

PARTE 2

REGULADORES DE INDUÇÃO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

DIVERSOS SISTEMAS INDUSTRIAIS OU DO SISTEMA ELÉTRICO DEMANDAM VARIAÇÃO E / OU REGULAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO

→ SISTEMAS TÉRMICOS DE AQUECIMENTO CONTROLADO:

FORNOS PARA FABRICAÇÃO DE VIDRO – ATÉ 6 MW – 10 kA – TENSÕES VÁRIÁVEIS ENTRE 120 E 250 V

FUSÃO DE SAIS DE SÓDIO, LÍTIO E ENXOFRE NA INDÚSTRIA QUÍMICA - ATÉ 1,5 MW - 400 A 600 V

→ ELETRÓLISE E GALVANOPLASTIA:

ELETRODEPOSIÇÃO DE METAIS - ATÉ 400 kW - 0 A 500 V

FABRICAÇÃO DE CAPACITORES - ATÉ 400 kW - 0 A 500 V

→ LABORATÓRIOS DE ENSAIOS DE MOTORES, TRANSFORMADORES E CABOS DE FORÇA:

POTÊNCIAS ATÉ 3.500 kVA - TENSÕES VARIÁVEIS DE 0 A 1200 V

→ ESTABILIZAÇÃO DE TENSÃO EM RAMAIS INDUSTRIAIS OU INSTALAÇÕES DE GRANDE PORTE:

POTÊNCIAS ATÉ 2.000 kVA - TENSÕES DE SAÍDA REGULADAS ENTRE 400 E 500 V

→ REGULADORES DE TENSÃO EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIAS DE 13,8 kV

POTÊNCIAS ATÉ 3.000 kVA - TENSÕES REGULADAS NA FAIXA DE 13.800 V \pm 15%

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

APLICAÇÕES TÍPICAS SE CARACTERIZAM POR:

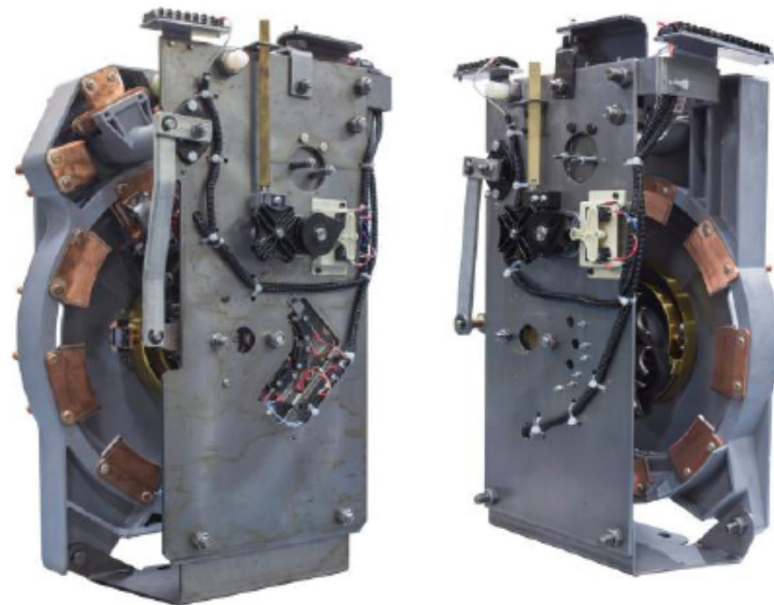
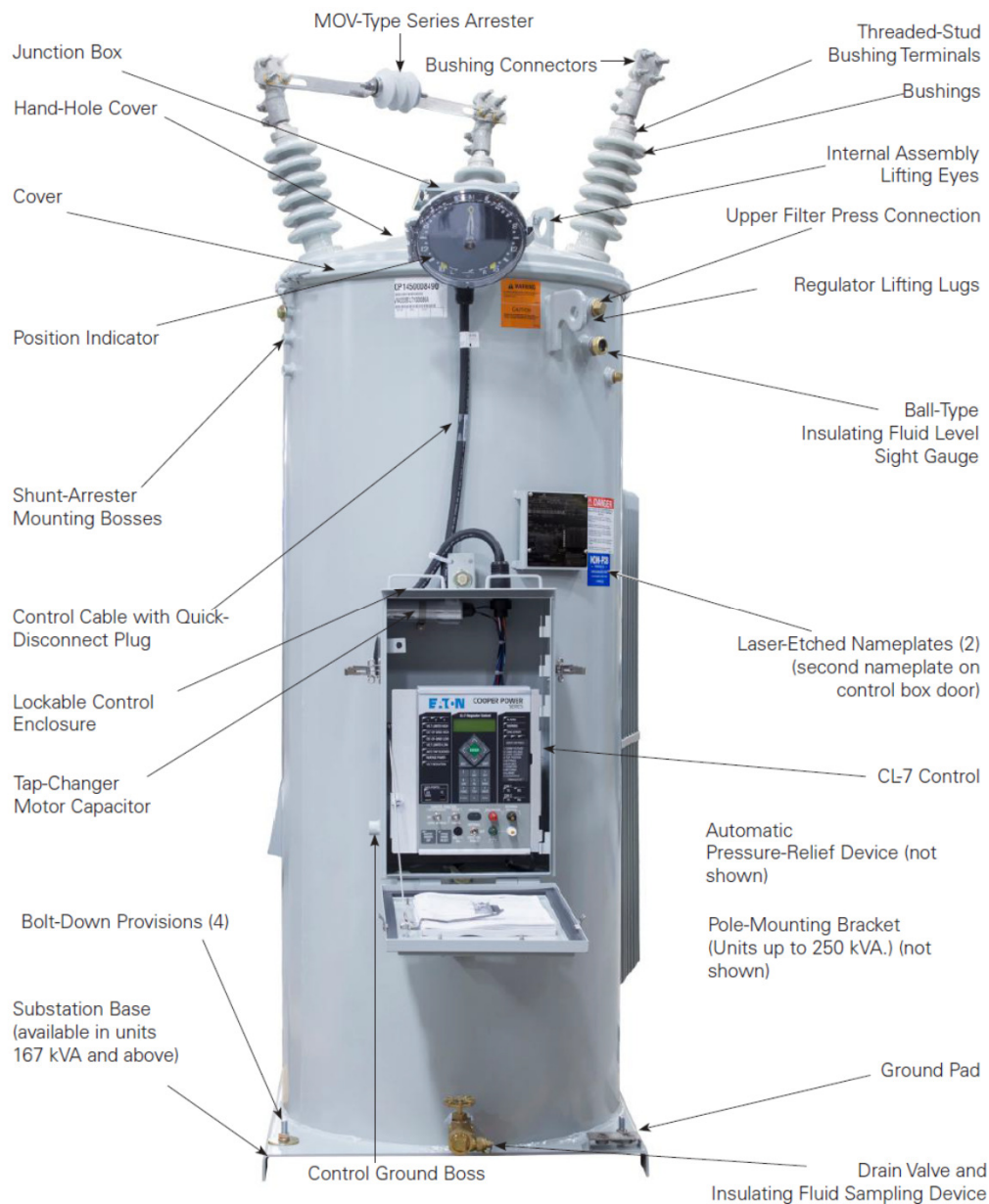
- NECESSIDADE DE VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TENSÃO DE SAÍDA
- LARGA FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA, A PARTIR DE TENSÃO DE ENTRADA CONSTANTE
- ELEVADA POTÊNCIA – DE CENTENAS ATÉ MILHARES DE kW
- ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE
- SUJEIÇÃO A SOBRECARGAS E EVENTUAIS CURTO-CIRCUITOS

TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA O CUMPRIMENTO DAS FUNÇÕES REQUERIDAS:

- VARIADORES DE DERIVAÇÕES COMUTÁVEIS SOB CARGA
- VARIADORES DE ESCOVAS DESLIZANTES TRANSVERSAIS “VARIAC”
- VARIADORES DE ESCOVAS DESLIZANTES HELICOIDAIS “VARIVOLT”
- TRANSFORMADORES ASSOCIADOS A RECORTADORES DE TENSÃO ESTÁTICOS
- VARIADORES DE INDUÇÃO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO



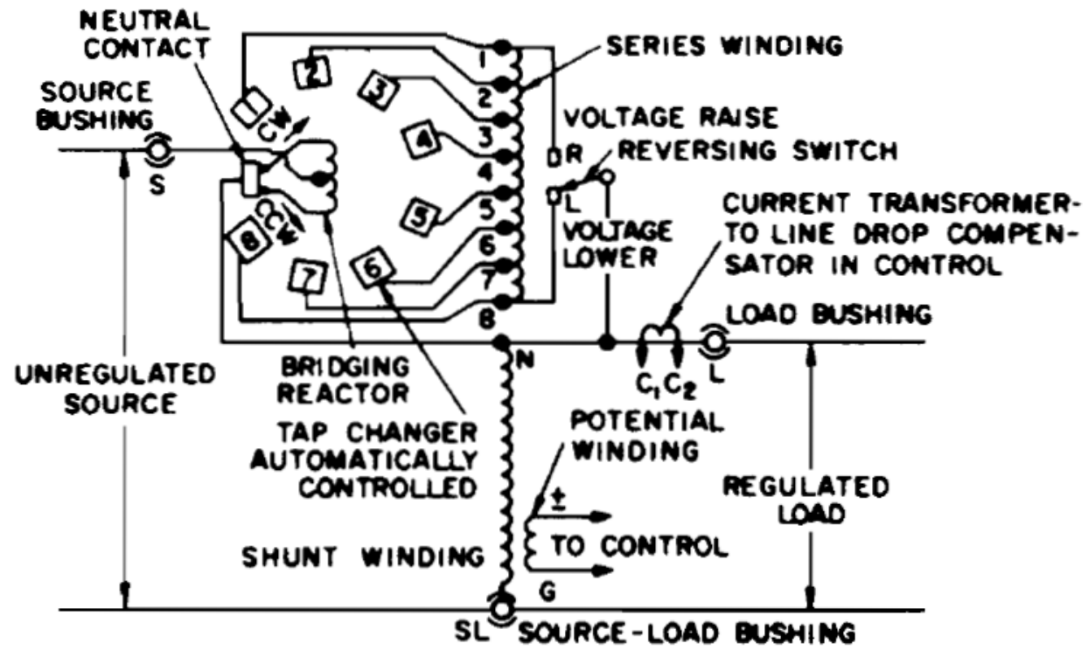
REGULADOR DE DERIVAÇÕES

COMUTÁVEIS SOB CARGA

APLICAÇÃO TÍPICA NA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

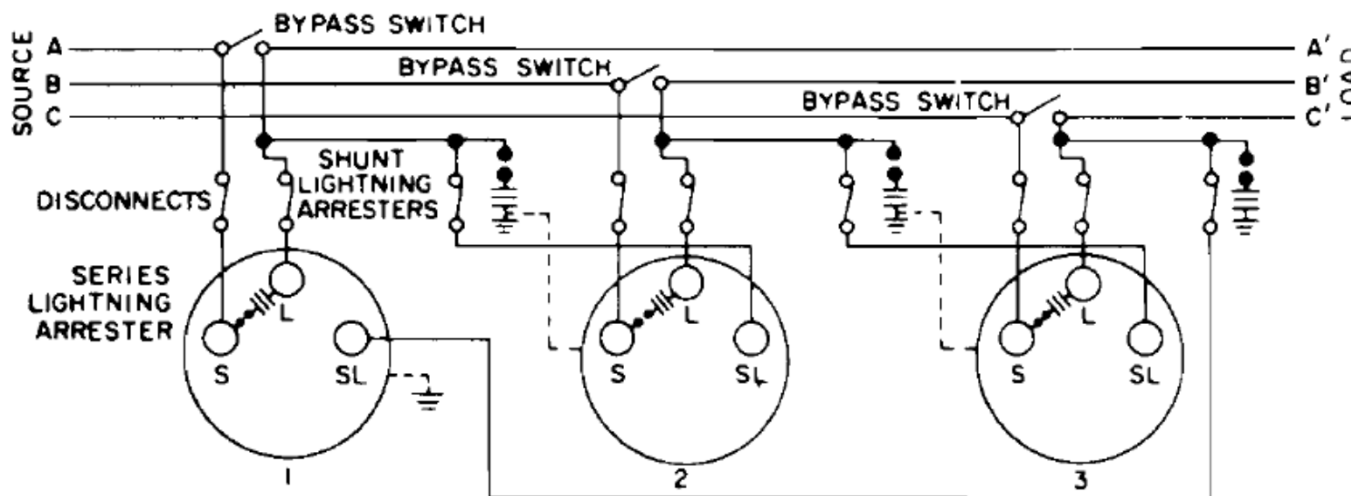
PEA - 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO



REGULADOR DE DERIVAÇÕES
COMUTÁVEIS SOB CARGA

ESQUEMA GERAL DO SISTEMA



REGULAÇÃO DE SISTEMA
TRIFÁSICO COM TRÊS
UNIDADES MONOFÁSICAS

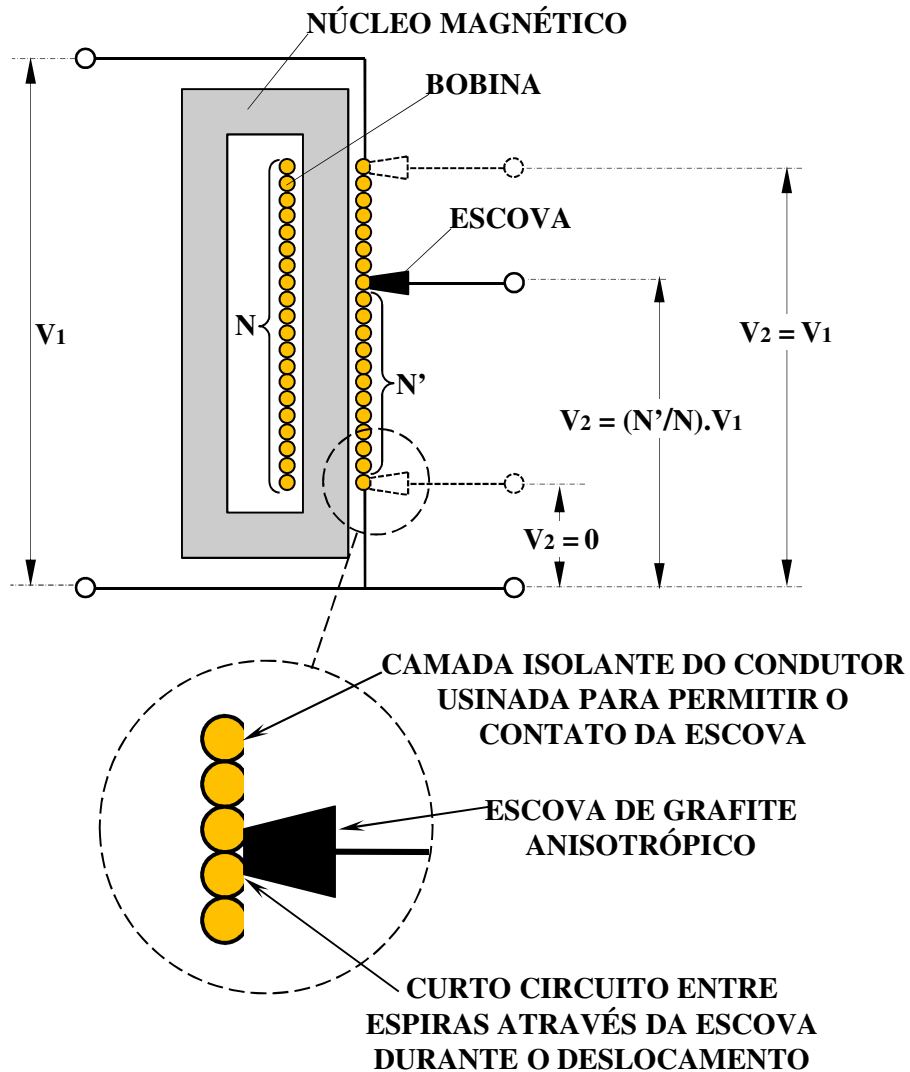
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

PROBLEMAS ASSOCIADOS À OPERAÇÃO DO REGULADOR COM COMUTADOR SOB CARGA:

- VARIAÇÃO EM DEGRAU (Não é problema crítico na aplicação em geral)
- FAIXA DE VARIAÇÃO ESTREITA DE TENSÃO (Usualmente $\pm 10\%$)
- DESGASTE DOS CONTATOS DEVIDO A UM CERTO GRAU DE CENTELHAMENTO NAS COMUTAÇÕES
- TRANSITÓRIOS DE COMUTAÇÃO DURANTE A MUDANÇA DE DERIVAÇÃO
- RETARDO NA ATUAÇÃO PARA EVITAR COMUTAÇÕES EM VARIAÇÕES DE CURTA DURAÇÃO
- VIDA LIMITADA (Notadamente em sistemas em que a variação de tensão é muito frequente → geração distribuída)
- CUSTO OPERACIONAL ELEVADO EM SISTEMAS COM COMUTAÇÃO MUITO FREQUENTE
- DETERIORAÇÃO DOS CONTATOS NA OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITOS

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

VARIADOR DE ESCOVAS DESLIZANTES TRANSVERSAIS – “VARIAC”:



CARACTERÍSTICAS DO VARIADOR DE ESCOVAS:

- VARIAÇÃO PRATICAMENTE CONTÍNUA
- LARGA FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO
- BAIXA CAPACIDADE DE SOBRECARGA
- BAIXA CAPACIDADE DE CURTO CIRCUITO
- EM GERAL, LIMITADO A BAIXAS POTÊNCIAS

PROBLEMAS ASSOCIADOS AO VARIADOR:

- CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS DURANTE O DESLOCAMENTO DA ESCOVA – LIMITADO PELA RESISTÊNCIA TRANSVERSAL DA ESCOVA
- OPERAÇÃO POR LONGO TEMPO EM UMA MESMA POSIÇÃO PROVOCA AQUECIMENTO LOCALIZADO NAS ESPIRAS EM CONTATO E DEPRESSÃO NA SUPERFÍCIE DA BOBINA
- MANUTENÇÃO FREQUENTE / BAIXA ROBUSTEZ

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

SCHÉMA V3

Circuit magnétique

- 1 _ culasse supérieure
- 2 _ culasse inférieure
- 3 _ noyau

Paliers

- 4 _ supérieur de guidage
- 5 _ inférieur de butée

Enroulement

- 6 _ primaire

Enroulement de réglage

- 7 _ demi-supérieur
- 8 _ sortie
- 9 _ curseur
- 10 _ glissière
- 11 _ couronne
- 12 _ frotteur
- 13 _ demi-inférieur
- 14 _ sortie
- 15 _ curseur
- 16 _ glissière
- 17 _ couronne
- 18 _ frotteur

Tête de commande

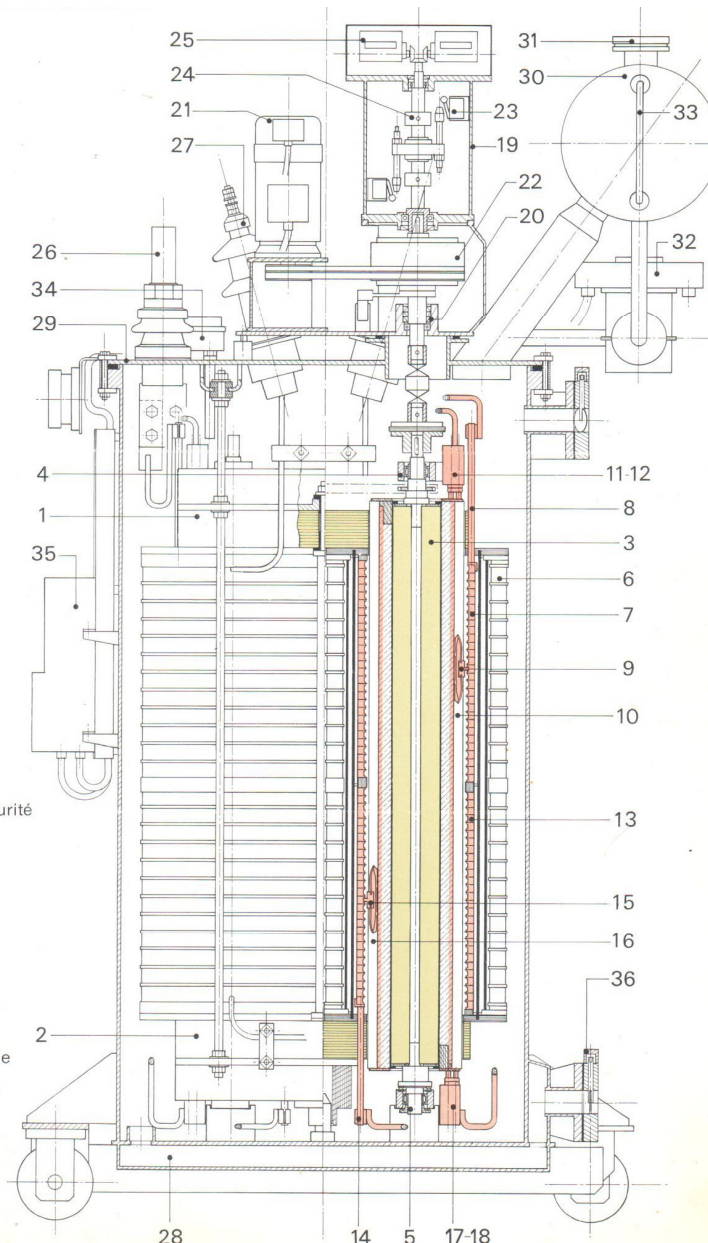
- 19 _ carter
- 20 _ joints d'étanchéité
- 21 _ moteur frein
- 22 _ poulie réductrice
- 23 _ contacts de fin de course
- 24 _ butées mécaniques de sécurité
- 25 _ compteurs

Bornes

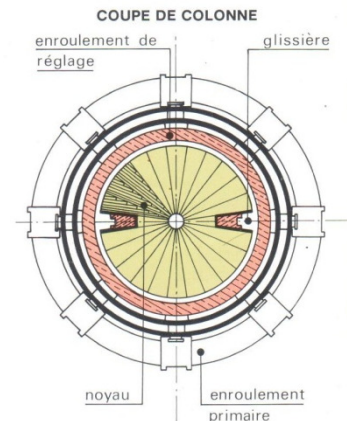
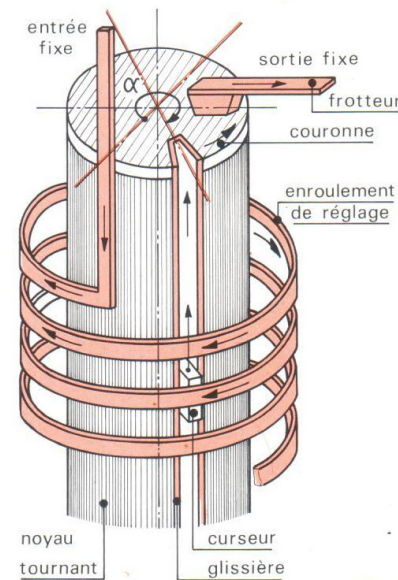
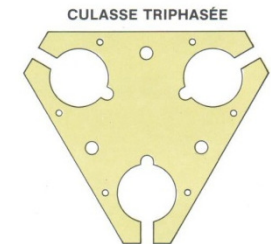
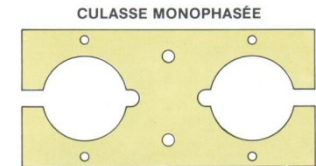
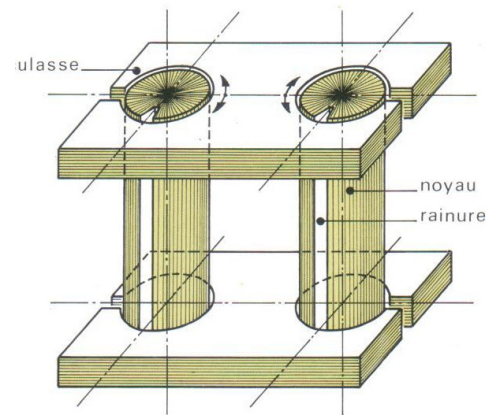
- 26 _ B.T.
- 27 _ H.T.

Cuve

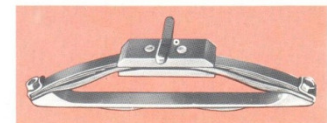
- 28 _ avec châssis et galets orientables
- 29 _ plateau
- 30 _ réservoir d'expansion
- 31 _ soupape d'explosion
- 32 _ relais Buchholz
- 33 _ indicateur de niveau d'huile
- 34 _ thermostats "alarme" et "déclanchement"
- 35 _ coffret bornier
- 36 _ vannes d'arrêt d'huile.



REGULADOR COM ESCOVAS DE DESLOCAMENTO HELICOIDAL "VARIVOLT"



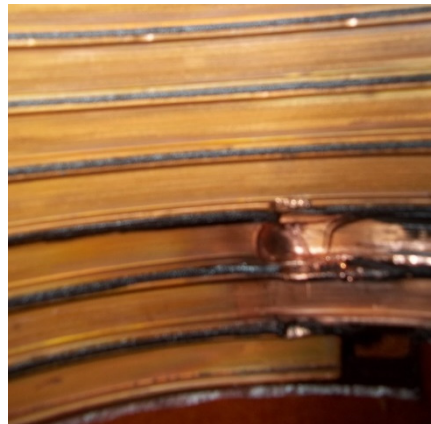
CURSEUR DE CONTACT EN CUIVRE SPÉCIAL



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DO VARIADOR DE ESCOVAS DE DESLOCAMENTO HECOIDAL - “VARIVOLT” :

- VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TENSÃO DE SAÍDA
- LARGA FAIXA DE VARIAÇÃO
- DESGASTE DOS CONTATOS A LONGO PRAZO
- CONSTRUÇÃO COMPLEXA
- EM GERAL CONSTRUÍDO PARA BAIXAS TENSÕES E ELEVADAS CORRENTES DE SAÍDA
- FLUÊNCIA DO COBRE DO CONDUTOR PARA OPERAÇÃO PROLONGADA NA MESMA TENSÃO
- DETERIORAÇÃO DOS CONTATOS NA OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITOS



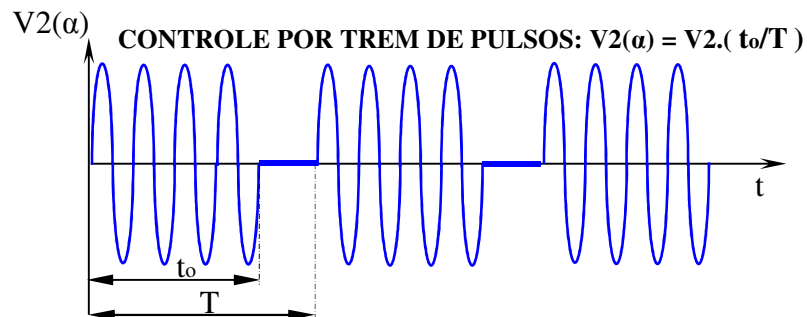
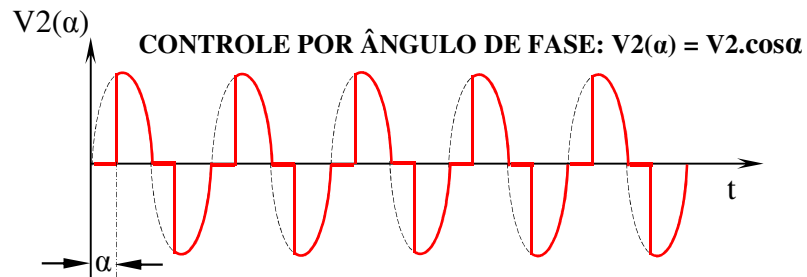
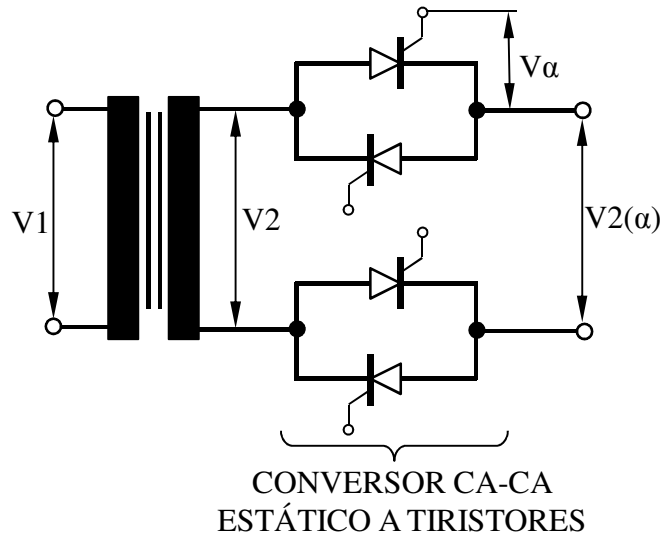
EXEMPLO DE FALHA NO

CONTATO ESCOVA / BOBINA

DO REGULADOR “VARIVOLT”

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

VARIADORES ESTÁTICOS BASEADOS EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA



CARACTERÍSTICAS DO VARIADOR RECORTADOR DE TENSÃO

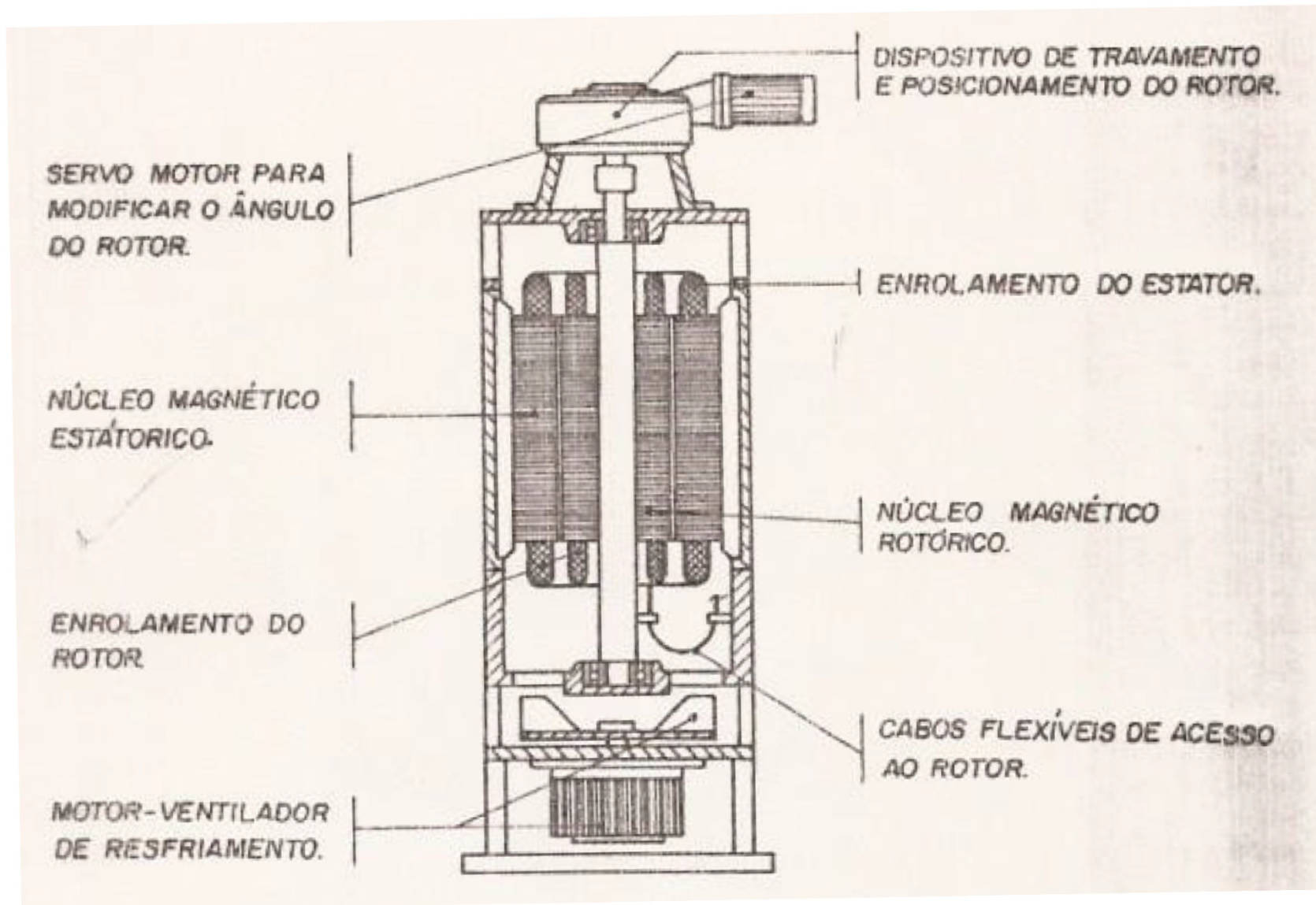
- VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TENSÃO DE SAÍDA
- LARGA FAIXA DE VARIAÇÃO
- GERAÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO
- REDUZIDA CAPACIDADE DE CURTO CIRCUITO
- FATOR DE POTÊNCIA REDUZIDO NO CONTROLE POR ÂNGULO DE FASE
- EVENTUAL CINTILAÇÃO (“FLICKER”) NO CONTROLE POR TREM DE PULSOS
- FALHAS FREQUENTES DAS CHAVES ELETRÔNICAS

VARIADOR DE TENSÃO DE INDUÇÃO

- VARIAÇÃO CONTÍNUA DA TENSÃO DE SAÍDA
- LARGA FAIXA DE VARIAÇÃO (Usualmente variação de zero ao dobro da tensão de entrada)
- INEXISTÊNCIA DE CONTATOS OU ESCOVAS DE QUALQUER NATUREZA
- CONSTRUÇÃO SIMILAR À MÁQUINA DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO
- ELEVADA CAPACIDADE DE SOBRECARGA E DE CURTO CIRCUITO
- POTÊNCIAS ATÉ 10 MVA – TENSÕES ATÉ 13,8 kV
- PRESENÇA DE ENTREFERRO – MAIOR CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO
- COMPETITIVO COM OS OUTROS EQUIPAMENTOS PARA POTÊNCIAS MÉDIAS E ELEVADAS

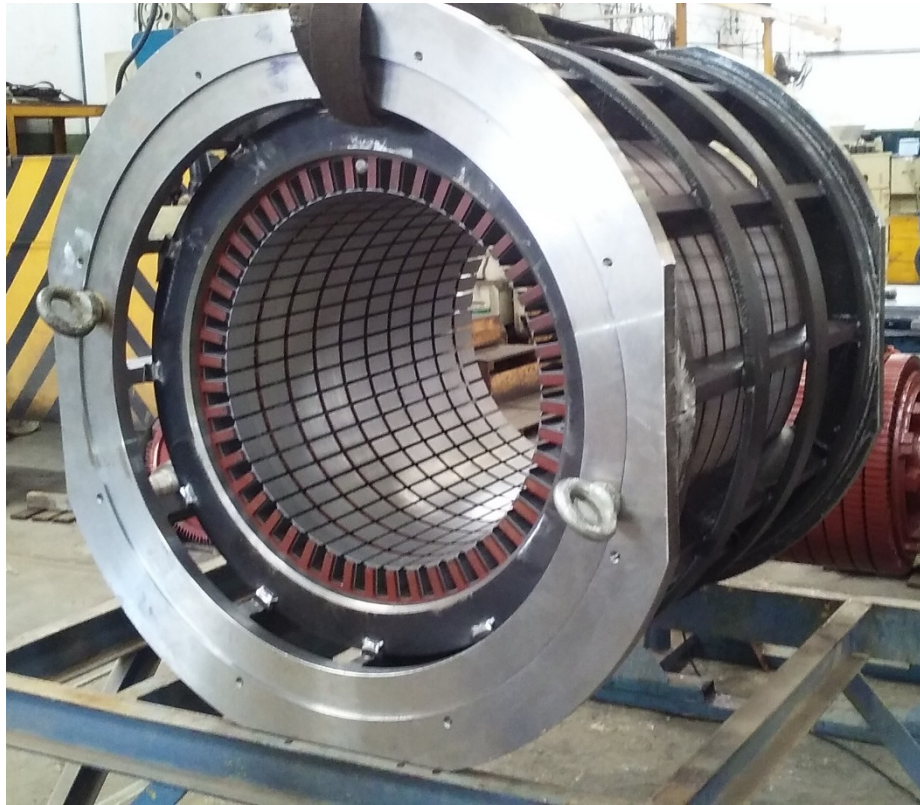
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CORTE TÍPICO DE REGULADOR DE INDUÇÃO RESFRIADO A AR



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CONSTRUÇÃO DO REGULADOR DE INDUÇÃO

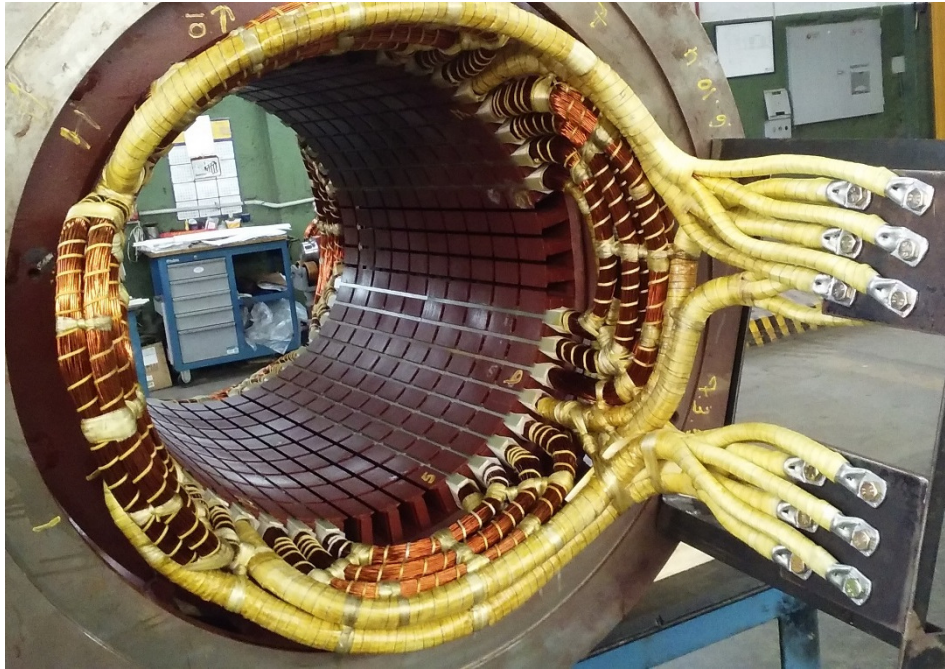


ESTATOR COM AS LÂMINAS DO
NÚCLEO MAGNÉTICO MONTADAS



NÚCLEO DO ROTOR PREPARADO
PARA O PROCESSO DE ENROLAMENTO

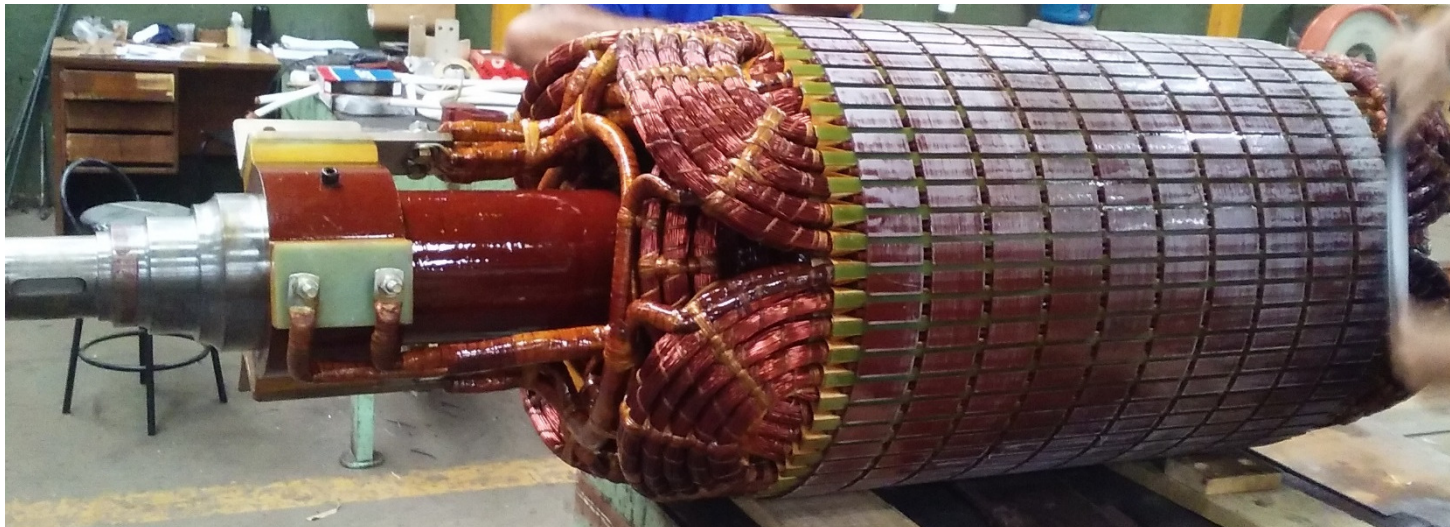
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO



REGULADOR MONOFÁSICO EM
BANHO DE ÓLEO PARA ELEVADA
CORRENTE DE SAÍDA – 6500 A

ESTATOR COM
ENROLAMENTO
CONCLUÍDO

ROTOR COM ENROLAMENTO
CONCLUÍDO



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR MONOFÁSICO EM BANHO DE ÓLEO: 50 / 250V – 6.500 A - BANCO 3 ϕ – 4.600 kVA



REGULADOR TRIFÁSICO RESFRIADO A AR: 0 / 760V – 1.500 A - 2.000 kVA

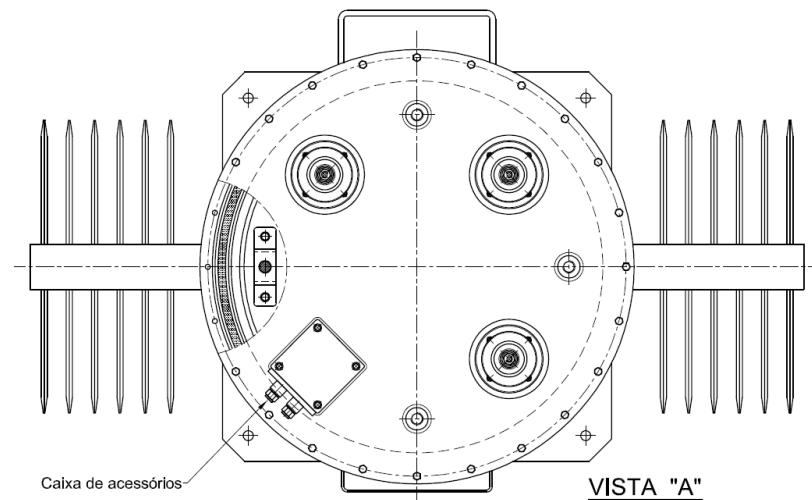
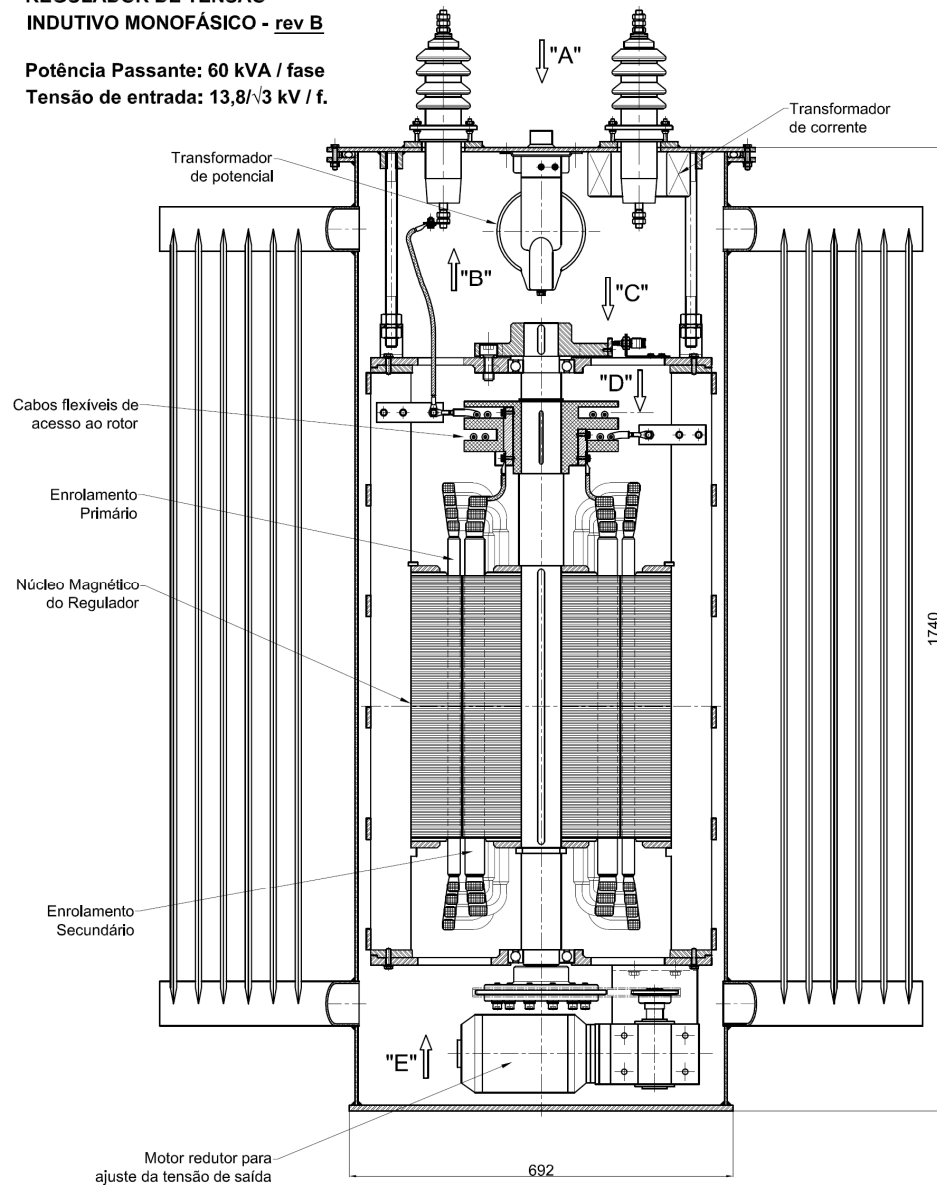


PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR MONOFASICO PROPOSTO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO

REGULADOR DE TENSÃO
INDUTIVO MONOFÁSICO - rev B

Potência Passante: 60 kVA / fase
Tensão de entrada: $13,8/\sqrt{3}$ kV / f.



POTÊNCIA TOTAL: 1.200 kVA EM BANCO TRIFÁSICO

TENSÃO 13,8 kV

FAIXA DE REGULAÇÃO DA TENSÃO: $\pm 15\%$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR MONOFÁSICO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO - PROJETO EPUSP / EDP / ANEEL



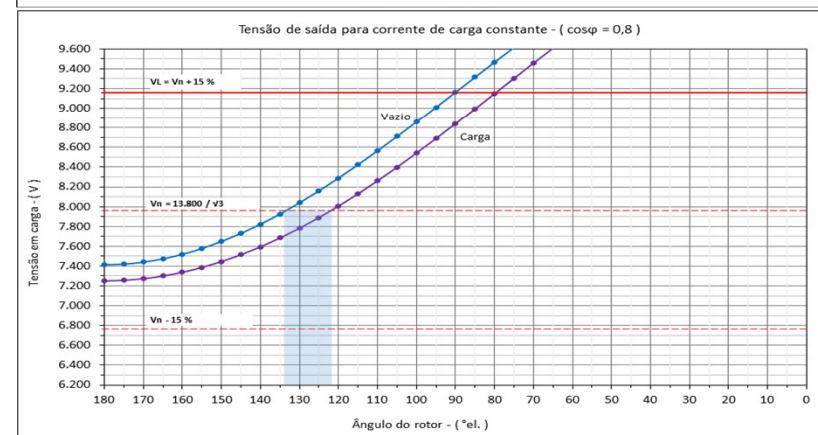
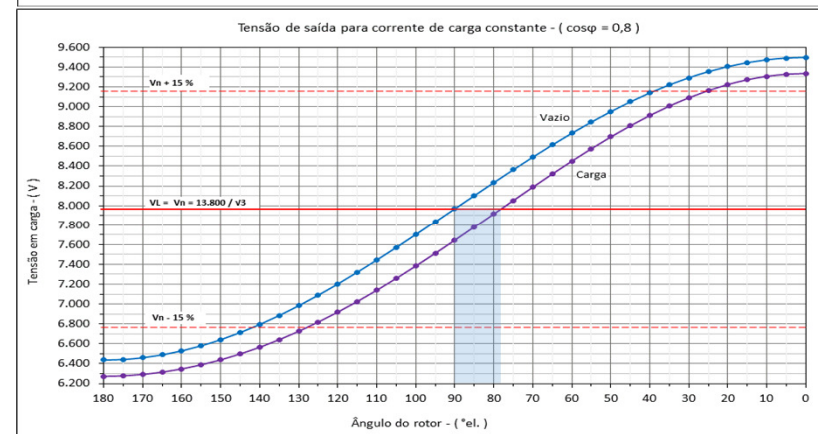
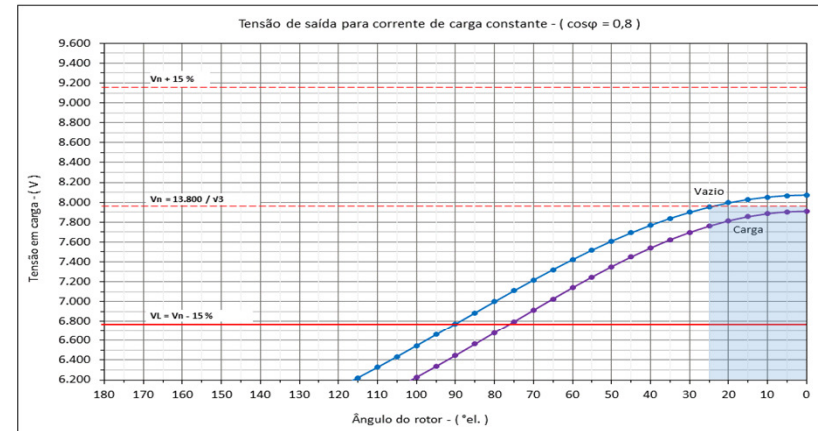
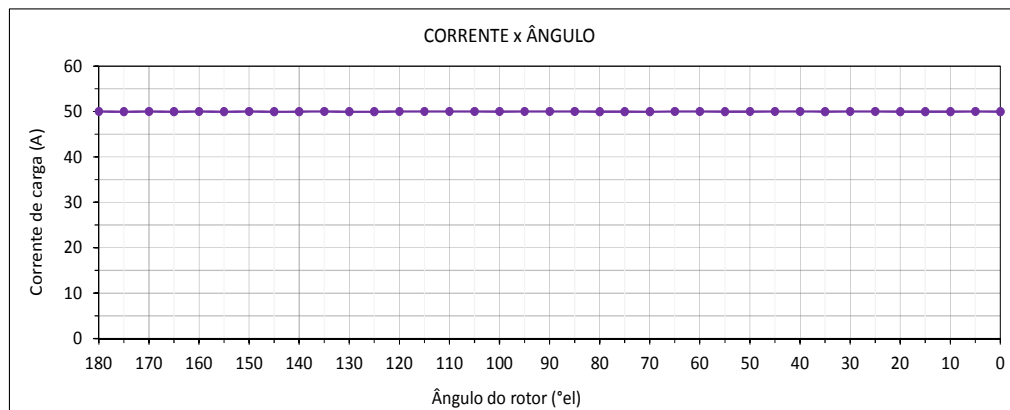
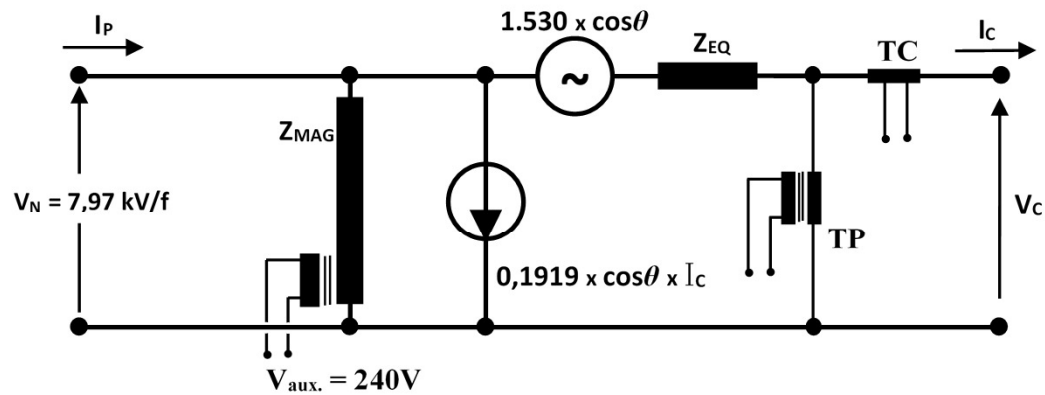
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE E

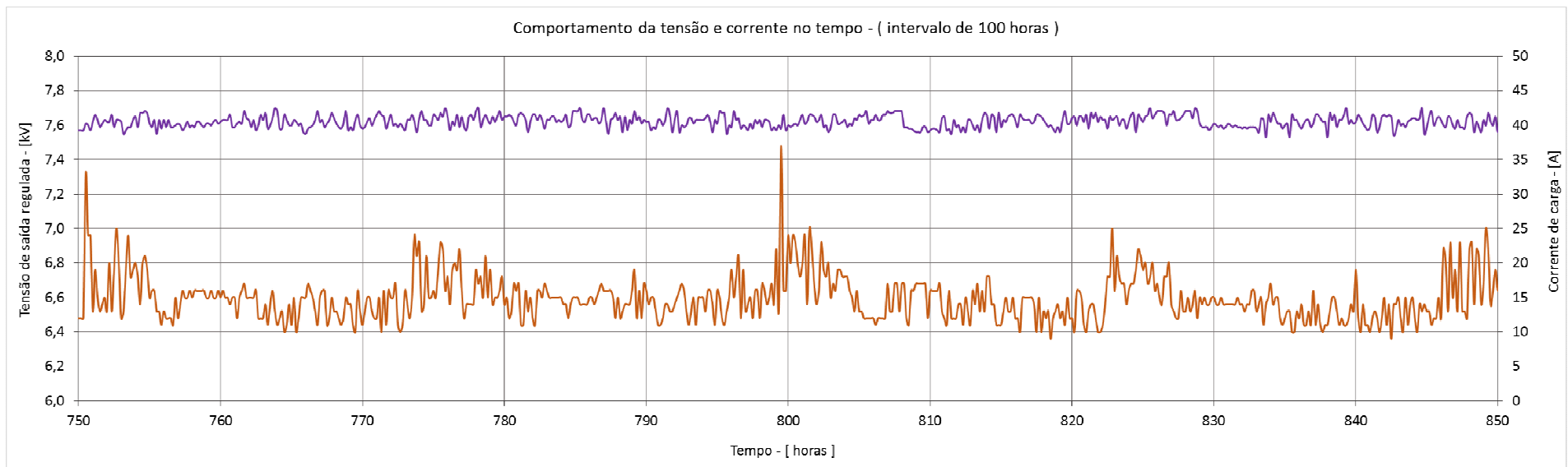
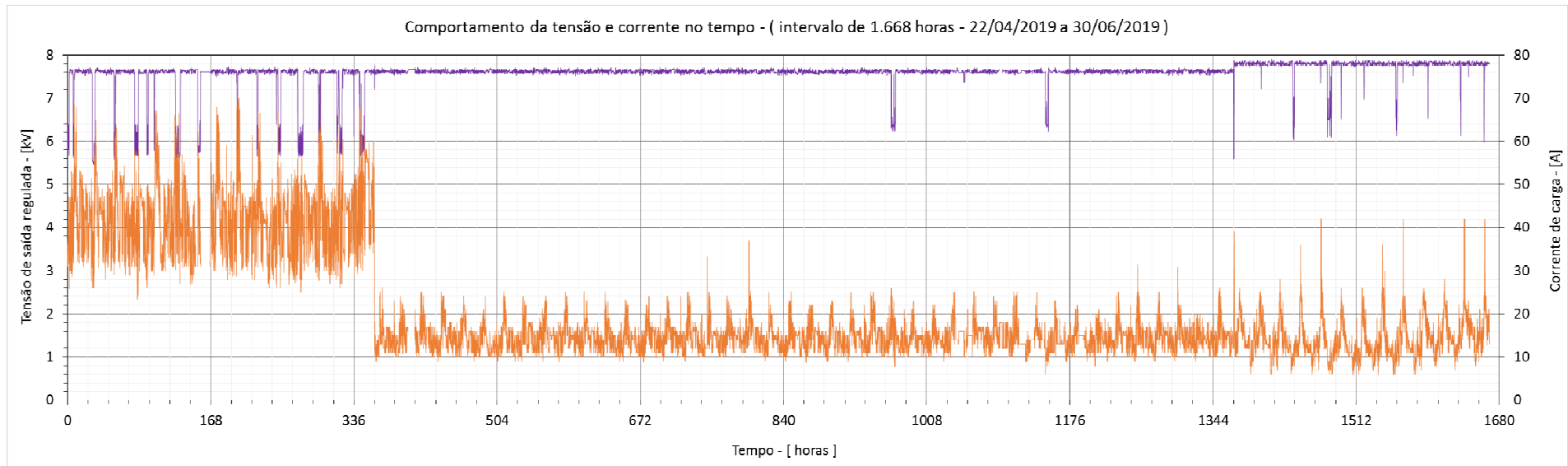
CARACTERÍSTICAS DE REGULAÇÃO

REGULADOR PROPOSTO PARA SISTEMAS DE

DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

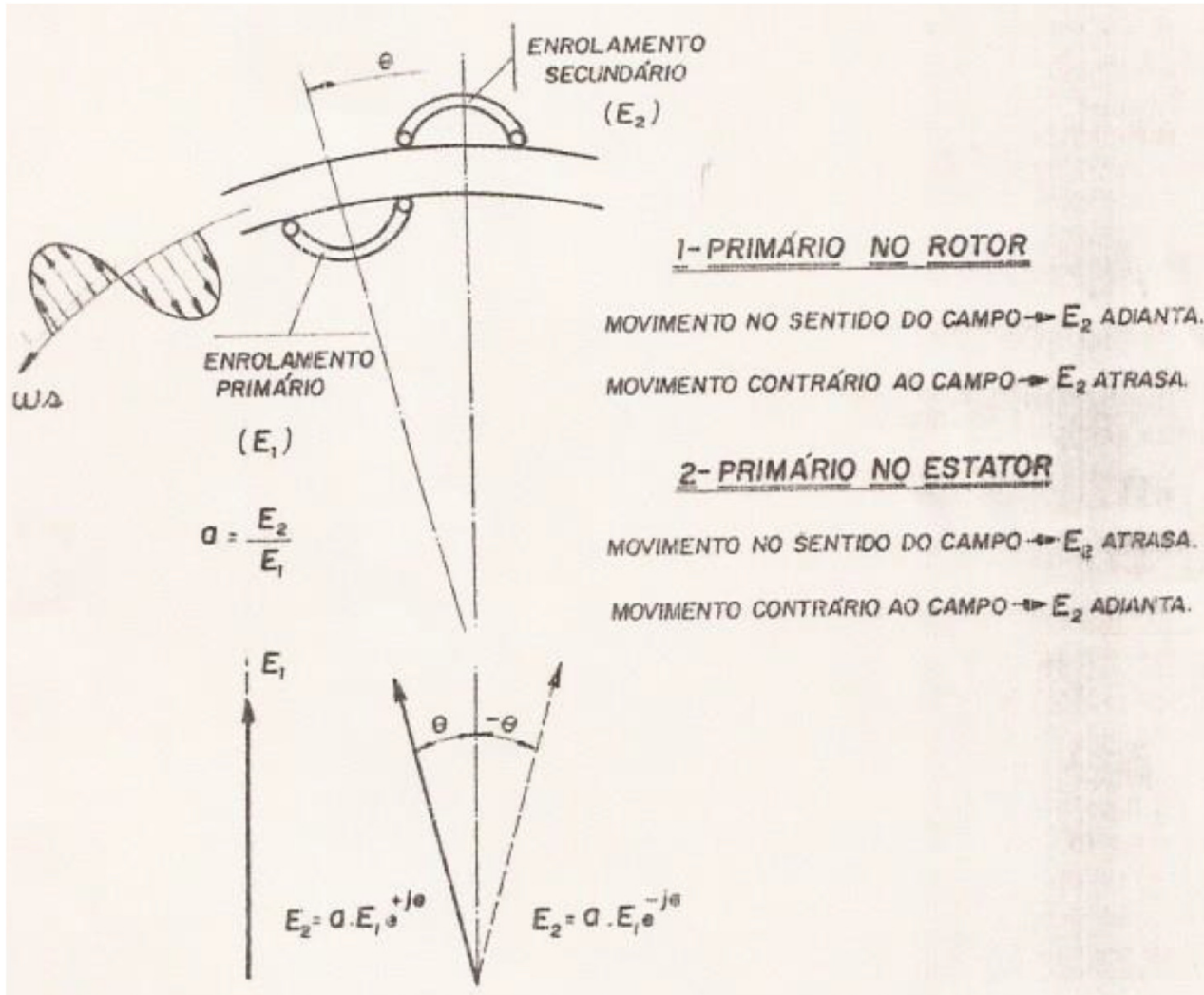


PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

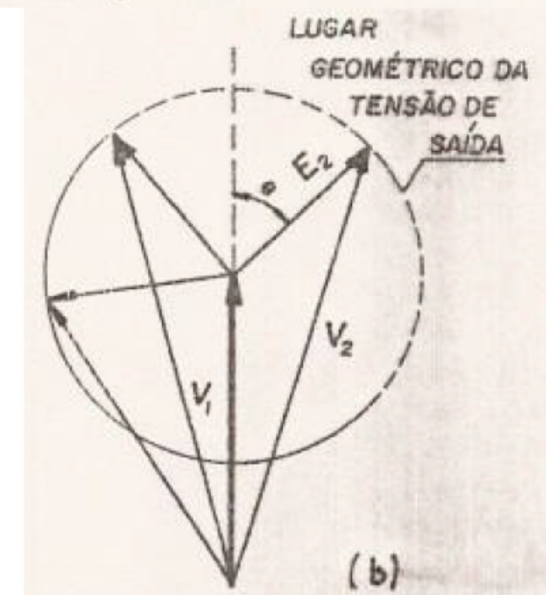
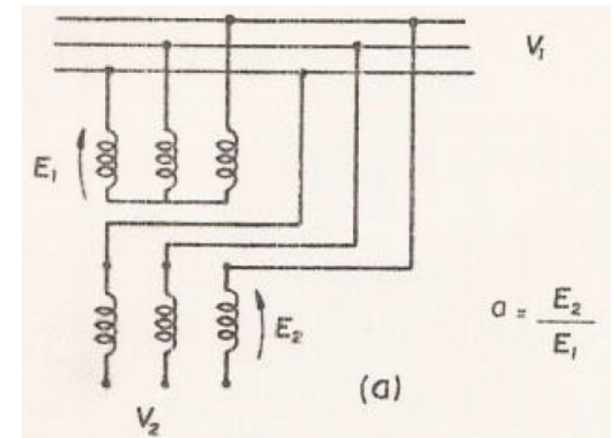
FUNCIONAMENTO DO REGULADOR TRIFÁSICO



TENSÃO SECUNDÁRIA DE FASE VARIÁVEL, INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO

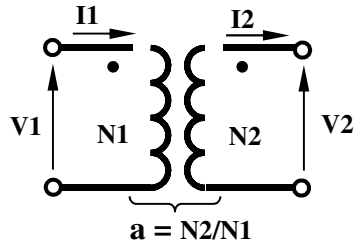
CONEXÃO COMO AUTO-TRANSFORMADOR

\rightarrow TENSÃO RESULTANTE DE MÓDULO VARIÁVEL



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REVISÃO DO COMPORTAMENTO DE AUTOTRANSFORMADORES EM GERAL



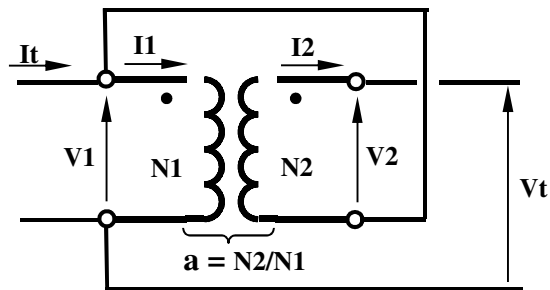
TRANSFORMADOR CONVENCIONAL:

EXEMPLO: 10 kVA - $V_1 = 100 \text{ V}$ - RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: $a = 0,2$

$$\rightarrow V_2 = a \cdot V_1 = 0,2 \times 100 = 20 \text{ V}$$

$$\rightarrow I_1 = 10.000/100 = 100 \text{ A} \rightarrow I_2 = (1/a) \cdot I_1 = (1/0,2) \times 100 = 500 \text{ A}$$

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



CONEXÃO COMO AUTOTRANSFORMADOR:

TENSÃO DE SAÍDA TOTAL É A SOMA FASORIAL DE V1 E V2

$$\rightarrow V_t = V_1 + V_2 = V_1 + a \cdot V_1 = (1+a) \cdot V_1 \rightarrow V_t = 100 + 20 = 120 \text{ V}$$

CORRENTE TOTAL DE ENTRADA É A SOMA FASORIAL DE I1 E I2

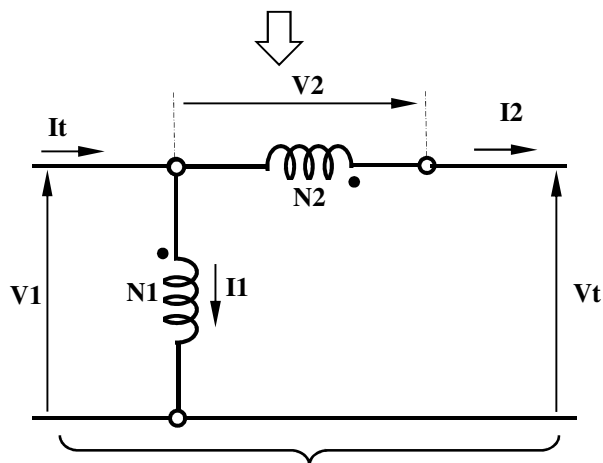
$$\rightarrow I_t = I_1 + I_2 = I_1 + (1/a) \cdot I_1 = (1 + 1/a) \cdot I_1 \rightarrow I_t = 100 + 500 = 600 \text{ A}$$

POTÊNCIA TOTAL DO AUTOTRANSFORMADOR:

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

$$\rightarrow S_t = [(1+0,2)/0,2] \cdot S_p = 6 \cdot S_p$$

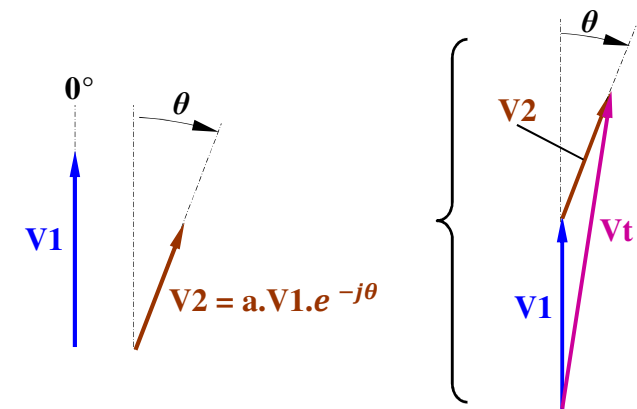
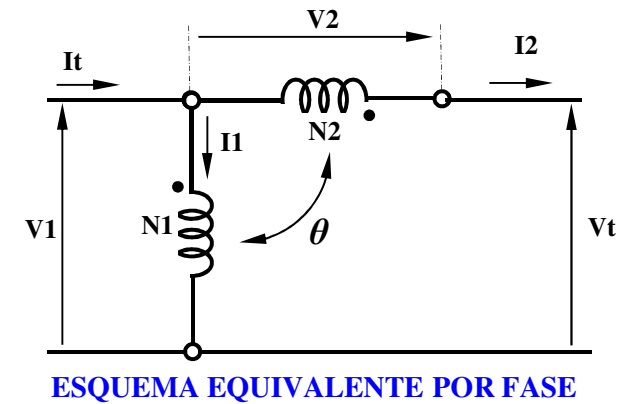
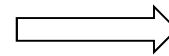
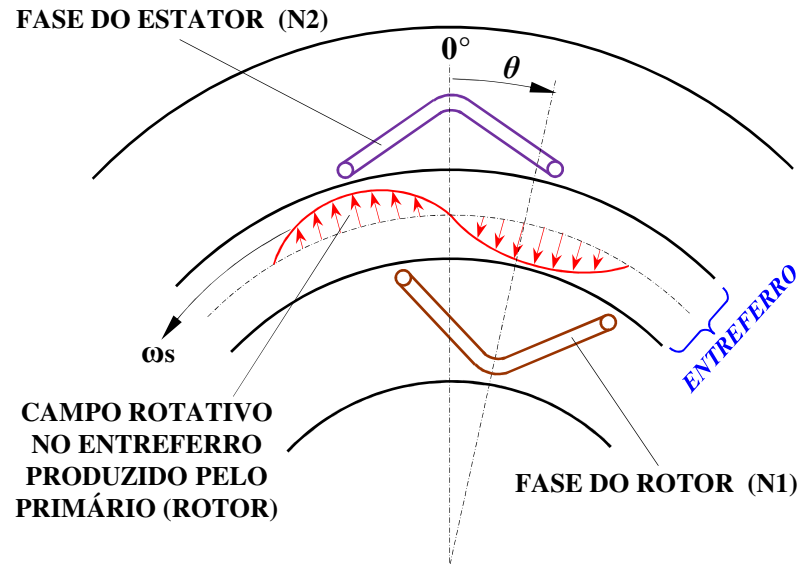
$$\rightarrow S_t = V_1 \cdot I_t = V_t \cdot I_2 = 100 \times 600 = 120 \times 500 = 60 \text{ kVA}$$



ESQUEMA EQUIVALENTE

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

APLICAÇÃO DA CARACTERÍSTICAS DE AUTOTRANSFORMADOR AO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO :



$$V_t = V_1 + V_2$$

$$V_t = V_1 + a.V_1.e^{-j\theta} = V_1(1 + a.e^{-j\theta})$$

TENSÃO DE ENTRADA – PRIMÁRIO (NO ROTOR) : V_1

→ TOMADA COMO REFERÊNCIA DE ÂNGULO : $V_1 / 0^\circ$ ou $(V_1.e^{j0^\circ})$

TENSÃO INDUZIDA NO SECUNDÁRIO (ESTATOR) : V_2

→ INDUZIDA POR EFEITO DO CAMPO ROTATIVO : V_2 / θ ou $(V_2.e^{-j\theta})$

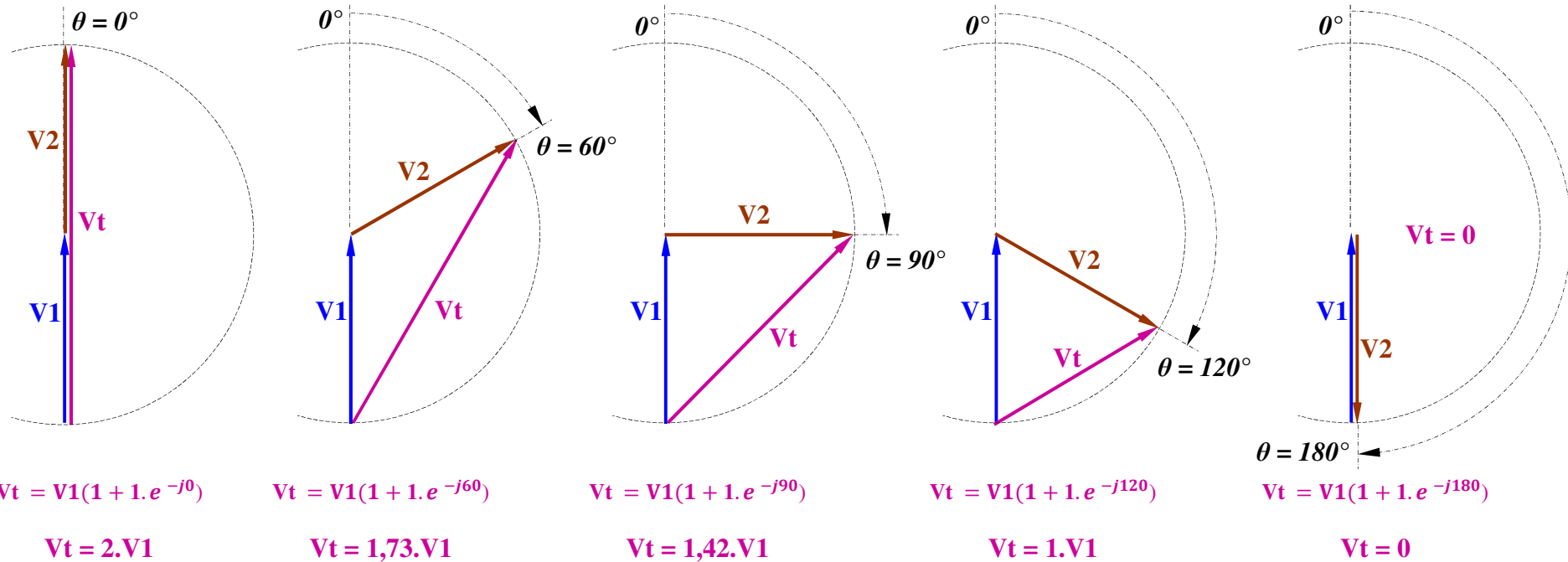
→ V_2 DEFASADA (EM ATRASO) DE V_1 DO ÂNGULO DE DESLOCAMENTO θ

RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO : $a = N_2/N_1$

→ $V_2 = a.V_1 = a.V_1.e^{-j\theta}$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXCURSÃO DE TENSÃO NO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO : $a = 1$



$$V_t = V_1(1 + a \cdot e^{-j\theta}) = V_1 \cdot \sqrt{(1 + a \cdot \cos\theta)^2 + (a \cdot \sin\theta)^2}$$

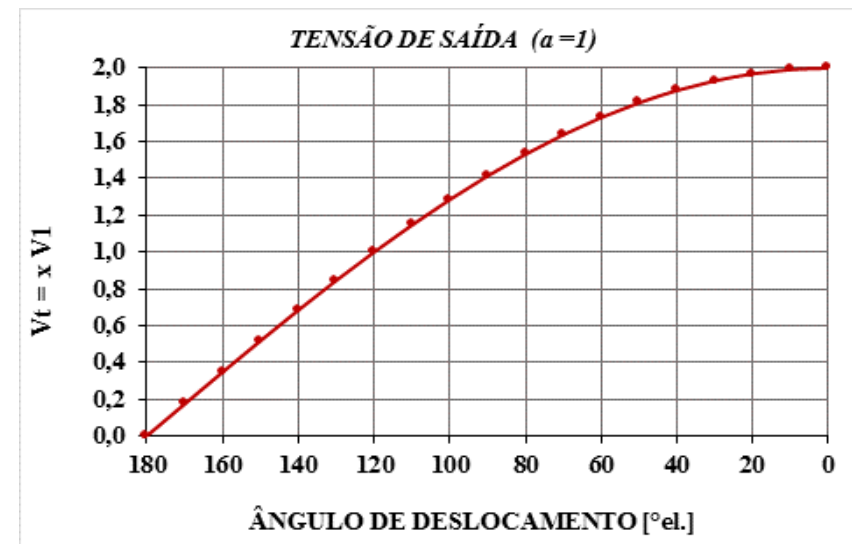
$$a = 1 \rightarrow V_2 = V_1 ; I_2 = I_1$$

→ FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : $0 \leq V_t \leq 2 \cdot V_1$

POTÊNCIA PASSANTE: $S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$

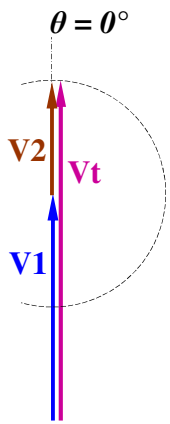
POTÊNCIA TOTAL MÁXIMA DE SAÍDA ($\theta = 0^\circ$) :

$$S_t = V_t \cdot I_2 = (2 \cdot V_1) \cdot I_2 = (2 \cdot V_1) \cdot I_1 = 2 \cdot S_p$$



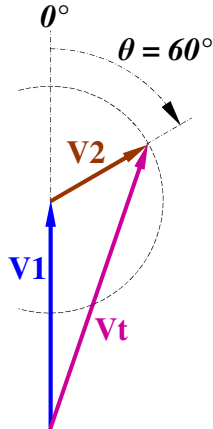
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXCURSÃO DE TENSÃO NO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO : $a = 0,5$



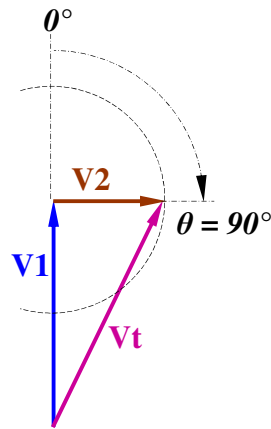
$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j0})$$

$$V_t = 1,5 \cdot V_1$$



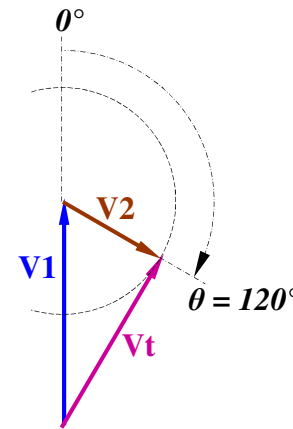
$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j60})$$

$$V_t = 1,32 \cdot V_1$$



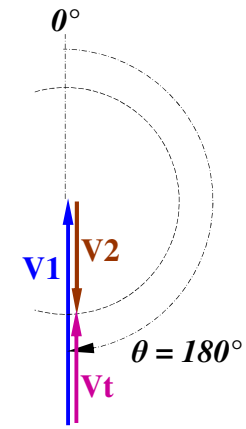
$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j90})$$

$$V_t = 1,12 \cdot V_1$$



$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j120})$$

$$V_t = 0,87 \cdot V_1$$



$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j180})$$

$$V_t = 0,5 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + a \cdot e^{-j\theta}) = V_1 \cdot \sqrt{(1 + a \cdot \cos\theta)^2 + (a \cdot \sin\theta)^2}$$

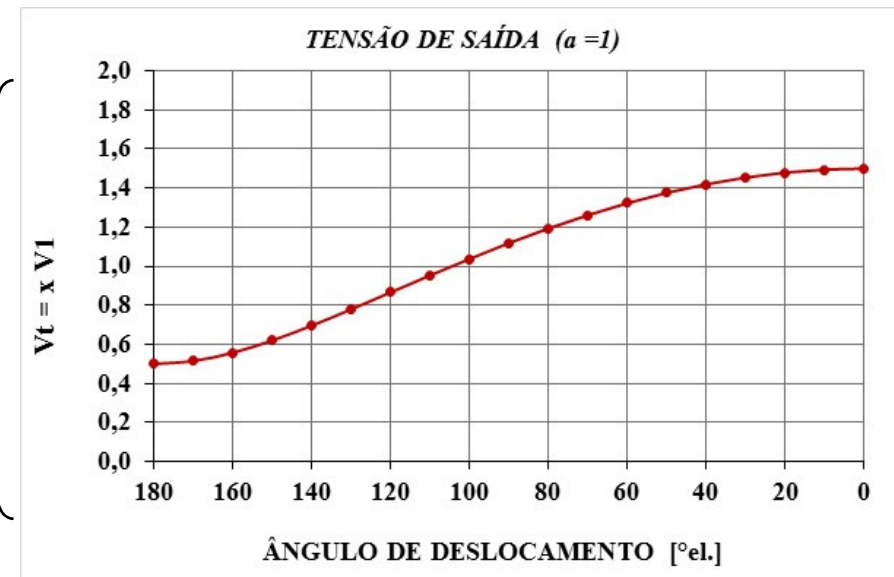
$$a = 0,5 \rightarrow V_2 = 0,5 \cdot V_1 ; I_2 = 2 \cdot I_1$$

→ FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : $0,5 \cdot V_1 \leq V_t \leq 1,5 \cdot V_1$

POTÊNCIA PASSANTE: $S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$

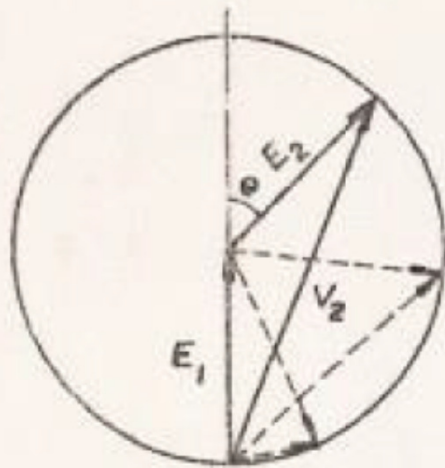
POTÊNCIA TOTAL MÁXIMA DE SAÍDA ($\theta = 0^\circ$) :

$$S_t = V_t \cdot I_2 = (1,5 \cdot V_1) \cdot I_2 = (1,5 \cdot V_1) \cdot (2 \cdot I_1) = 3 \cdot S_p$$



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO: DETERMINADA PELA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

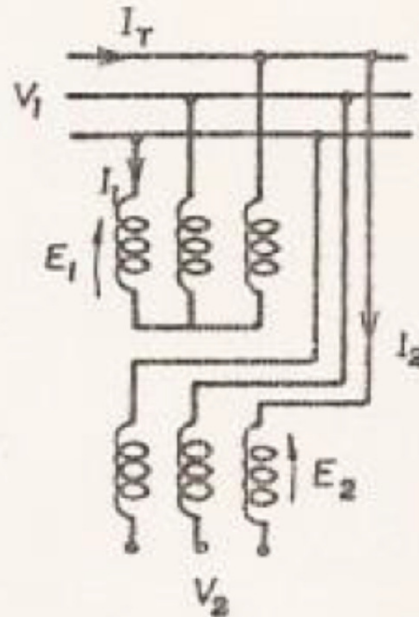


$$\sigma = \frac{E_2}{E_1} = 1 = \frac{I_1}{I_2}$$

FAIXA: $\begin{cases} V_2 = 0 \text{ (min)} \\ V_2 = 2 V_1 \text{ (max)} \end{cases}$

$$S_1 = V_1 I_1 ; S_2 = 2 V_1 I_2$$

POT. TRANSFERIDA: $S_{tr} = \frac{1}{2} S_2$



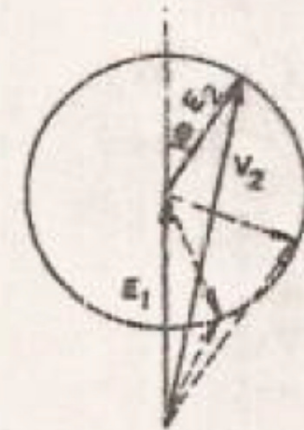
$$\sigma = \frac{E_2}{E_1} = 0,5 = \frac{I_1}{I_2}$$

FAIXA: $\begin{cases} V_2 = 0,5 V_1 \text{ (min)} \\ V_2 = 1,5 V_1 \text{ (max)} \end{cases}$

$$S_1 = V_1 I_1 ; S_2 = 1,5 V_1 I_2$$

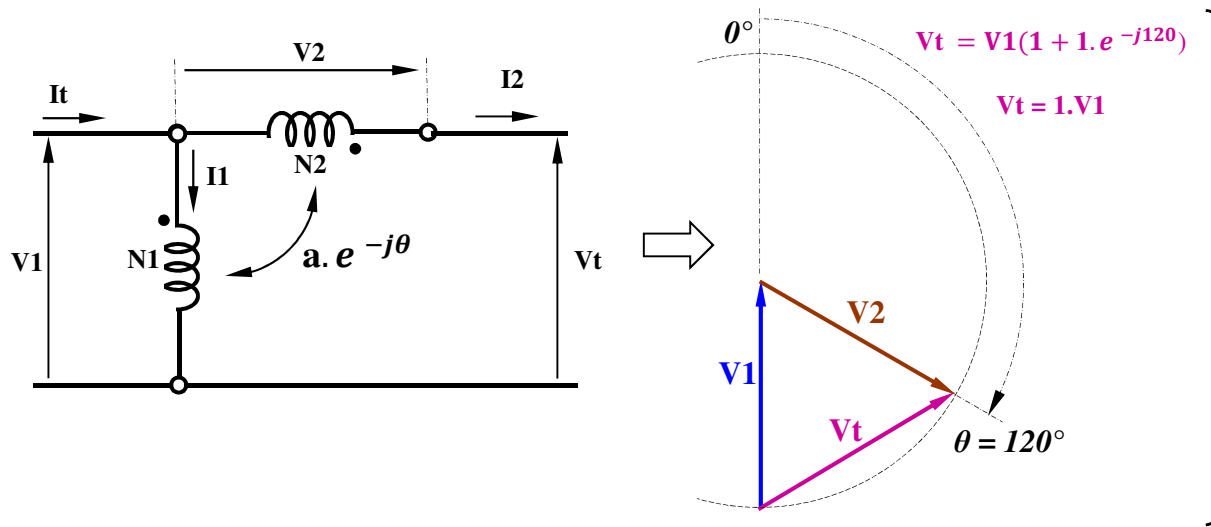
POT. TRANSFERIDA: $S_{tr} = \frac{1}{3} S_2$

POTÊNCIA TRANSFERIDA = POTÊNCIA PASSANTE
 → TRANSFERIDA ATRAVÉS DO CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO
 → $S_2 = S_t$: POTÊNCIA TOTAL NA CARGA



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FAIXA DE TENSÃO DE SAÍDA NÃO SIMÉTRICA EM RELAÇÃO À TENSÃO DE ENTRADA



$$V_t = V_1(1 + a \cdot e^{-j\theta})$$

$$a = 1 \rightarrow V_2 = V_1 ; I_2 = I_1$$

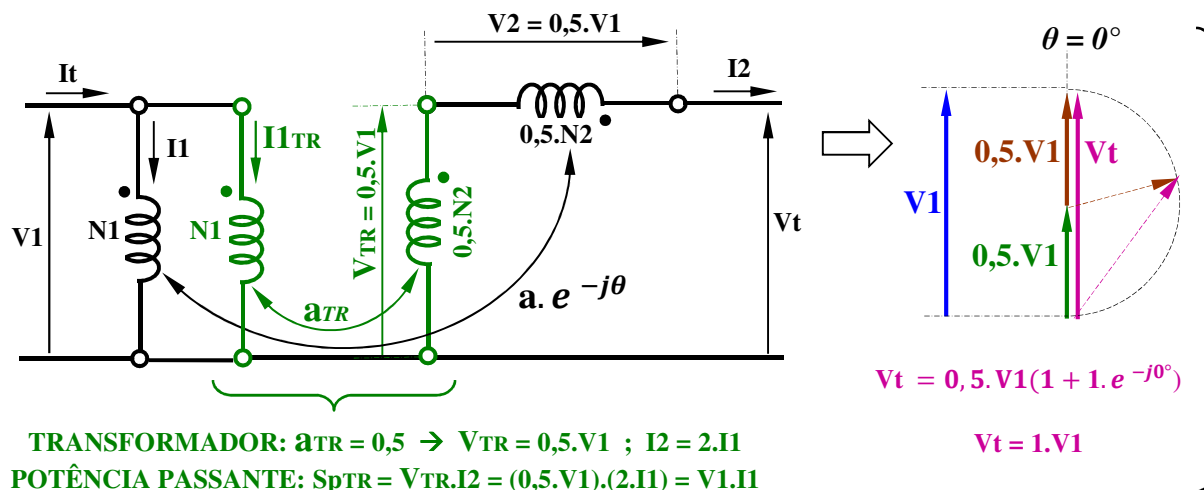
FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : $0 \leq V_t \leq V_1$
 $\rightarrow 180^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$

POTÊNCIA PASSANTE: $S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$

POTÊNCIA TOTAL DE SAÍDA
 NO LIMITE DA FAIXA ($\theta = 120^\circ$) :

$$S_t = V_t \cdot I_2 = V_1 \cdot I_2 = V_1 \cdot I_1 = S_p$$

FAIXA DE TENSÃO DE SAÍDA NÃO SIMÉTRICA COM TRANSFORMADOR INTERMEDIÁRIO AUXILIAR



REGULADOR: $a = 0,5 \rightarrow V_2 = 0,5 \cdot V_1 ; I_2 = 2 \cdot I_1$

POTÊNCIA PASSANTE: $S_p = V_2 \cdot I_2 = V_1 \cdot I_1$

$$V_t = V_{TR} + a \cdot V_1 \cdot e^{-j\theta}$$

FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : $0 \leq V_t \leq V_1$
 $\rightarrow 180^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$

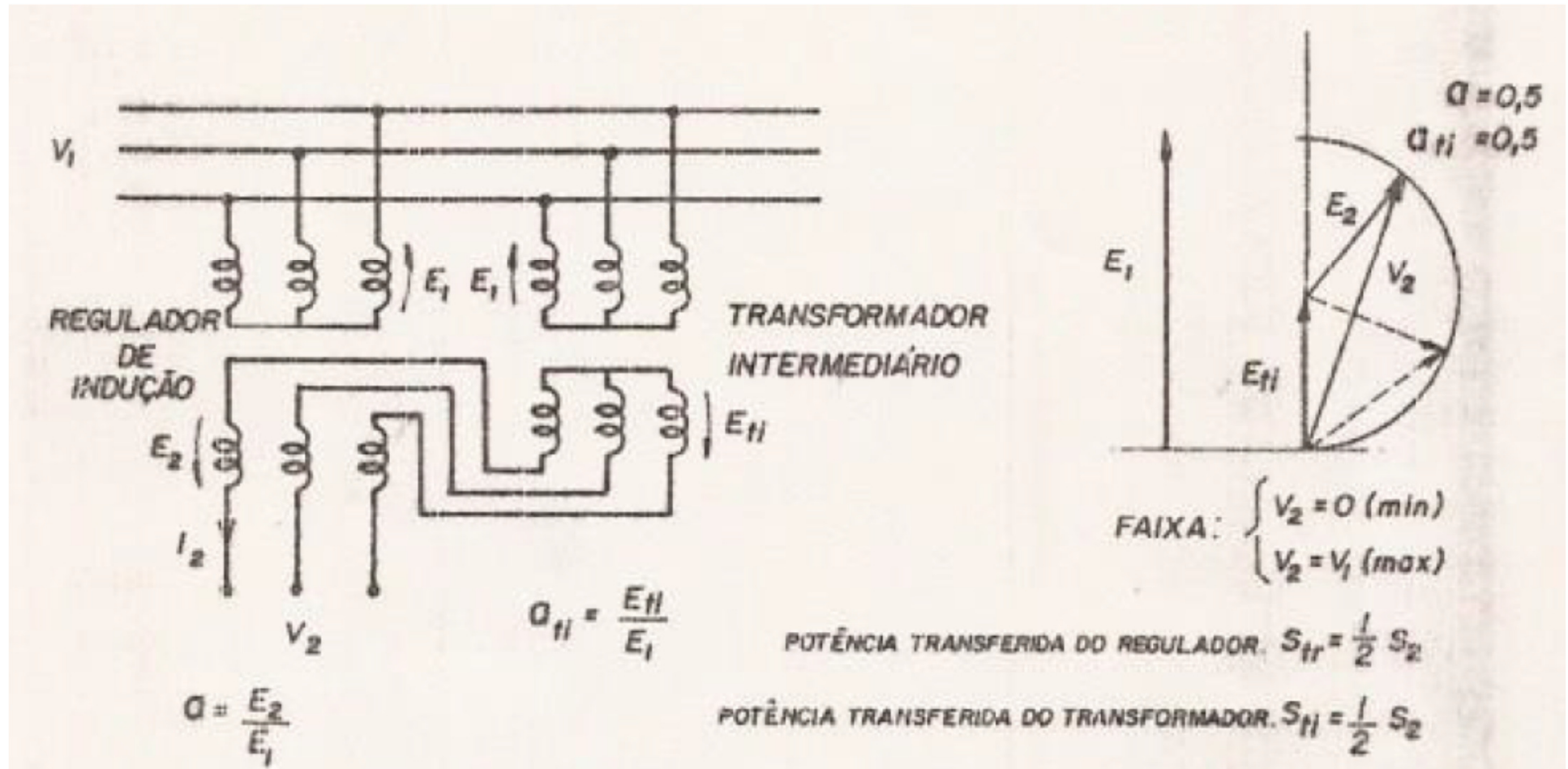
POTÊNCIA TOTAL DE SAÍDA
 NO LIMITE DA FAIXA ($\theta = 0^\circ$) :

$$S_t = V_t \cdot I_2 = V_1 \cdot I_2 = V_1 \cdot (2 \cdot I_1) = 2 \cdot S_p$$

TRANSFORMADOR: $a_{TR} = 0,5 \rightarrow V_{TR} = 0,5 \cdot V_1 ; I_2 = 2 \cdot I_1$
 POTÊNCIA PASSANTE: $S_{pTR} = V_{TR} \cdot I_2 = (0,5 \cdot V_1) \cdot (2 \cdot I_1) = V_1 \cdot I_1$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

ADAPTAÇÃO DA FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO COM O USO DE TRANSFORMADOR INTERMEDIÁRIO AUXILIAR



POTÊNCIA TRANSFERIDA = POTÊNCIA PASSANTE

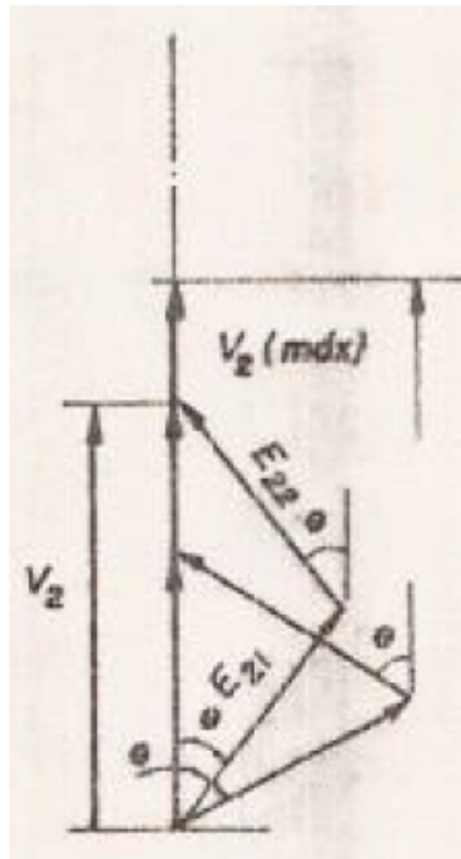
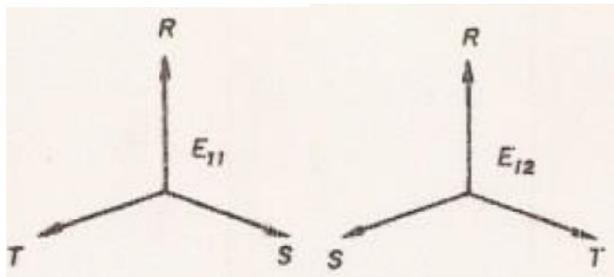
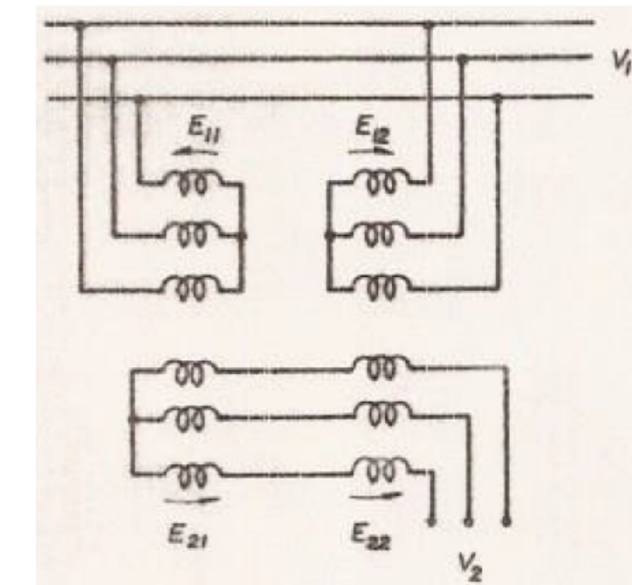
→ TRANSFERIDA ATRAVÉS DO CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO

→ $S_2 = S_t$: POTÊNCIA TOTAL NA CARGA

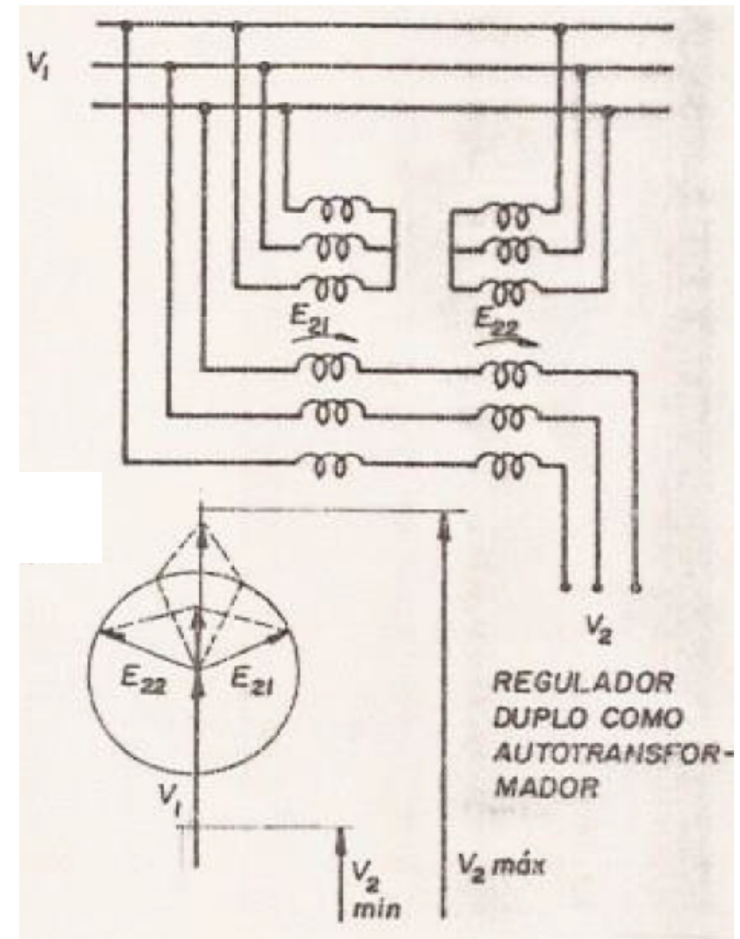
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

VARIANTES DE CONFIGURAÇÃO DO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

REGULADOR TRIFÁSICO DE CORPO DUPLO:
SECUNDÁRIO ISOLADO E TENSÃO DE SAÍDA
EM FASE COM A TENSÃO DE ENTRADA

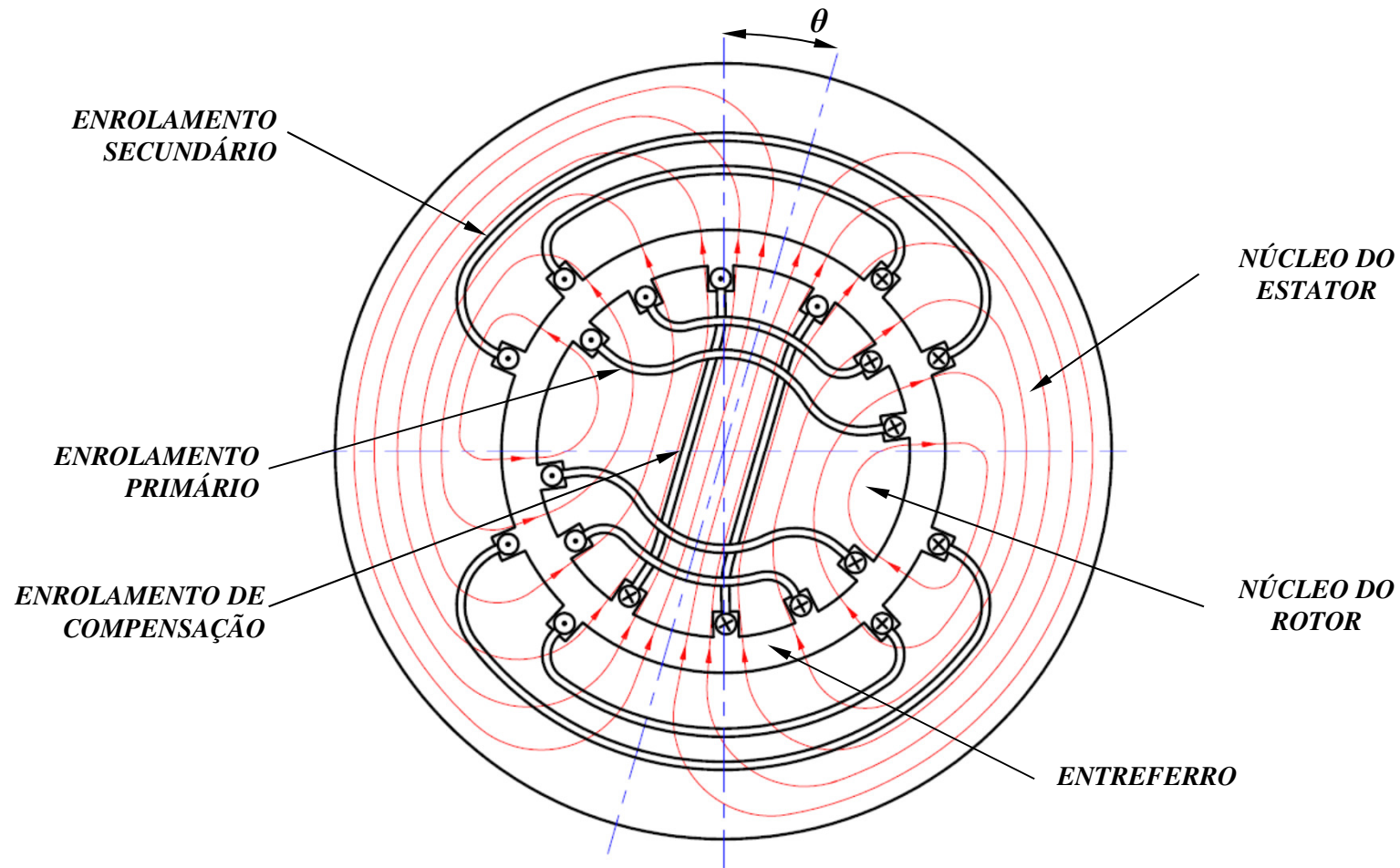


REGULADOR DUPLO COMO AUTO-
TRANSFORMADOR:
TENSÃO DE SAÍDA SEM DEFASAGEM
EM RELAÇÃO À TENSÃO DE ENTRADA



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO - PRINCÍPIO CONSTRUTIVO



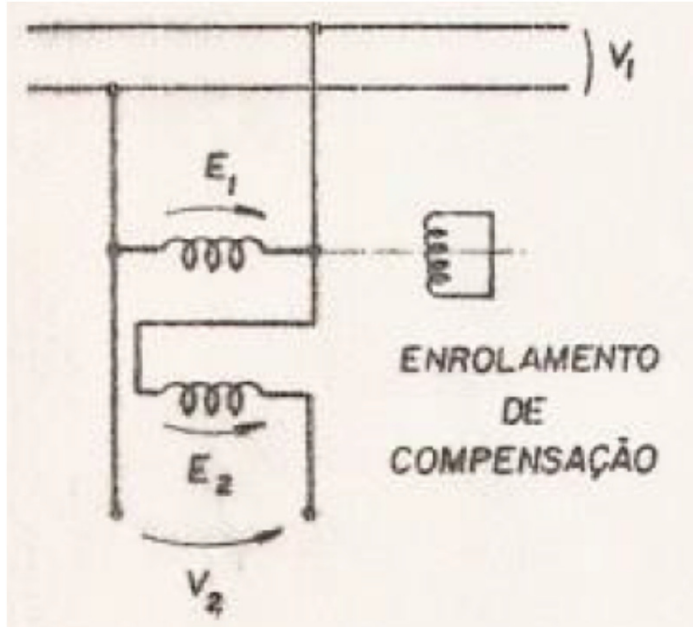
θ : ÂNGULO DE DESLOCAMENTO ENTRE ROTOR E ESTATOR (°el)

REGULADOR DE 2 POLOS: $0 < \theta < 180^\circ$ - REGULADOR DE 4 POLOS: $0 < \theta < 90^\circ$

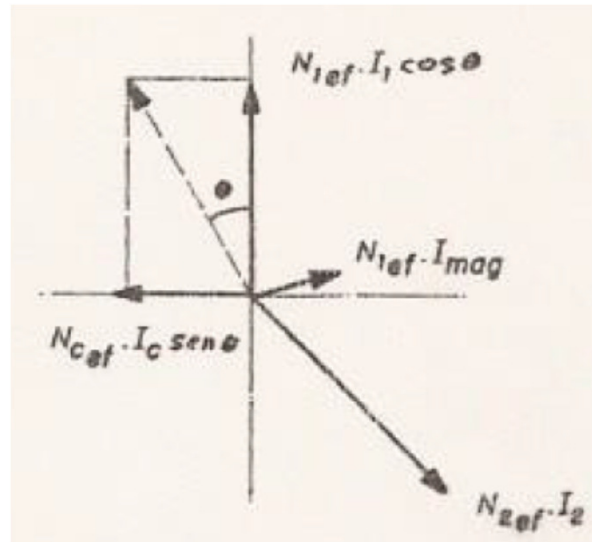
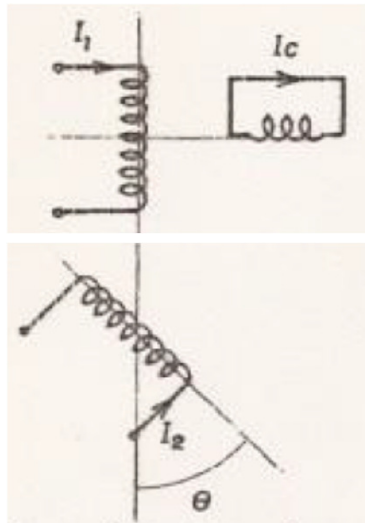
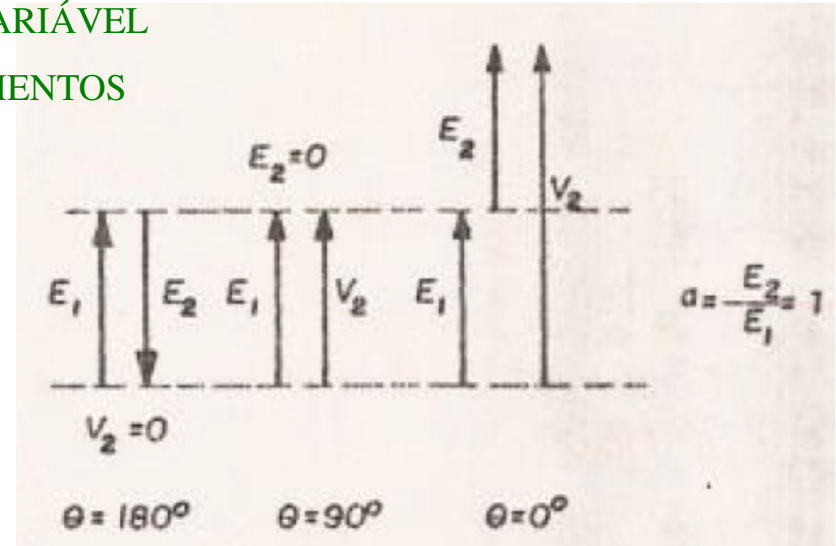
DESLOCAMENTO ANGULAR AJUSTADO POR MEIO DE SERVO MOTOR

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FUNCIONAMENTO DO REGULADOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO



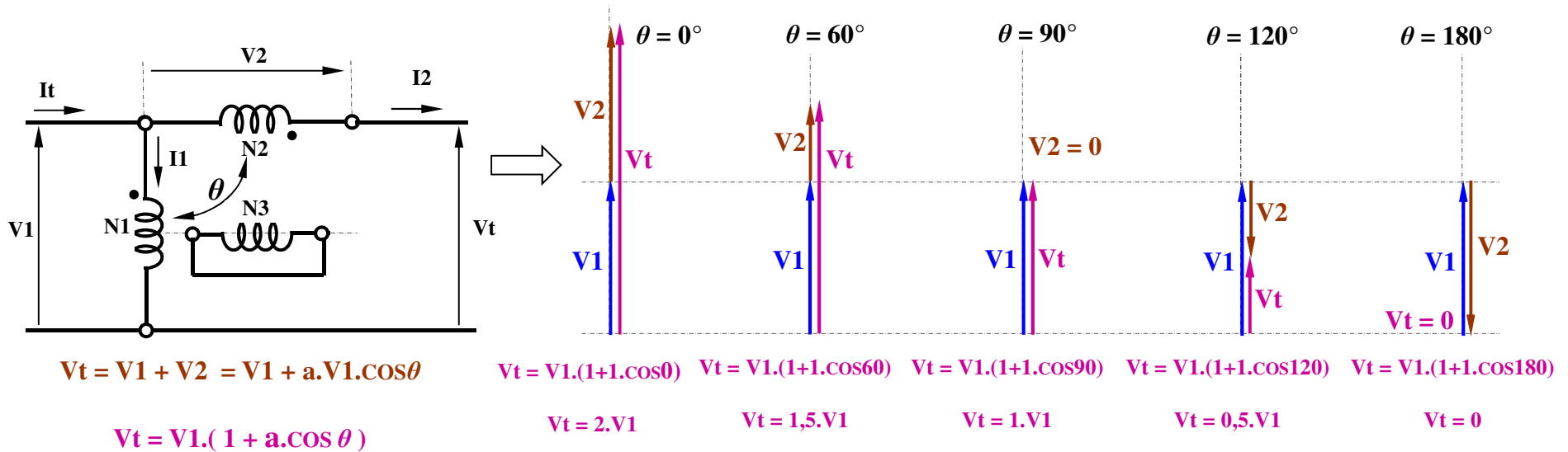
ACOPLAMENTO VARIÁVEL
ENTRE ENROLAMENTOS



EFEITO DO ENROLAMENTO DE
COMPENSAÇÃO NO EQUILÍBRIO TOTAL
DE FORÇAS MAGNETOMOTRIZES

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXCURSÃO DE TENSÃO DO REGULADOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO - $a = 1$



TENSÃO DE ENTRADA – PRIMÁRIO (NO ROTOR): V_1

→ TENSÕES INDUZIDAS EM FASE ENTRE SI

TENSÃO INDUZIDA NO SECUNDÁRIO (ESTATOR): V_2

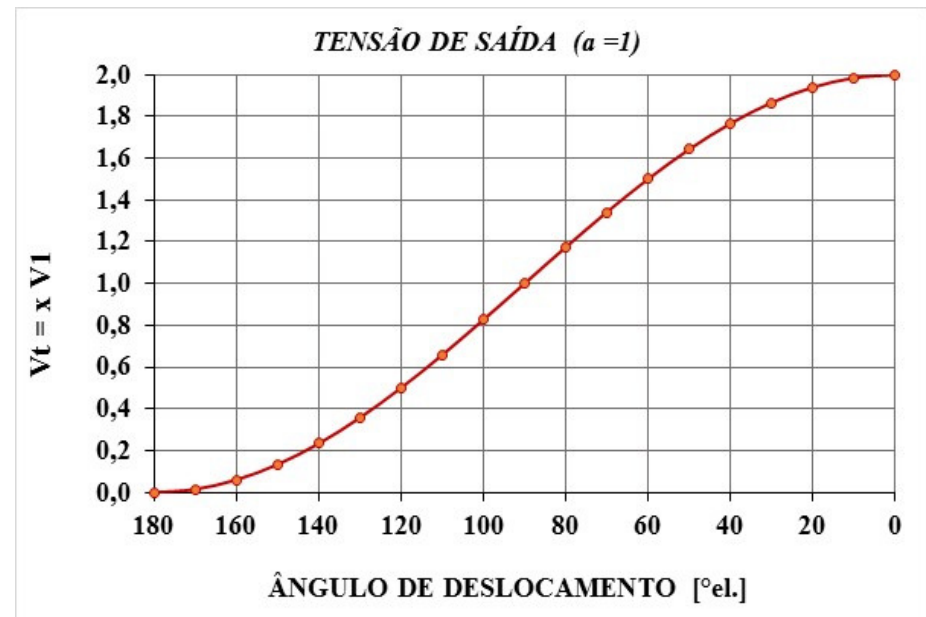
→ INDUZIDA POR EFEITO DO ACOPLAMENTO

MAGNÉTICO : $V_2(\theta) = V_2 \cdot \cos\theta$

RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO : $a = N_2/N_1$

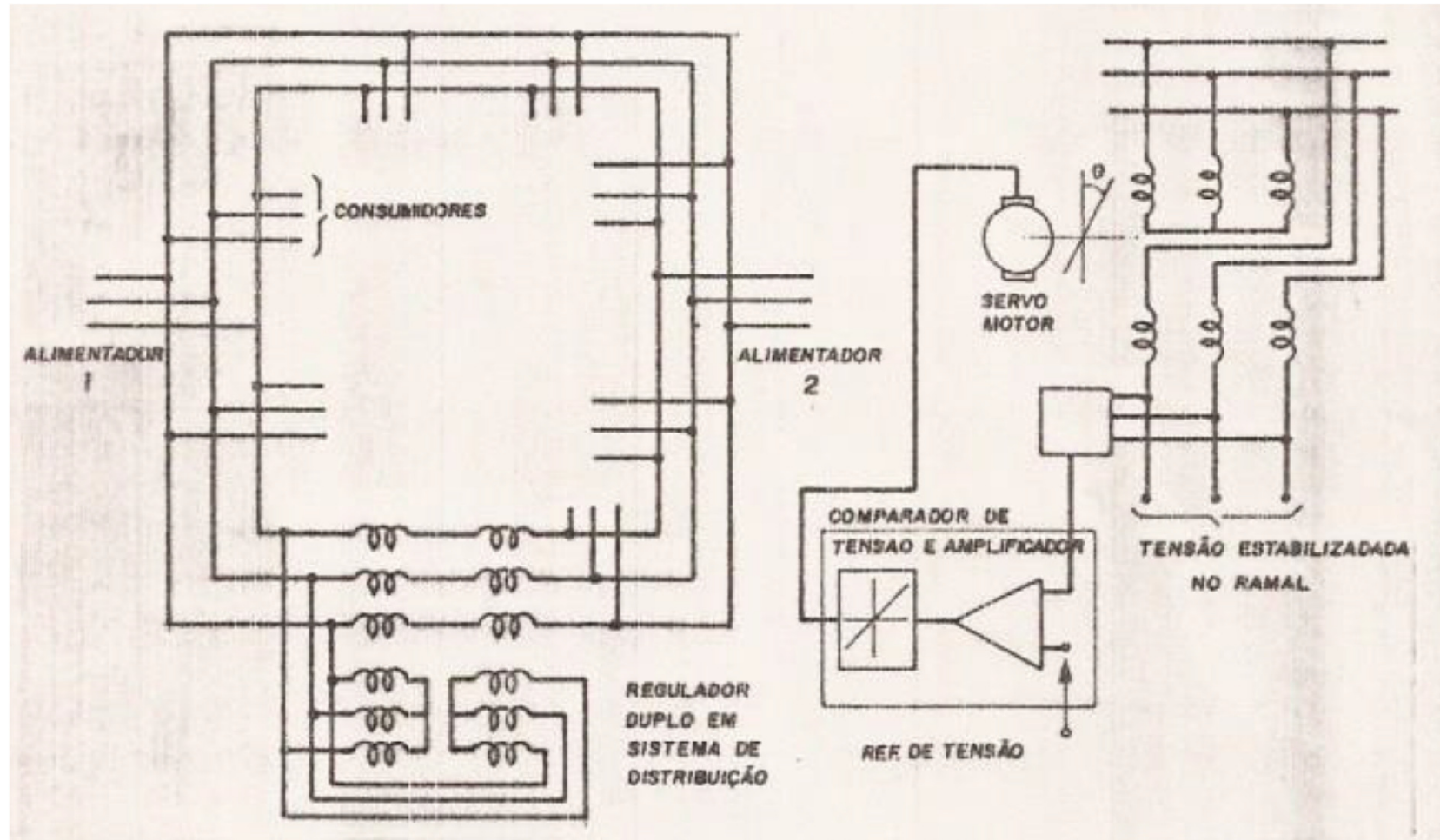
→ $V_2 = a \cdot V_1 = a \cdot V_1 \cdot \cos\theta$

→ $V_t = V_1 + V_2 = V_1 + a \cdot V_1 \cdot \cos\theta$



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE REGULADORES DE INDUÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

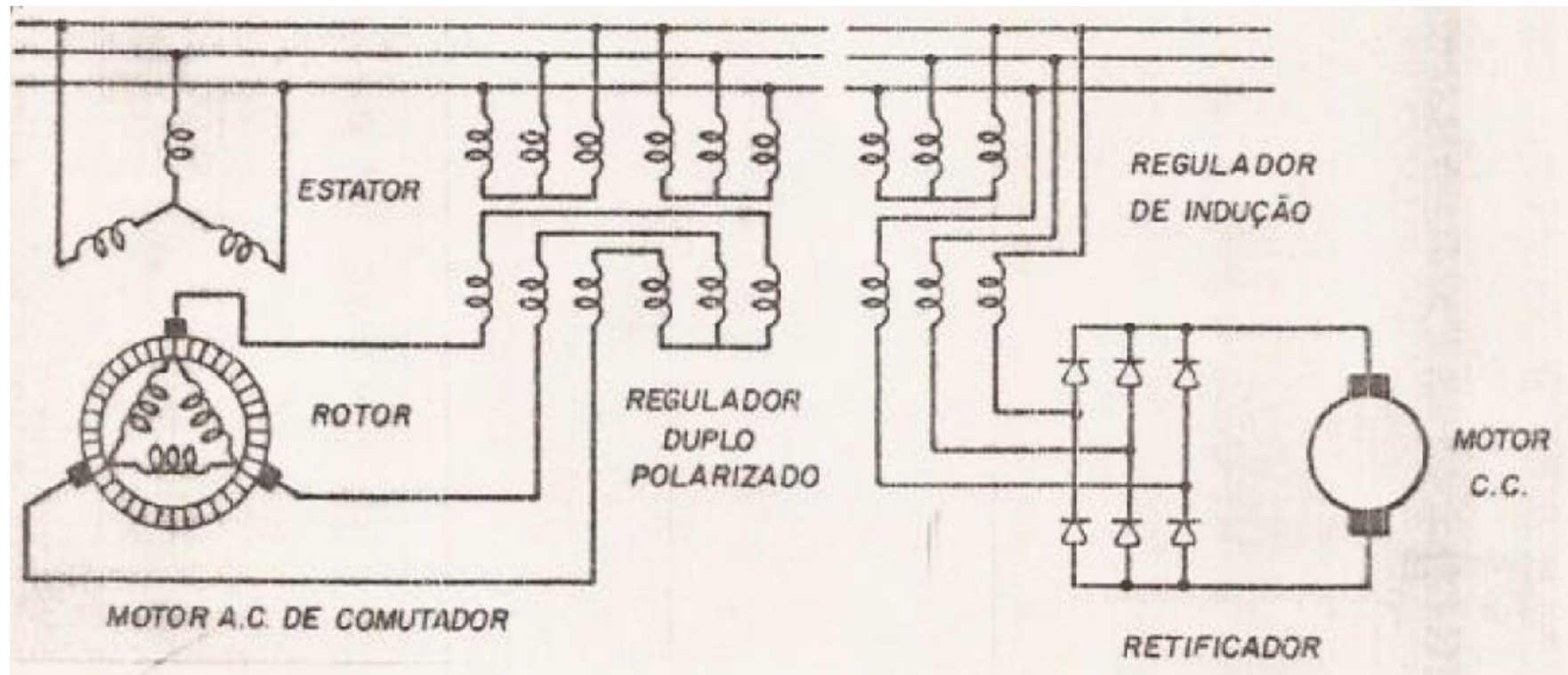


DIVISÃO DE CARGA ENTRE ALIMENTADORES
EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL

ESTABILIZAÇÃO DE TENSÃO EM RAMAIS COM
FORTE FLUTUAÇÃO DE TENSÃO DA REDE

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE REGULADORES DE INDUÇÃO EM ACIONAMENTOS

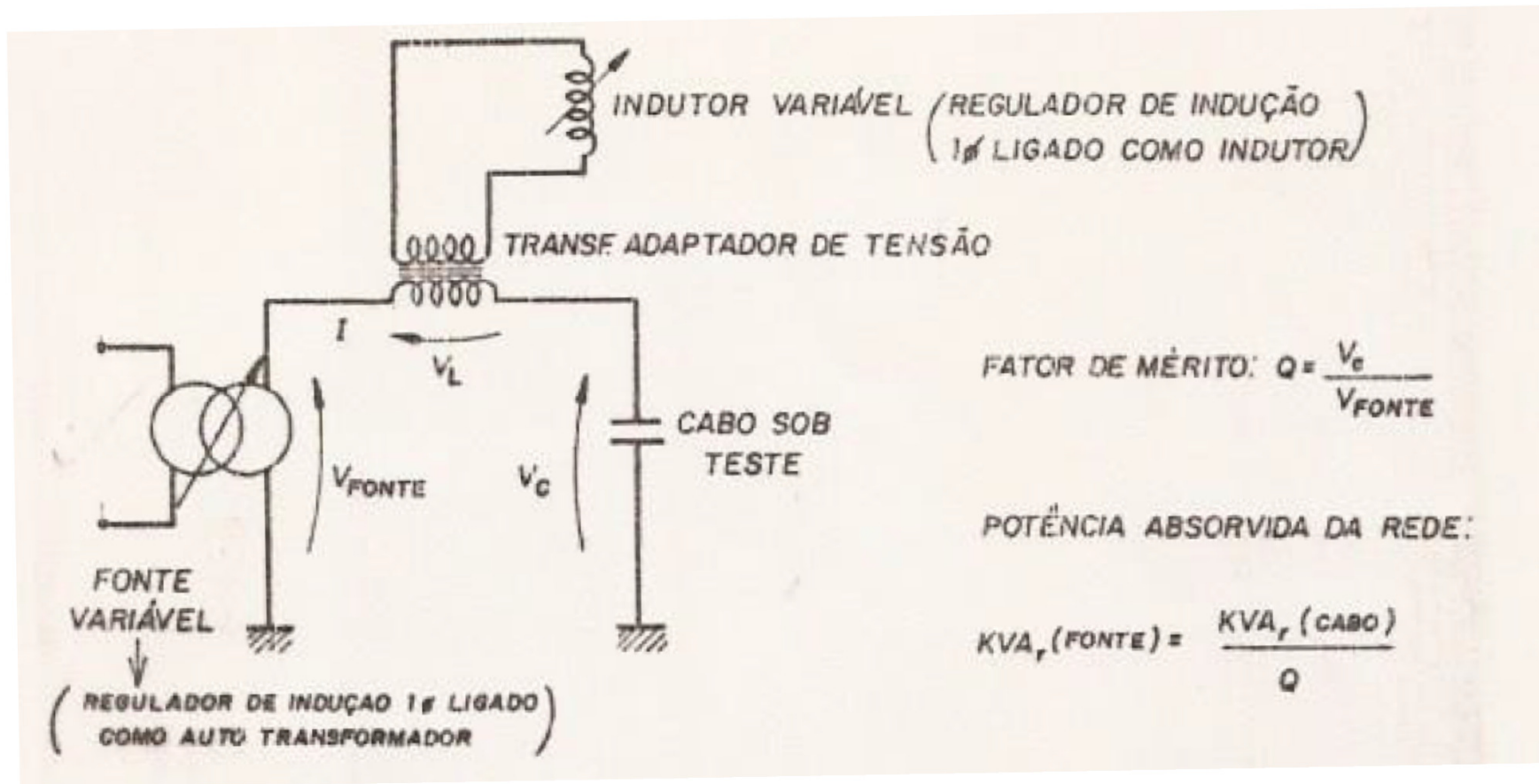


ACIONAMENTO DE MOTORES C.A. DE COMUTADOR (EM DESUSO)

ACIONAMENTO DE MOTORES C.C. COM VARIAÇÃO DO LADO ALTERNADO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

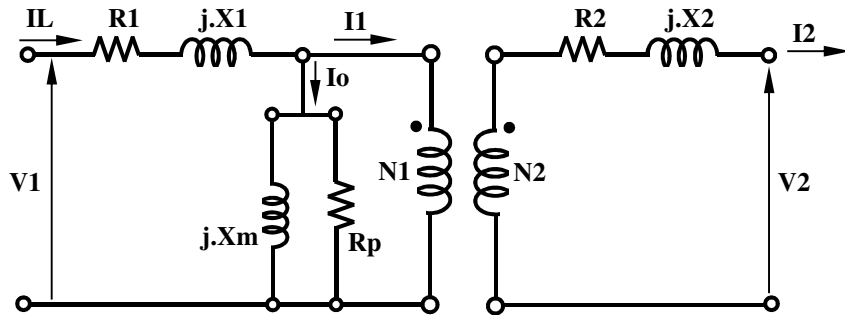
EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE REGULADORES DE INDUÇÃO EM LABORATÓRIOS DE ENSAIOS



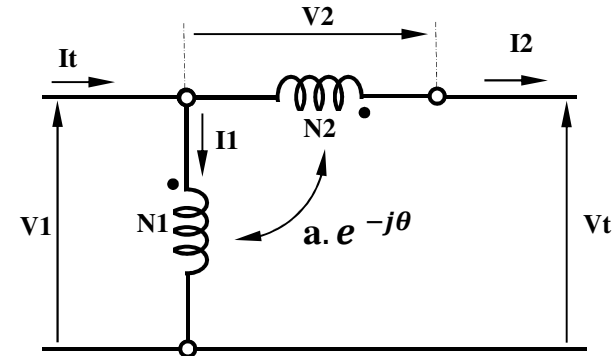
USO COMO FONTE DE TENSÃO E COMO INDUTOR VARIÁVEL PARA
RESSONÂNCIA SÉRIE COM CARGAS FORTEMENTE CAPACITIVAS

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

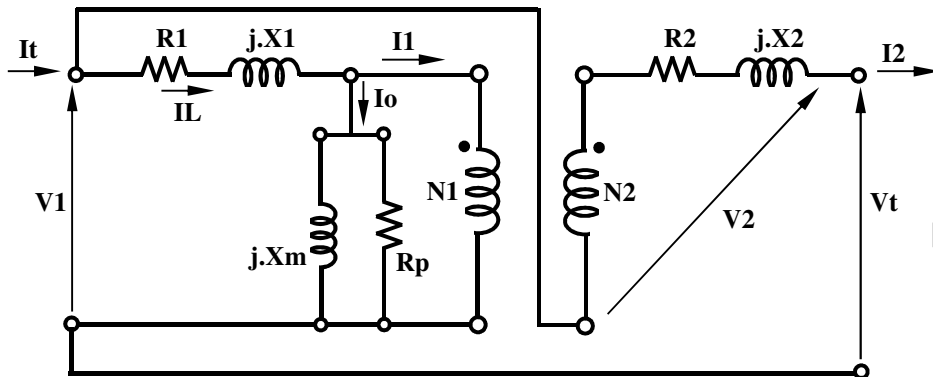
MODELAMENTO DO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



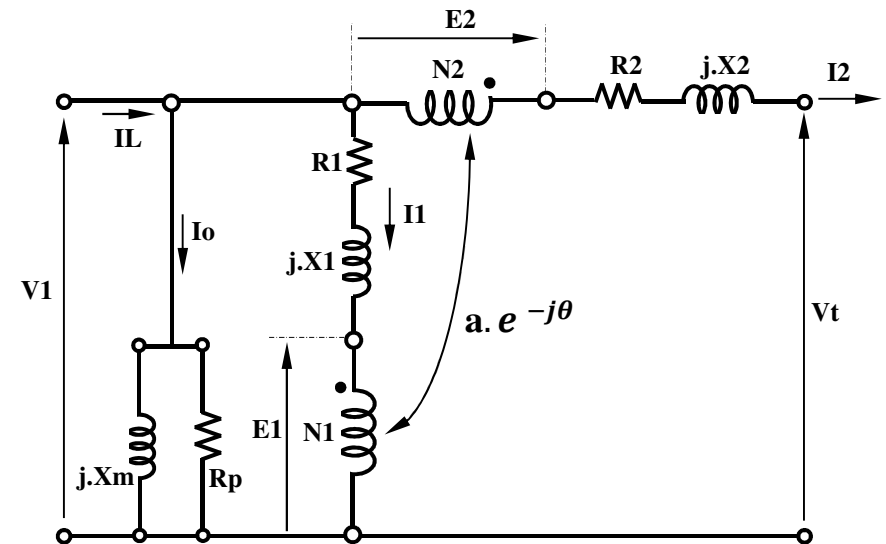
CIRCUITO EQUIVALENTE TRADICIONAL DO TRANSFORMADOR



CONEXÃO EQUIVALENTE COMO AUTOTRANSFORMADOR



CIRCUITO EQUIVALENTE COMO AUTOTRANSFORMADOR



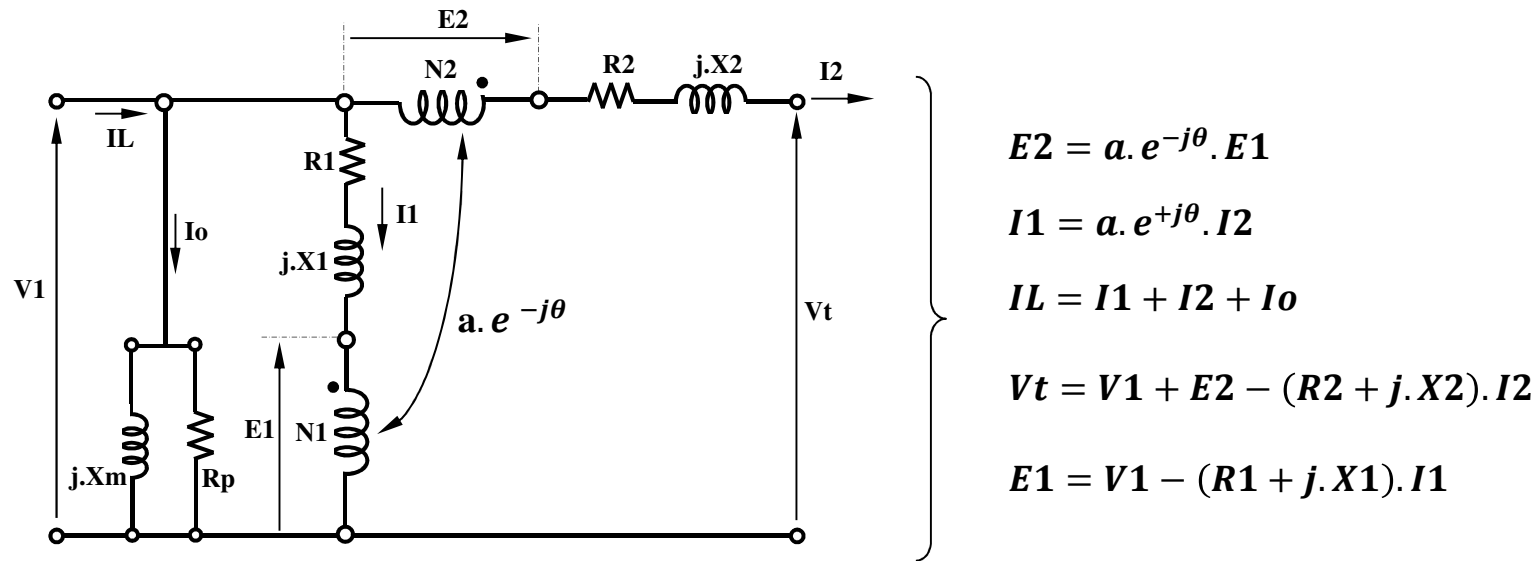
CIRCUITO EQUIVALENTE COMO AUTOTRANSFORMADOR

SIMPLIFICADO (RAMO MAGNETIZANTE NA ENTRADA)

MODELO OBTIDO DIRETAMENTE A PARTIR DE ADAPTAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE TRADICIONAL

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELAMENTO DIRETO DO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MODELO POR FASE)



$$Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} [V1 - (R1 + j \cdot X1) \cdot I1] - (R2 + j \cdot X2) \cdot I2$$

$$Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} [V1 - (R1 + j \cdot X1) \cdot a \cdot e^{+j\theta} \cdot I2] - (R2 + j \cdot X2) \cdot I2$$

$$Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1 - a^2 \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{+j\theta} \cdot (R1 + j \cdot X1) \cdot I2 - (R2 + j \cdot X2) \cdot I2$$

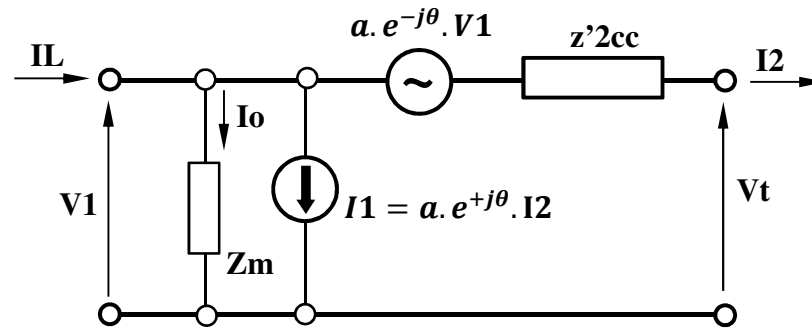
$$Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1 - [a^2 (R1 + j \cdot X1) + (R2 + j \cdot X2)] \cdot I2$$

$$Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1 - [a^2 \cdot z1 + z2] \cdot I2 \quad \rightarrow \quad \boxed{Vt = V1 + a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1 - z'_{2cc} \cdot I2}$$

$\rightarrow z'_{2cc} = a^2 \cdot z1 + z2 \rightarrow$ IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO REFERIDA AO SECUNDÁRIO

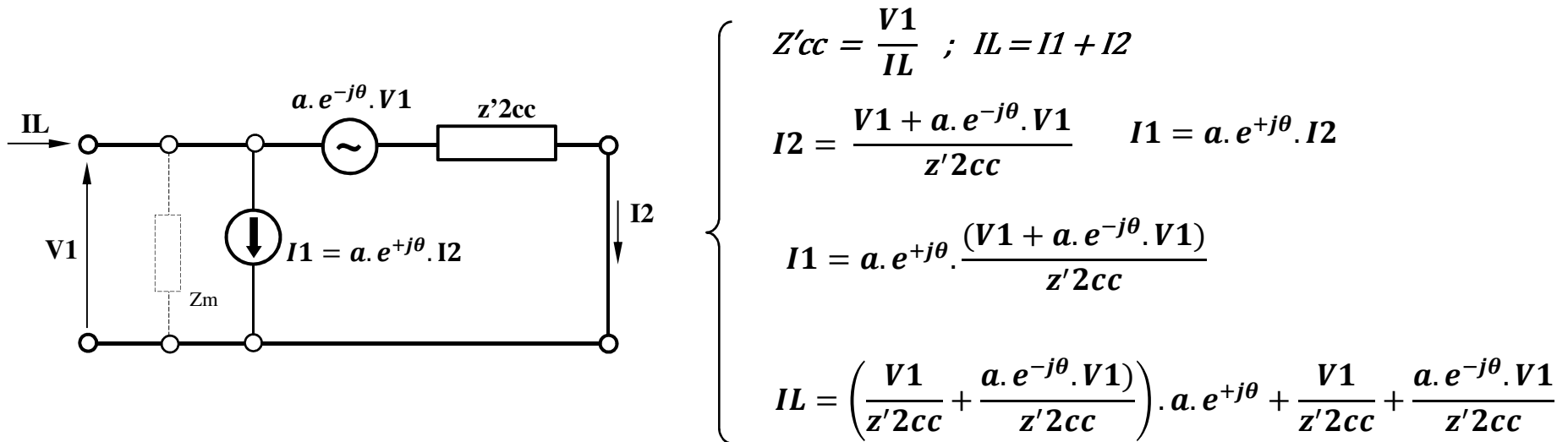
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELO POR FASE DO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO → $V_t = V_1 + a \cdot e^{-j\theta} \cdot V_1 - z'_{2cc} \cdot I_2$



CIRCUITO EQUIVALENTE ASSOCIADO À EQUAÇÃO RESULTANTE

**IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO VISTA PELA LINHA DE ALIMENTAÇÃO
(DESCONSIDERANDO O RAMO MAGNETIZANTE):**



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

$$IL = \left(\frac{V1}{z'2cc} + \frac{a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1}{z'2cc} \right) \cdot a \cdot e^{+j\theta} + \frac{V1}{z'2cc} + \frac{a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1}{z'2cc}$$

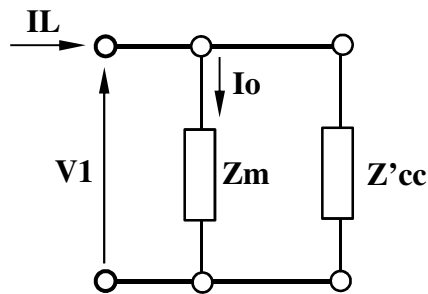
$$IL = \frac{V1}{z'2cc} \cdot a \cdot e^{+j\theta} + \frac{a^2 \cdot V1}{z'2cc} + \frac{V1}{z'2cc} + \frac{a \cdot e^{-j\theta} \cdot V1}{z'2cc} = \frac{V1}{z'2cc} \cdot [1 + a^2 + a \cdot (e^{+j\theta} + e^{-j\theta})]$$

$$\cos\theta = \frac{e^{+j\theta} + e^{-j\theta}}{2} \quad \Longrightarrow \quad IL = \frac{V1}{z'2cc} \cdot [1 + a^2 + 2a \cdot \cos\theta]$$

$$Z'cc = \frac{V1}{IL} \quad \Longrightarrow$$

$$Z'cc = \frac{z'2cc}{1 + a^2 + 2a \cdot \cos\theta}$$

INCORPORANDO A IMPEDÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO :

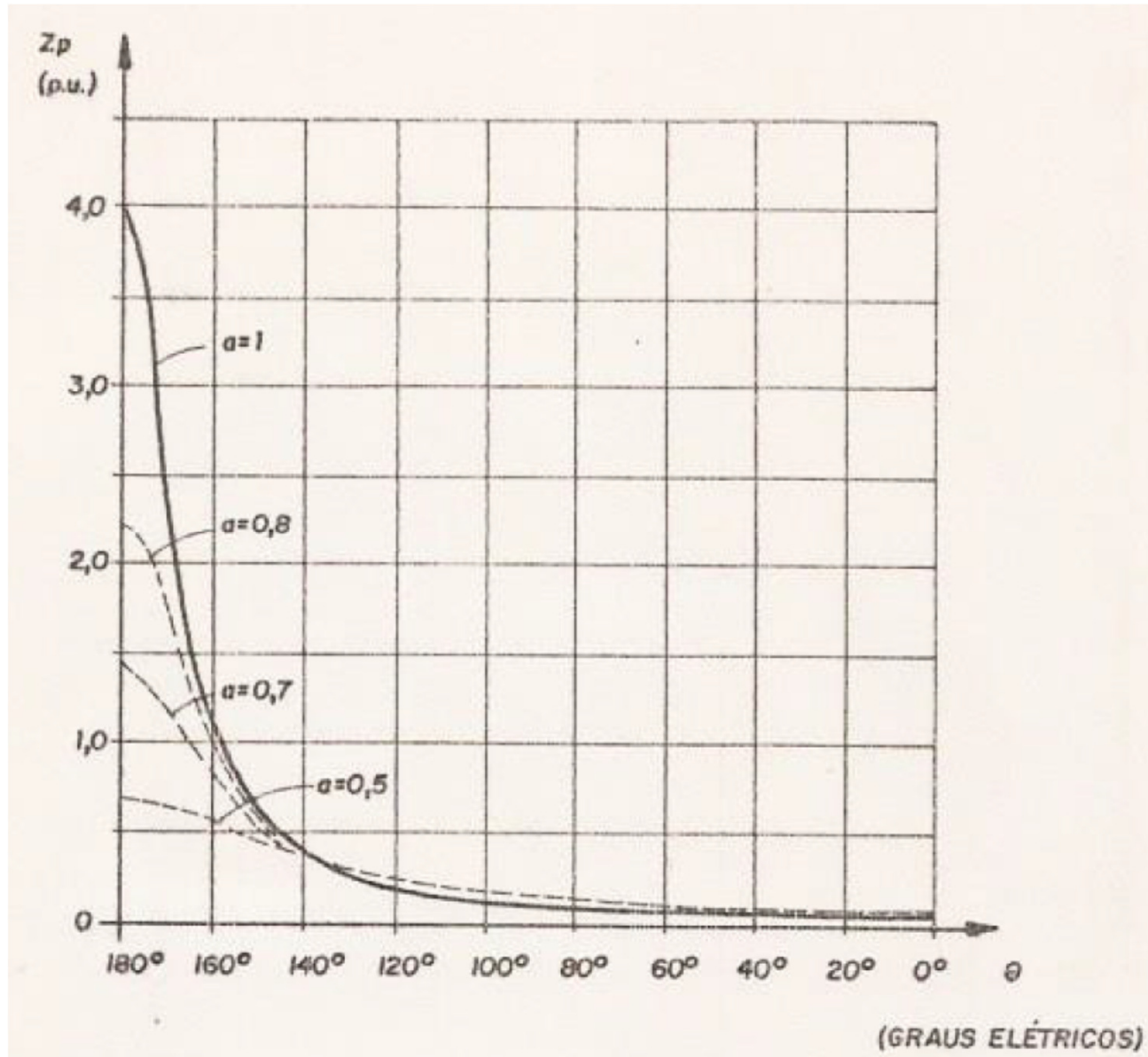


$$Z_{cc} = \frac{Z_m \cdot Z'cc}{Z_m + Z'cc}$$

$$Z_{cc} = \frac{Z_m \cdot z'2cc}{z'2cc + Z_m \cdot (1 + a^2 + 2a \cdot \cos\theta)}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CARACTERÍSTICA TÍPICA DE IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO DO REGULADOR DE INDUÇÃO



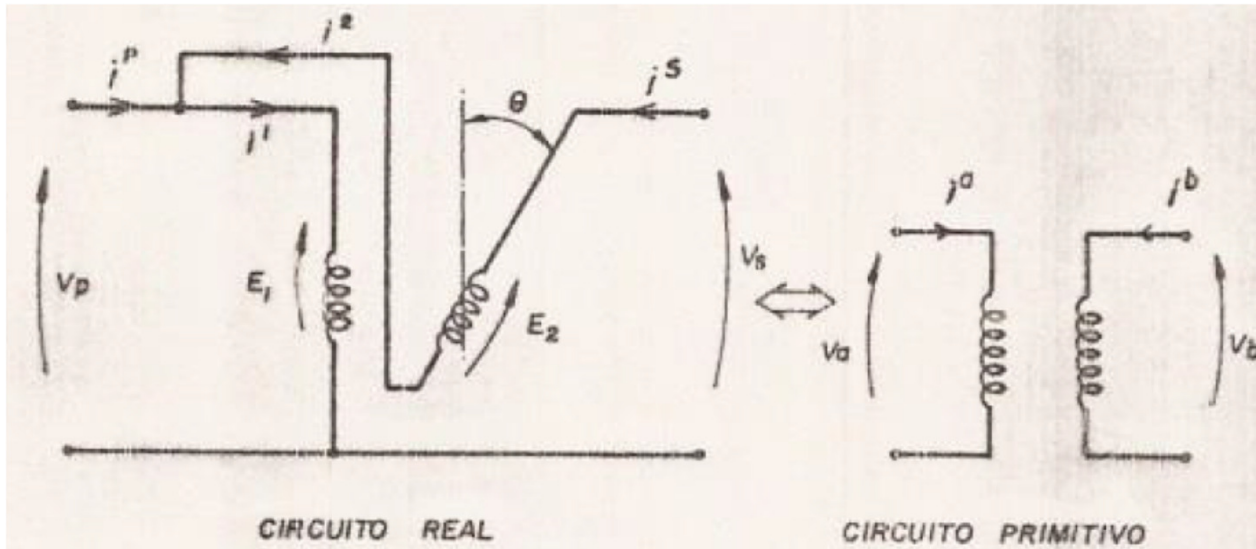
$$z_1 = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_2 = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$Z_{\text{mag}} = 4 \text{ p.u.}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELO POR FASE A PARTIR DA ANÁLISE TENSORIAL – REGULADOR TRIFÁSICO



MODELOS REAL E
PRIMITIVO POR FASE

$$Z_{\mu' \nu'} = \begin{bmatrix} Z_a & | Z_a + a Z_m e^{j\theta} \\ Z_a + a Z_m e^{-j\theta} & | Z_a + Z_b + 2a Z_m \cos \theta \end{bmatrix}$$

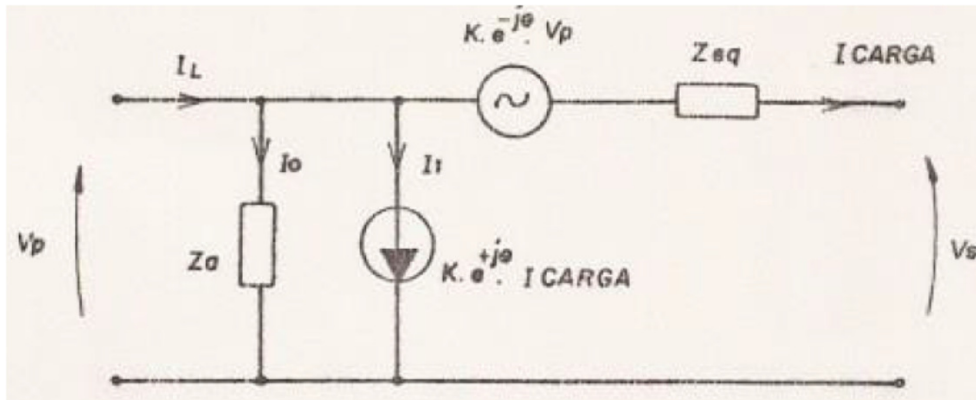
TENSOR DE IMPEDÂNCIAS GERAL
DO REGULADOR TRIFÁSICO

$$\begin{cases} V_p = Z_a i^p + (Z_a + a Z_m e^{j\theta}) i^s \\ V_s = (Z_a + a Z_m e^{-j\theta}) i^p + (Z_a + Z_b + 2a Z_m \cos \theta) i^s \end{cases}$$

EQUAÇÕES GERAIS
DO REGULADOR
TRIFÁSICO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

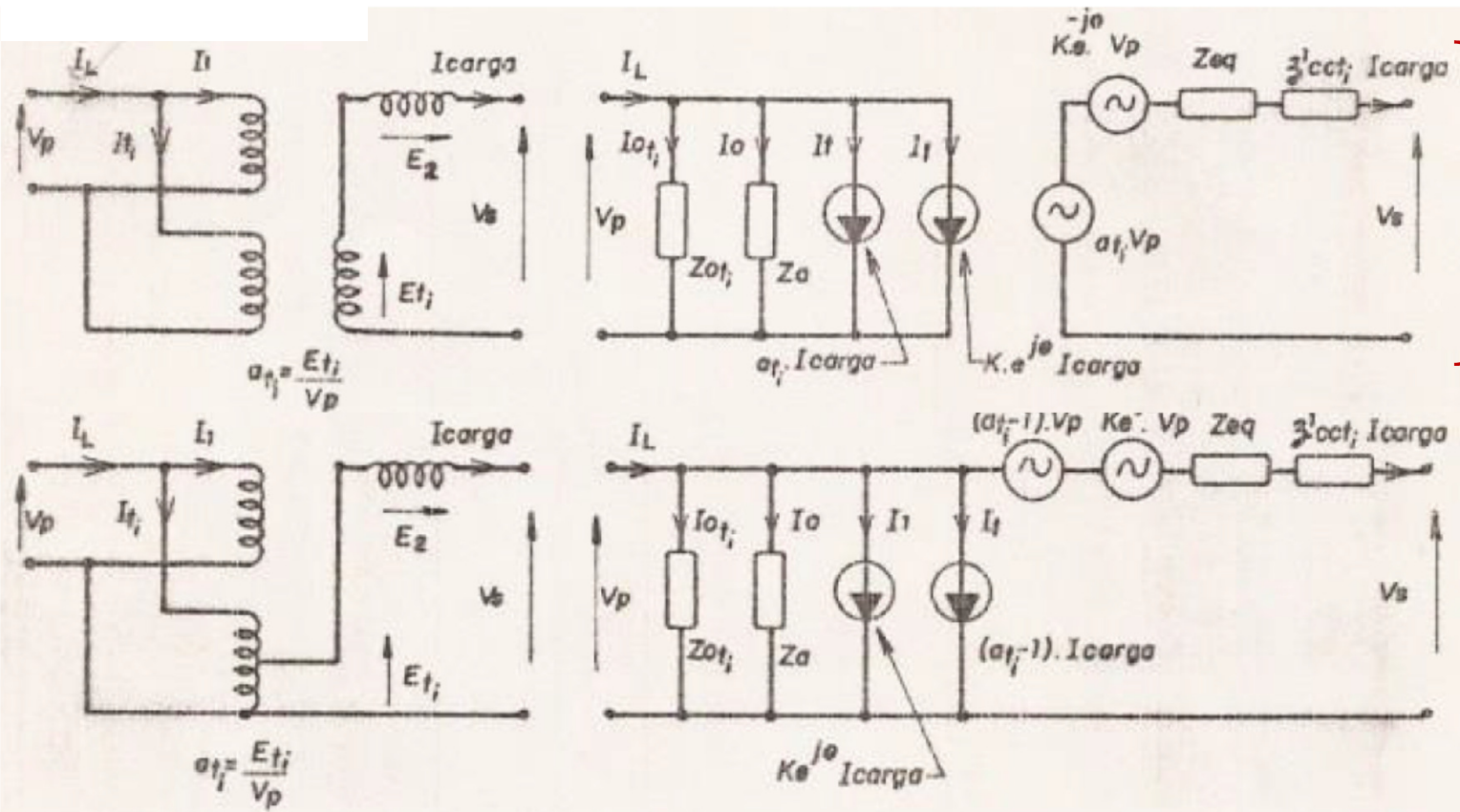
MODELO FINAL – REGULADOR TRIFÁSICO



$$k = \frac{a \cdot Z_m}{Z_a} = \frac{a \cdot Z_m}{z_a + Z_m}$$

$$Z_{eq} = \frac{z_a \cdot z_b + Z_m \cdot z'_{2cc}}{z_a + Z_m}$$

REGULADOR TRIFÁSICO

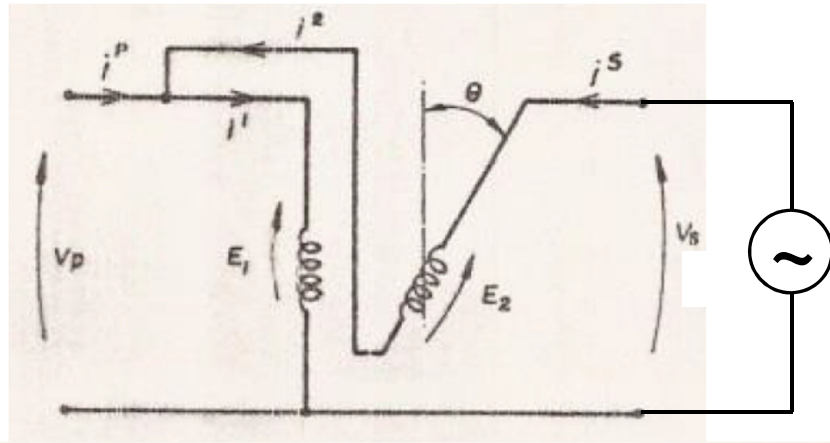


REGULADOR TRIFÁSICO COM TRANSFORMADOR AUXILIAR ISOLADOR

REGULADOR TRIFÁSICO COM AUTO TRANSFORMADOR AUXILIAR

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

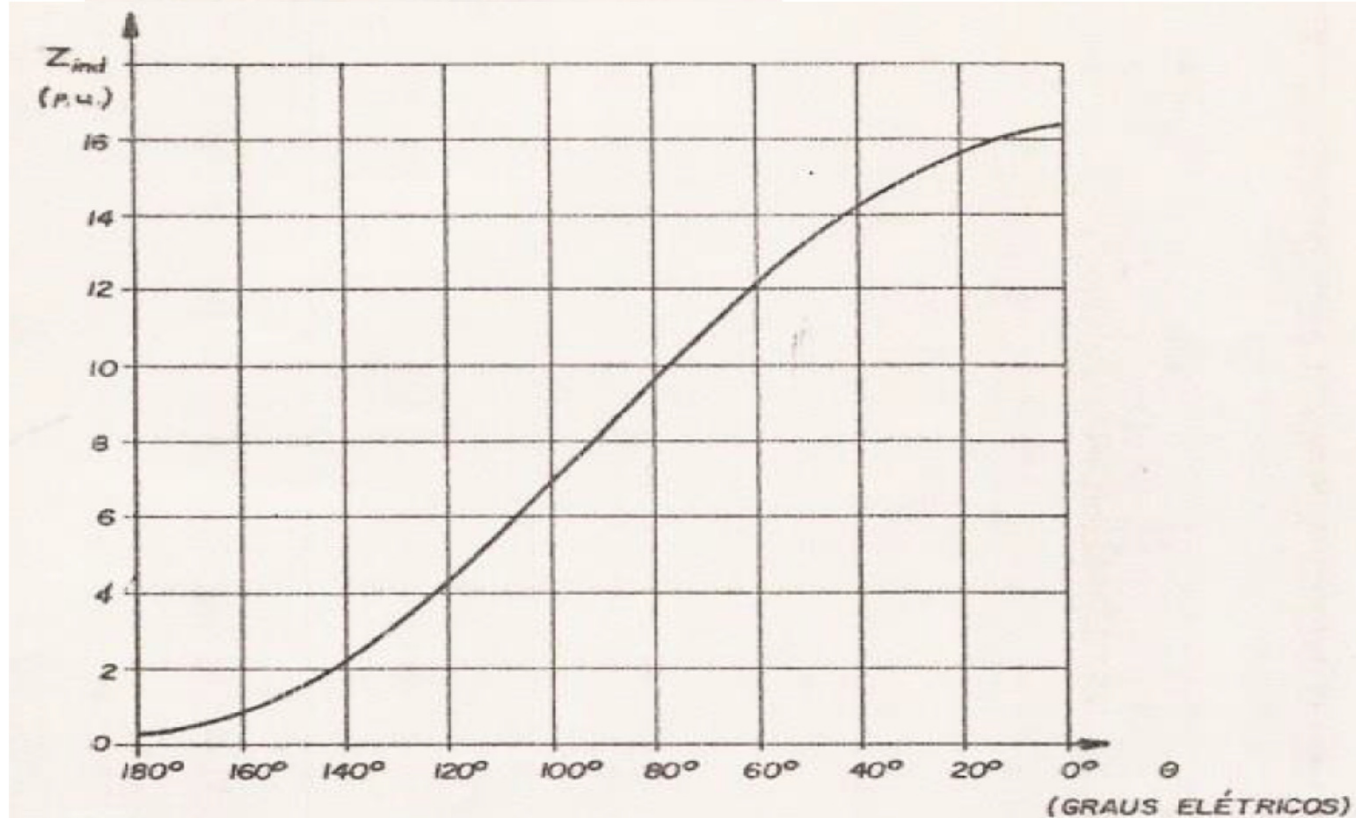
REGULADOR TRIFÁSICO OPERANDO COMO INDUTOR VARIÁVEL



ALIMENTAÇÃO PELO SECUNDÁRIO
PRIMÁRIO EM ABERTO

$$Z_{ind} = \frac{V_s}{I_s} \rightarrow I^p = 0 \text{ nas equações gerais}$$

$$Z_{ind} = z_a + z_b + Z_m \cdot (1 + a^2 + 2 \cdot a \cdot \cos\theta)$$



$$z_a = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_b = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$Z_m = 4 \text{ p.u.}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR MONOFÁSICO: MODELO A PARTIR DA ANÁLISE TENSORIAL

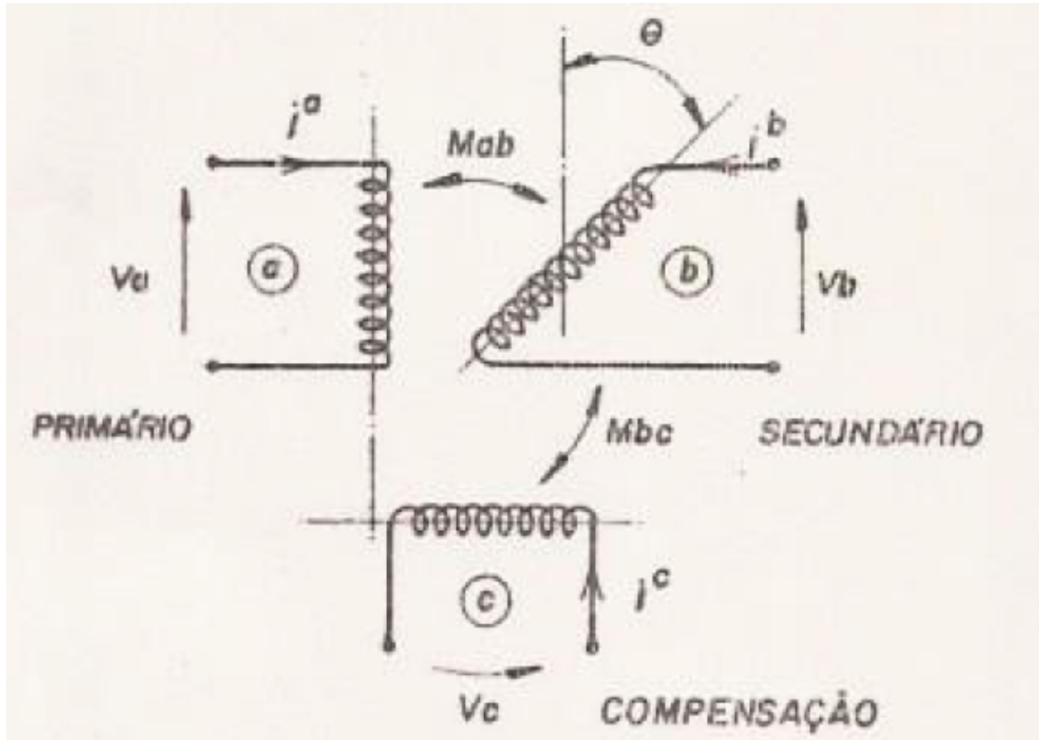


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO
REGULADOR MONOFÁSICO

$$j \omega M_{ob} = a Z_m$$
$$j \omega M_{bc} = a^2 b Z_m$$

CARACTERIZAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS
MÚTUAS ENTRE ENROLAMENTOS

RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO:

SECUNDÁRIO / PRIMÁRIO

$$a = V_b / V_a = N_{2ef} / N_{1ef}$$

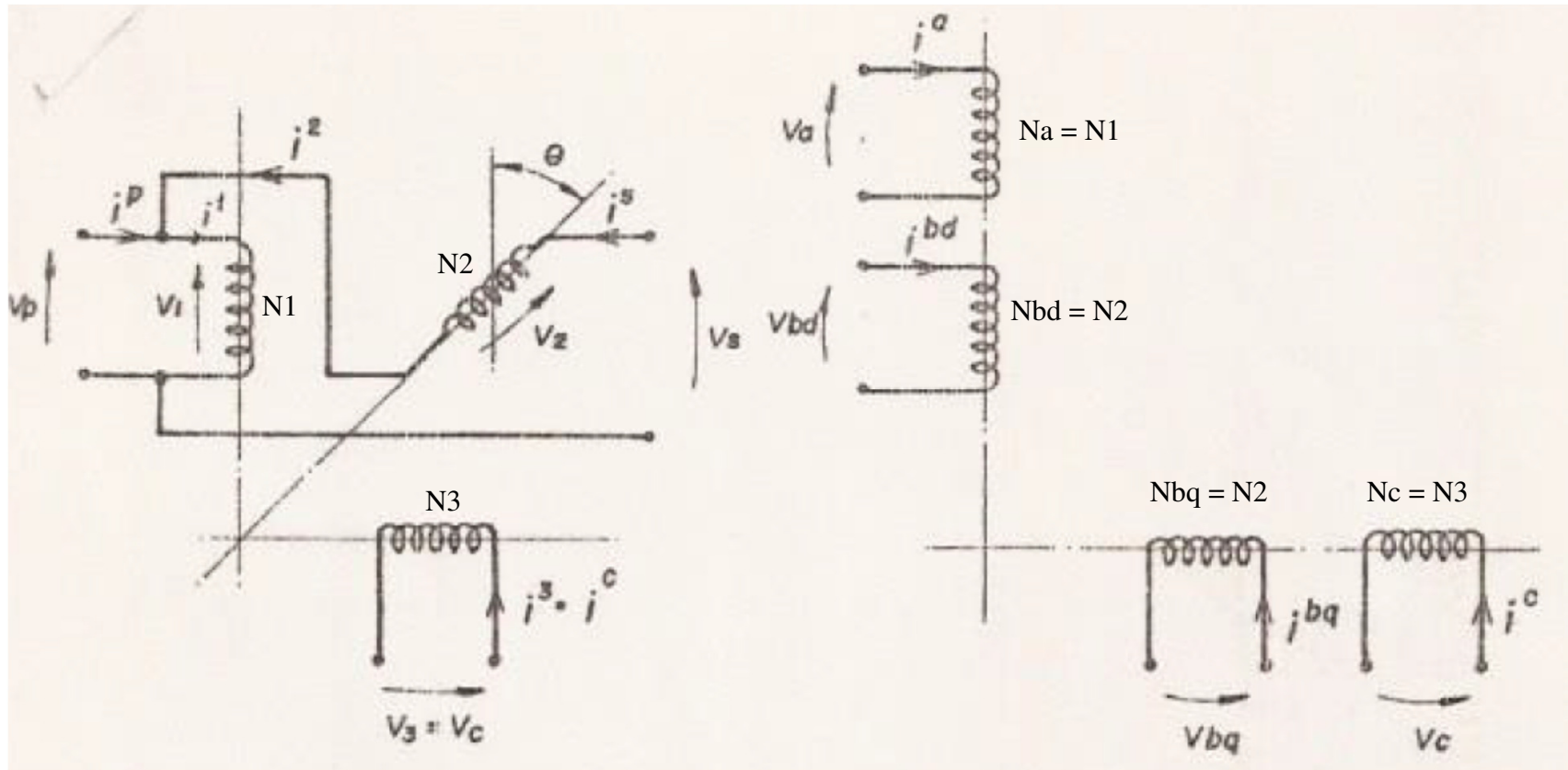
COMPENSAÇÃO / SECUNDÁRIO

$$b = V_c / V_b = N_{3ef} / N_{2ef}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CIRCUITOS EQUIVALENTES ASSOCIADOS À ANÁLISE TENSORIAL

REGULADOR CONECTADO COMO AUTO-TRANSFORMADOR



CIRCUITO REAL

$$a = \frac{N_{2ef}}{N_{1ef}} = \frac{E_2}{E_1}$$

CIRCUITO PRIMITIVO

$$b = \frac{N_{3ef}}{N_{2ef}} = \frac{E_3}{E_2}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EQUAÇÕES GERAIS DO REGULADOR MONOFÁSICO

$$Z_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_a + aZ_m \cos \theta & 0 \\ Z_a + aZ_m \cos \theta & Z_a + Z_b + 2aZ_m \cos \theta & a^2 b Z_m \sin \theta \\ 0 & a^2 b Z_m \sin \theta & Z_c \end{bmatrix}$$

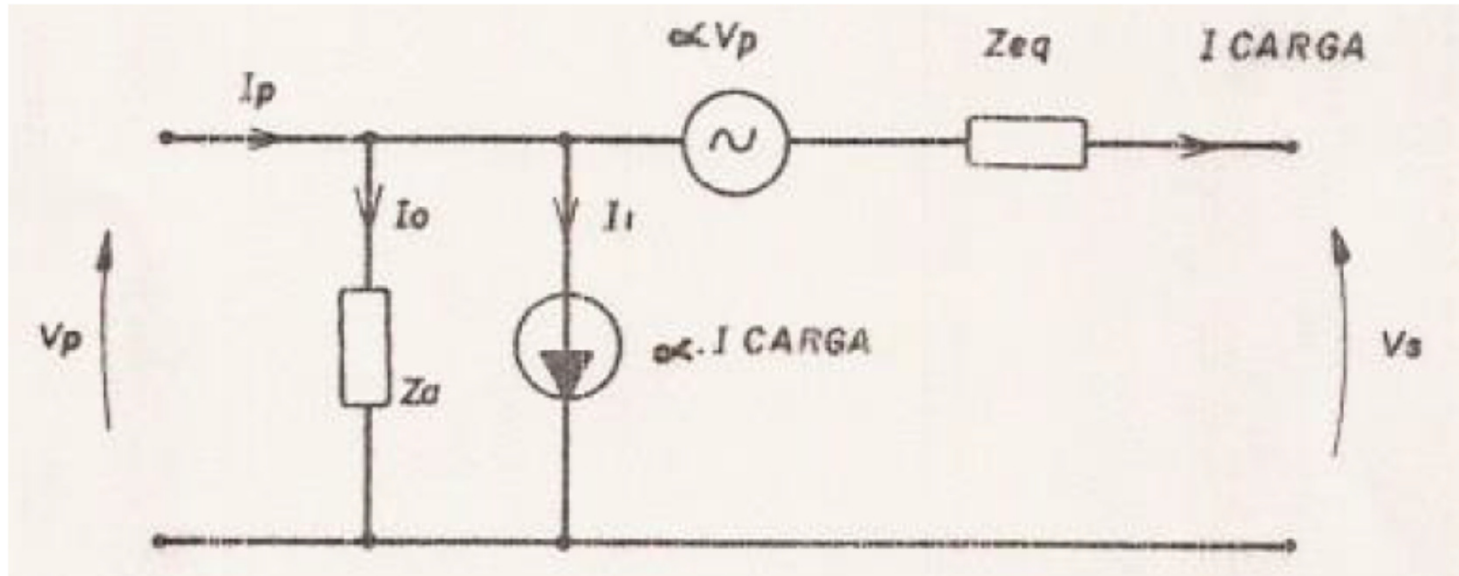
TENSOR DE IMPEDÂNCIAS GERAL DO REGULADOR MONOFÁSICO

$$\begin{cases} v_p = Z_a i^p + (Z_a + aZ_m \cos \theta) i^s \\ v_s = (Z_a + aZ_m \cos \theta) i^p + (Z_a + Z_b + 2aZ_m \cos \theta) i^s + a^2 b Z_m \sin \theta i^c \\ v_c = a^2 b Z_m \sin \theta i^s + Z_c i^c \end{cases}$$

EQUAÇÕES GERAIS DO REGULADOR MONOFÁSICO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CIRCUITO EQUIVALENTE FINAL DO REGULADOR MONOFÁSICO

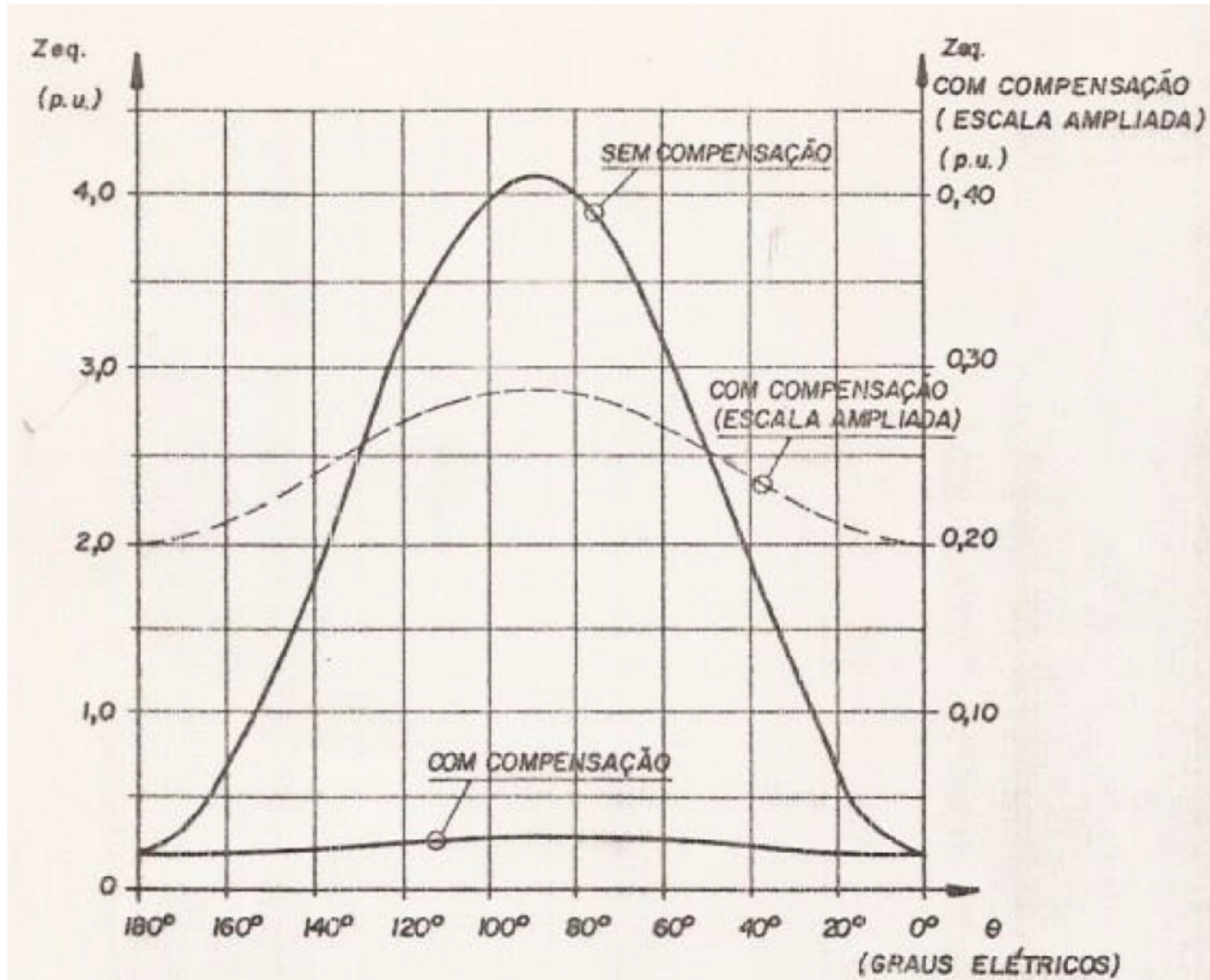


$$\alpha = a \frac{Z_m}{Z_0} \cos \theta$$

$$Z_{eq} = \frac{z_a z_b + Z_m z'_{2cc} + a^2 Z_m^2 \sin^2 \theta + a^2 \left(\frac{b^2}{z_c}\right) Z_m [z_b (z_a + Z_m) + a^2 z_a Z_m \cos^2 \theta]}{z_0 + Z_m \left[1 + a^2 \left(\frac{b^2}{z_c}\right) z_a\right] + a^2 \left(\frac{b^2}{z_c}\right) Z_m^2}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO REGULADOR MONOFÁSICO



$$a = 1$$

$$b = 0,5$$

$$z_a = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_b = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_c = 0,05 \text{ p.u.}$$

$$Z_m = 4 \text{ p.u.}$$

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CARACTERÍSTICAS
TÍPICAS DE SAÍDA
DE REGULADOR
MONOFÁSICO
ASSOCIADO A
TRANSFORMADOR

DADOS NOMINAIS

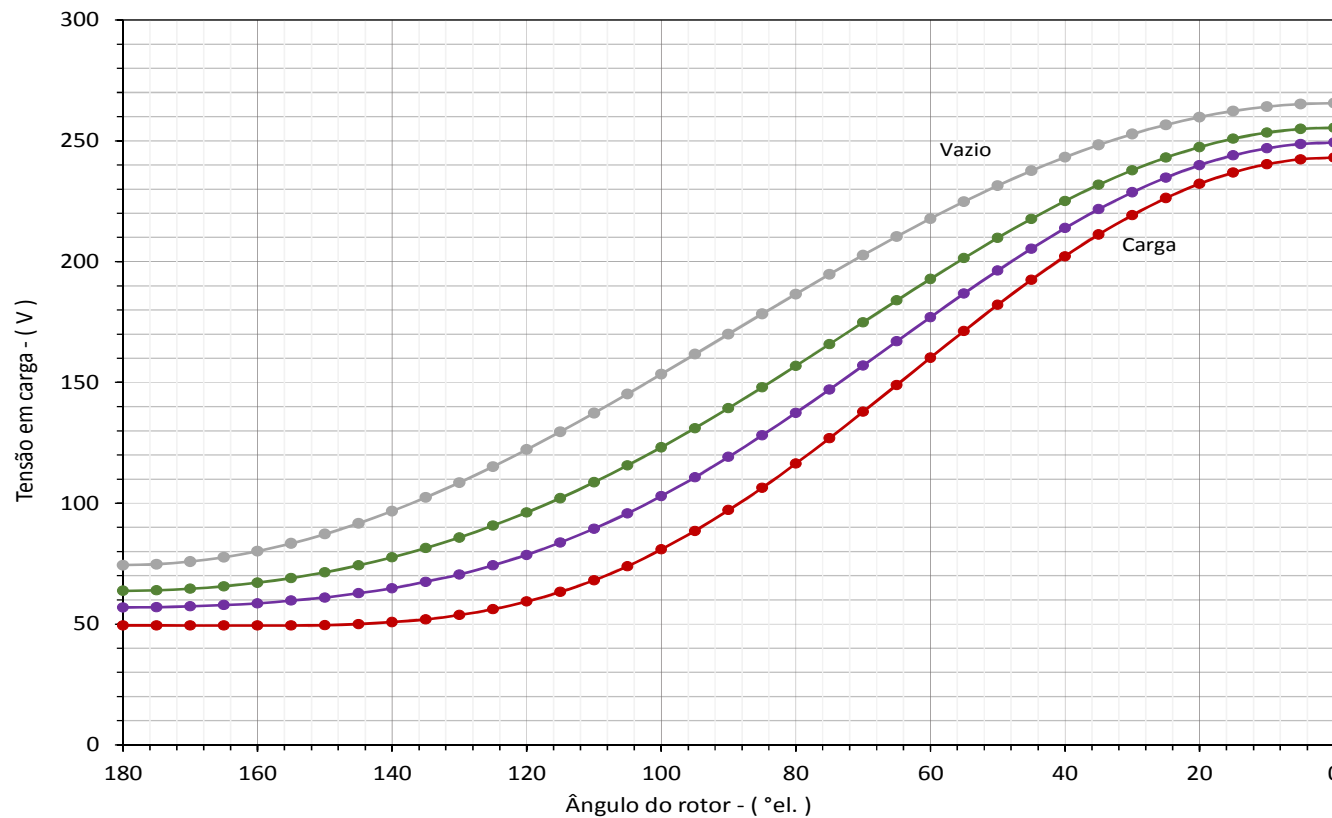
POR FASE:

$S = 325 / 1.625 \text{ kVA}$

$V = 50 / 250 \text{ V}$

$I = 6.500 \text{ A}$

Tensão de saída para corrente de carga constante - ($\cos\phi = 0,8$)



CORRENTE x ÂNGULO

