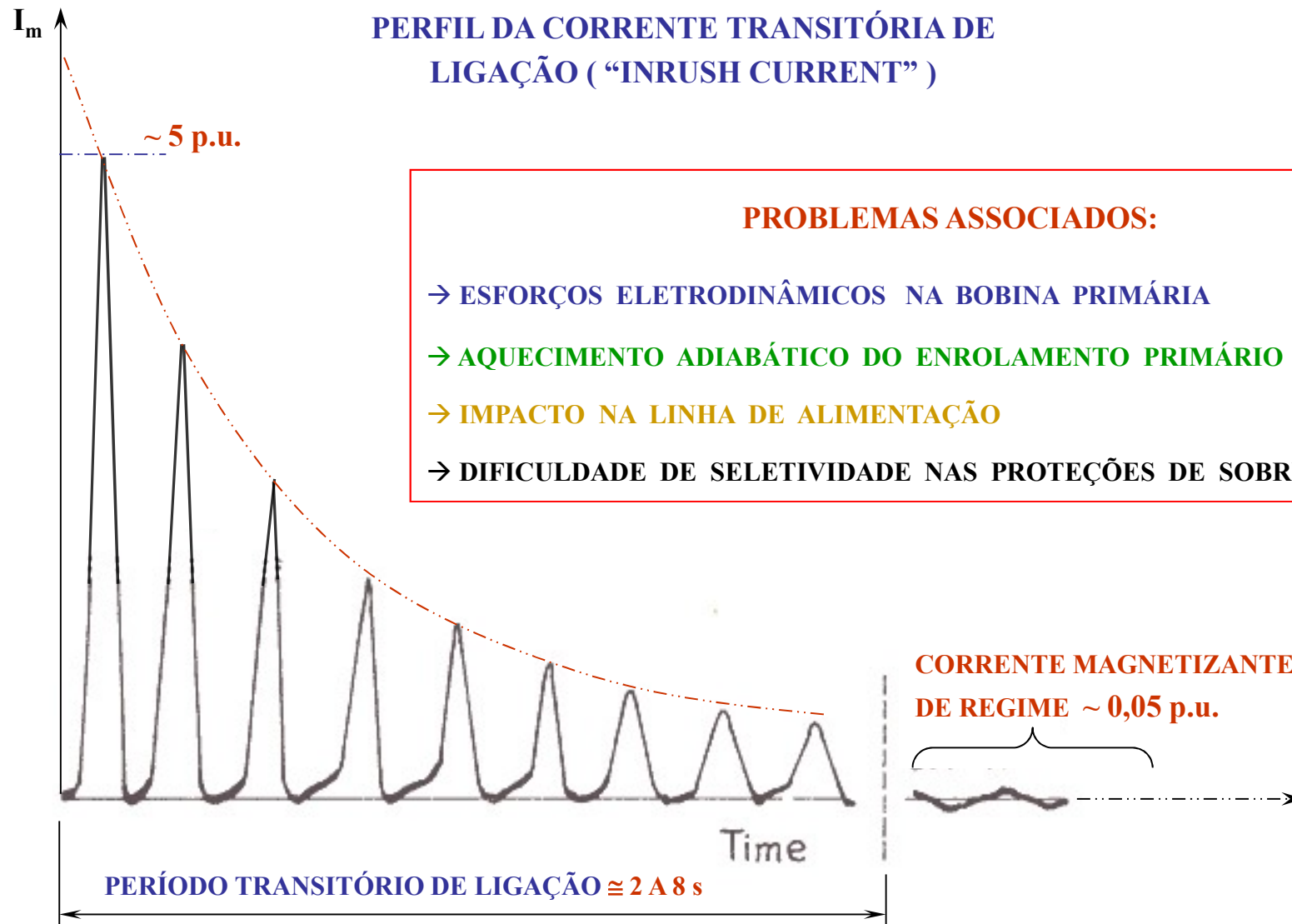
L/r : CONSTANTE DE TEMPO DE DECAIMENTO $\cong 2$ A 8 s

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 Δ . → **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

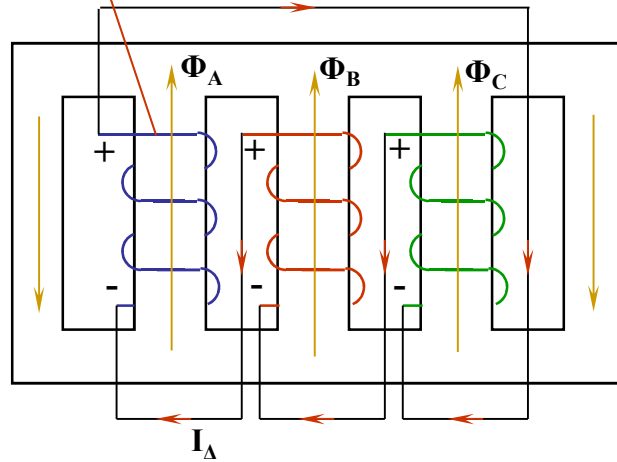
MESMO EM LIGAÇÕES QUE PERMITEM A CIRCULAÇÃO DE SEQUÊNCIA ZERO ($Y/Y - \Delta/Y - Y/\Delta$ COM NEUTRO ATERRADO) → A IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO DO TRANSFORMADOR PODE LIMITAR ESSAS CORRENTES → MANIFESTAÇÃO DOS PROBLEMAS JÁ MENCIONADOS → COMPROMETIMENTO DAS PROTEÇÕES DO SISTEMA

→ 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^{ÁRIO} E O 2^{ÁRIO} 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 

→ 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

CIRCUITOS DE SEQUENCIA ZERO COM E SEM TERCIÁRIO

