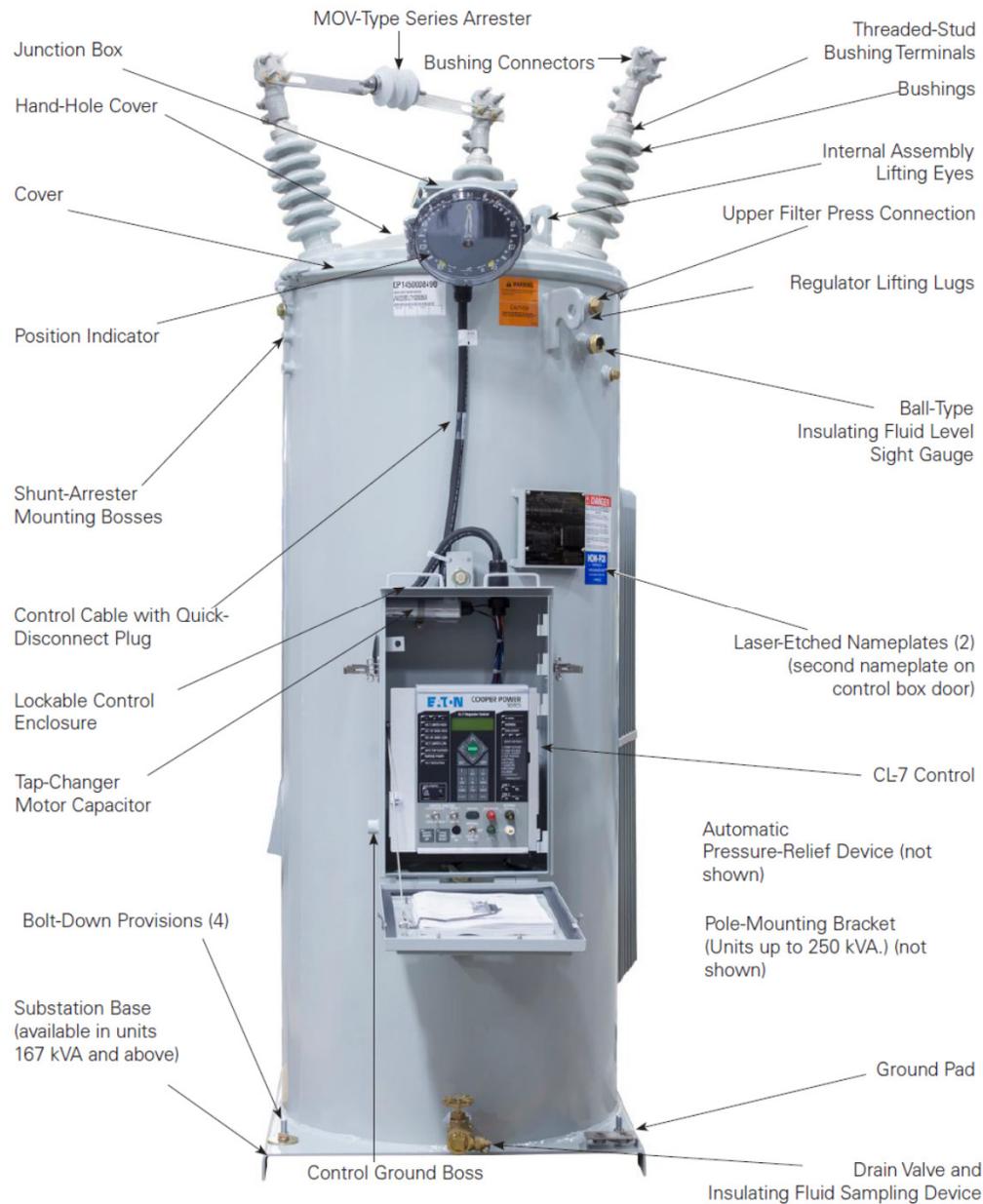


PARTE 2

REGULADORES DE INDUÇÃO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

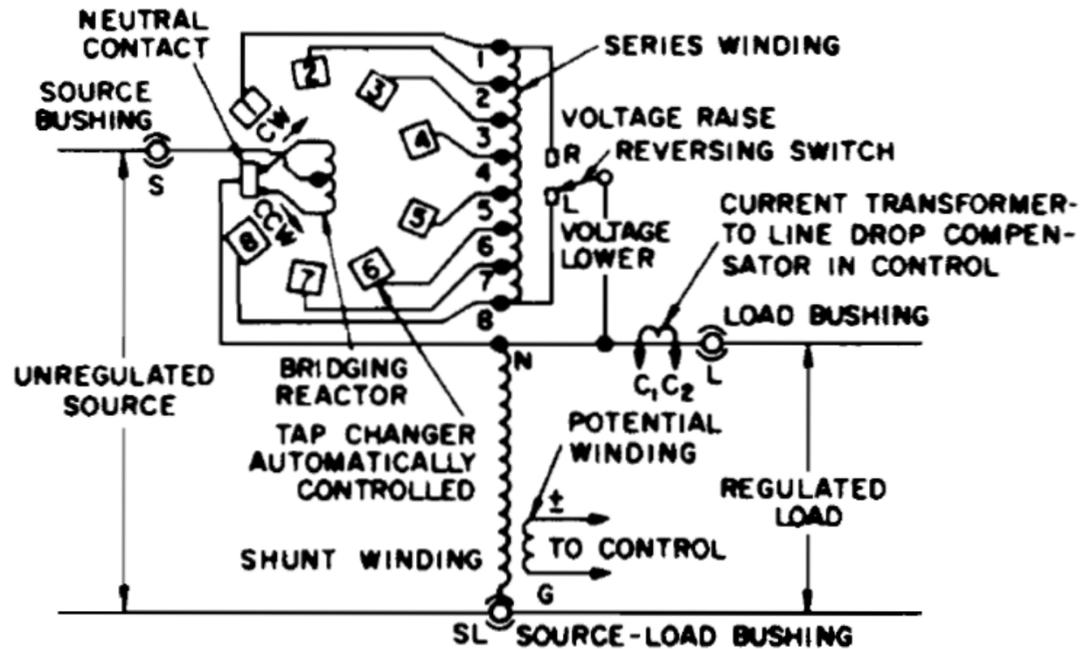
SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO



REGULADOR DE DERIVAÇÕES COMUTÁVEIS SOB CARGA

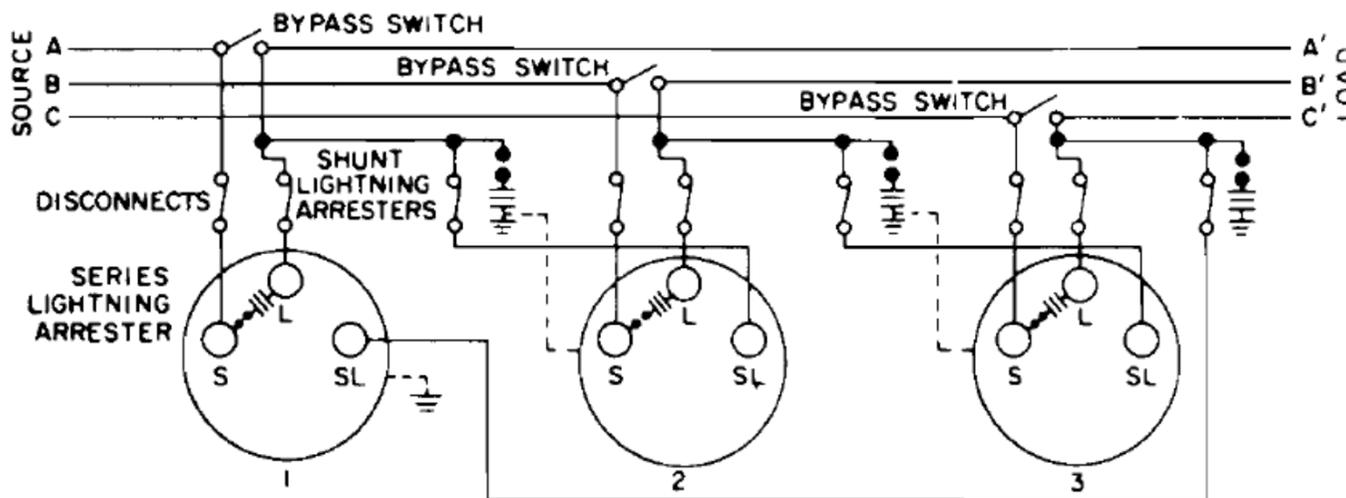
PEA - 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

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

SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

REGULADOR COM ESCOVAS DE DESLOCAMENTO HELICOIDAL

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

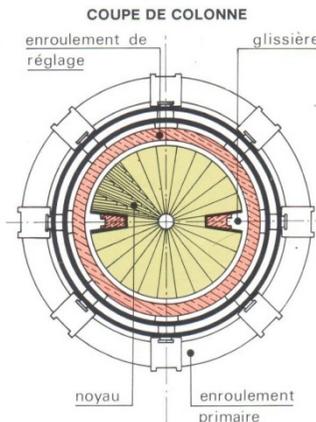
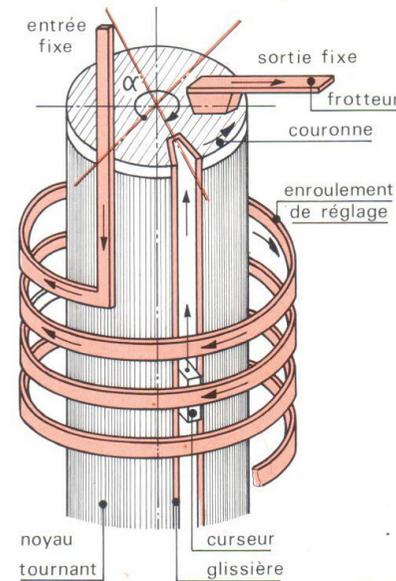
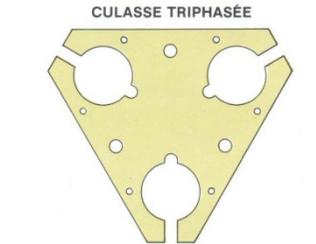
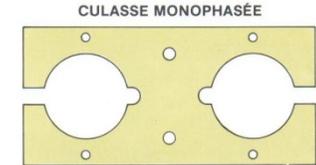
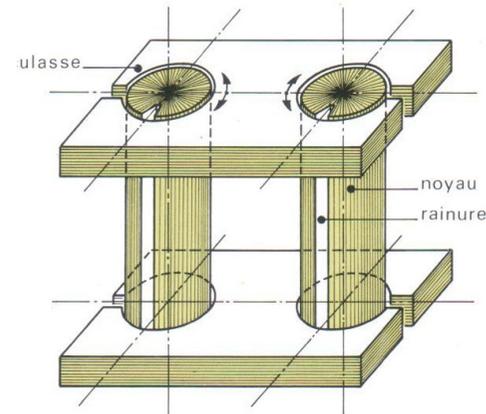
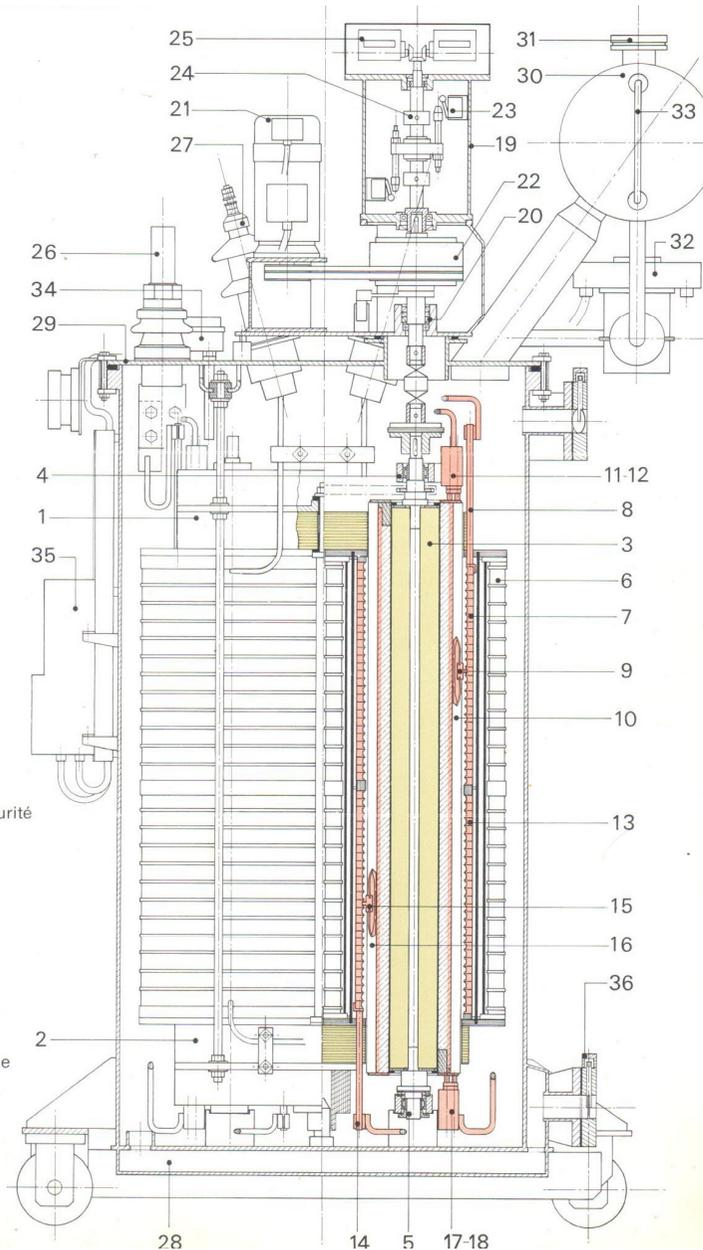
- 19 _ carter
- 20 _ joints d'étanchéité
- 21 _ moteur frein
- 22 _ poulie réductrice
- 23 _ contacts de fin de course
- 24 _ butées mécaniques de sécurité
- 25 _ compteurs

Bornes

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

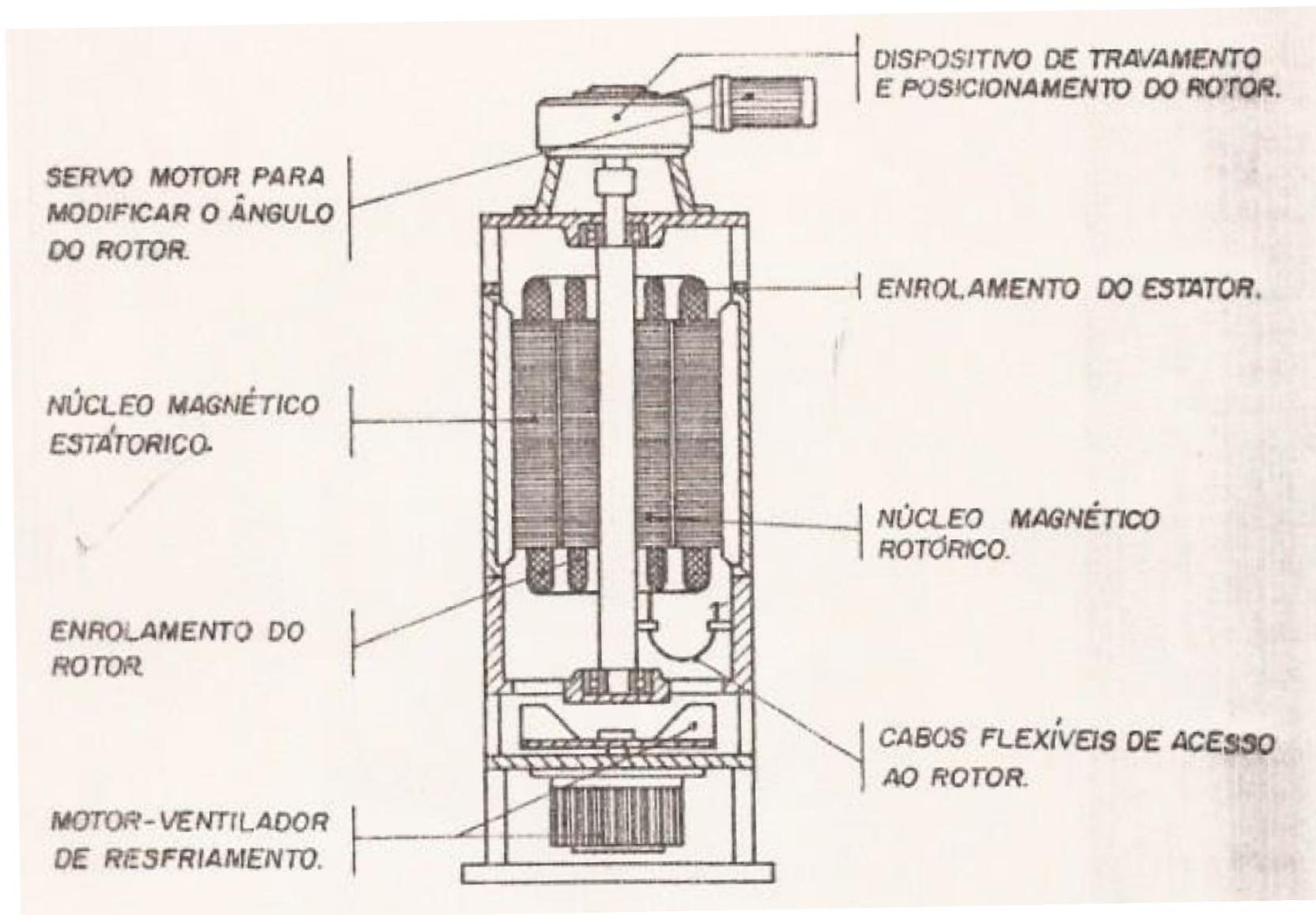
Cuve

- 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.



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

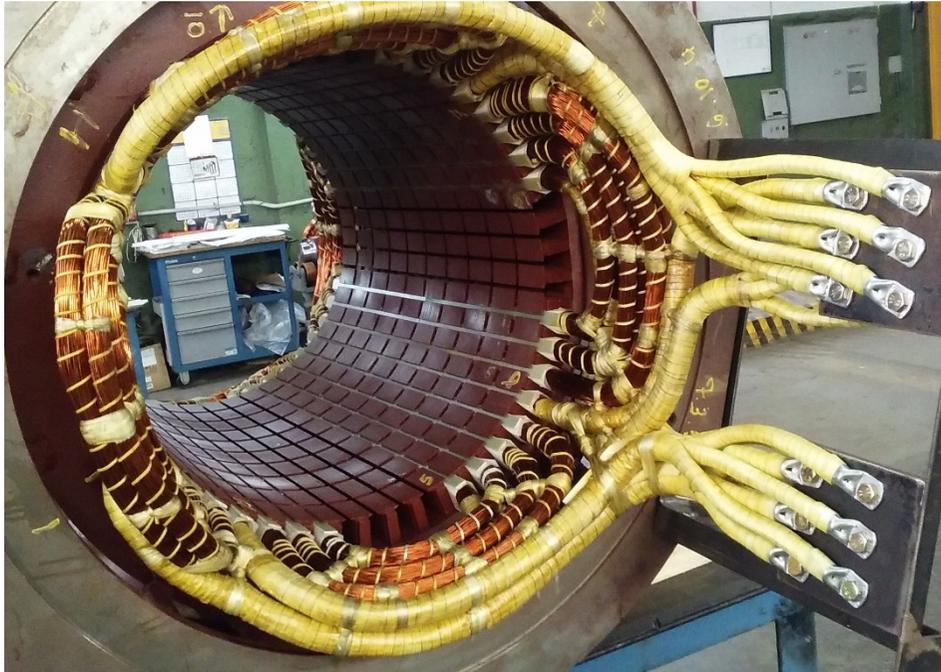


ESTATOR COM AS LÂMINAS DO
NÚCLEO MAGNÉTICO MONTADAS



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

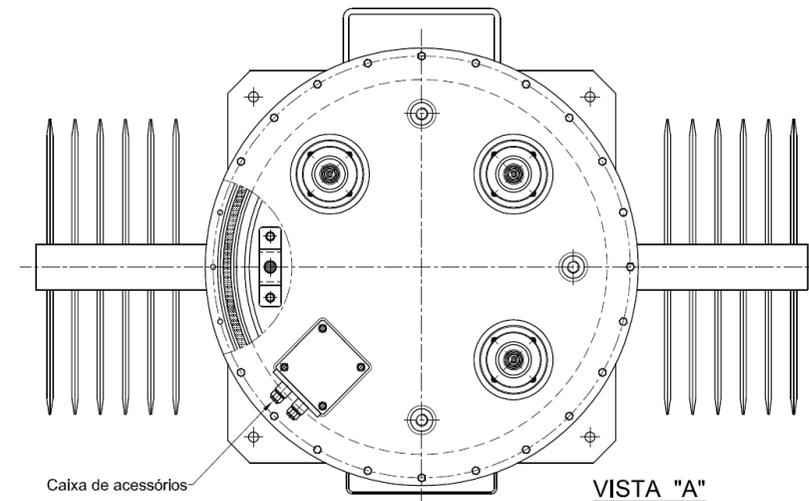
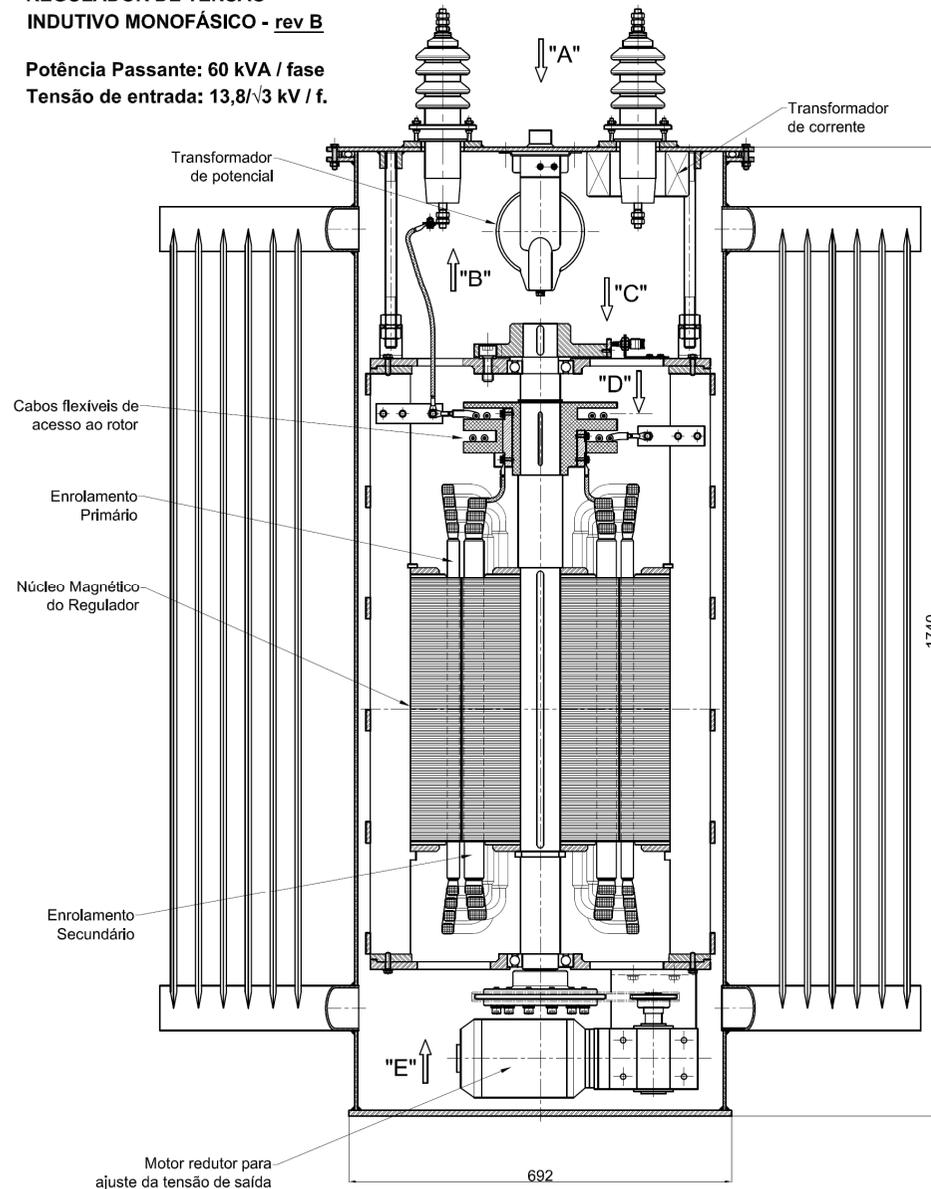


PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

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/√3 kV / f.



POTÊNCIA TOTAL: 1.200 kVA EM BANCO TRIFÁSICO

TENSÃO 13,8 kV

FAIXA DE REGULAÇÃO DA TENSÃO: ± 15 %

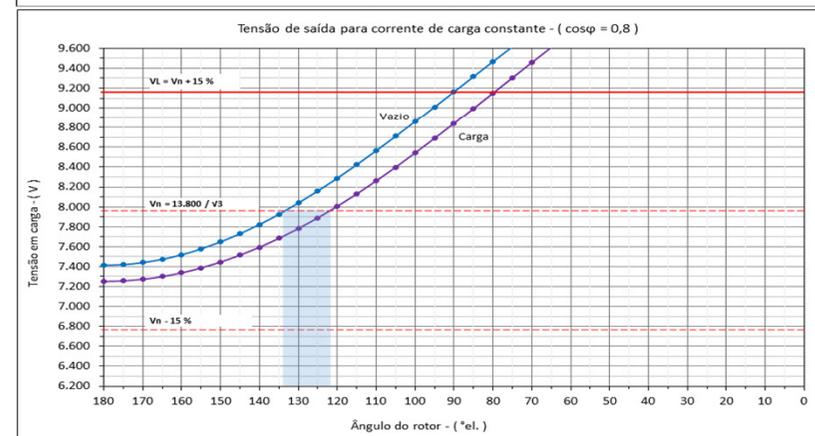
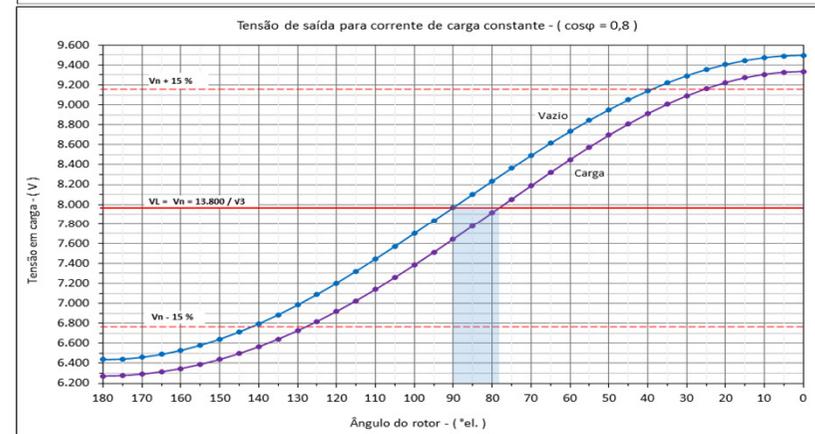
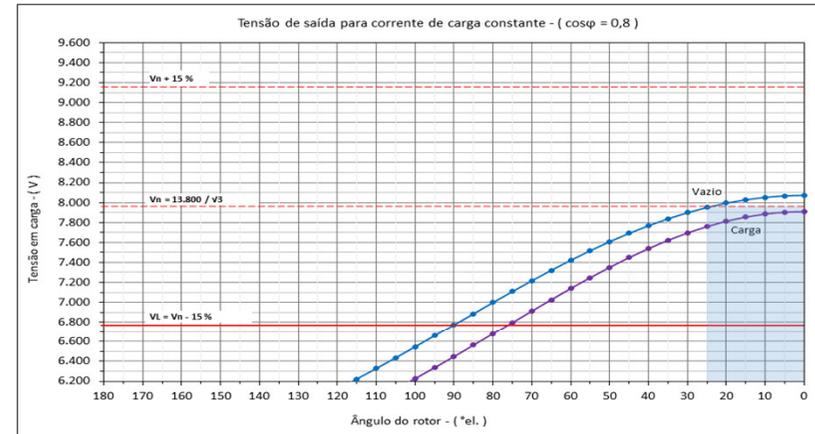
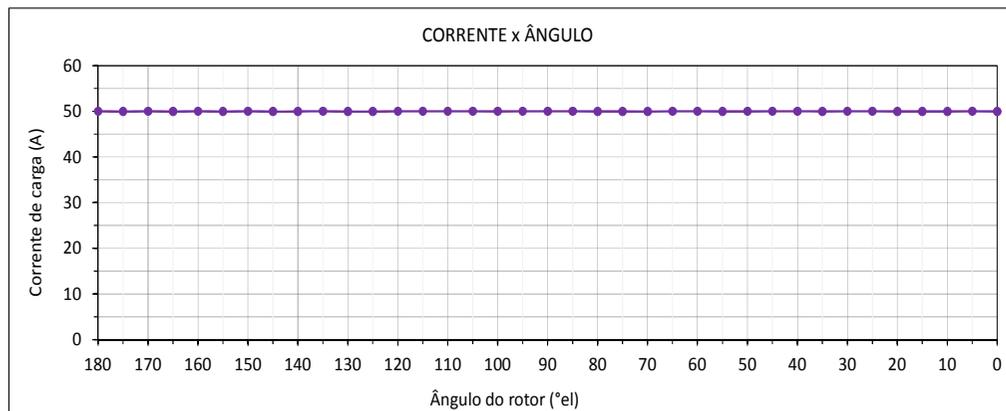
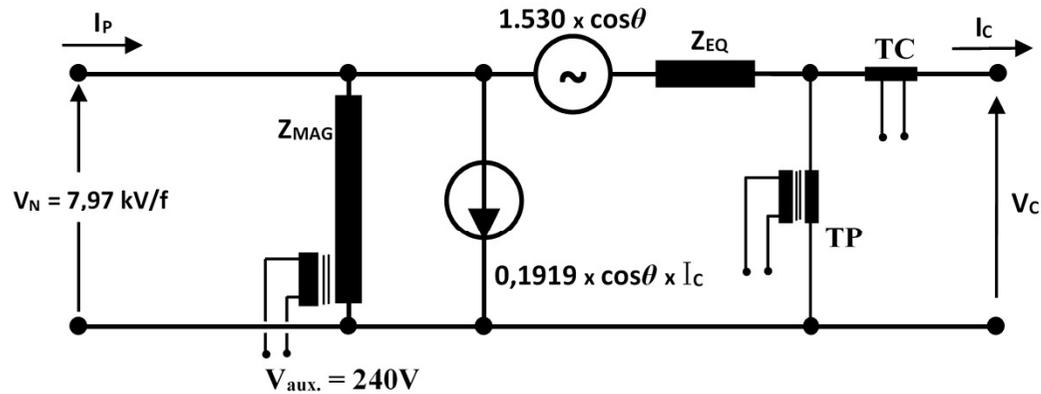
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE E

CARACTERÍSTICAS DE REGULAÇÃO

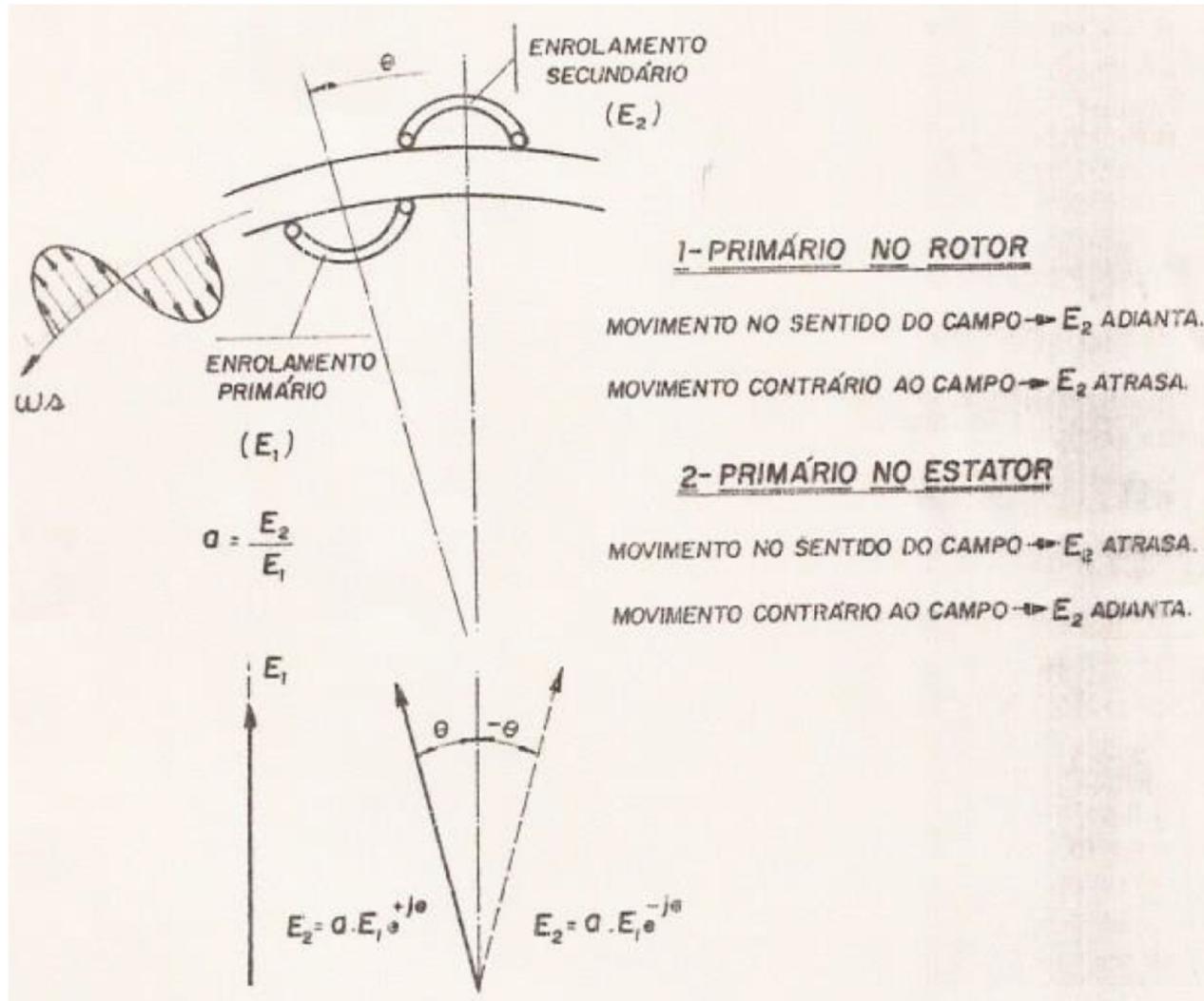
REGULADOR PROPOSTO PARA SISTEMAS DE

DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA



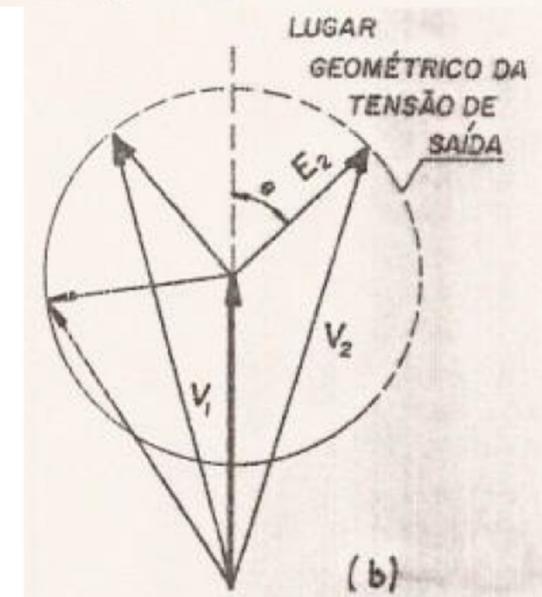
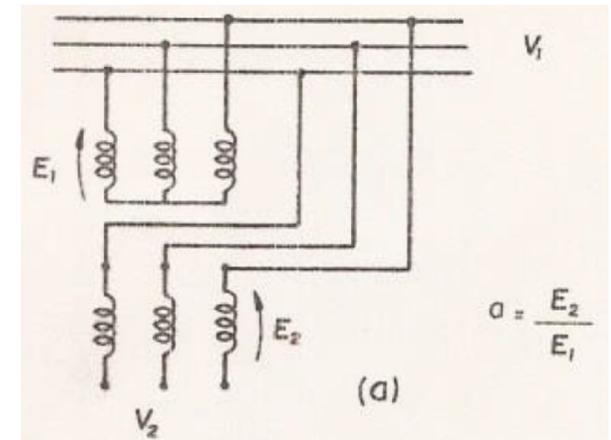
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FUNCIONAMENTO DO REGULADOR TRIFÁSICO



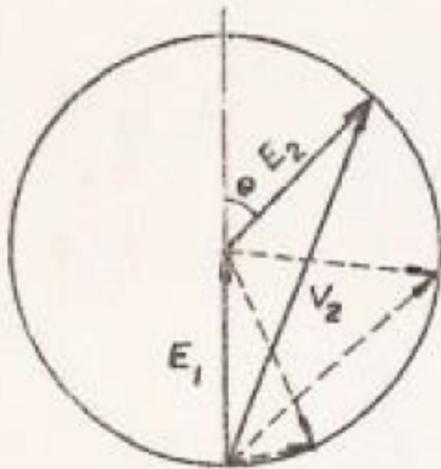
TENSÃO SECUNDÁRIA DE FASE VARIÁVEL, INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO

CONEXÃO COMO AUTO-TRANSFORMADOR
 \rightarrow TENSÃO RESULTANTE DE MÓDULO VARIÁVEL



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO: DETERMINADA PELA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

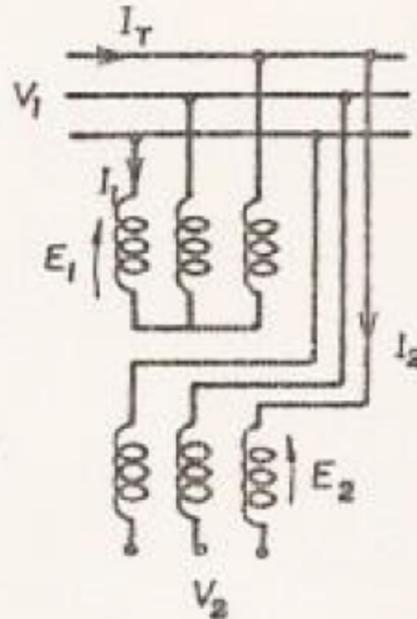


$$\sigma = \frac{E_2}{E_1} = 1 = \frac{I_1}{I_2}$$

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

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

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

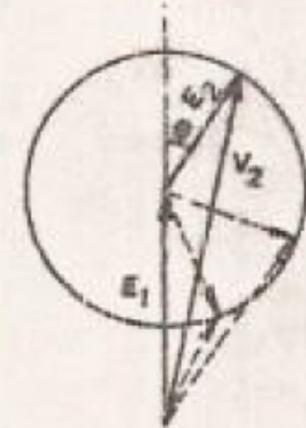


$$\sigma = \frac{E_2}{E_1} = 0,5 = \frac{I_1}{I_2}$$

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

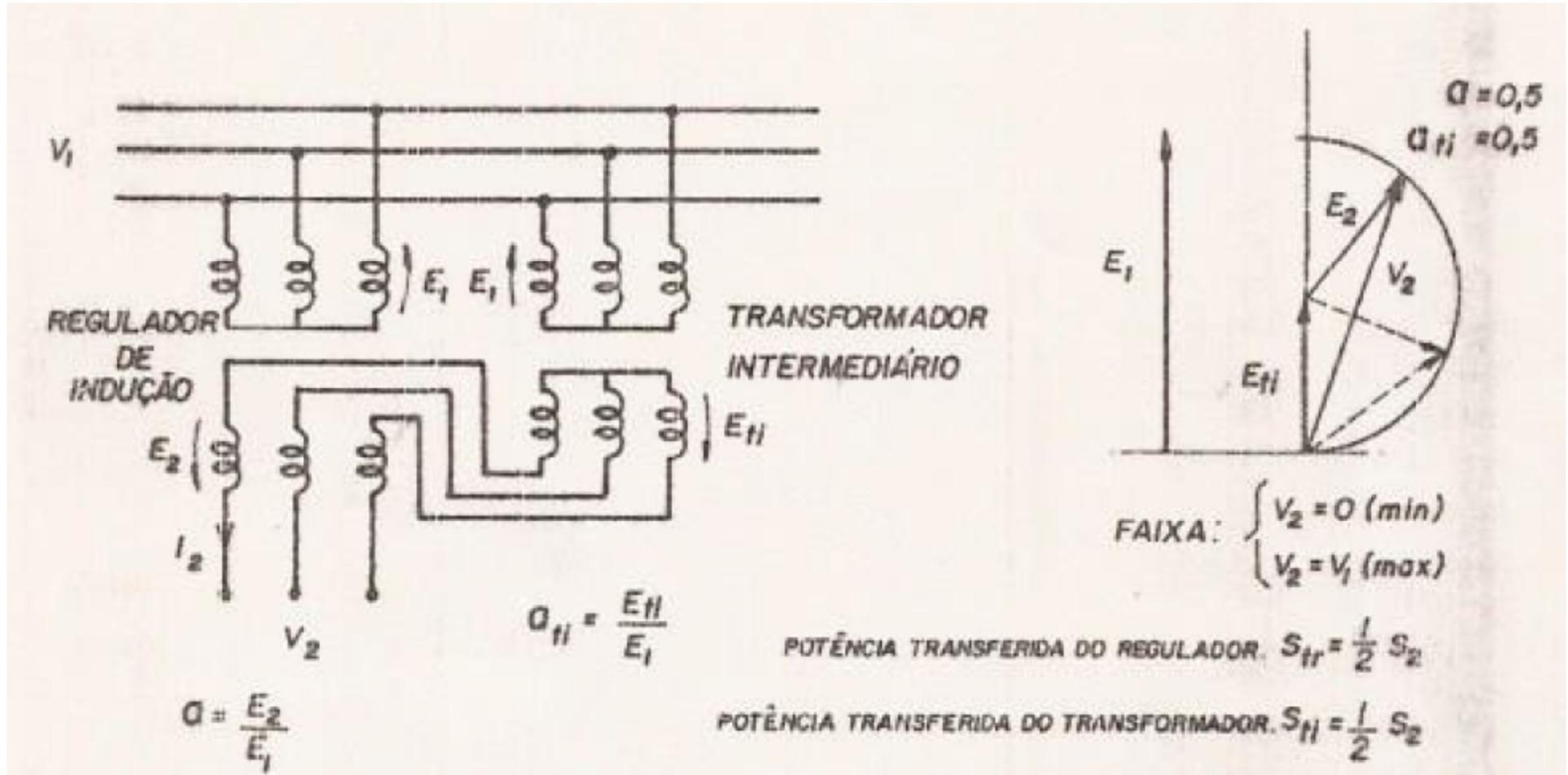
$S_1 = V_1 I_1$; $S_2 = 1,5V_1 I_2$

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



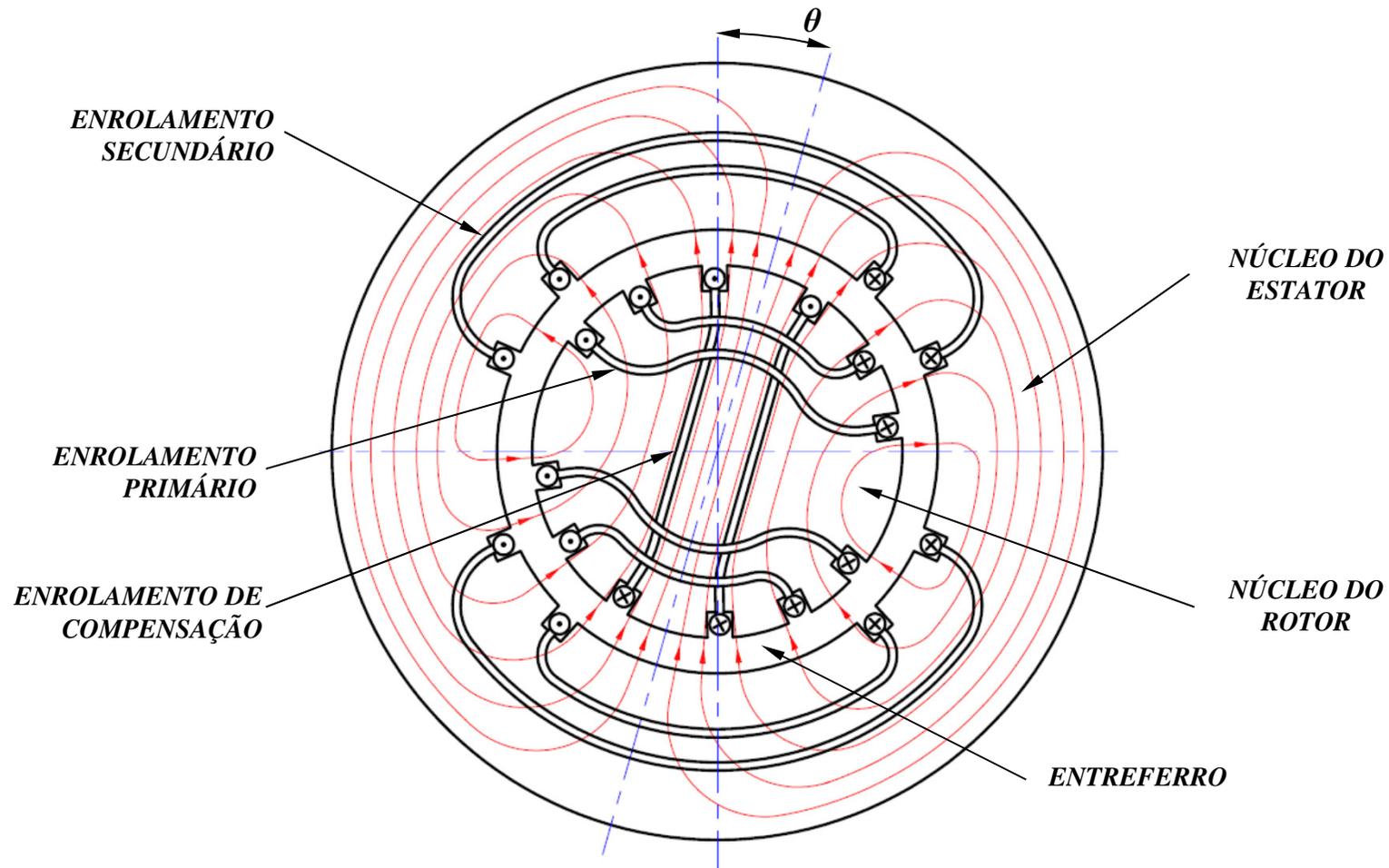
PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

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



PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO - PRINCÍPIO CONSTRUTIVO



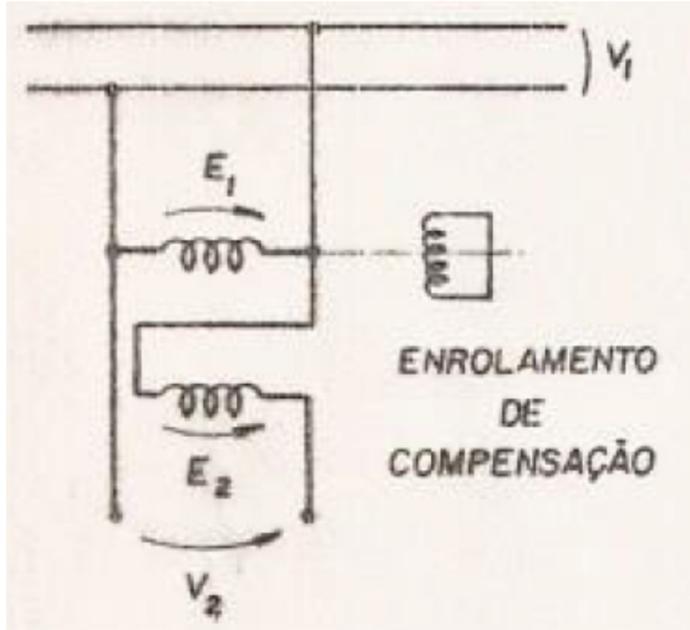
θ : ÂNGULO DE DESLOCAMENTO ENTRE ROTOR E ESTATOR ($^{\circ}el$)

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

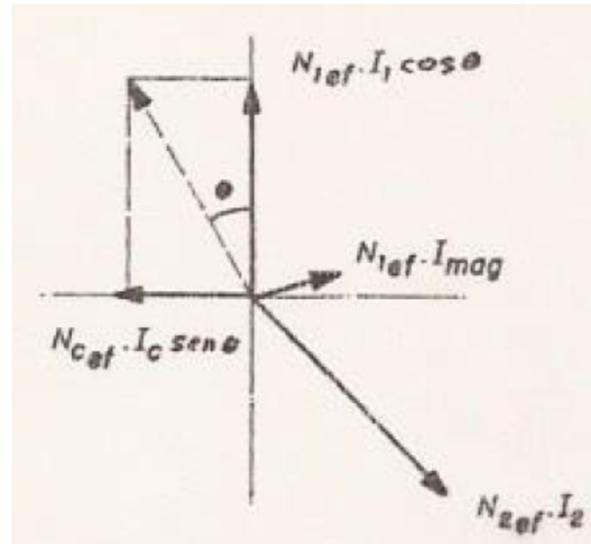
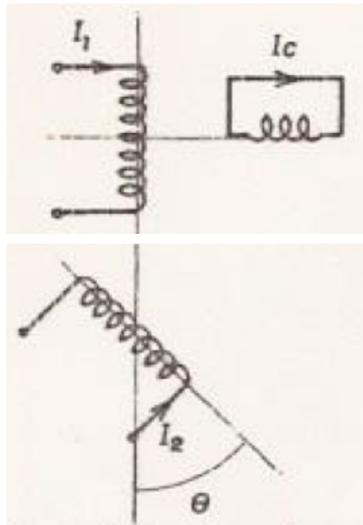
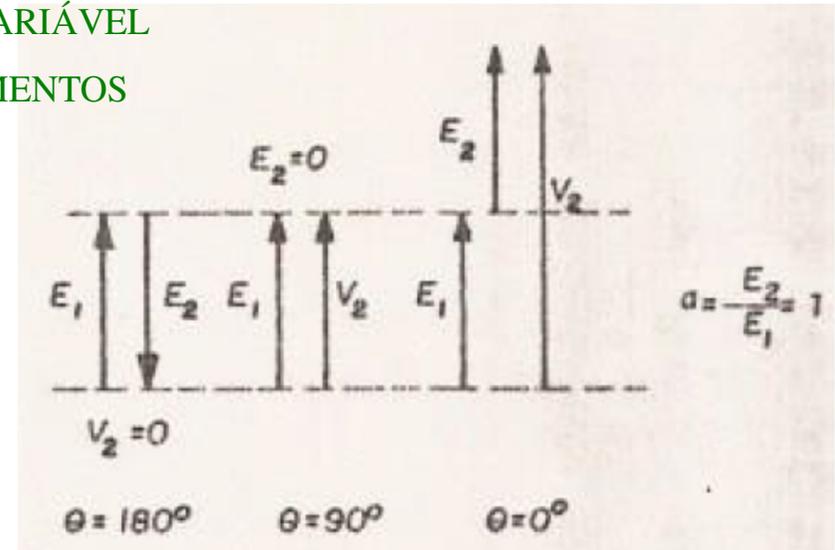
DESLOCAMENTO ANGULAR AJUSTADO POR MEIO DE SERVO MOTOR

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

FUNCIONAMENTO DO REGULADOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO



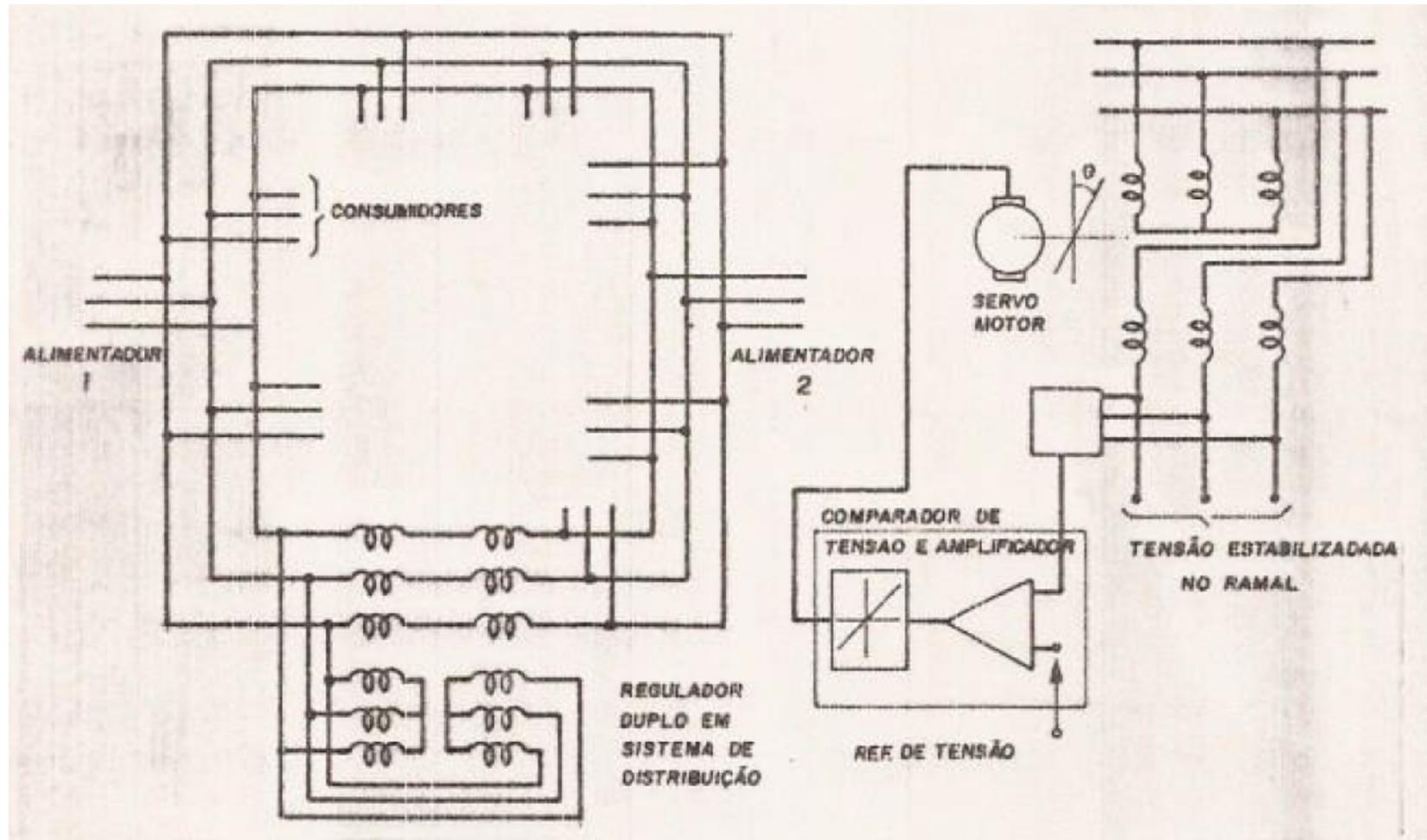
ACOPLAMENTO VARIÁVEL
ENTRE ENROLAMENTOS



EFEITO DO ENROLAMENTO DE
COMPENSAÇÃO NO EQUILÍBRIO TOTAL
DE FORÇAS MAGNETOMOTRIZES

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE REGULADORES DE INDUÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

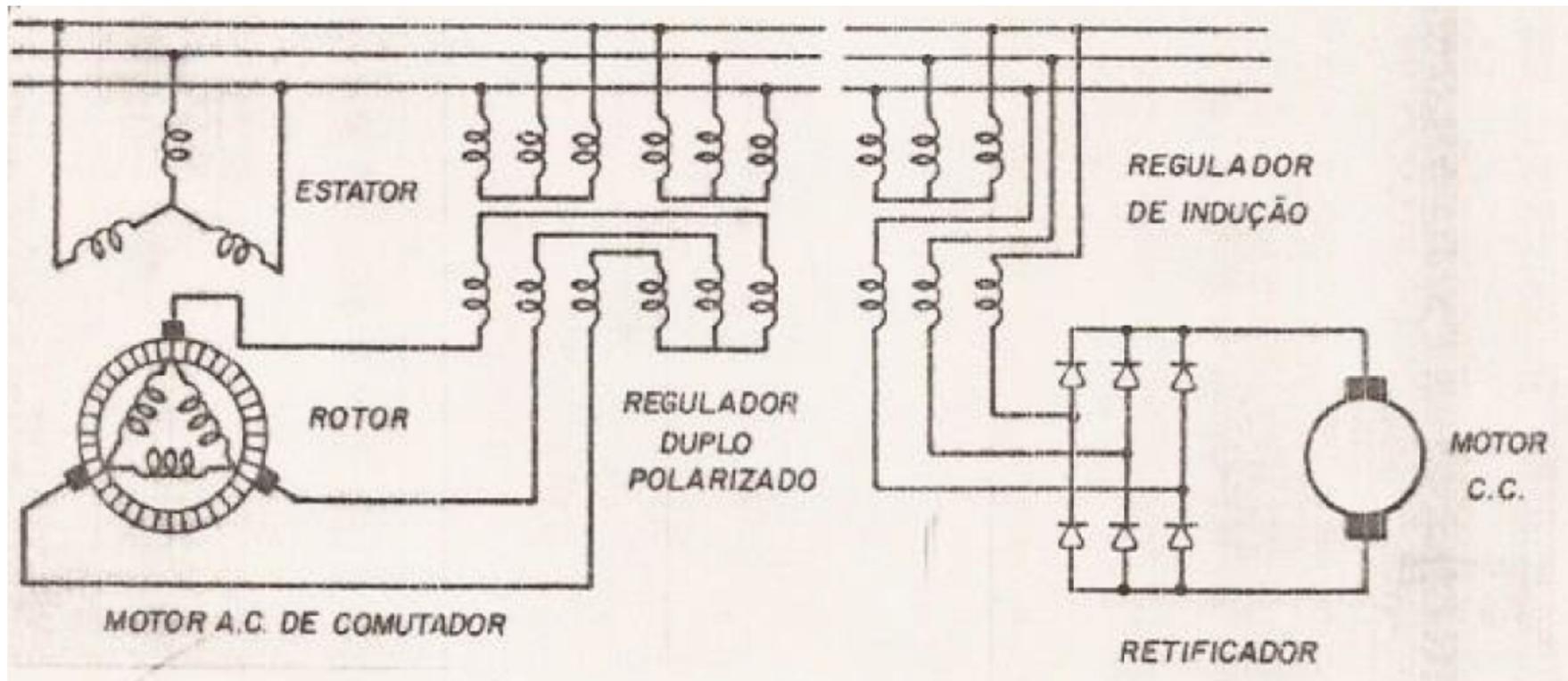


DIVISÃO DE CARGA ENTRE ALIMENTADORES
EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL

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

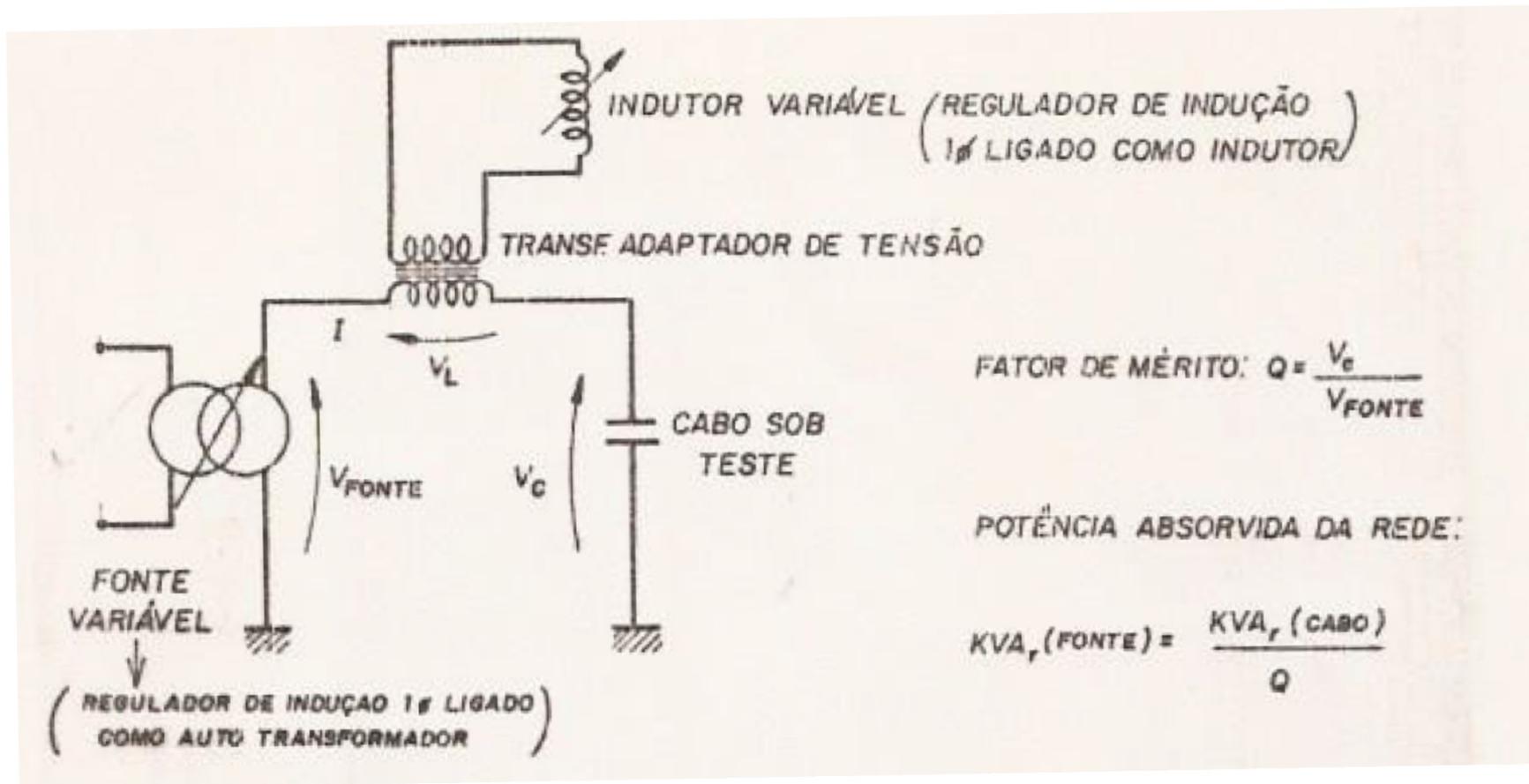


ACIONAMENTO DE MOTORES C.A. DE COMUTADOR (EM DESUSO)

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

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

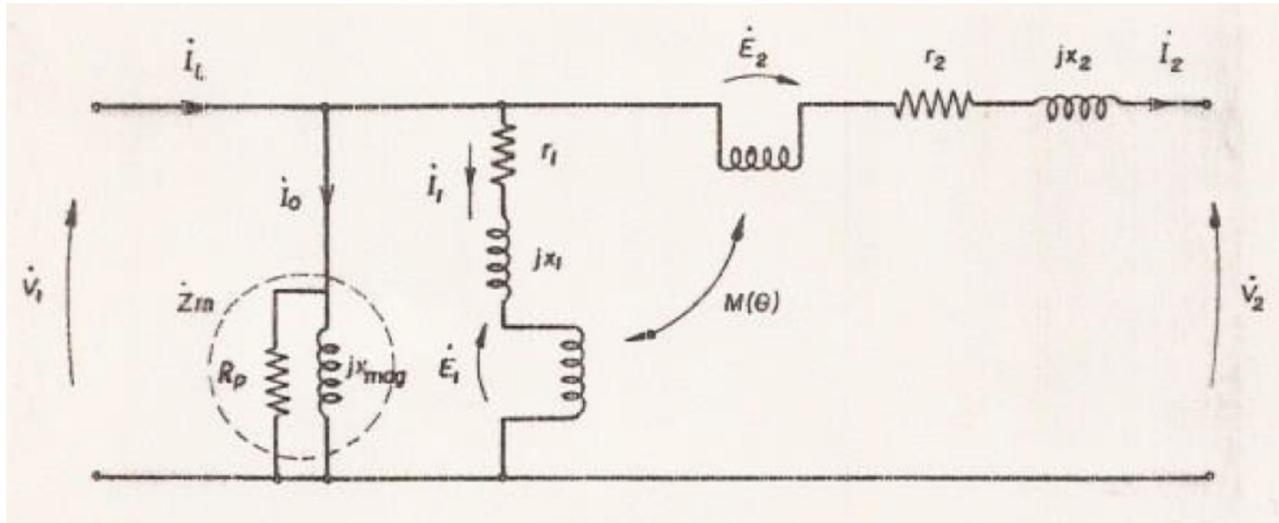
EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE REGULADORES DE INDUÇÃO EM LABORATÓRIOS DE ENSAIOS



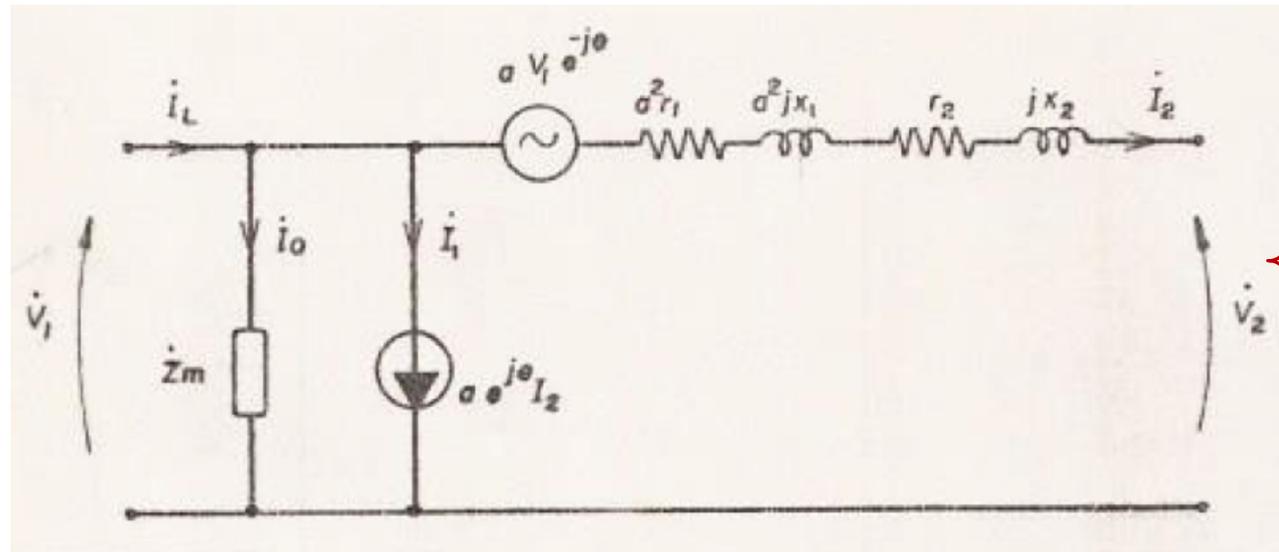
USO COMO FONTE DE TENSÃO E COMO INDUTOR VARIÁVEL PARA
RESSONÂNCIA SÉRIE COM CARGAS FORTEMENTE CAPACITIVAS

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

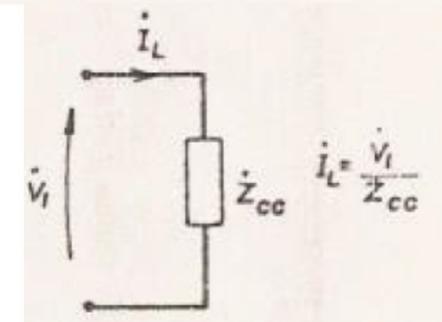
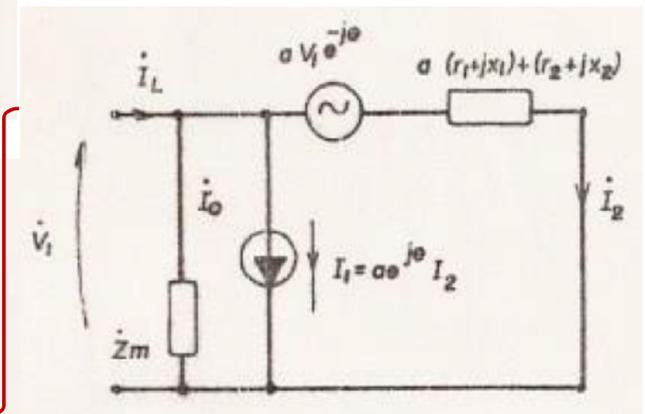
MODELO DIRETO DO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO



MODELO “CONVENCIONAL”
CONECTADO COMO AUTO-
TRANSFORMADOR



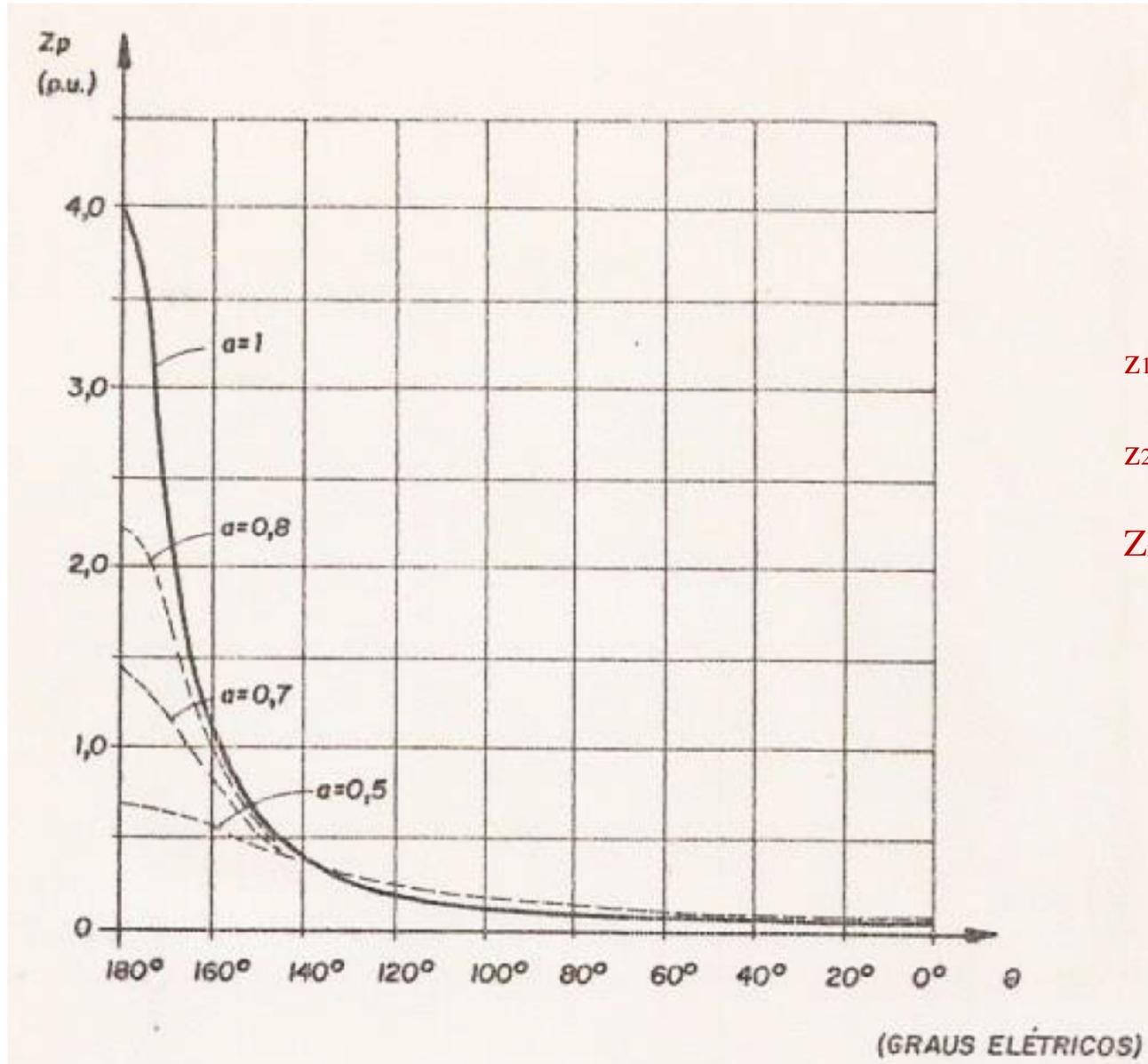
MODELO RESULTANTE, COM FONTES VINCULADAS



IMPEDÂNCIA VISTA PELA LINHA

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

CARACTERÍSTICA TÍPICA DE IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO DO REGULADOR DE INDUÇÃO



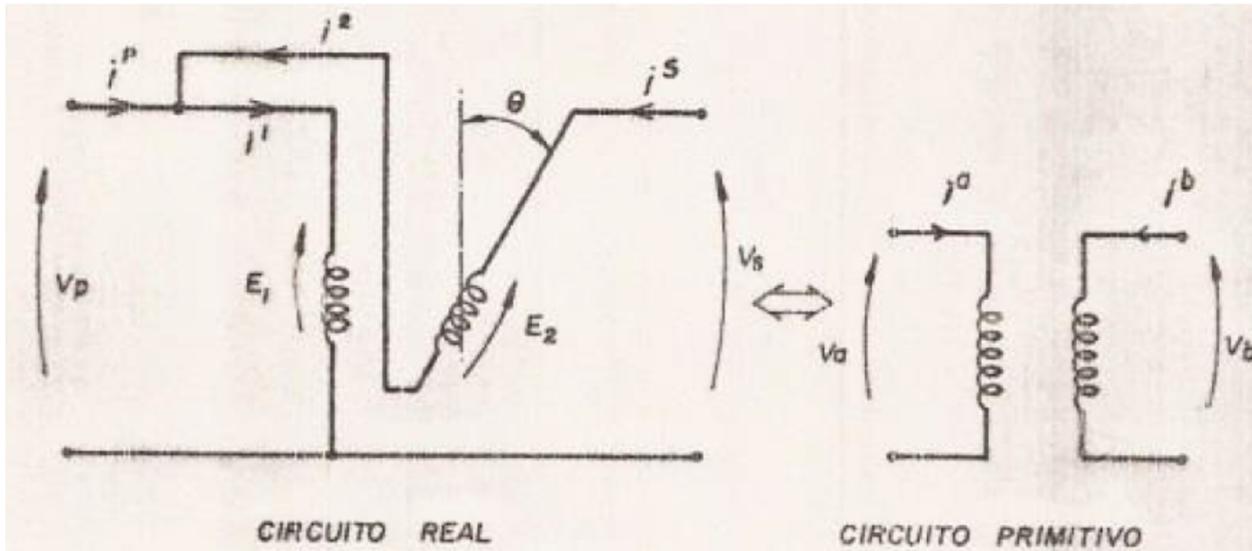
$$z_1 = 0,1 \text{ p.u.}$$

$$z_2 = 0,2 \text{ p.u.}$$

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

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

MODELO POR FASE A PARTIR DA ANÁLISE TENSORIAL – REGULADOR TRIFÁSICO



MODELOS REAL E
PRIMITIVO POR FASE

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

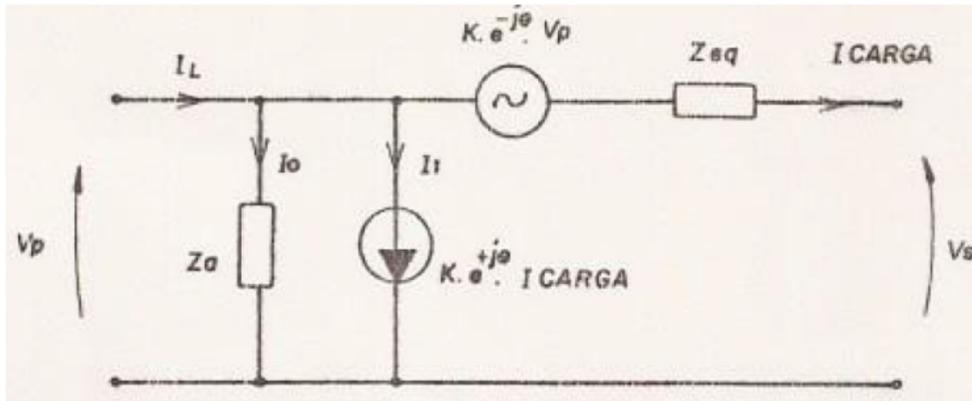
TENSOR DE IMPEDÂNCIAS GERAL
DO REGULADOR TRIFÁSICO

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

EQUAÇÕES GERAIS
DO REGULADOR
TRIFÁSICO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

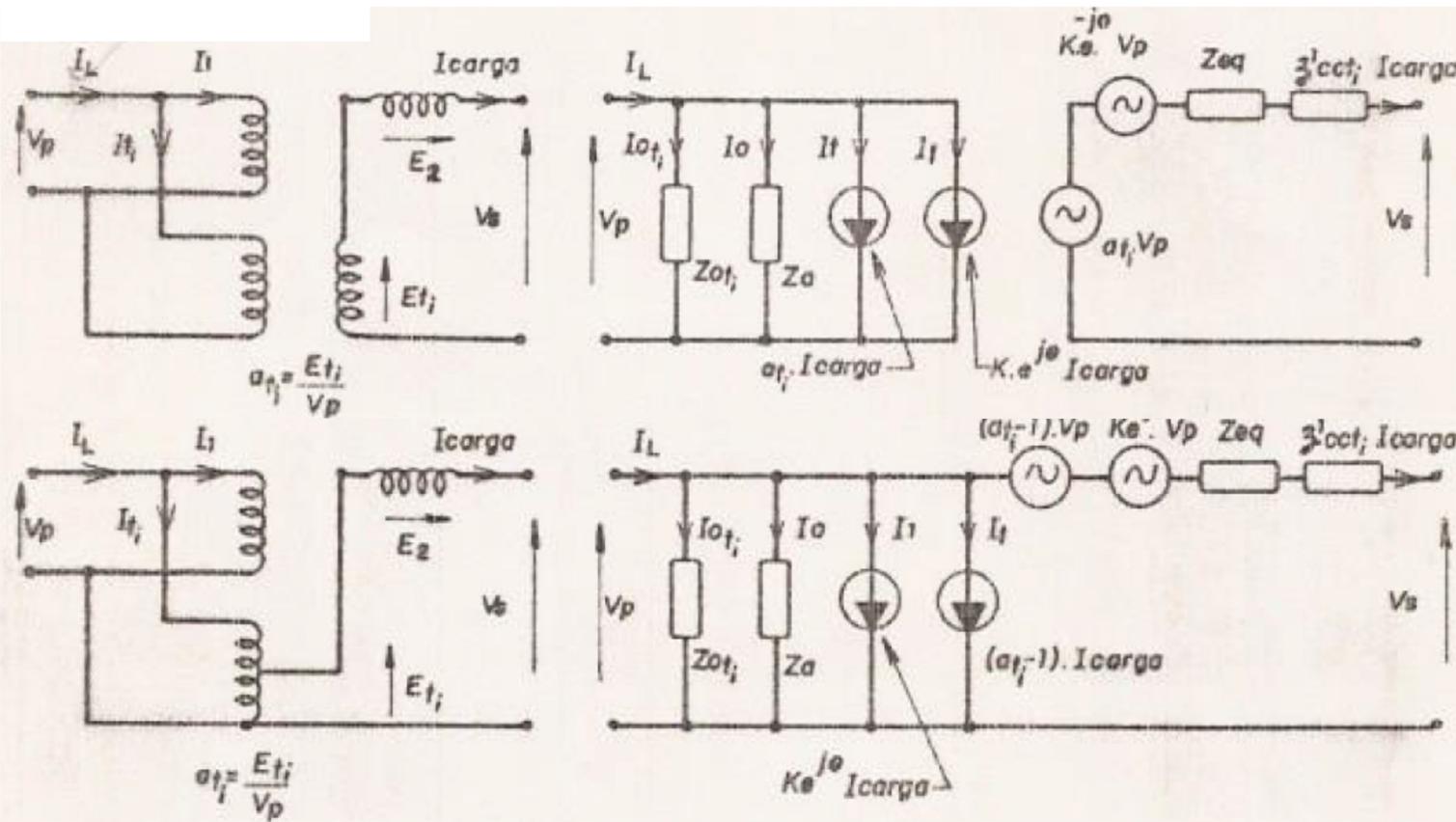
MODELO FINAL – REGULADOR TRIFÁSICO



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

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

REGULADOR TRIFÁSICO

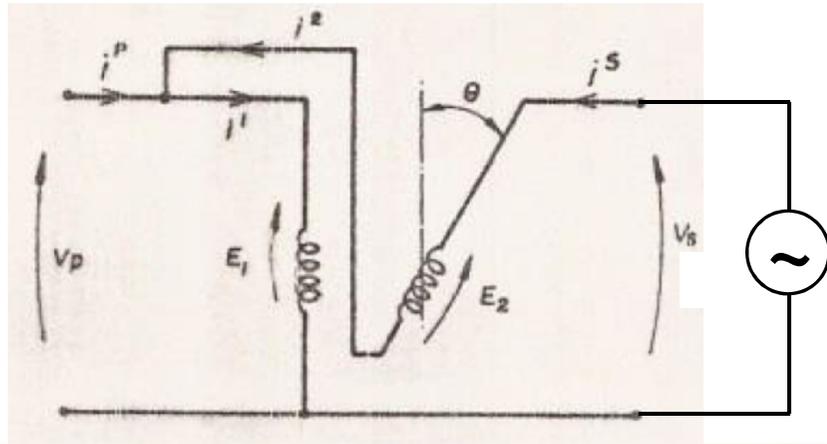


REGULADOR TRIFÁSICO COM TRANSFORMADOR AUXILIAR ISOLADOR

REGULADOR TRIFÁSICO COM AUTO TRANSFORMADOR AUXILIAR

PEA - 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

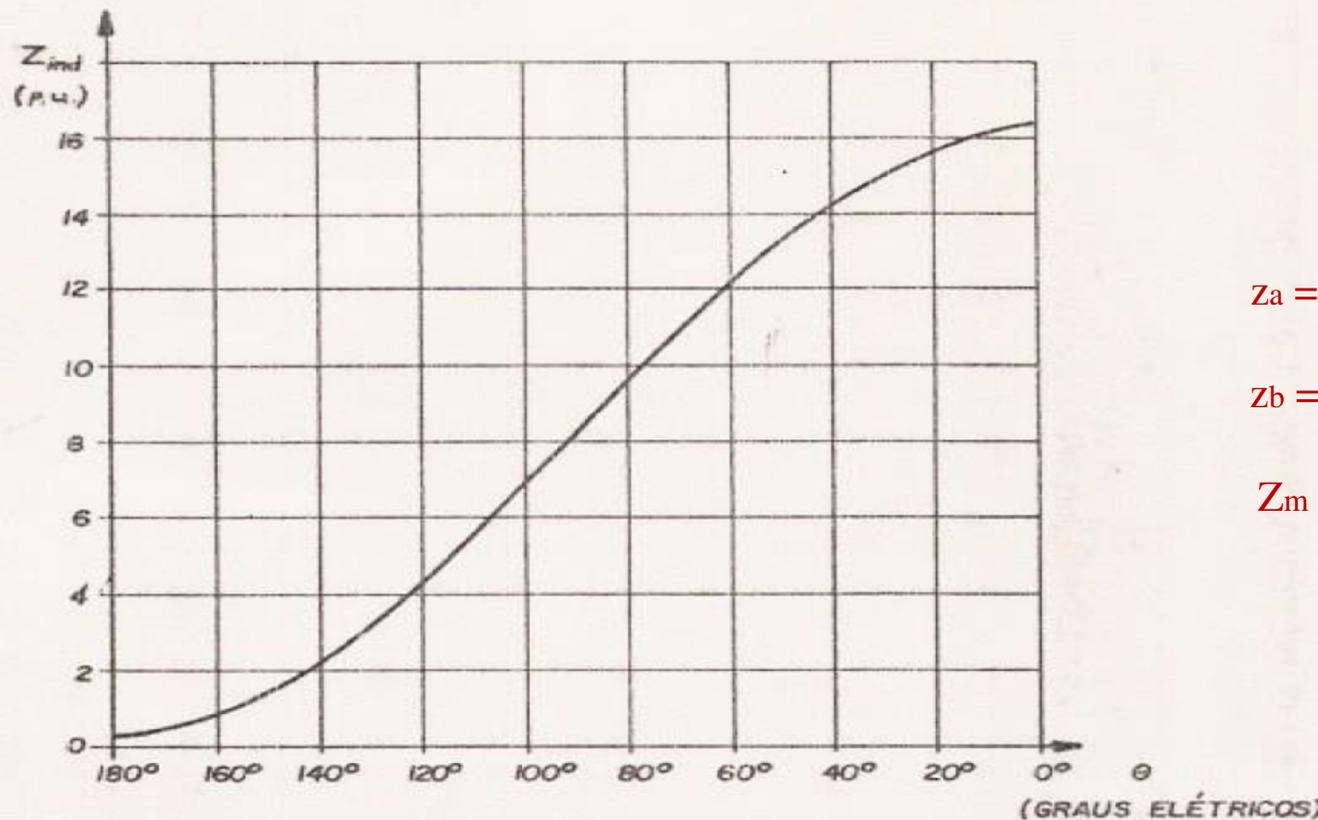
REGULADOR TRIFÁSICO OPERANDO COMO INDUTOR VARIÁVEL



ALIMENTAÇÃO PELO SECUNDÁRIO
PRIMÁRIO EM ABERTO

$$Z_{ind} = \frac{V_S}{I^S} \rightarrow I^P = 0 \text{ nas equações gerais}$$

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



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

$$z_b = 0,2 \text{ p.u.}$$

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

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

REGULADOR MONOFÁSICO: MODELO A PARTIR DA ANÁLISE TENSORIAL

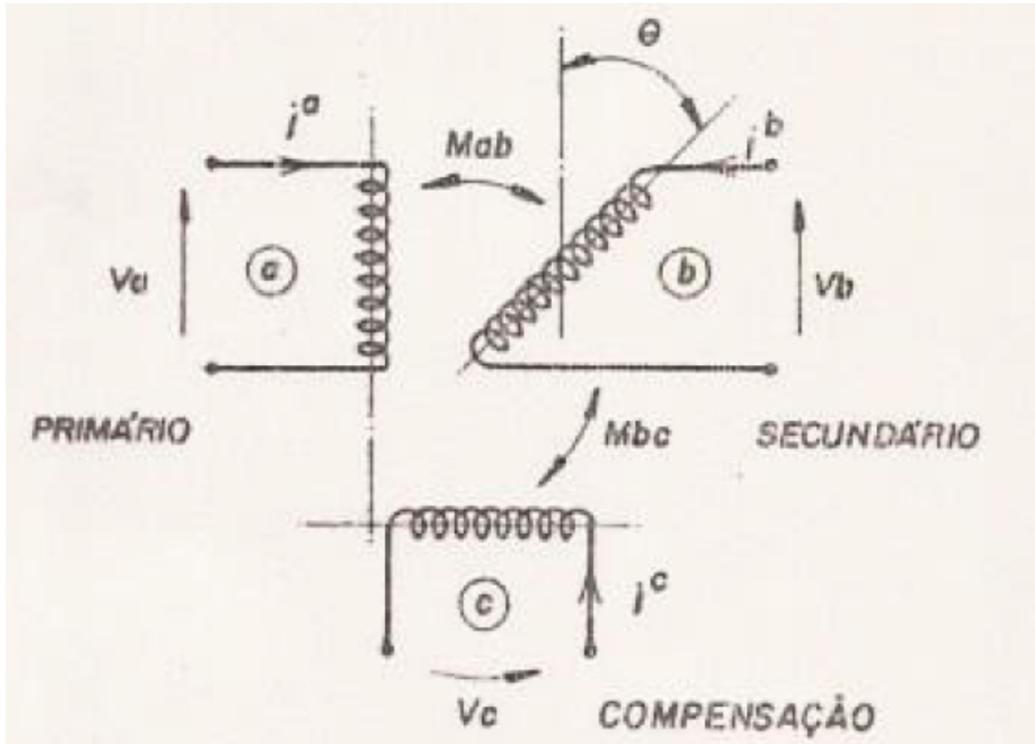


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO
REGULADOR MONOFÁSICO

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

CARACTERIZAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS
MÚTUAS ENTRE ENROLAMENTOS

RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO:

SECUNDÁRIO / PRIMÁRIO

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

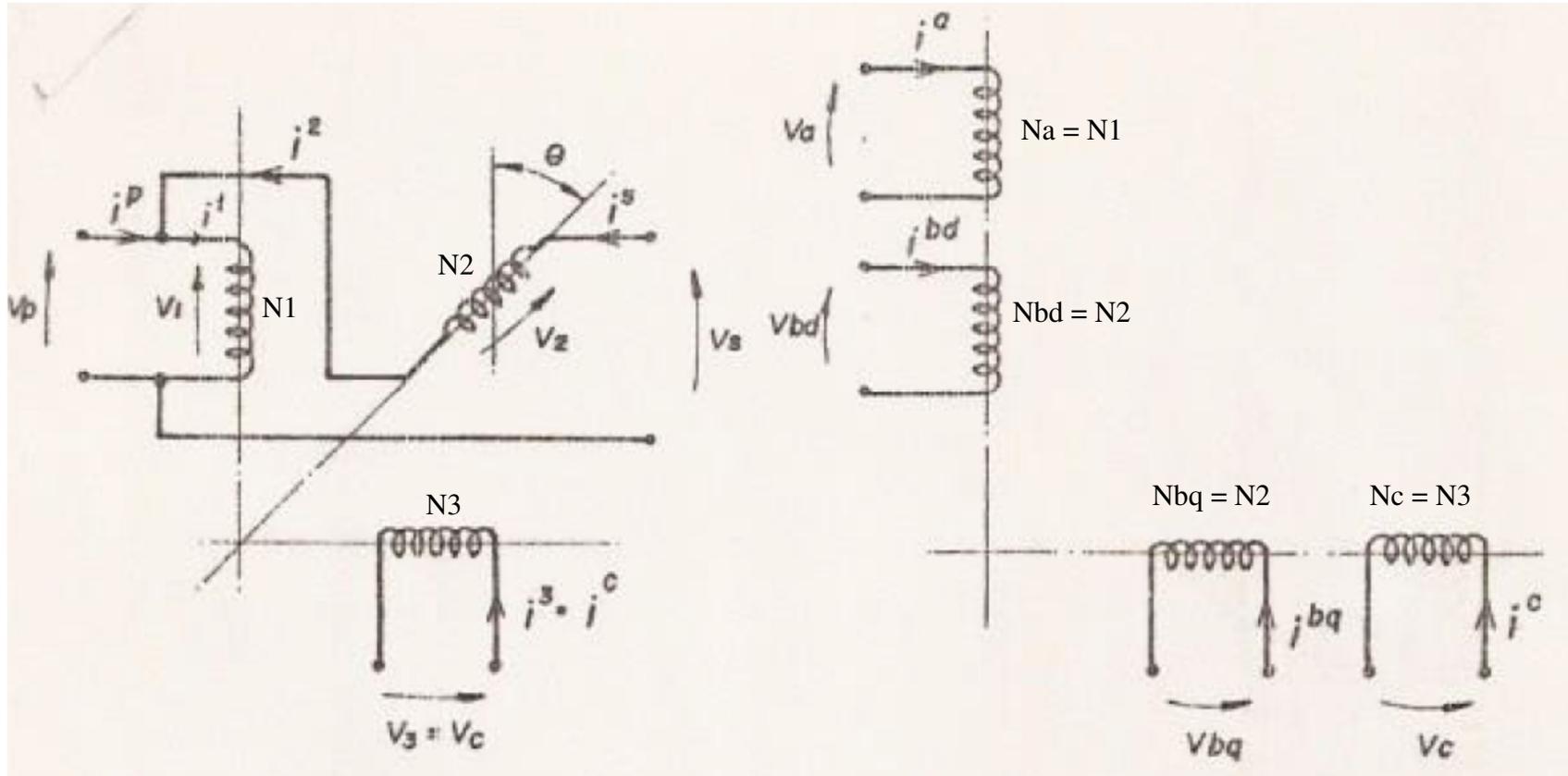
COMPENSAÇÃO / SECUNDÁRIO

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

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

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

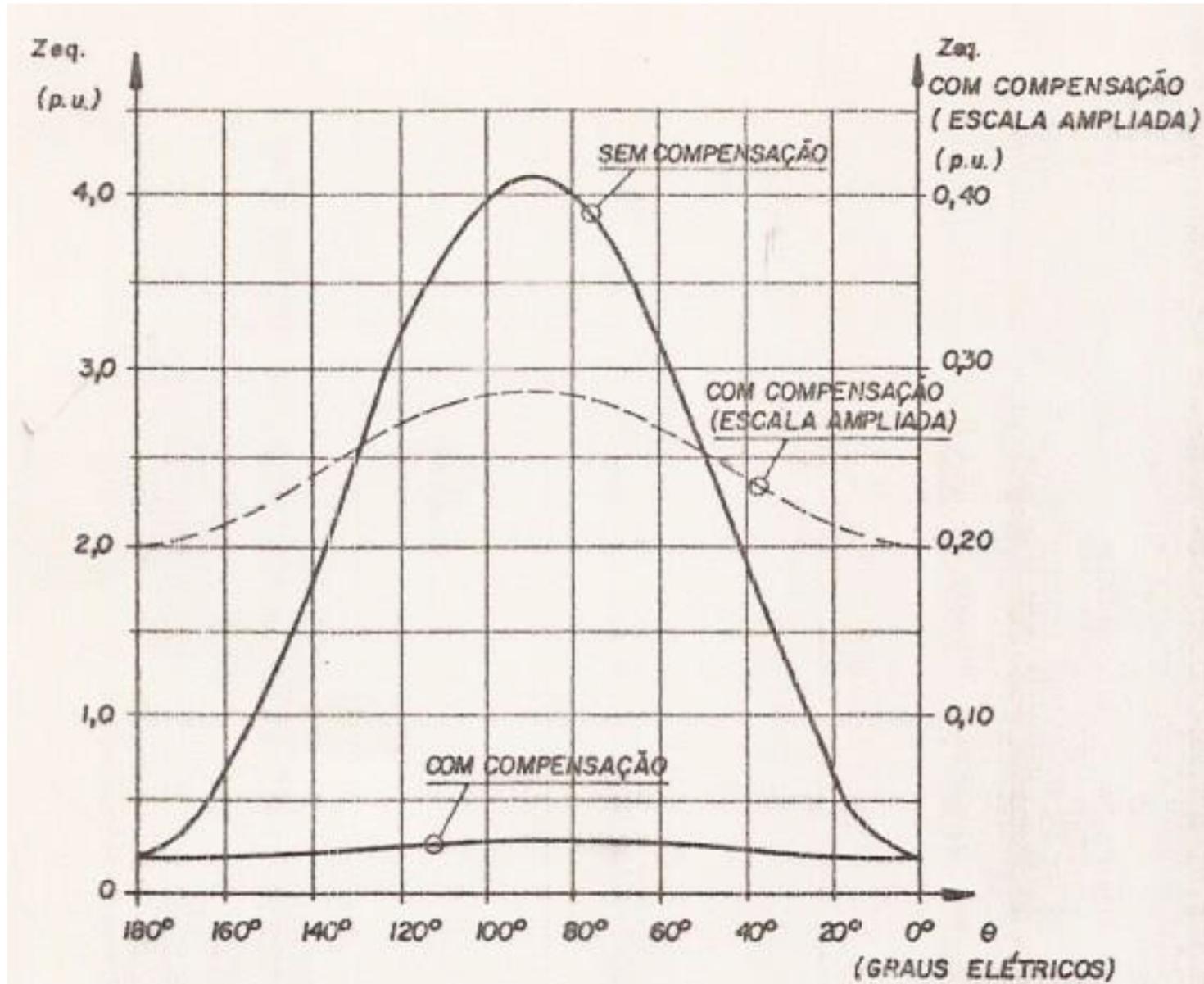
TENSOR DE IMPEDÂNCIAS GERAL DO REGULADOR MONOFÁSICO

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

EQUAÇÕES GERAIS DO REGULADOR MONOFÁSICO

PEA – 5728 - Parte 2: REGULADORES DE INDUÇÃO

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:

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

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

$I = 6.500 \text{ A}$

