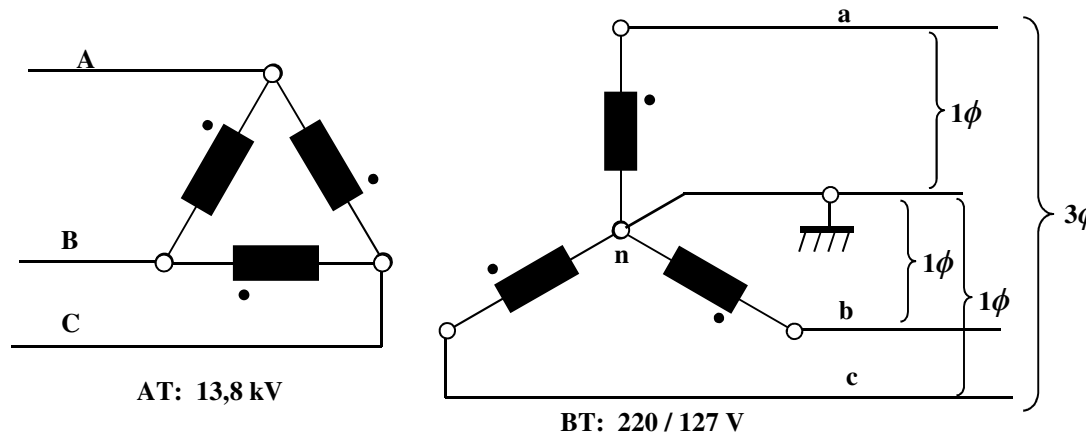


LIGAÇÕES USUAIS E ESPECIAIS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

SISTEMAS TRIFÁSICOS USUAIS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO:



LIGAÇÃO:

Δ / Y COM NEUTRO ACESSÍVEL E ATERRADO NA BT

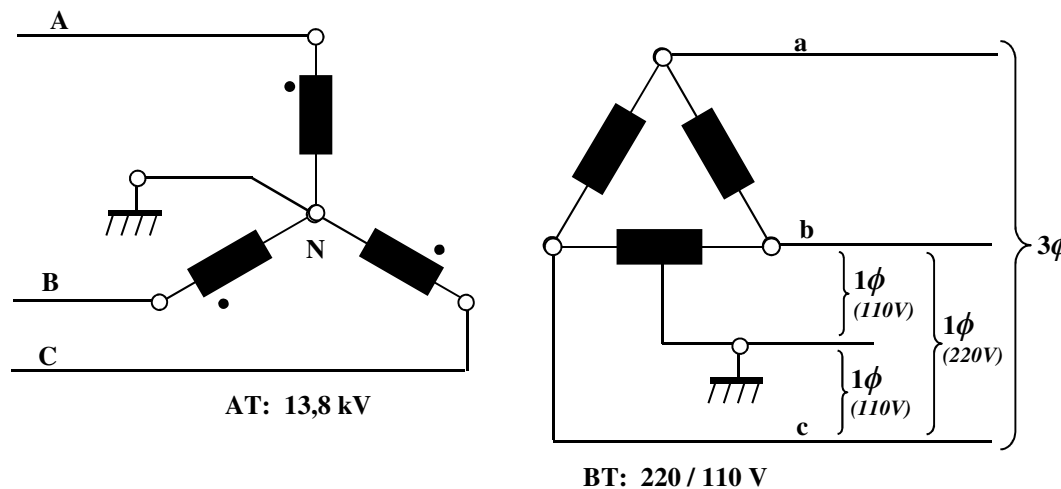
CARGAS MONOFÁSICAS ENTRE LINHAS E NEUTRO

CARGAS TRIFÁSICAS ENTRE LINHAS

TENSÕES USUAIS NA BT: 220 V - 3φ / 127 V - 1φ

TENSÕES ALTERNATIVAS NA BT: 208 V - 3φ / 120 V - 1φ

SISTEMA ADOTADO PELA CESP



LIGAÇÃO:

Y / Δ COM NEUTRO ACESSÍVEL E ATERRADO NA AT

SECUNDÁRIO COM DERIVAÇÃO CENTRAL NO ENROLAMENTO

CARGAS MONOFÁSICAS ENTRE LINHAS "b" E "c" - 220 / 110 V

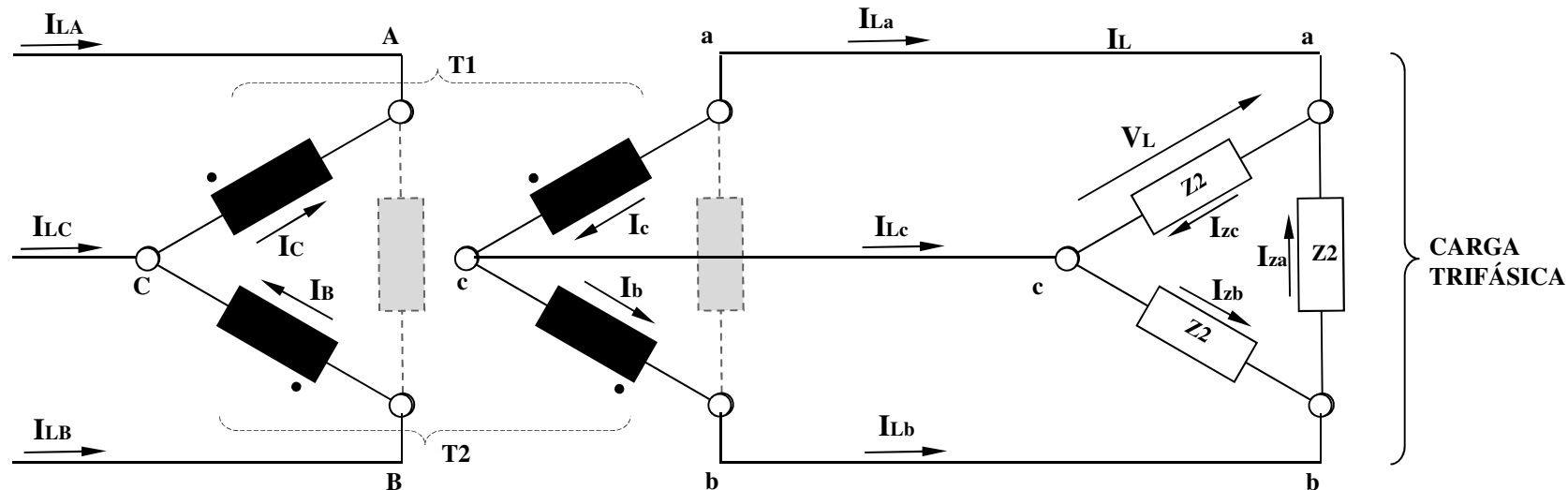
CARGAS TRIFÁSICAS ENTRE LINHAS

TENSÕES USUAIS NA BT: 220 V - 3φ // 220 V / 110 V - 1φ

TENSÕES ALTERNATIVAS NA BT: 230 V - 3φ // 230 V / 115 V - 1φ

SISTEMA ADOTADO PELA ELETROPAULO

LIGAÇÃO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM TRIÂNGULO ABERTO (CONEXÃO “V”):



SISTEMA TRIFÁSICO
LINHA DE ALIMENTAÇÃO

SECUNDÁRIO DOS
TRANSFORMADORES

DIAGRAMA DE FASORES DAS TENSÕES DE
LINHA NO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

TRANSFORMADORES T1 e T2 COM POTÊNCIAS NOMINAIS: $S_{T1} = S_{T2} = S$

POTÊNCIA NA CARGA TRIFÁSICA: $S_C = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$

POTÊNCIA SOMADA DOS DOIS TRANSFORMADORES: $S_{(T1+T2)} = 2 \cdot V_L \cdot I_L = 2S$

POTÊNCIA DA CONEXÃO “V”:

$$\rightarrow S_V = (\sqrt{3}/2) \cdot S_{(T1+T2)} = 0,866 \cdot S_{(T1+T2)} = 1,73 \cdot S (< 2 \cdot S)$$

COMPARANDO COM SISTEMA TRIFÁSICO COMPLETO (CONEXÃO Δ)

CONEXÃO $\Delta \rightarrow S_{T1} = S_{T2} = S_{T3} = S \rightarrow S_\Delta = S_{(T1+T2+T3)} = 3 \cdot S$

$$S_{(T1+T2)} = (2/3) \cdot S_{(T1+T2+T3)} = (2/3) \cdot S_\Delta$$

POTÊNCIA NA CONEXÃO “V”:

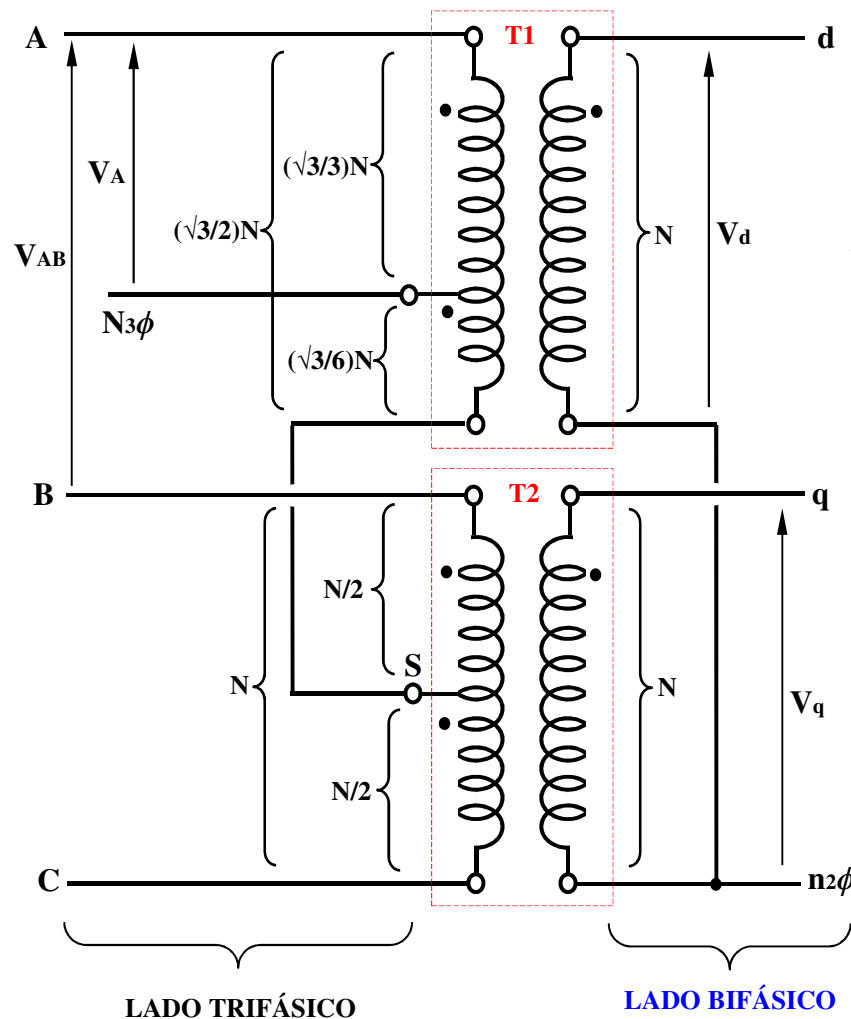
$$\rightarrow S_V = (\sqrt{3}/2) \cdot (2/3) \cdot S_\Delta = (\sqrt{3}/3) \cdot S_\Delta = (1/\sqrt{3}) \cdot S_\Delta = 0,57 \cdot S_\Delta (< 2/3 \cdot S)$$

USOS DA CONEXÃO EM DELTA ABERTO:

1) OPERAÇÃO EMERGENCIAL QUANDO DE FALHA DE UMA UNIDADE EM BANCO TRIFÁSICO NORMAL

2) INSTALAÇÃO DE SISTEMA 3 ϕ COM EXPECTATIVA DE AUMENTO DE DEMANDA AO LONGO DO TEMPO (MENOR CUSTO)

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EM CONEXÃO “SCOTT” - CONVERSÃO DE SISTEMA TRIFÁSICO ↔ BIFÁSICO



TRANSFORMADOR T1 :

SECUNDÁRIO COM Nº DE ESPIRAS : $N_2 = N$

PRIMÁRIO COM Nº DE ESPIRAS: $N_1 = (\sqrt{3}/2).N$ E TAP COM $\sqrt{3}/6).N$

TENSÕES NOMINAIS: $V_1 / V_2 \rightarrow (\sqrt{3}/2).V / V \rightarrow 0,866.V / V$

CORRENTES NOMINAIS: $I_1 / I_2 \rightarrow (2/\sqrt{3}).I / I \rightarrow 1,155.I / I$

RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: $a(T1) = N_1/N_2 = \sqrt{3}/2 = 0,866$

TRANSFORMADOR T2 :

SECUNDÁRIO COM Nº DE ESPIRAS : $N_2 = N$

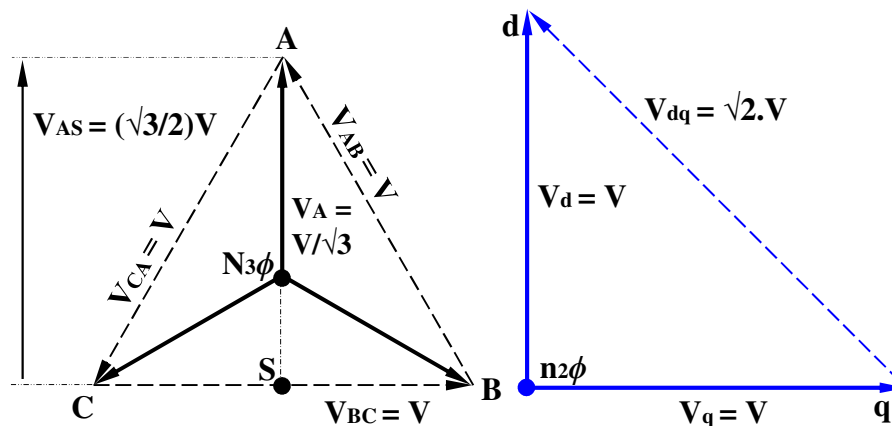
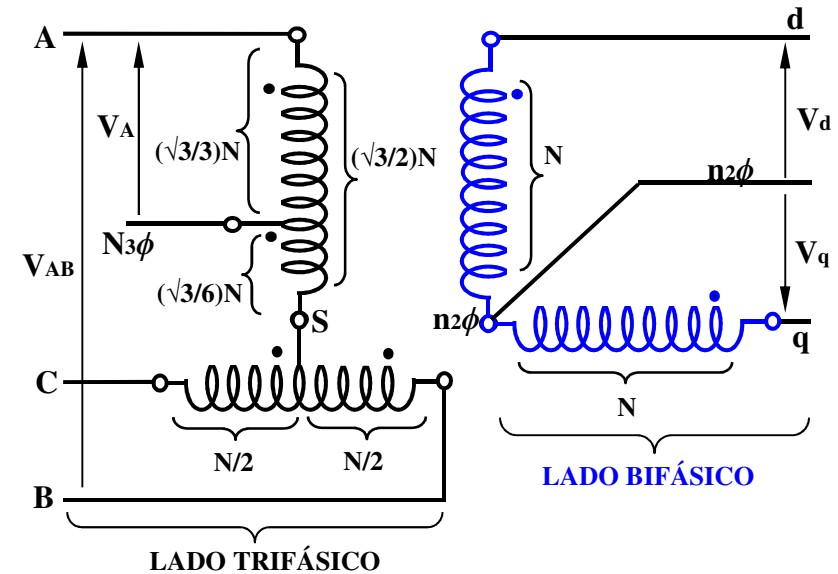
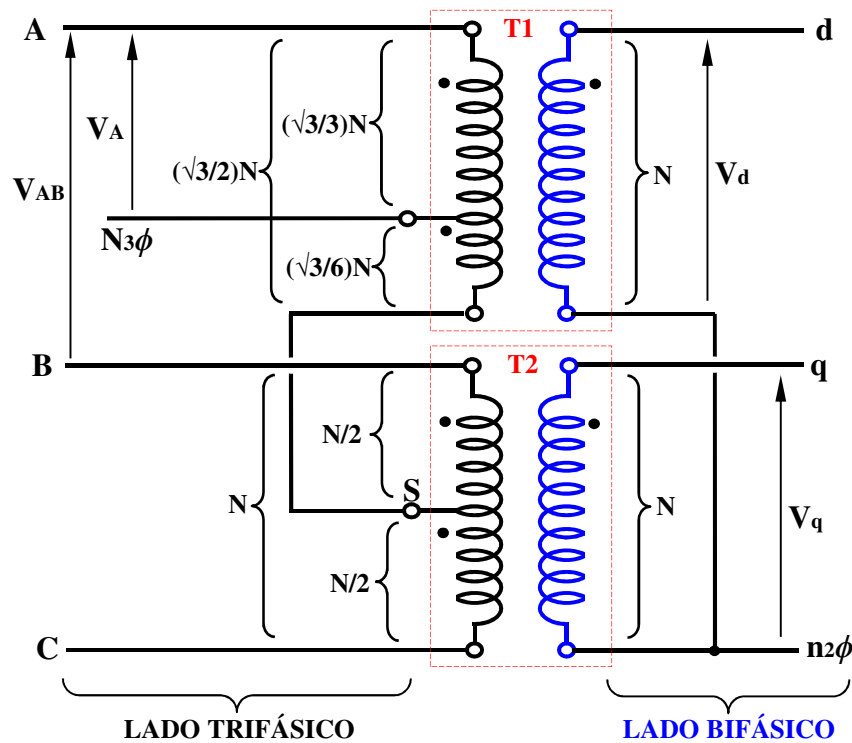
PRIMÁRIO COM Nº DE ESPIRAS: $N_1 = N$ E TAP CENTRAL COM $N/2$

TENSÕES NOMINAIS: $V_1 / V_2 \rightarrow V / V \rightarrow (V/2 + V/2) / V$

CORRENTES NOMINAIS: $I_1 / I_2 \rightarrow I / I$

RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: $a(T2) = N_1/N_2 = 1$

TENSÕES NA CONEXÃO SCOTT


 REFERÊNCIA DE FASE → FASOR DE TENSÃO V_A

$$\omega t = 0^\circ \rightarrow V_1(T1) = V_{AS} = (\sqrt{3}/2) \cdot V ; V_1(T2) = V_{BC} = 0$$

$$V_1(T1) = V_{AS} = (\sqrt{3}/2) \cdot V \rightarrow V_A = V/\sqrt{3}$$

$$V_2(T1) = [1/a(T1)] \cdot V_1(T1) = [1/(\sqrt{3}/2)] \cdot (\sqrt{3}/2) \cdot V = V \rightarrow V_2(T1) = V_d = V$$

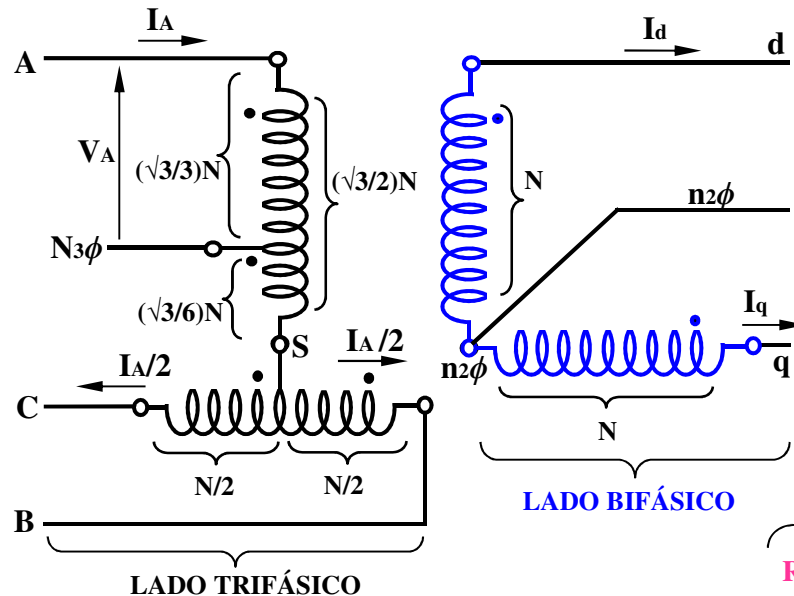
$$V_1(T2) = V_{BC} = 0 \rightarrow V_2(T2) = [1/a(T2)] \cdot V_1(T1) = 0 \rightarrow V_2(T2) = V_q = 0$$

$$\omega t = 90^\circ \rightarrow V_1(T1) = V_{AS} = 0 ; V_1(T2) = V_{BC} = V$$

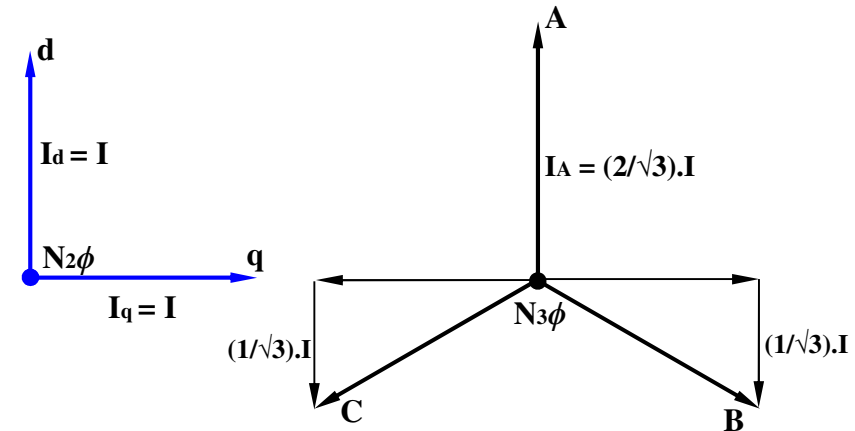
$$V_1(T1) = V_{AS} = 0 \rightarrow V_A = 0$$

$$V_2(T1) = (1/a) \cdot V_1(T1) = [1/(\sqrt{3}/2)] \cdot V_{AS} = 0 \rightarrow V_2(T1) = V_d = 0$$

$$V_1(T2) = V_{BC} = V \rightarrow V_2(T2) = (1/a(T2)) \cdot V_1(T1) = V \rightarrow V_2(T2) = V_q = V$$



CORRENTES NA CONEXÃO SCOTT

REFERÊNCIA DE FASE → FASOR DE CORRENTE I_d

POTÊNCIAS NA CONEXÃO SCOTT

LADO TRIFÁSICO:

$$S = 3.V_f.I_f = 3.(V/\sqrt{3}).(2/\sqrt{3}).I = 2.V.I = 2.S_N$$

LADO BIFÁSICO:

$$S = 2.V_f.I_f = 2.V.I = 2.S_N$$

→ S_N = POTÊNCIA NOMINAL DE CADA TRANSF.

APLICAÇÕES DA CONEXÃO SCOTT:

FORNOS ELÉTRICOS

TRAÇÃO FERROVIÁRIA EM A.C.

$$\omega t = 0^\circ \rightarrow I_d = I \rightarrow I_2(T1) = I_d = I ; N_1(T1).I_1(T1) = N_2(T1).I_2(T1)$$

$$I_1(T1) = [1/a(T1)].I_2(T1) = (2/\sqrt{3}).I \rightarrow I_A = (2/\sqrt{3}).I$$

$$N_1(T2).I_1(T2) = N_2(T2).I_2(T2) \rightarrow I_1(T2) = \pm I_A/2$$

$$[N_1(T2)/2].(+I_A/2) + [N_1(T2)/2].(-I_A/2) = 0 \rightarrow N_2(T2).I_2(T2) = 0 \rightarrow I_q = 0$$

$$\omega t = 90^\circ \rightarrow I_q = I \rightarrow I_2(T2) = I_q = I$$

$$I_1(T2) = [1/a(T2)].I_2(T2) = (1).I \rightarrow I_B = -I_C = I$$

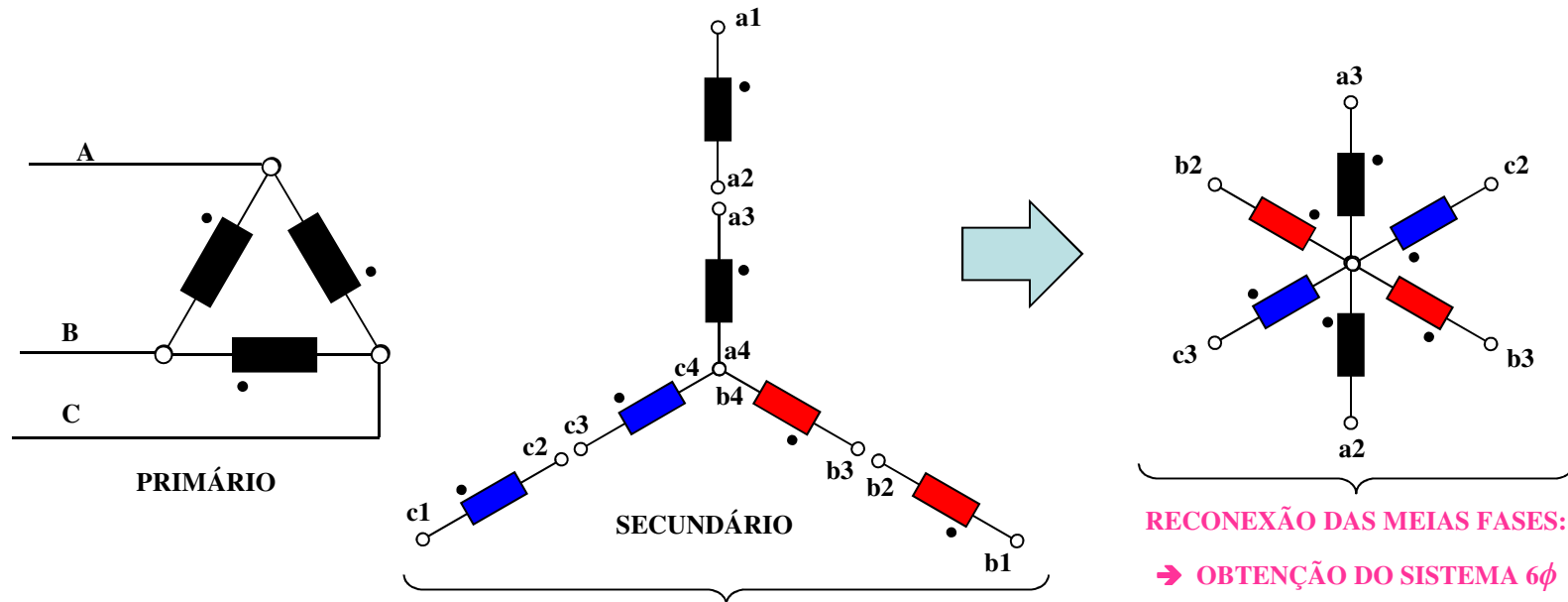
$$I_d = 0 \rightarrow I_2(T1) = I_d = 0$$

$$I_1(T1) = (1/a(T1)).I_2(T1) = 0$$

→ CORRENTES EQUILIBRADAS NO LADO BIFÁSICO DE VALOR I

→ CORRENTES EQUILIBRADAS NO LADO TRIFÁSICO DE VALOR $(2/\sqrt{3}).I$

OBTENÇÃO DE SISTEMA HEXAFÁSICO A PARTIR DE SISTEMA TRIFÁSICO



APLICAÇÃO PRINCIPAL:

- 1) RETIFICADORES DE POTÊNCIA DE 12 PULSOS
- 2) COM DOIS TRANSFORMADORES DEFASADOS:
→ FORMAÇÃO DE SISTEMA 12φ (24 PULSOS)

SECUNDÁRIO COM FASES SUBDIVIDIDAS:

FASE ORIGINAL COM N espiras
CADA SUBDIVISÃO COM $N/2$ espiras

FORMAÇÃO DO SISTEMA HEXAFÁSICO:

$$V_1 = V_a \rightarrow \angle V_1 = \angle V_a \rightarrow \angle V_a = 0^\circ \rightarrow \angle V_1 = 0^\circ$$

$$V_2 = -V_c \rightarrow \angle V_2 = \angle V_c + 180^\circ \rightarrow \angle V_c = 240^\circ \rightarrow \angle V_2 = 240^\circ + 180^\circ = 420^\circ \rightarrow \angle V_2 = 420^\circ - 360^\circ = 60^\circ$$

$$V_3 = V_b \rightarrow \angle V_3 = \angle V_b \rightarrow \angle V_b = 120^\circ \rightarrow \angle V_3 = 120^\circ$$

$$V_4 = -V_a \rightarrow \angle V_4 = \angle V_a + 180^\circ \rightarrow \angle V_a = 0^\circ \rightarrow \angle V_4 = 0^\circ + 180^\circ = 180^\circ \rightarrow \angle V_4 = 180^\circ$$

$$V_5 = V_c \rightarrow \angle V_5 = \angle V_c \rightarrow \angle V_c = 240^\circ \rightarrow \angle V_5 = 240^\circ$$

$$V_6 = -V_b \rightarrow \angle V_6 = \angle V_b + 180^\circ \rightarrow \angle V_b = 120^\circ \rightarrow \angle V_6 = 120^\circ + 180^\circ = 300^\circ \rightarrow \angle V_6 = 300^\circ - 360^\circ = -60^\circ$$

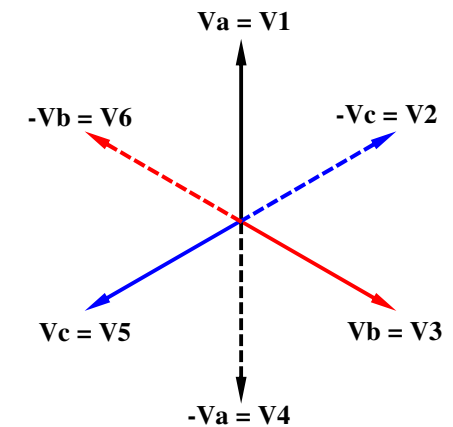
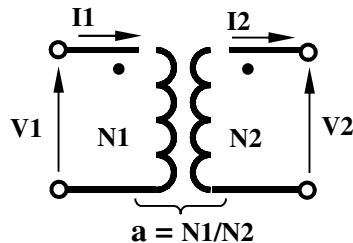


DIAGRAMA FASORIAL DO
SISTEMA HEXAFÁSICO

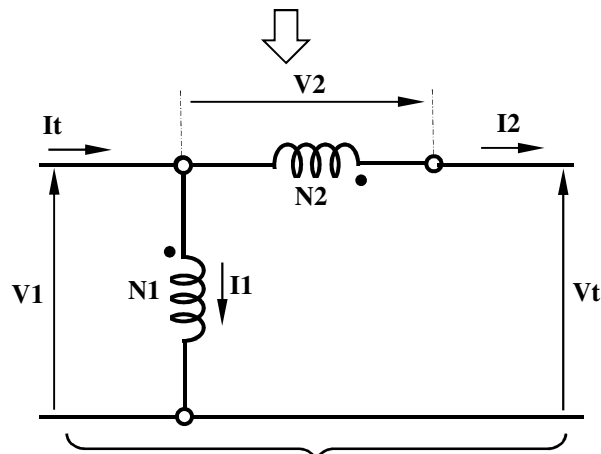
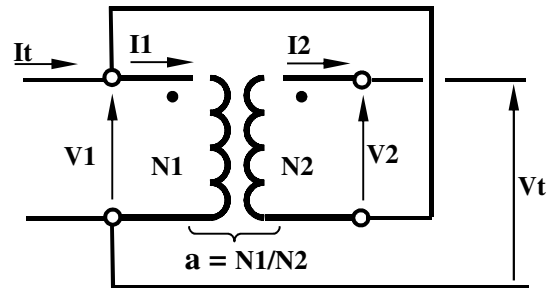
CONEXÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR**TRANSFORMADOR CONVENCIONAL:**

EXEMPLO: 10 kVA - $V_1 = 100 \text{ V}$ - RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: $a = 10$

$$\rightarrow V_1 = a \cdot V_2 \rightarrow V_2 = V_1 / a = 100 / 10 = 10 \text{ V}$$

$$\rightarrow I_1 = 10.000/100 = 100 \text{ A} \rightarrow I_2 = a \cdot I_1 = 10 \times 100 = 1000 \text{ A}$$

$\rightarrow$ **POTÊNCIA PASSANTE:** $S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 = \underline{10 \text{ kVA}}$ $\rightarrow$ potência de dimensionamento

**ESQUEMA EQUIVALENTE****CONEXÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR (ELEVADOR DE TENSÃO):****SECUNDÁRIO CONECTADO EM SÉRIE ADITIVA AO PRIMÁRIO**

TENSÃO DE SAÍDA TOTAL É A SOMA FASORIAL DE V_1 E V_2

$$\rightarrow V_t = V_1 + V_2 = V_1 + V_1/a = (1+1/a) \cdot V_1 \rightarrow V_t = 100 + 10 = \underline{110 \text{ V}}$$

CORRENTE TOTAL DE ENTRADA É A SOMA FASORIAL DE I_1 E I_2

$$\rightarrow I_t = I_1 + I_2 = I_1 + a \cdot I_1 = (1+a) \cdot I_1 \rightarrow I_t = 100 + 1000 = \underline{1100 \text{ A}}$$

POTÊNCIA TOTAL DO AUTOTRANSFORMADOR:

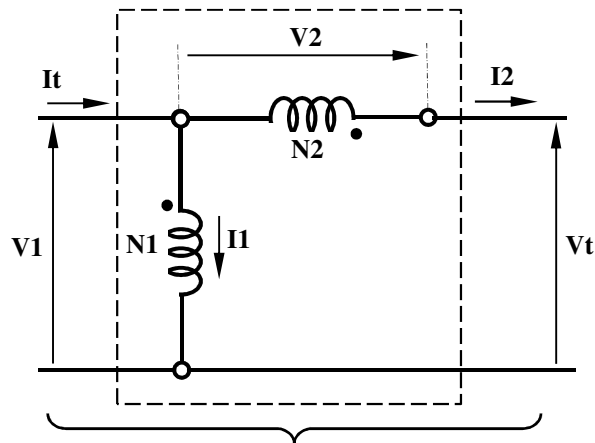
$$\rightarrow S_t = V_1 \cdot I_t = V_1 \cdot (1+a) \cdot I_1 = (1+a) \cdot V_1 \cdot I_1 = (1+a) \cdot S_p$$

$$\rightarrow S_t = V_t \cdot I_2 = (1+1/a) \cdot V_1 \cdot a \cdot I_1 = (1+1/a) \cdot a \cdot V_1 \cdot I_1 = (a+1) \cdot S_p$$

$$\rightarrow S_t = (1+10) \cdot S_p = (1+10) \cdot S_p = 11 \times S_p$$

$$\rightarrow S_t = V_1 \cdot I_t = V_t \cdot I_2 = 100 \times 1100 = 110 \times 1000 = \underline{110 \text{ kVA}}$$

RELAÇÃO DE POTÊNCIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO TOTAL DO AUTOTRANSFORMADOR:



ESQUEMA EQUIVALENTE (QUADRIPOLO)

CONEXÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR (ELEVADOR DE TENSÃO):

RELAÇÃO DO TRANSFORMADOR QUE DÁ ORIGEM AO AUTO:

$$a = N1/N2 = V1/V2$$

RELAÇÃO TOTAL COMO AUTOTRANSFORMADOR:

$$a' = V_{\text{entrada}} / V_{\text{saída}} = I_{\text{saída}} / I_{\text{entrada}} = V1 / Vt = I2 / It \quad (a' < 1)$$

POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO TOTAL COMO AUTO:

$$a' = V1 / Vt = V1 / (V1 + V2) = a \cdot V2 / (a \cdot V2 + V2) = a / (1 + a)$$

$$\rightarrow a' = a / (1 + a) \rightarrow 1/a' = (1 + a) / a = 1/a + 1 \rightarrow 1/a = 1/a' - 1$$

$$\rightarrow 1/a = (1 - a') / a' \rightarrow \boxed{a = a' / (1 - a')}$$

$$\rightarrow St = (1 + a) \cdot Sp = [1 + a' / (1 - a')] \cdot Sp = (1 - a' + a') / (1 - a') \cdot Sp$$

$$\rightarrow \boxed{St = [1 / (1 - a')] \cdot Sp} \quad St = k \cdot Sp \rightarrow a' < 1 \rightarrow k > 1$$

$$\rightarrow \text{QUANDO: } \boxed{a' \rightarrow 1 \rightarrow St \rightarrow \infty} \quad \rightarrow S_{\text{AUTO}} > S_{\text{TRANSF}}$$

VANTAGENS DO AUTOTRANSFORMADOR:

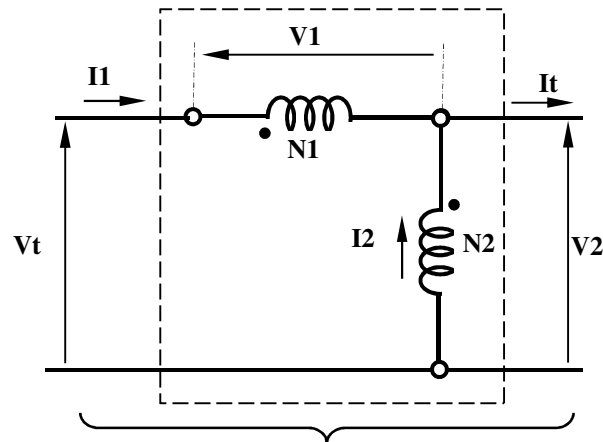
- 1- MAIOR POTÊNCIA PARA MESMO VOLUME
(OU MENOR VOLUME PARA MESMA POTÊNCIA)
- 2 - MENOR CUSTO
- 3 - MAIOR RENDIMENTO
- 4 - MENOR (MELHOR) REGULAÇÃO

DESVANTAGENS:

- 1- NÃO PROMOVE ISOLAÇÃO GALVÂNICA ENTRE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO
- 2 - MENOR IMPEDÂNCIA DE CURTO EM p.u.
 $\rightarrow$ MAIOR CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

AUTOTRANSFORMADOR EM GERAL APLICADO QUANDO A
RELAÇÃO TOTAL a' É PRÓXIMA DA UNIDADE

RELAÇÃO DE POTÊNCIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO TOTAL DO AUTOTRANSFORMADOR:



ESQUEMA EQUIVALENTE (QUADRIPOLO)

CONEXÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR (ABAIXADOR DE TENSÃO):

RELAÇÃO DO TRANSFORMADOR QUE DÁ ORIGEM AO AUTO:

$$a = N1/N2 = V1/V2 \rightarrow Vt = V1 + V2 \rightarrow It = I1 + I2$$

RELAÇÃO TOTAL COMO AUTOTRANSFORMADOR:

$$a' = V_{\text{entrada}} / V_{\text{saída}} = I_{\text{saída}} / I_{\text{entrada}} = Vt / V2 = It / I2 \quad (a' > 1)$$

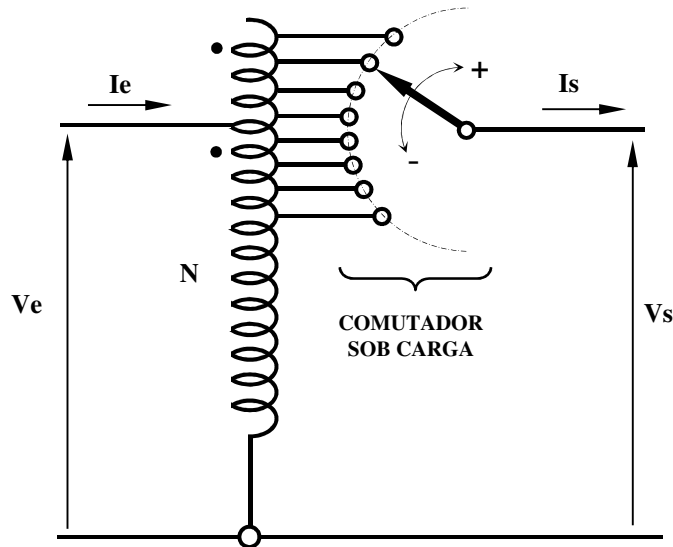
POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO TOTAL COMO AUTO:

$$St = [a' / (a' - 1)] \cdot Sp \quad St = k \cdot Sp \rightarrow a' > 1 \rightarrow k > 1$$

$$\rightarrow \text{QUANDO: } a' \rightarrow 1 \rightarrow St \rightarrow \infty \quad \rightarrow S_{\text{AUTO}} > S_{\text{TRANSF}}$$

VANTAGENS E DESVANTAGENS DO
AUTO TRANSFORMADOR ABAIXADOR
SÃO IDÊNTICAS ÀS DO AUTO ELEVADOR

APLICAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR COMO REGULADOR DE TENSÃO (UTILIZADO EM DISTRIBUIÇÃO):



AUTOTRANSFORMADOR (ELEVADOR / ABAIXADOR DE TENSÃO):

NÚMERO DE DERIVAÇÕES (TAP'S NO ENROLAMENTO) : n

TENSÃO ENTRE CADA DERIVAÇÃO : ΔV

TENSÃO DE ENTRADA : V_e

TENSÃO DE SAÍDA : $V_s = V_e \pm n \cdot \Delta V \rightarrow n = 0 ; 1 ; 2 ; 3 ; ; 15$

COMUTADOR SOB CARGA $\rightarrow$ PERMITE MUDANÇA DE TAP'S SEM INTERRUPÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA

COMUTADOR MOTORIZADO ACIONADO POR SISTEMA DE CONTROLE DA TENSÃO DE SAÍDA

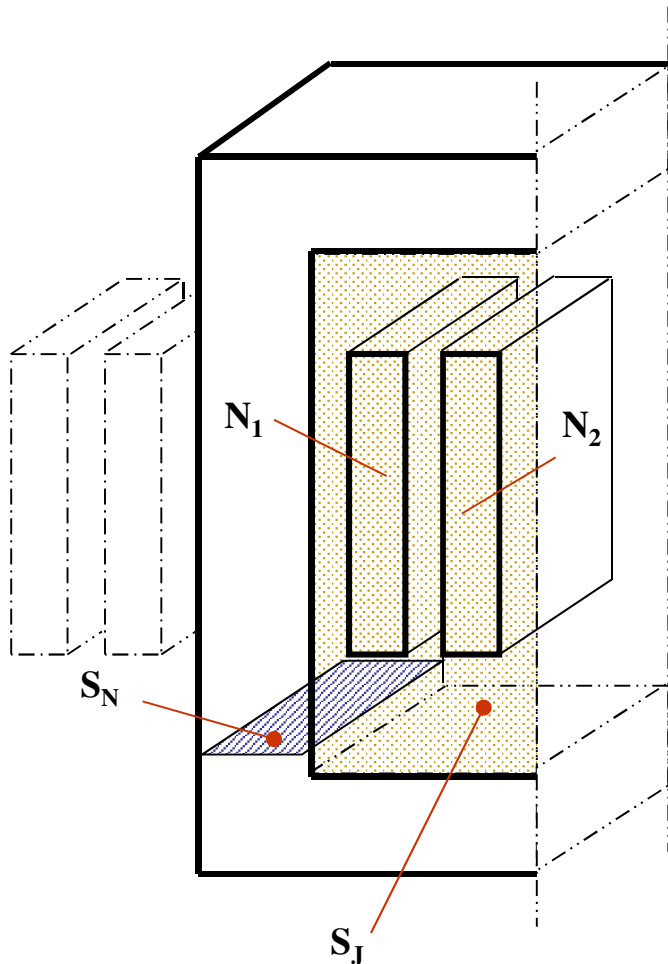
TENSÃO ENTRE CADA DERIVAÇÃO - ΔV : USUALMENTE 2,5 % DE V_1 OU 1,25 % DE V_e

NÚMERO DE TAP'S - n : USUALMENTE 15 TAP'S ACIMA E 15 TAP'S ABAIXO DO PONTO CENTRAL

$\rightarrow$ SISTEMA DE CONTROLE: MONITORA V_s E COMANDA O COMUTADOR EM FUNÇÃO DAS VARIAÇÕES DE V_e

$\rightarrow$ FUNÇÃO DO REGULADOR : MANTER A TENSÃO V_e CONSTANTE PARA “QUALQUER SITUAÇÃO”

$\rightarrow$ UTILIZAÇÃO NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA CORREÇÃO DA TENSÃO NA CARGA EM FUNÇÃO DA REGULAÇÃO DE TENSÃO INERENTE DA LINHA E DOS TRANSFORMADORES COM A VARIAÇÃO DA DEMANDA

CRITÉRIO BÁSICO DE DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

$$S_f = E_f \cdot I_f \quad \bullet \quad E_f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_f \cdot \phi_m \quad \bullet \quad I_f = j \cdot s_c$$

$$\phi_m = B_{FE} \cdot S_N \quad \bullet \quad N_f \cdot s_c = \frac{1}{2} \cdot S_J \cdot k_s$$

$$S_f = 10^{-5} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot S_J \cdot S_N \cdot k_s \cdot B_{FE} \cdot j$$

S_f : [kVA / fase] → POTÊNCIA APARENTE POR FASE

f : [Hz] → FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

S_J : [cm² / fase] → ÁREA DA JANELA (PARA UMA FASE)

S_N : [cm² / coluna] → ÁREA DE FERRO DA COLUNA

B_{FE} : [Wb / m²] → INDUÇÃO NO FERRO

j : [A / mm²] → DENSIDADE DE CORRENTE (NO CONDUTOR)

k_s : FATOR DE ENCHIMENTO DA JANELA → 0,08 – 0,25

ESPECIFICADA POTÊNCIA POR FASE: S_f { → ARBITRAM-SE CARREGAMENTOS: B_{FE} ; j ; k_s
 → RESULTAM DIMENSÕES FUNDAMENTAIS: S_J , S_{FE}