

PARTE 3

SINCROS DE CONTROLE - (“SELSYN”)

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

“SELSYN” - ACRÔNIMO DE “SELF – SYNCHRONOUS” OU SINCRO DE CONTROLE

DESIGNAÇÃO GERAL DE DISPOSITIVOS ELETROMECCÂNICOS COM FUNÇÃO DE:

1 - TRANSMISSÃO À DISTÂNCIA DE CONJUGADOS DE PEQUENA MAGNITUDE

2 - TRANSMISSÃO À DISTÂNCIA DE SINAIS (MECÂNICOS OU ELÉTRICOS) DE POSIÇÃO ANGULAR

3 – TRANSMISSÃO À DISTÂNCIA DE SINAIS DE ERRO DE POSIÇÃO ANGULAR

CARACTERIZAM-SE COMO TRANSDUTORES OU ATUADORES DE ELEVADA PRECISÃO E ROBUSTEZ, IMUNES A INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS E APTOS A OPERAREM EM AMBIENTES AGRESSIVOS COM ELEVADA TEMPERATURA, VIBRAÇÃO E SUJEIÇÃO A CHOQUES.

➔ DESENVOLVIDOS ORIGINALMENTE PARA EQUIPAMENTOS DE APLICAÇÃO MILITAR

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

CONFIGURAÇÕES USUAIS:

1 – SINCRO “TRANSMISSOR – RECEPTOR” (OU “GERADOR – MOTOR”)

→ TRANSMITE CONJUGADO OU SINAL MECÂNICO DE POSIÇÃO ANGULAR

APLICAÇÕES:

- INDICADORES MECÂNICOS DE POSIÇÃO DE VÁLVULAS, COMPORTAS, ANTENAS, NÍVEL DE RESERVATÓRIOS, ETC.
- ACIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE PEQUENO PORTE À DISTÂNCIA, SEM ELO MECÂNICO, COMO CÂMERAS DE VÍDEO, MANIPULADORES EM AMBIENTE CONFINADO, ENCODERS, ETC.

2 – SINCRO “TRANSMISSOR – TRANSFORMADOR”

→ TRANSMITE SINAL ELÉTRICO DE POSIÇÃO ANGULAR

APLICAÇÕES:

- INDICADORES DE POSIÇÃO COM SINAL ELÉTRICO
- SERVO MECANISMOS E CONTROLADORES DE POSIÇÃO

3 – SINCRO “DIFERENCIAL”

→ TRANSMITE SINAL DE ERRO DE POSIÇÃO ANGULAR

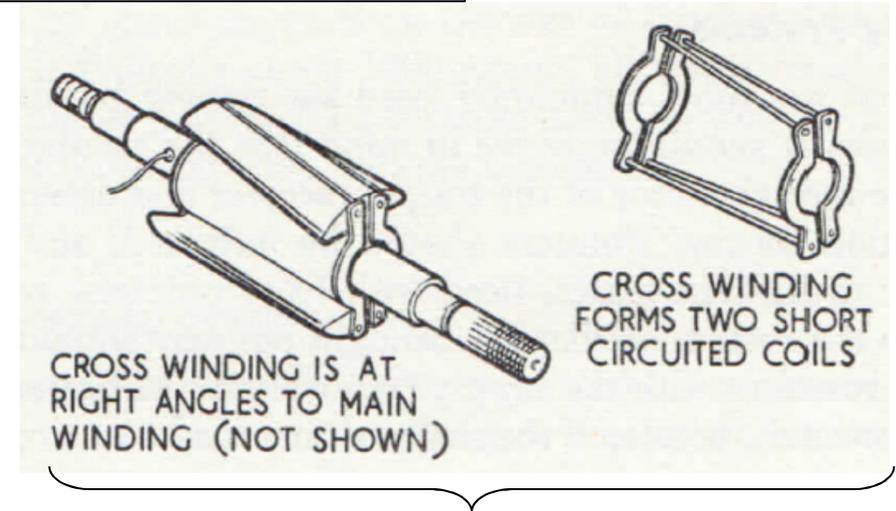
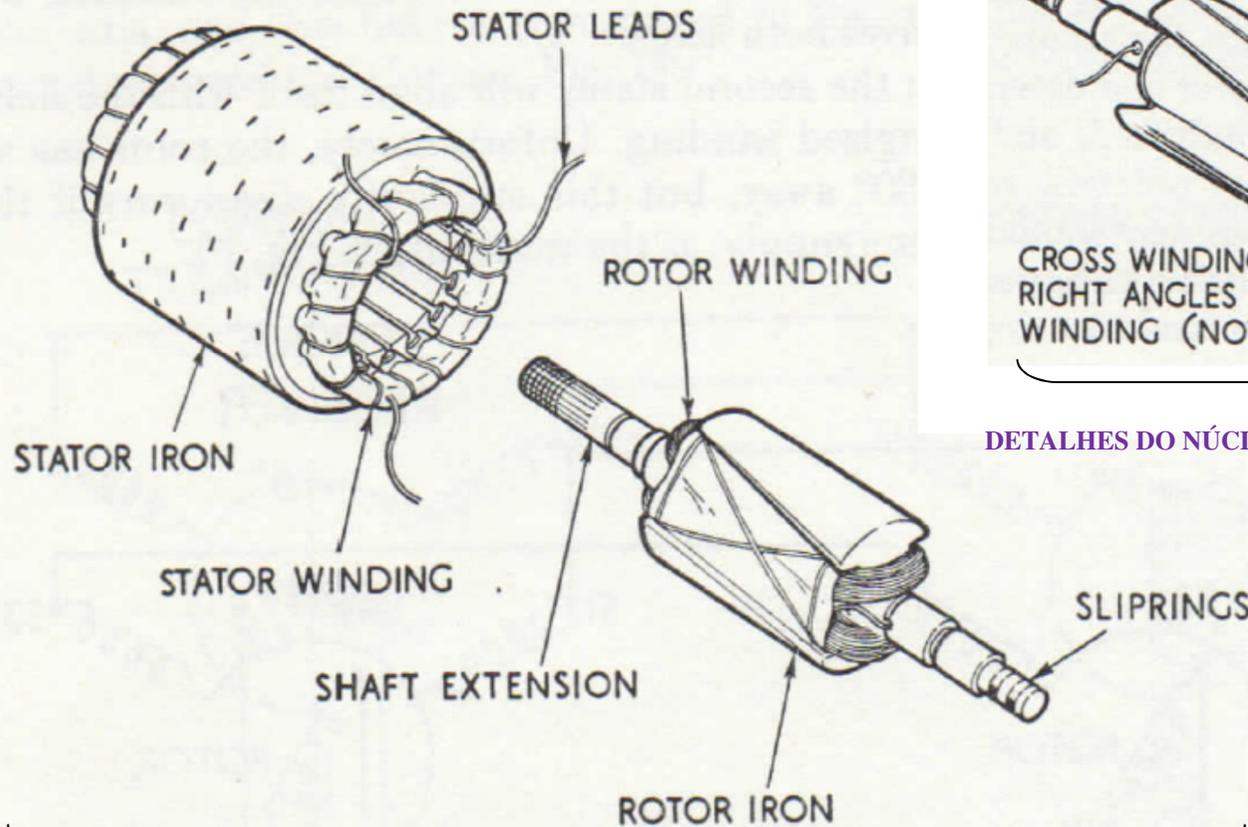
APLICAÇÕES:

- DETECTORES DE ERRO, DETECTORES DE PERDA DE SINCRONISMO ENTRE EIXOS
- CONTROLE

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS SINCROS DE CONTROLE

SINCRO TRANSMISSOR E SINCRO RECEPTOR:



DETALHES DO NÚCLEO DO ROTOR COM BARRA AMORTECEDORA

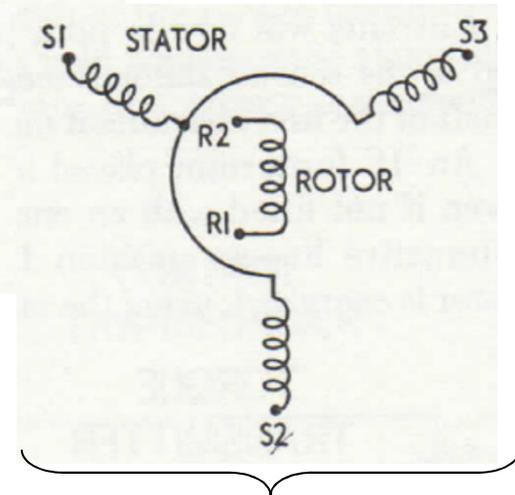


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO TRANSMISSOR/RECEPTOR

CONSTRUÇÃO SIMILAR À DA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES:

ESTATOR COM ENROLAMENTO TRIFÁSICO (ENROLAMENTO DE SINCRONIZAÇÃO)

ROTOR COM ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO ALIMENTADO EM C.A.

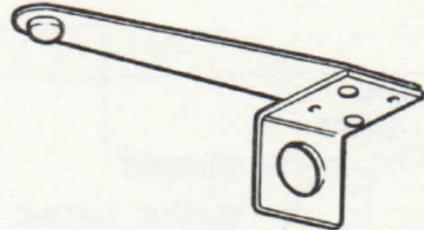
ENROLAMENTO AMORTECEDOR PARA ATENUAR OSCILAÇÕES

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

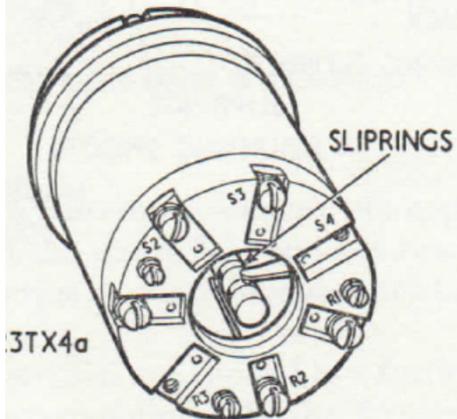
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS SINCROS DE CONTROLE

ALIMENTAÇÃO DO ROTOR
PODE SER FEITA DE FORMA
ALTERNATIVA ATRAVÉS DE
TRANSFORMADOR ROTATIVO

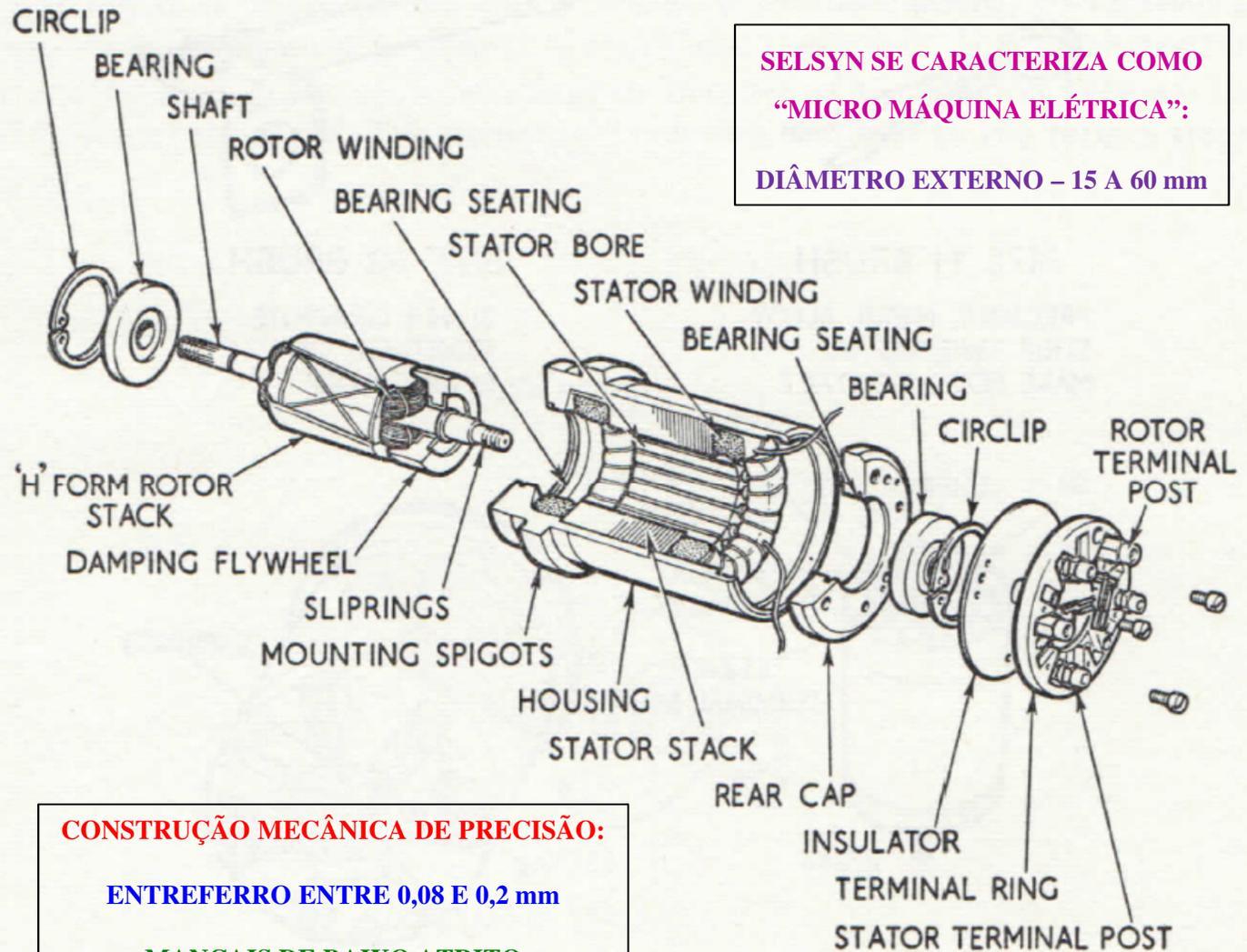
SELSYN SE CARACTERIZA COMO
“MICRO MÁQUINA ELÉTRICA”:
DIÂMETRO EXTERNO – 15 A 60 mm



SIZE 23 BRUSH
SILVER GRAPHITE
CONTACT ON
SPRING LEAF



3TX4a



CONSTRUÇÃO MECÂNICA DE PRECISÃO:

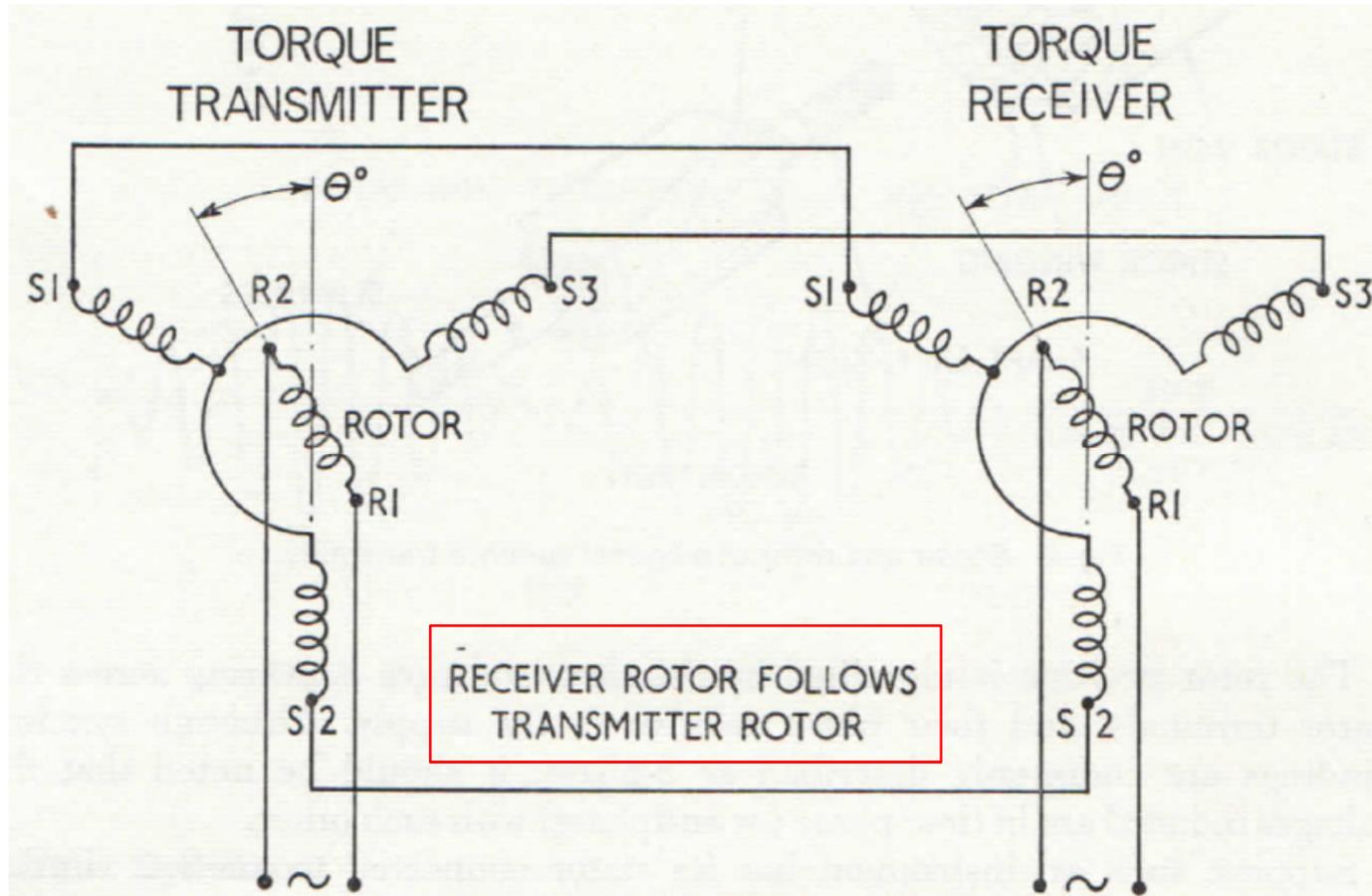
ENTREFERRO ENTRE 0,08 E 0,2 mm

MANCAIS DE BAIXO ATRITO

ESCOVAS DE BAIXA QUEDA DE TENSÃO
NO CONTATO COM OS ANÉIS

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

ESQUEMA DE CONEXÕES DO SINCRO TRANSMISSOR - RECEPTOR



ROTORES DOS DOIS SINCROS ALIMENTADOS NA MESMA FONTE DE TENSÃO ALTERNADA :

TENSÕES USUAIS – 50 / 110 V - FREQUÊNCIAS USUAIS: 50 / 60 / 400 / 2500 Hz

ESTADORES CONECTADOS ENTRE SI POR LINHA TRIFÁSICA (“LINHA DE TRANSMISSÃO”)

TENSÕES DE LINHA USUAIS NOS ESTADORES: 50 / 80 V

DISTÂNCIA ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR: ATÉ POUCOS QUILOMETROS

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

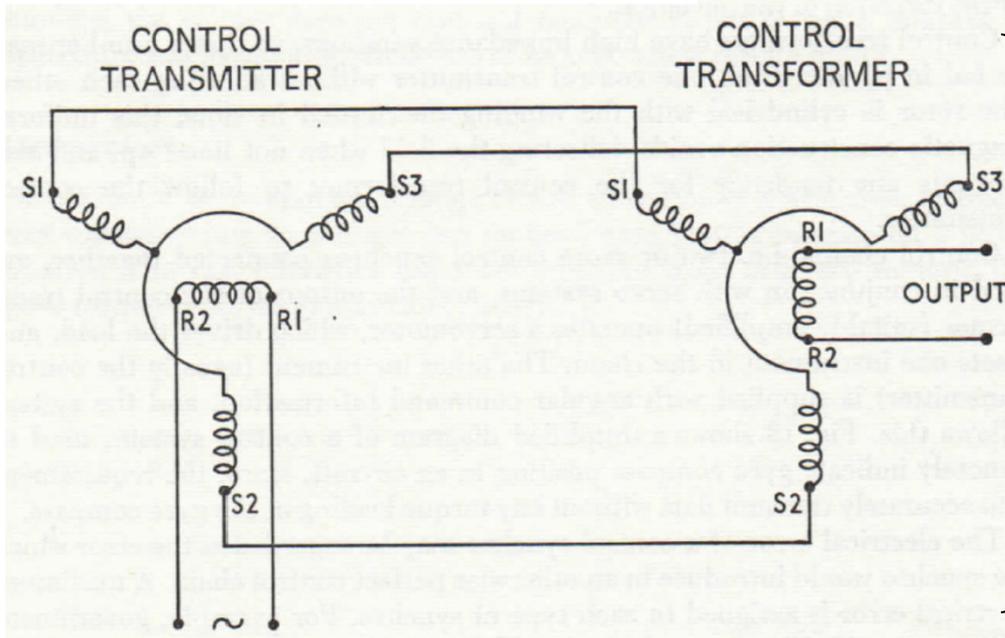
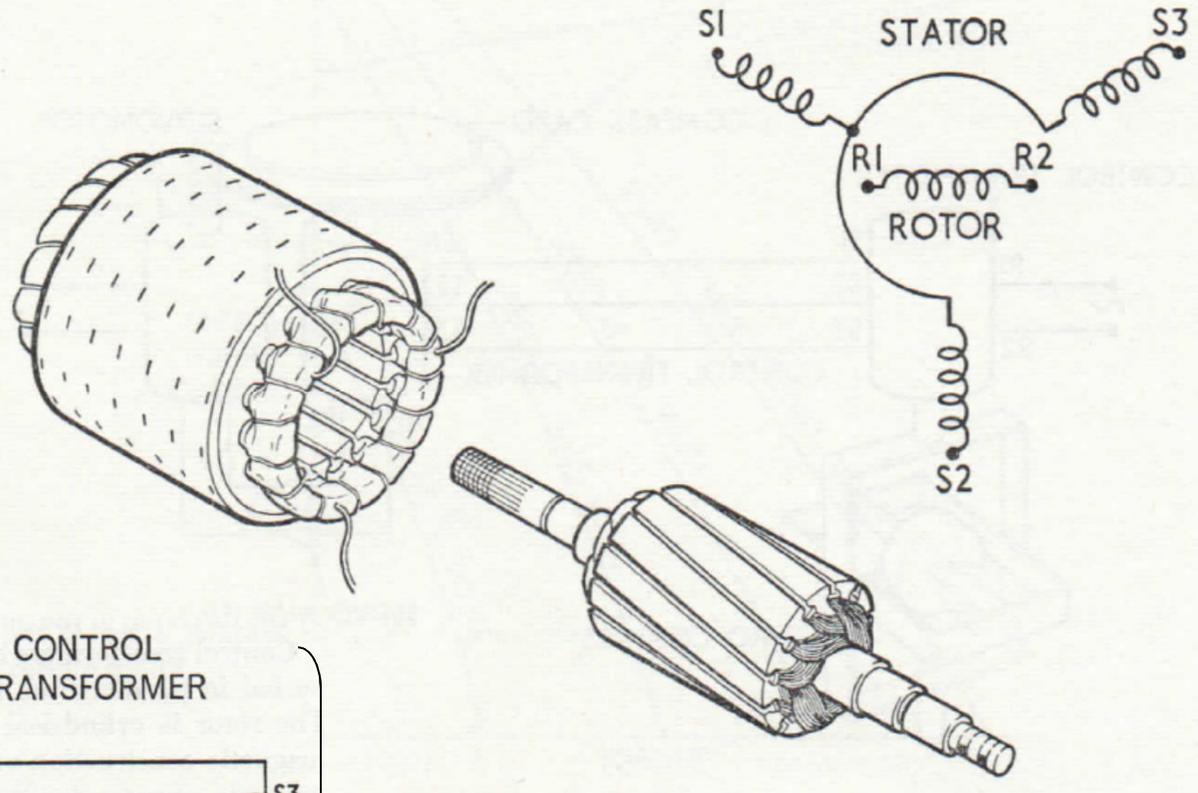
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS SINCROS DE CONTROLE

SINCRO TRANSFORMADOR:

CONSTRUÇÃO SIMILAR À DA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS:

ESTATOR COM ENROLAMENTO TRIFÁSICO (ENROLAMENTO DE SINCRONIZAÇÃO)

ROTOR COM ENROLAMENTO MONOFÁSICO → SAÍDA ELÉTRICA



ESQUEMA DE CONEXÕES DO SINCRO TRANSFORMADOR

ROTOR DO TRANSMISSOR ALIMENTADO EM TENSÃO

SINAL DE SAÍDA PELO ROTOR DO TRANSFORMADOR

ESTADORES CONECTADOS POR LINHA TRIFÁSICA

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS SINCROS DE CONTROLE

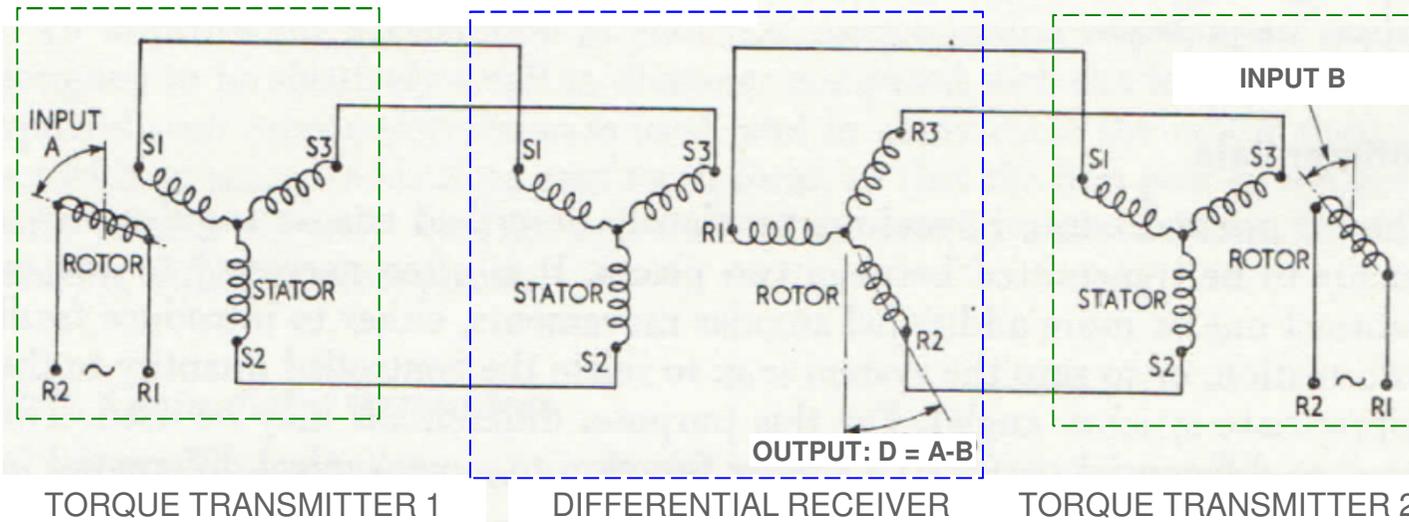
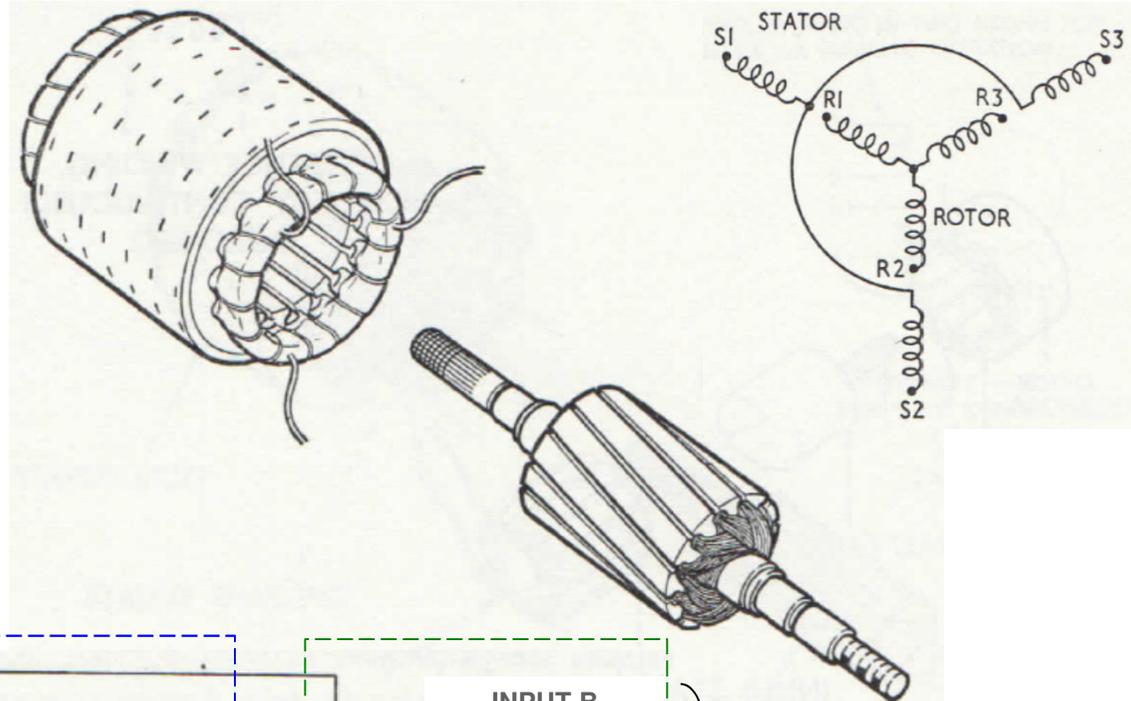
SINCRO DIFERENCIAL:

CONSTRUÇÃO SIMILAR À DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ROTOR BOBINADO:

ESTATOR COM ENROLAMENTO TRIFÁSICO

ROTOR COM ENROLAMENTO

TRIFÁSICO – ACESSÍVEL POR MEIO DE TRÊS ANÉIS COLETORES E ESCOVAS



ESQUEMA DE CONEXÕES DO SINCRO DIFERENCIAL

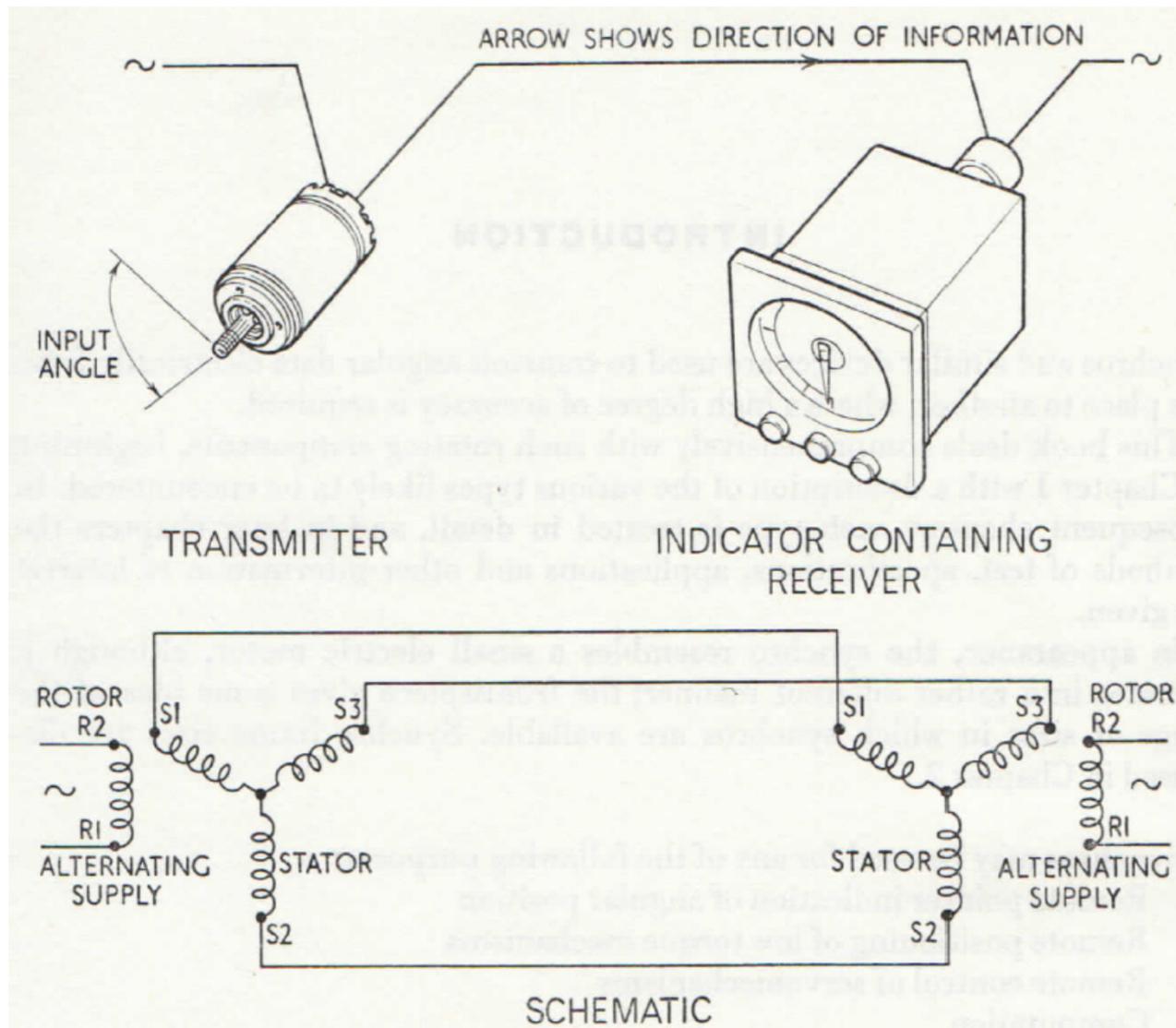
ESTATOR DO TRANSMISSOR 1 CONECTADO AO ESTATOR DO DIFERENCIAL

ESTATOR DO TRANSMISSOR 2 CONECTADO AO ROTOR DO DIFERENCIAL

ROTORES DO DOIS SINCROS TRANSMISSORES ALIMENTADOS EM TENSÃO

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM PAR DE SINCROS NO MODO TRANSMISSOR – RECEPTOR UTILIZADO COMO INDICADOR DE POSIÇÃO À DISTÂNCIA



TRANSMISSOR:

ACOPLADO AO DISPOSITIVO QUE SE MOVIMENTA

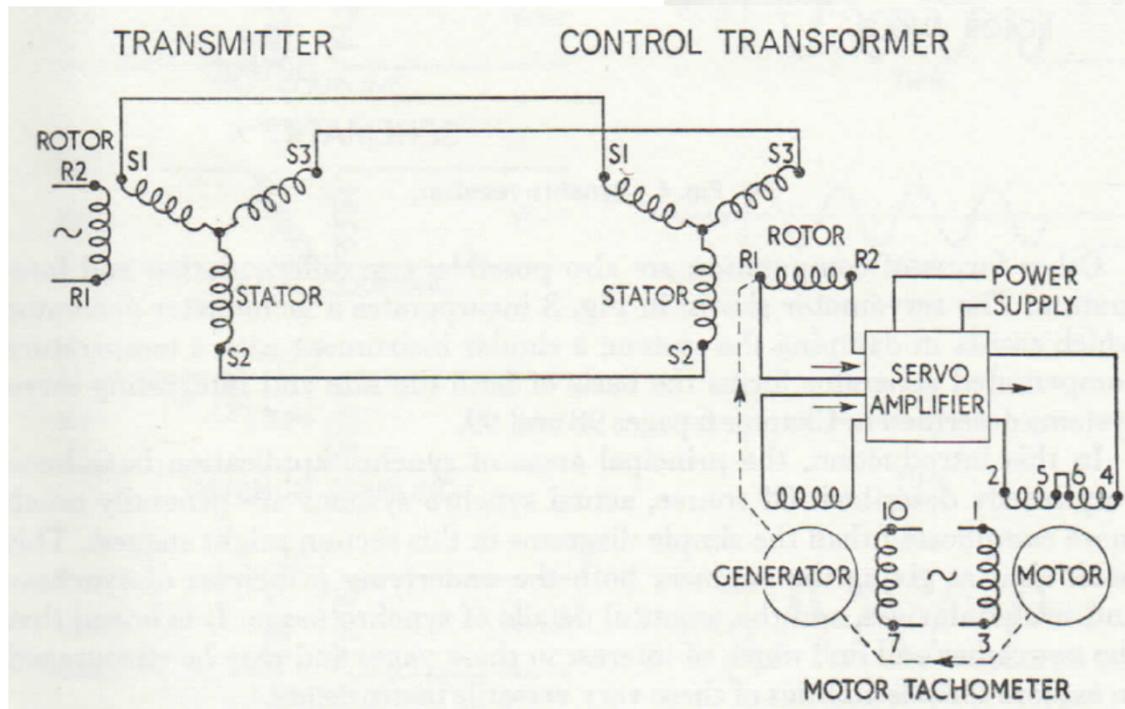
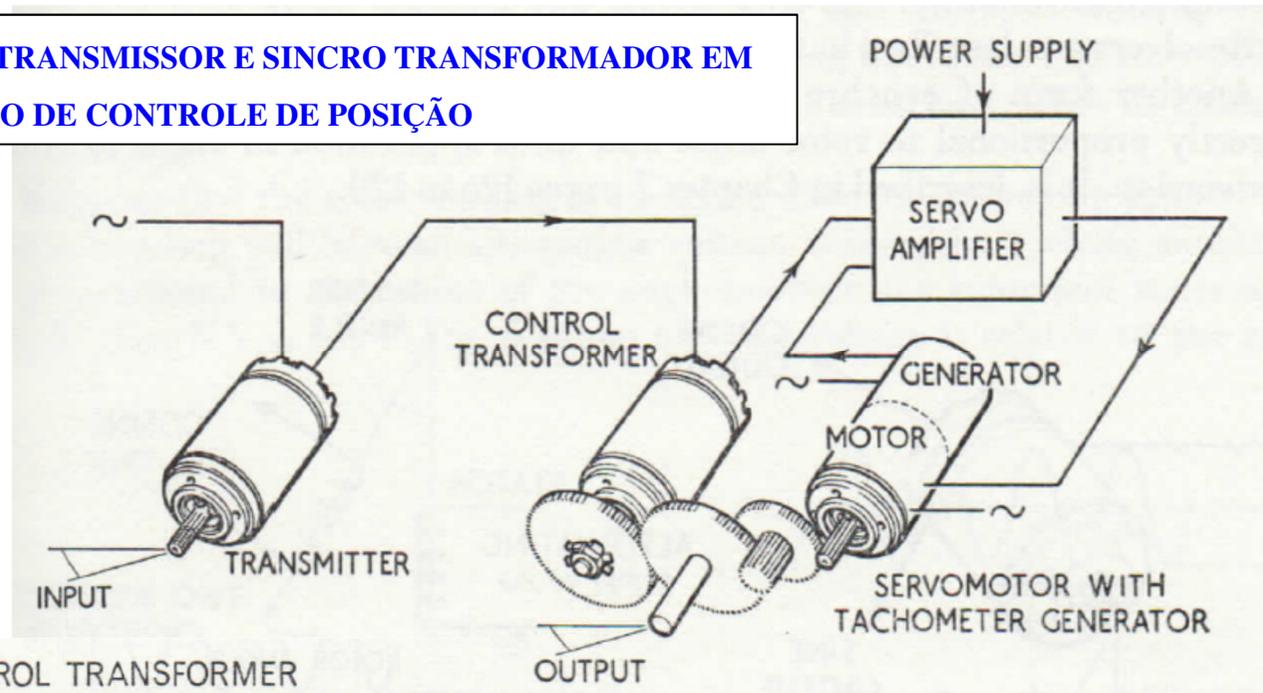
e.g. VÁLVULA, ANTENA, COMPORTA, ABERTURA DE CILÍNDRIO DE LAMINADOR, ETC.

RECEPTOR:

INDICA A POSIÇÃO DO DISPOSITIVO EM UMA SALA REMOTA DE CONTROLE

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

APLICAÇÃO DE UM PAR DE SINCRO TRANSMISSOR E SINCRO TRANSFORMADOR EM SERVO MECANISMO DE CONTROLE DE POSIÇÃO



TRANSMISSOR:

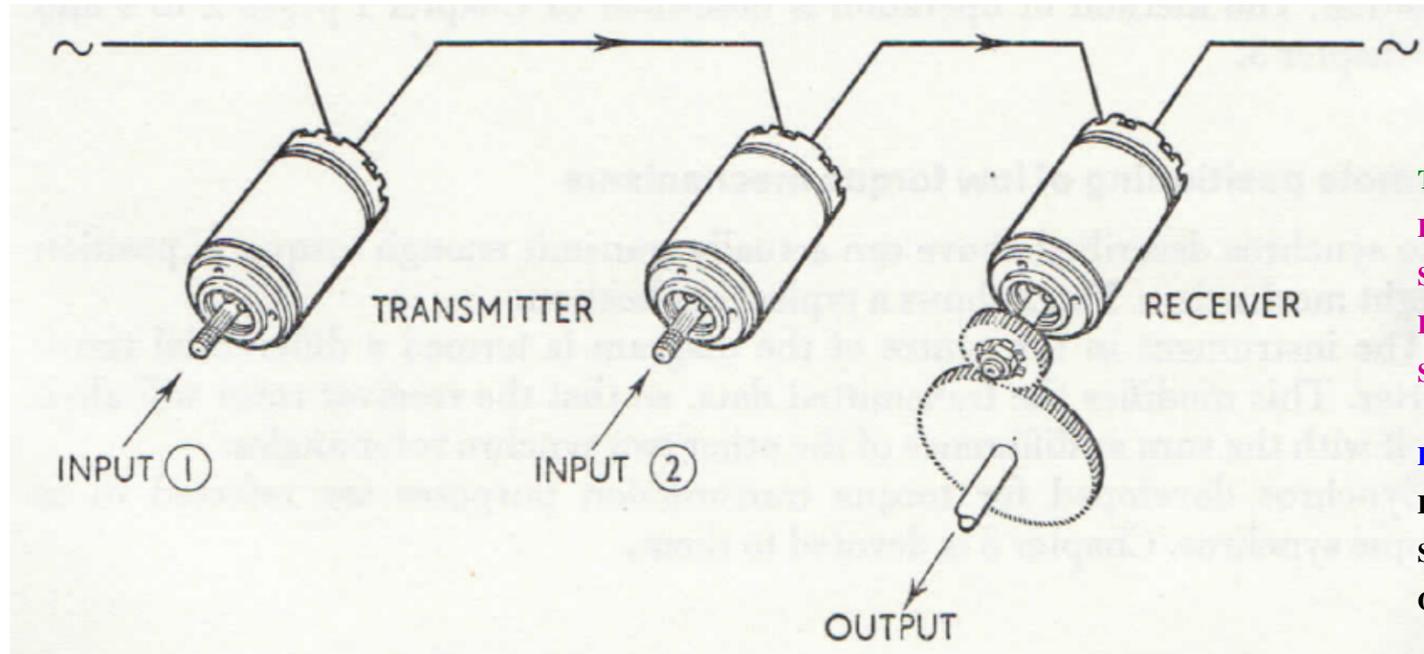
ENTRADA MECÂNICA DO SISTEMA, CUJO MOVIMENTO DEVE SER SEGUIDO E AMPLIFICADO.

TRANSFORMADOR:

FORNECE O SINAL ELÉTRICO DE SAÍDA QUE, AMPLIFICADO, É APLICADO AO SERVO MOTOR PARA ACIONAMENTO DA CARGA QUE DEVE REPLICAR O MOVIMENTO DO TRANSMISSOR

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE SINCRO DIFERENCIAL PARA MONITORAMENTO DE ASSINCRONIA ENTRE DOIS EIXOS

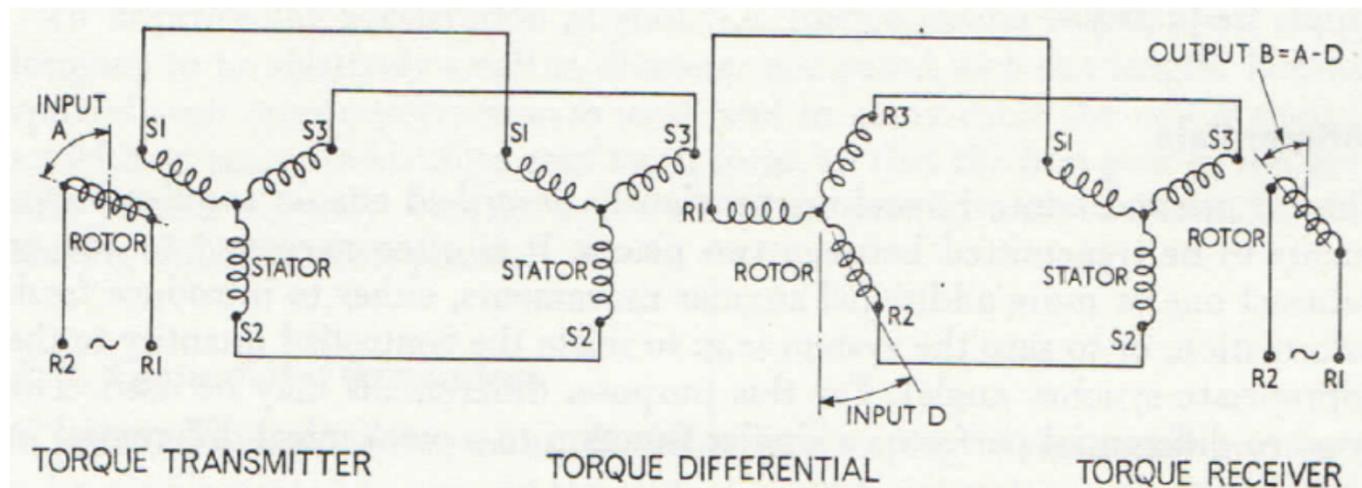


TRANSMISSORES:

ENTRADA MECÂNICA DO SISTEMA, ACIONADOS PELOS EIXOS EM MOVIMENTO SÍNCRONO.

DIFERENCIAL:

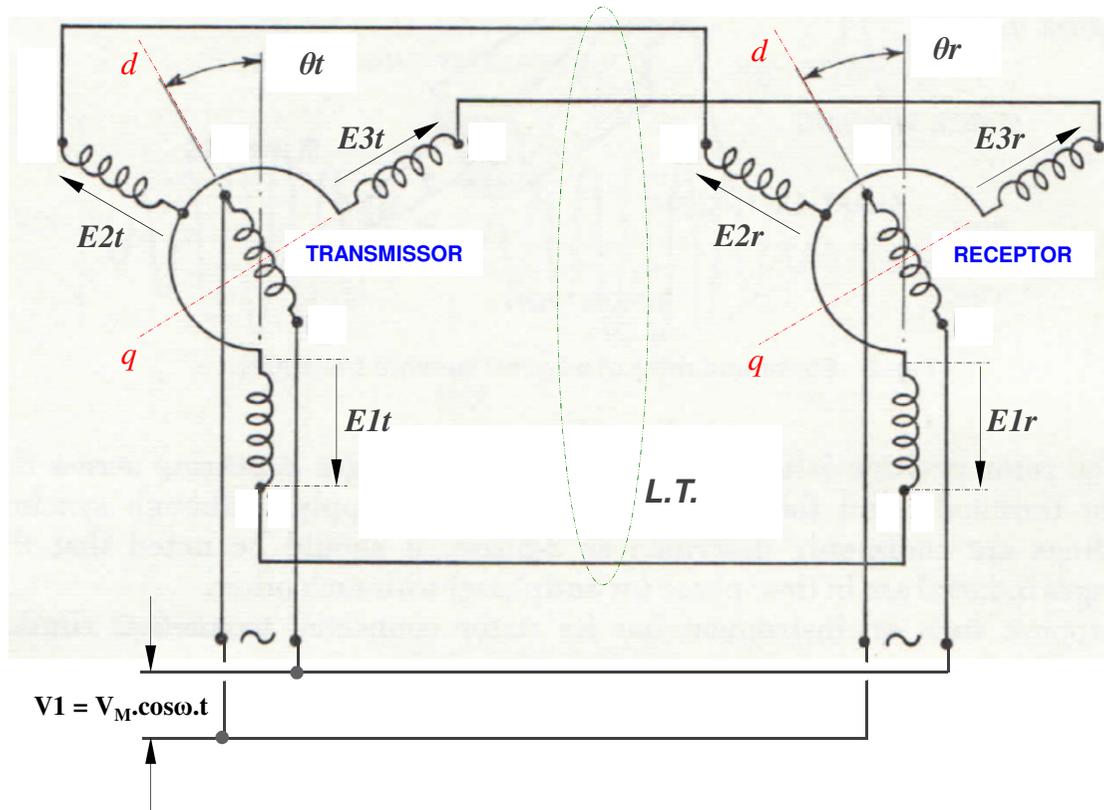
FORNECE O SINAL MECÂNICO SEMPRE QUE O ÂNGULO ENTRE OS EIXOS DE ENTRADA VARIAR



ALTERNATIVAMENTE, PODE SER UTILIZADO PARA O ACIONAMENTO DE PEQUENAS CARGAS MECÂNICAS NO EIXO DE SAÍDA

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

FUNCIONAMENTO DO SINCRO TRANSMISSOR - RECEPTOR



→ PRIMÁRIOS DOS DOIS SINCROS ALIMENTADOS NA MESMA FONTE DE TENSÃO ALTERNADA :

$$V1 = V_M \cdot \cos \omega \cdot t$$

→ FLUXO MAGNÉTICO PULSANTE, ALINHADO COM O EIXO DIRETO DO ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO:

$$\phi_{exc} = \phi_d = \phi_M \cdot \text{sen} \omega \cdot t$$

→ TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES DO ENROLAMENTO DE SINCRONIZAÇÃO:

$$E_i = N_p \cdot (d\phi_{exc}/dt) \cdot \cos \theta = [(N_p \cdot k_e / N_p) \cdot V1] \cdot \cos \theta$$

$$E_i = E_M \cdot \cos \theta \rightarrow E_i(t) = E_M(t) \cdot \cos \theta \quad (i = 1; 2; 3)$$

→ TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO VARIÁVEL (E_M : VALOR EFICAZ MÁXIMO DA TENSÃO INDUZIDA)

TENSÕES NO SINCRO TRANSMISSOR:

$$E1t = E_M \cdot \cos \theta t$$

$$E2t = E_M \cdot \cos(\theta t - 120^\circ)$$

$$E3t = E_M \cdot \cos(\theta t - 240^\circ)$$

TENSÕES NO SINCRO RECEPTOR:

$$E1r = E_M \cdot \cos \theta r$$

$$E2r = E_M \cdot \cos(\theta r - 120^\circ)$$

$$E3r = E_M \cdot \cos(\theta r - 240^\circ)$$

ERRO ANGULAR: $\theta = \theta t - \theta r$

→ ERRO DE TENSÃO INDUZIDA

→ $\Delta E = E_t - E_r$ (EM FASE - SIST. 1 ϕ)

→ CORRENTE NA L.T. : $I = \Delta E / 2 \cdot Z_f$

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

FUNCIONAMENTO DO SINCRO TRANSMISSOR - RECEPTOR

ERRO ANGULAR: $\theta = \theta_t - \theta_r \rightarrow \Delta E = E_t - E_r = E_M \cdot \cos\theta_t - E_M \cdot \cos\theta_r = E_M \cdot (\cos\theta_t - \cos\theta_r)$

USANDO A TRANSFORMAÇÃO TRIGONOMÉTICA: $\cos A - \cos B = 2 \cdot \text{sen}[(A+B)/2] \cdot \text{sen}[(A-B)/2]$ E FAZENDO $\theta_r = \theta_t - \theta \rightarrow \Delta E = 2 \cdot E_M \cdot \text{sen}(\theta_t - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$

ERROS DE TENSÃO INDUZIDA NAS FASES (θ_t : TOMADO COMO REFERÊNCIA):

$$\Delta E_1 = E_{1t} - E_{1r} = 2 \cdot E_M \cdot \text{sen}(\theta_t - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$\Delta E_2 = E_{2t} - E_{2r} = 2 \cdot E_M \cdot \text{sen}(\theta_t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$\Delta E_3 = E_{3t} - E_{3r} = 2 \cdot E_M \cdot \text{sen}(\theta_t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

CORRENTES RESULTANTES NA LINHA DE TRANSMISSÃO (L.T.):

$$I_1 = \Delta E_1 / 2Z_f = I_M \cdot \text{sen}(\theta_t - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$I_2 = \Delta E_2 / 2Z_f = I_M \cdot \text{sen}(\theta_t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$I_3 = \Delta E_3 / 2Z_f = I_M \cdot \text{sen}(\theta_t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$I_M = 2 \cdot E_M / 2 \cdot Z_f \rightarrow Z_f : \text{IMPEDÂNCIA DE FASE DO SINCRO}$$

CORRENTES PERCORRENDO AS FASES DO ESTATOR:

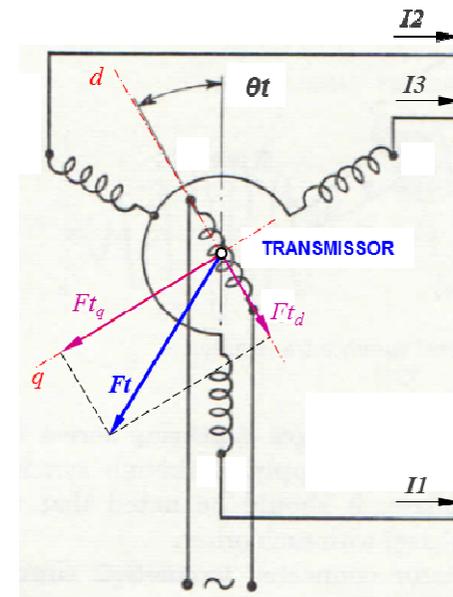
\rightarrow **FORÇA MAGNETOMOTRIZ DO ENROLAMENTO SINCRONIZADOR:** $F_{mm}(t) = k \cdot N_f \cdot I(t)$

$$F_{1t} = k \cdot N_f \cdot I_1 = k \cdot N_f \cdot I_M \cdot \text{sen}(\theta_t - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2) = F_M \cdot \text{sen}(\theta_t - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$F_{2t} = k \cdot N_f \cdot I_2 = k \cdot N_f \cdot I_M \cdot \text{sen}(\theta_t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2) = F_M \cdot \text{sen}(\theta_t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$F_{3t} = k \cdot N_f \cdot I_3 = k \cdot N_f \cdot I_M \cdot \text{sen}(\theta_t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2) = F_M \cdot \text{sen}(\theta_t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \text{sen}(\theta/2)$$

$$F_M = k \cdot N_f \cdot I_M \rightarrow N_f : \text{NÚMERO DE ESPIRAS POR FASE DO ESTATOR}$$



Fmm DE CADA FASE ATUA SEGUNDO O SEU EIXO

Fmm RESULTANTE ATUA NUM EIXO ARBITRÁRIO, CONFORME A MAGNITUDE DAS CORRENTES EM CADA FASE

Fmm RESULTANTE INTERAGE COM FLUXO DO ROTOR PRODUZINDO UM TORQUE NOS EIXOS, TENDENDO A ANULAR O ERRO DE ÂNGULO

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

FORÇA MAGNETOMOTRIZ DO ESTATOR:

$$F_{1t} = F_M \cdot \sin(\theta t - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2)$$

$$F_{2t} = F_M \cdot \sin(\theta t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2)$$

$$F_{3t} = F_M \cdot \sin(\theta t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2)$$

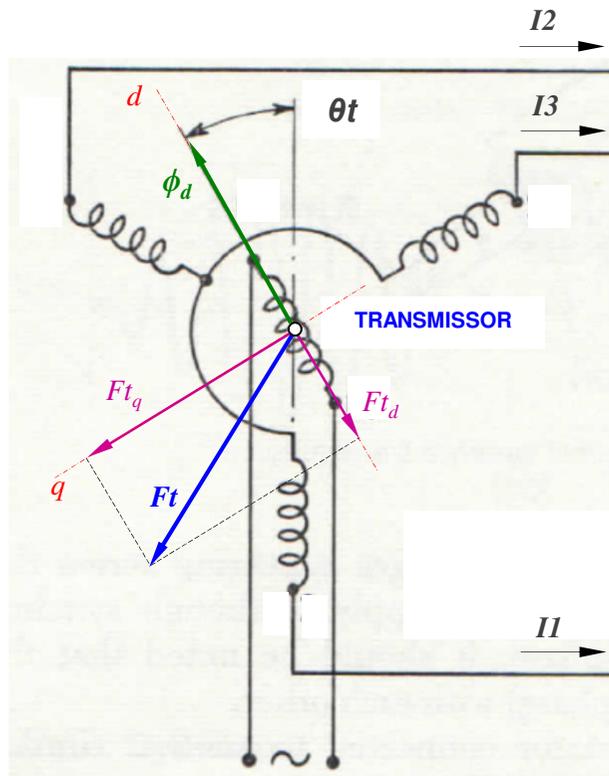
→ COMPONENTES DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ NOS EIXOS d / q (TRANSMISSOR):

$$F_{t_d} = F_{1t} \cdot \cos\theta t + F_{2t} \cdot \cos(\theta t - 120^\circ) + F_{3t} \cdot \cos(\theta t + 120^\circ)$$

$$F_{t_q} = F_{1t} \cdot \sin\theta t + F_{2t} \cdot \sin(\theta t - 120^\circ) + F_{3t} \cdot \sin(\theta t + 120^\circ)$$

$$\rightarrow F_{t_d} = F_M \cdot [\sin(\theta t - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \cos\theta t + \sin(\theta t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \cos(\theta t - 120^\circ) + \sin(\theta t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \cos(\theta t + 120^\circ)]$$

$$\rightarrow F_{t_q} = F_M \cdot [\sin(\theta t - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \sin\theta t + \sin(\theta t - 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \sin(\theta t - 120^\circ) + \sin(\theta t + 120^\circ - \theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \sin(\theta t + 120^\circ)]$$



DESENVOLVENDO OS TERMOS TRIGONOMÉTRICOS:

$$\rightarrow F_{t_d} = -\frac{3}{4} F_M \cdot (1 - \cos\theta) \quad \left. \vphantom{F_{t_d}} \right\} \text{TRANSMISSOR}$$

$$\rightarrow F_{t_q} = +\frac{3}{4} F_M \cdot \sin\theta$$

$$\rightarrow F_{r_d} = -\frac{3}{4} F_M \cdot (1 - \cos\theta) \quad \left. \vphantom{F_{r_d}} \right\} \text{RECEPTOR}$$

$$\rightarrow F_{r_q} = -\frac{3}{4} F_M \cdot \sin\theta$$

COMPONENTES SEGUNDO O EIXO DIRETO SÃO DESPREZÁVEIS PARA θ PEQUENO (USUAL)

FLUXOS IMPOSTOS PELOS ROTORES FICA PRESERVADO $\rightarrow \phi_d = \phi_M \cdot \sin\omega \cdot t$

(MESMO COM F_{t_d} e F_{t_r} EM OPOSIÇÃO, INDICADO PELO SINAL NEGATIVO)

COMPONENTES TRANSVERSAIS DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ, F_{t_q} e F_{r_q} INTERAGEM COM O FLUXO NO EIXO LONGITUDINAL RESULTANDO NO TORQUE DESENVOLVIDO

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

FUNCIONAMENTO DO SINCRO TRANSMISSOR - RECEPTOR

FLUXO DO ROTOR NO TEMPO, SEGUNDO EIXO DIRETO: $\phi_d(t) = \phi_M \cdot \text{sen}\omega.t$

COMPONENTE DE F_{mm} NO TEMPO, SEGUNDO EIXO EM QUADRATURA: $F_q(t) = \frac{3}{4} F_M \cdot \text{sen}(\omega.t - \varphi) \cdot \text{sen}\theta$

TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO DESENVOLVIDO ENTRE SINCRO TRANSMISSOR E RECEPTOR:

$M_S(t) = K \cdot \phi_d(t) \cdot F_q(t) \rightarrow K$: CONSTANTE CONSTRUTIVA ; φ : ÂNGULO DE FASE ENTRE ϕ e F_{mm}

$\rightarrow M_S(t) = K \cdot \phi_M \text{sen}\omega.t \cdot F_M \text{sen}(\omega.t - \varphi) \cdot \text{sen}\theta \rightarrow$ DESENVOLVENDO O TERMO TRIGONOMÉTRICO:

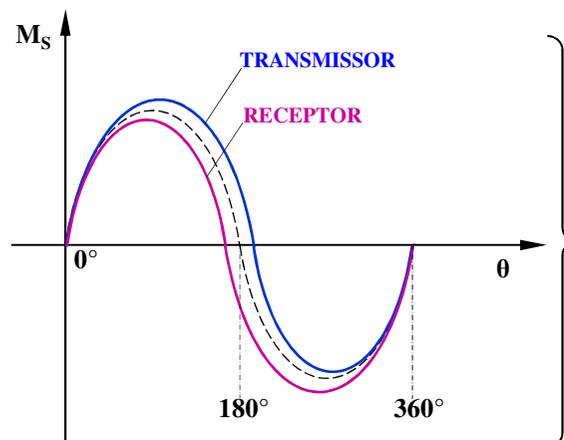
$\rightarrow M_S(t) = K \cdot \left[\frac{1}{2} \phi_M \cdot F_M \cdot \cos\varphi \cdot \text{sen}\theta - \frac{1}{2} \phi_M \cdot F_M \cdot \cos(2\omega.t - \varphi) \cdot \text{sen}\theta \right]$

VALOR MÉDIO DO TORQUE

PULSAÇÃO DE TORQUE COM FREQUÊNCIA DUPLA DA ALIMENTAÇÃO E VALOR MÉDIO NULO

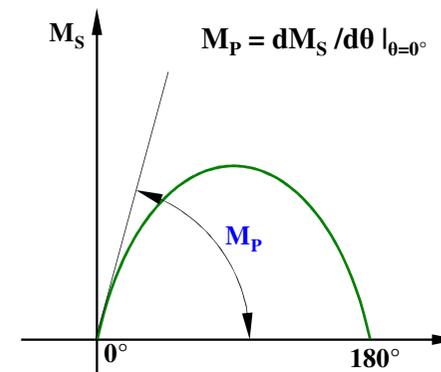
TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO: $M_S = (K \cdot \frac{1}{2} \phi_M \cdot F_M \cdot \cos\varphi) \cdot \text{sen}\theta \rightarrow M_S = M_{Smax} \cdot \text{sen}\theta$

COMO F_{tq} e F_{rq} TÊM SINAIS CONTRÁRIOS \rightarrow TORQUE DO TRANSMISSOR É CONTRÁRIO AO DO RECEPTOR \rightarrow ACÇÃO SINCRONIZADORA



CARACTERÍSTICA EXTERNA:
SINCRO
TRANSMISSOR - RECEPTOR

CASO REAL:
 $\phi_M = f(\theta)$
 $\varphi = f(\theta)$

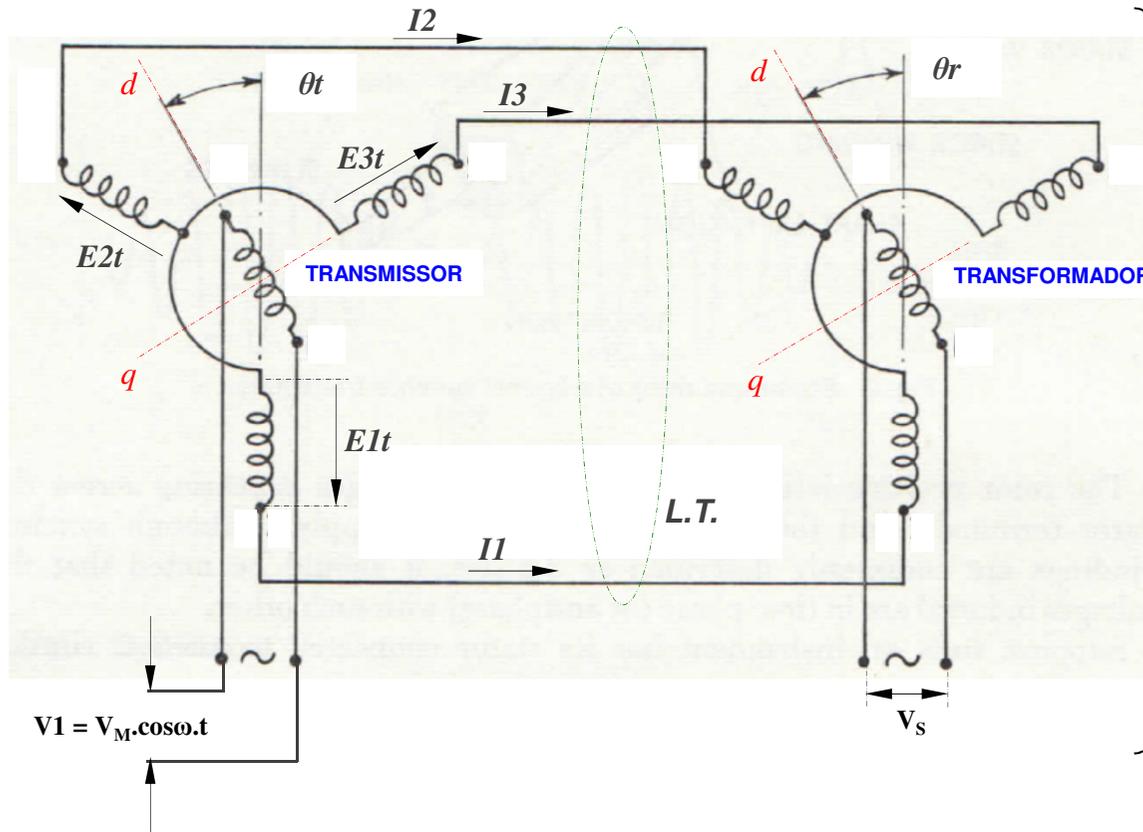


TORQUE ESPECÍFICO:
 M_P : [N.m/rd]

ASSOCIADO À PRECISÃO
DO SISTEMA SELSYN
(ERRO ESTÁTICO)

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

FUNCIONAMENTO DO SINCRO TRANSMISSOR - TRANSFORMADOR



→ PRIMÁRIO DO TRANSMISSOR ALIMENTADO EM FONTE DE TENSÃO ALTERNADA.:

$$V1 = V_M \cdot \cos \omega \cdot t$$

→ FLUXO MAGNÉTICO PULSANTE, ALINHADO COM O EIXO DIRETO DO ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO.:

$$\phi_{exc} = \phi_d = \phi_M \cdot \sin \omega \cdot t$$

→ TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES DO ENROLAMENTO DE SINCRONIZAÇÃO.:

$$E_i = N_{f_r} \cdot (d\phi_{exc}/dt) \cdot \cos \theta = [(N_{f_r} \cdot k_e / N_p) \cdot V1] \cdot \cos \theta$$

$$E_i = E_M \cdot \cos \theta \rightarrow E_i(t) = E_M(t) \cdot \cos \theta \quad (i = 1 ; 2 ; 3)$$

→ CORRENTES CIRCULAM PELA L.T.

$$I_i = E_i / 2 \cdot Z_f$$

TENSÕES NO SINCRO TRANSMISSOR.:

$$E1t = E_M \cdot \cos \theta t$$

$$E2t = E_M \cdot \cos(\theta t - 120^\circ)$$

$$E3t = E_M \cdot \cos(\theta t - 240^\circ)$$

CORRENTES NA L.T.:

$$I1 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos \theta t$$

$$I2 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos(\theta t - 120^\circ)$$

$$I3 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos(\theta t + 120^\circ)$$

ERRO ANGULAR: $\theta = \theta_t - \theta_r$

θ_r : AJUSTE DE ZERO DA TENSÃO DE SAÍDA

θ_t : VARIÁVEL DE ENTRADA DO SISTEMA

V_s : VARIÁVEL DE SAÍDA DO SISTEMA

PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

CORRENTES NA L.T.:

$$I_1 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos \theta t$$

$$I_2 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos(\theta t - 120^\circ)$$

$$I_3 = (E_M / 2 \cdot Z_f) \cdot \cos(\theta t + 120^\circ)$$

Fmm NO ESTATOR DO TRANSFORMADOR:

$$F_{1r} = k \cdot N_f \cdot I_1 = F_M \cdot \cos \theta t$$

$$F_{2r} = k \cdot N_f \cdot I_2 = F_M \cdot \cos(\theta t - 120^\circ)$$

$$F_{3r} = k \cdot N_f \cdot I_3 = F_M \cdot \cos(\theta t + 120^\circ)$$

COMPONENTES DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ NOS EIXOS d / q (SINCRO TRANSFORMADOR $\rightarrow \theta = \theta t - \theta r$):

$$\rightarrow Fr_d = F_M \cdot [\cos \theta t \cdot \cos \theta r + \cos(\theta t - 120^\circ) \cdot \cos(\theta r - 120^\circ) + \cos(\theta t + 120^\circ) \cdot \cos(\theta r + 120^\circ)] \rightarrow Fr_d = (3/2) \cdot F_M \cdot \cos \theta$$

$$\rightarrow Fr_q = F_M \cdot [\cos \theta t \cdot \sin \theta r + \cos(\theta t - 120^\circ) \cdot \sin(\theta r - 120^\circ) + \cos(\theta t + 120^\circ) \cdot \sin(\theta r + 120^\circ)] \rightarrow Fr_q = - (3/2) \cdot F_M \cdot \sin \theta$$

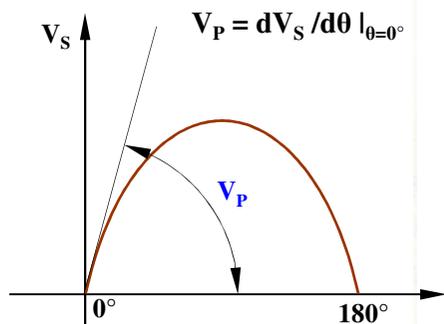
Fmm RESULTANTE: $F_r = \sqrt{Fr_d^2 + Fr_q^2} = \frac{3}{2} \cdot F_M$

→ VETOR ESPACIAL DE MÓDULO CONSTANTE

→ SE DESLOCA NO ESPAÇO (ENTREFERRO DO TRANSFORMADOR) COM O ÂNGULO θ

→ Fr : CRIA FLUXO ϕ_r QUE INDUZ NO ROTOR A TENSÃO DE SAÍDA

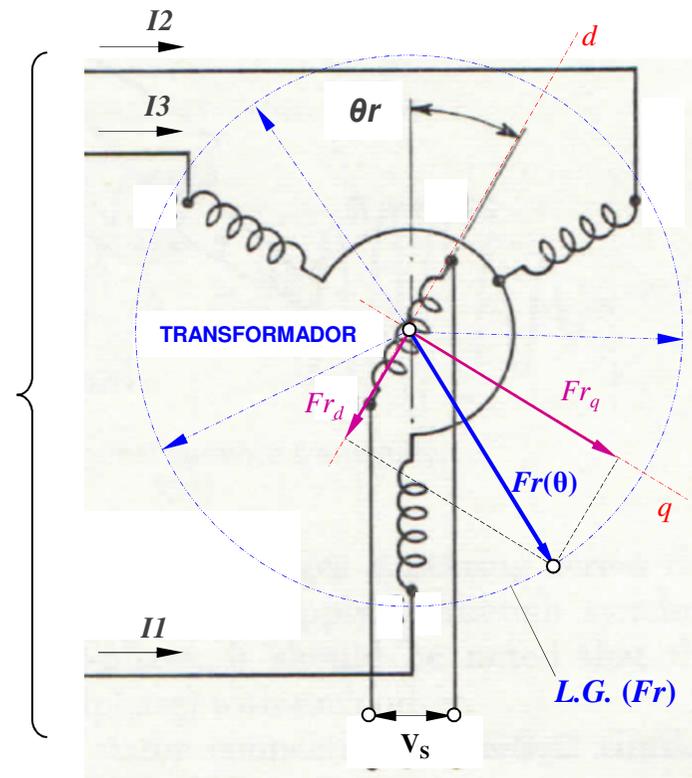
→ $V_s = V_M \cdot \sin \theta$



GRADIENTE DE TENSÃO DE SAÍDA:

$$V_p : [V/rad]$$

ASSOCIADO À SENSIBILIDADE DO SISTEMA SELSYN TRANSFORMADOR



PEA – 5728 - Parte 3: SINCROS DE CONTROLE

CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA DO SINCRO TRANSMISSOR - TRANSFORMADOR

ENVOLTÓRIA DO SINAL DE SAÍDA - “ONDA MODULANTE” CONFORME VARIAÇÃO DE θ

SINAL DE SAÍDA - “ONDA PORTADORA” COM FREQUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

