

PARTE 5

MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

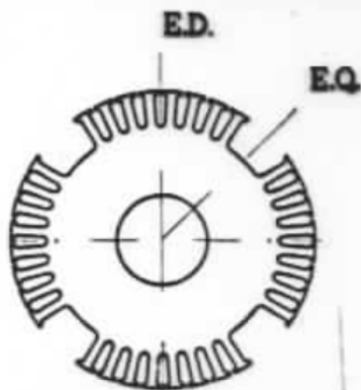
MOTOR SÍNCRONO DE RELUTÂNCIA (MSR) COMO ACIONAMENTO → COMPARADO AO MOTOR DE INDUÇÃO

DESENVOLVIMENTO AO LONGO DO TEMPO RESULTOU EM FAMÍLIAS OU “GERAÇÕES” DE MSR ONDE SE BUSCOU OTIMIZAR:

RAZÃO POTÊNCIA/VOLUME - FATOR DE POTÊNCIA - RENDIMENTO - SIMPLICIDADE E BAIXO CUSTO

GRANDEZA NOTÁVEL NO MSR: ÍNDICE DE SALIÊNCIA = X_d / X_q

1ª “GERAÇÃO” DE MSR - (ATÉ A DÉCADA DE 1950)

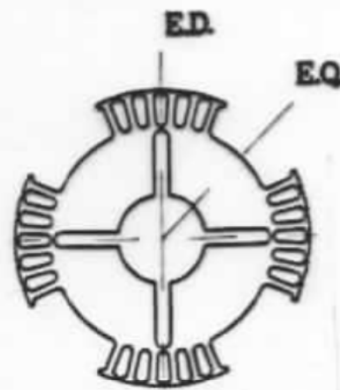


Rotor de polos salientes

$$X_d/X_q : 1,5 \text{ a } 2,0$$

$$\cos \varphi : 0,35 \text{ a } 0,45 \text{ (4 polos)}$$

$$Pot_{MSR} \approx (0,3 \text{ a } 0,5)Pot_{MI}$$

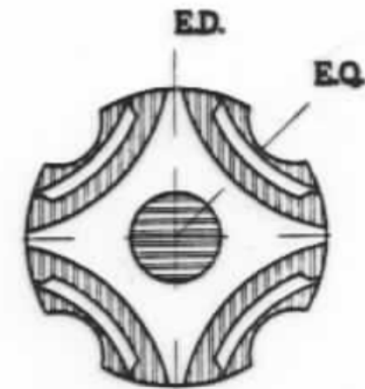


Rotor com barreiras de fluxo

$$X_d/X_q : 2,5 \text{ a } 4,0$$

$$\cos \varphi : 0,55 \text{ a } 0,65$$

$$Pot_{MSR} \approx (0,65 \text{ a } 0,85)Pot_{MI}$$

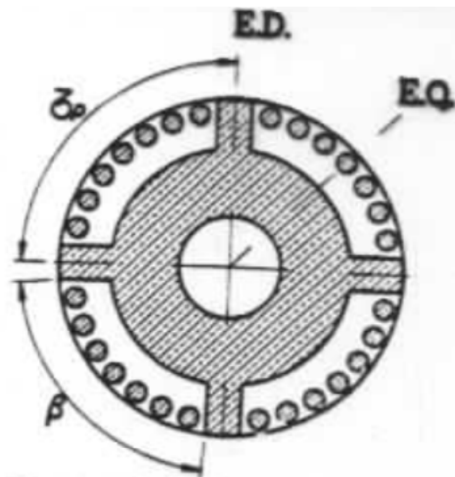


Rotor proposto

em 1920 por

J.K. Kostko.

2ª “GERAÇÃO” DE MSR - (DÉCADA DE 1960) - MSR DE ROTOR SEGMENTADO



Rotor básico

$$X_d/X_q : 5 \text{ a } 6$$

$$\cos \psi : 0,6 \text{ a } 0,75$$

$$Pot_{MSR} \approx 0,9 Pot_{MI}$$

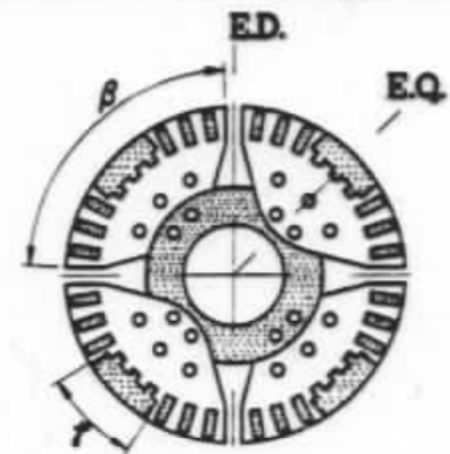


MSR de pequeno porte

$$X_d/X_q : 5 \text{ a } 6,5$$

$$\cos \psi : 0,7 \text{ a } 0,8$$

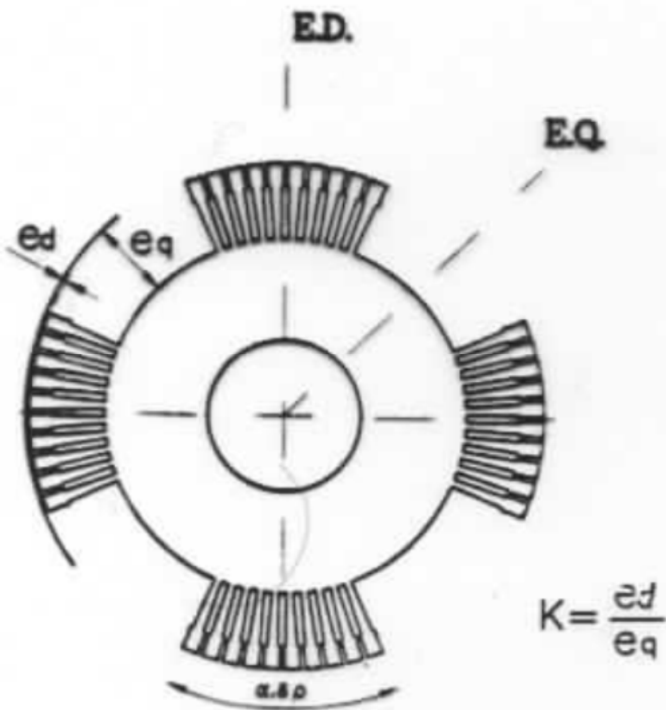
$$Pot_{MSR} \approx Pot_{MI}$$



MSR de médio porte

TOPOLOGIAS INTERMEDIÁRIAS DE MSR

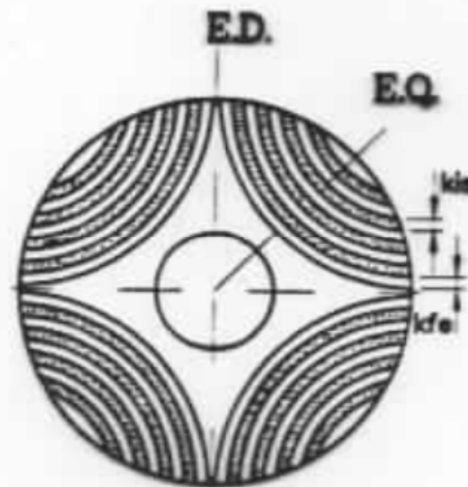
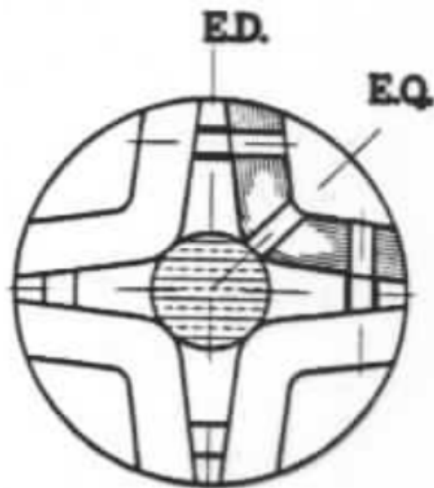
MSR DE ROTOR COM *DENTES SATURÁVEIS* NO E.Q.



- $X_d/X_q : 4,5 \text{ a } 5,5$ (sat.)
- $\cos \varphi : 0,65 \text{ a } 0,75$
- $Pot_{MSR} \approx (0,8 \text{ a } 0,9) Pot_{MI}$
- Preservação da simplicidade construtiva e baixo custo

3ª “GERAÇÃO” DE MSR - (A PARTIR DA DÉCADA DE 1970 / 1980)

MSR DE ROTOR ANISOTRÓPICO COM LAMINAÇÃO RADIAL



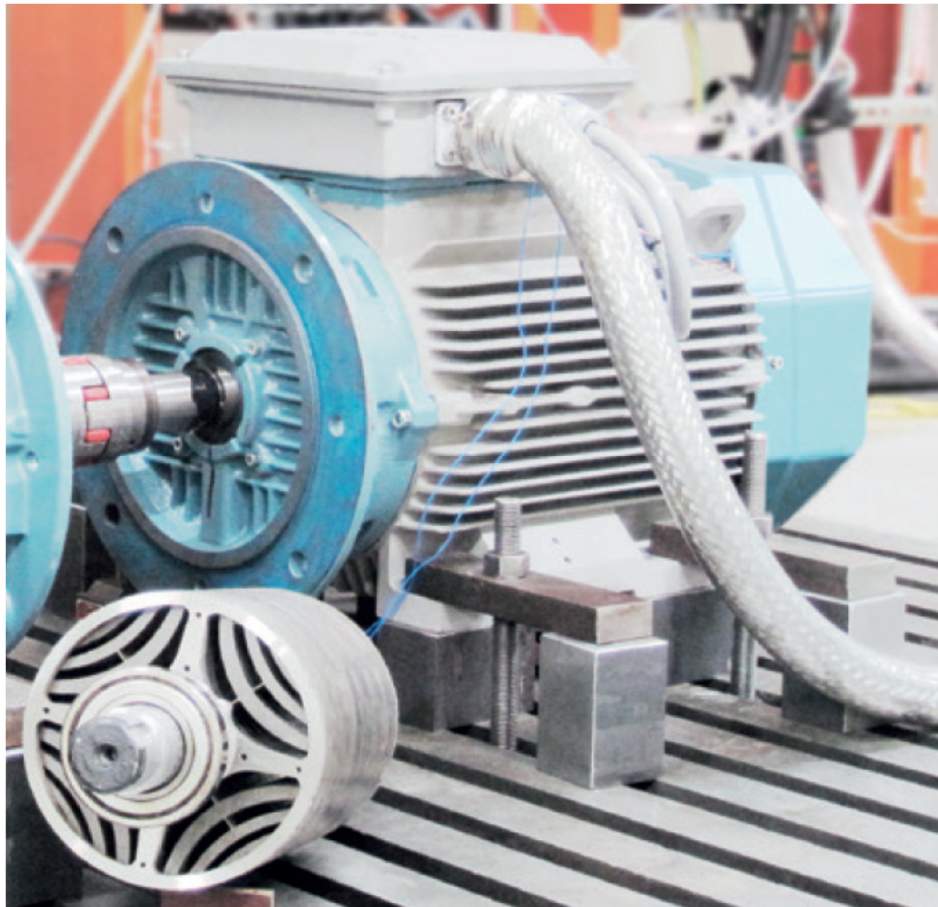
$$X_d/X_q : 7 \text{ ou maior}$$

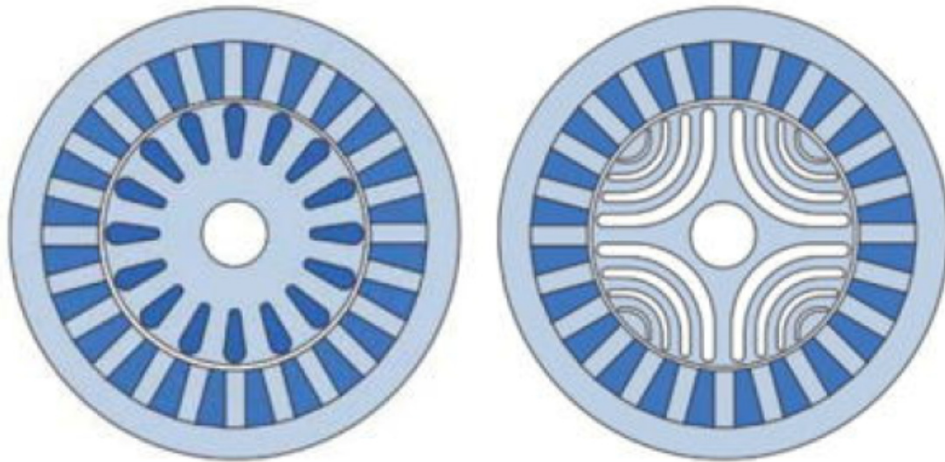
$$\cos \varphi : 0,8 \text{ ou maior}$$

$$Pot_{MSR} \approx Pot_{MI}$$

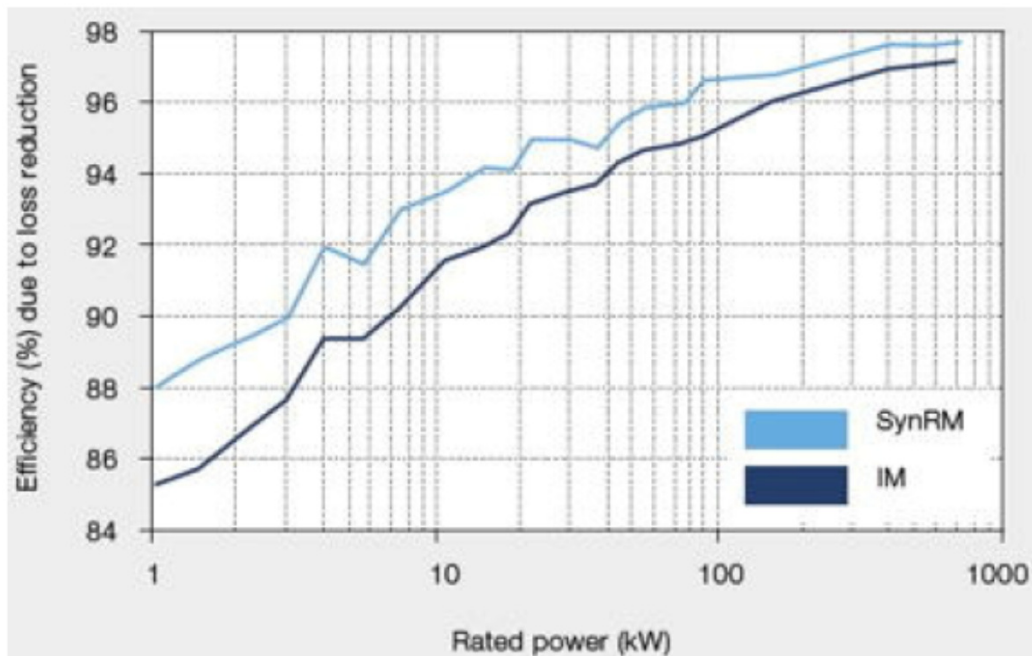
TECNOLOGIA RECENTE DE MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA PROPOSTA PARA
ACIONAMENTOS DE ELEVADA EFICIÊNCIA (FABRICANTE EUROPEU)

MSR DE ROTOR COM LAMINAÇÃO AXIAL DE GEOMETRIA OTIMIZADA ASSOCIADO A
INVERSOR DE FREQUENCIA VARIÁVEL (SÉRIE OFERECIDA A PARTIR DE 2011)





COMPARAÇÃO DA
TOPOLOGIA DO MSR
OTIMIZADO COM O MOTOR DE
INDUÇÃO CONVENCIONAL



COMPARAÇÃO DA CURVA DE
RENDIMENTO DO MSR
OTIMIZADO E O MOTOR DE
INDUÇÃO EM FUNÇÃO DA
POTÊNCIA

APLICAÇÕES PRINCIPAIS DOS MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA:

ACIONAMENTOS MULTIMOTORIZADOS

- EIXOS SINCRONIZADOS OU COM RELAÇÕES DE VELOCIDADE EXATAS
- CONJUNTO DE MSR'S ALIMENTADOS EM PARALELO A PARTIR DE FONTE ÚNICA DE TENSÃO E FREQUENCIA, FIXA OU VARIÁVEL
- OBTENÇÃO DE SINCRONISMO DE POSIÇÃO ANGULAR ENTRE EIXOS, INDEPENDENTE DA DIVISÃO DE CARGA ENTRE MOTORES

EXEMPLO Nº 1 DE ACIONAMENTOS MULTIMOTORIZADOS:

TRAÇÃO E ESTIRAMENTO CONTROLADO NO PROCESSAMENTO DE FIBRAS SINTÉTICAS
(RAYON, LYCRA, ELASTANO, ETC.)



→ → →
EXTRUSÃO DOS
FILAMENTOS
DA RESINA

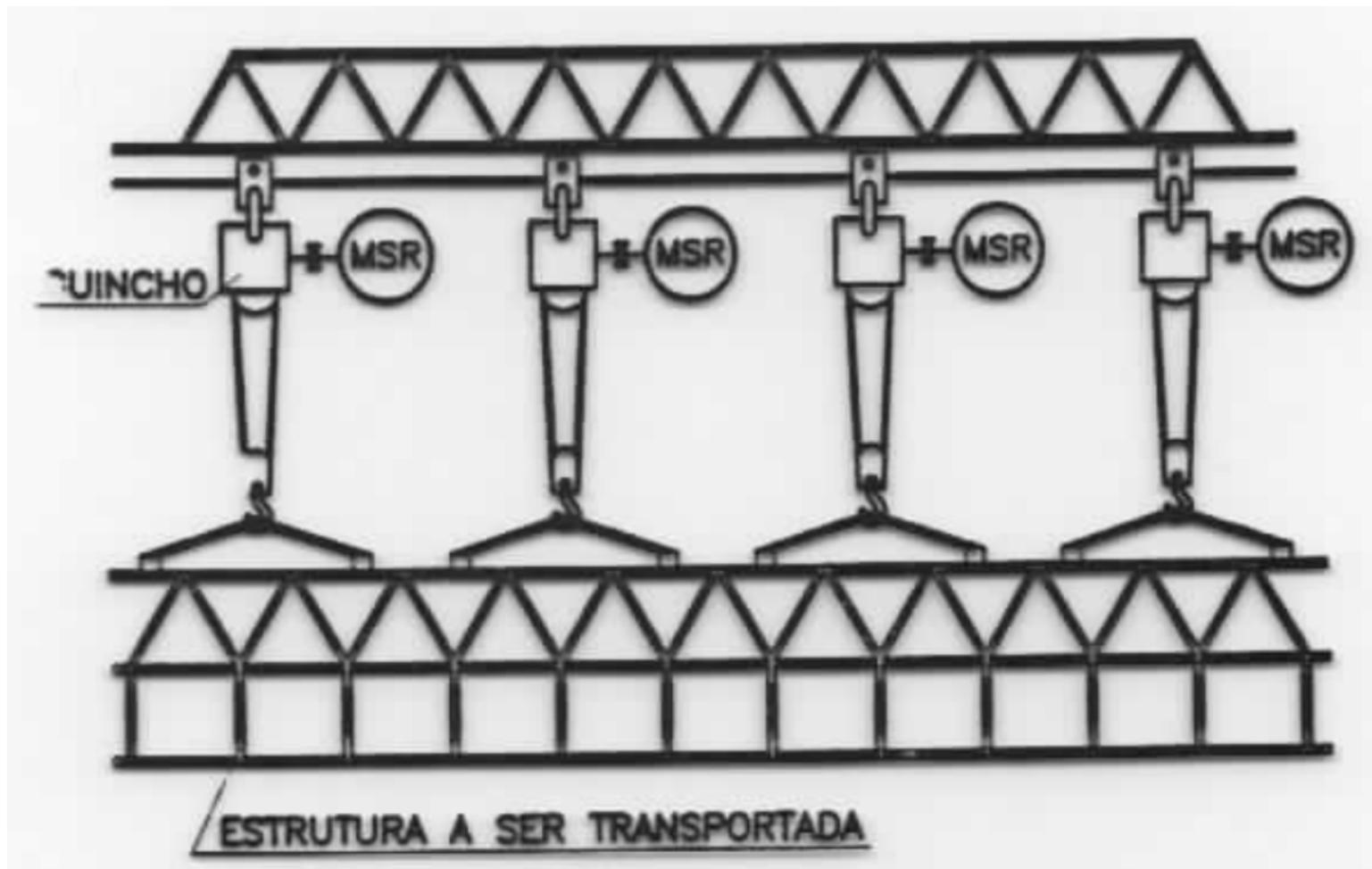
→ → →
BOBINAMENTO
DA FIBRA
PROCESSADA

ESTIRAMENTO COM TRAÇÃO CONTROLADA E ALTA VELOCIDADE

EXEMPLO Nº 2 DE ACIONAMENTOS MULTIMOTORIZADOS:

LEVANTAMENTO E TRANSPORTE DE GRANDES ESTRUTURAS FLEXÍVEIS COM MÚLTIPLOS
GUINCHOS SINCRONIZADOS (e.g. IÇAMENTO DE EMBARCAÇÕES EM DIQUE SECO)

→ “SYNCROLIFT”[®] (PATENTE “BRISSENEAU & LOTZ MARINE”)



APLICAÇÕES PRINCIPAIS DOS MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA:

ACIONAMENTOS MONOMOTORES

→ **ACIONAMENTOS COM VELOCIDADE RIGOROSAMENTE CONSTANTE**

→ **ACIONAMENTOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL (MSR ASSOCIADO A INVERSOR DE FREQUENCIA)
EM ALTERNATIVA AO USO DE MOTORES DE INDUÇÃO, POR MAIOR FACILIDADE DE CONTROLE**



SÉRIE DE ACIONAMENTOS COMPOSTOS

POR MSR E INVERSOR - SynRM

ASEA BROWN BOVERI - ABB

ABORDAGEM FORMAL DA OPERAÇÃO DO MSR

→ DIAGRAMA FASORIAL POR FASE DA MÁQUINA SÍNCRONA SEM EXCITAÇÃO

MODO DE OPERAÇÃO A TENSÃO CONSTANTE:

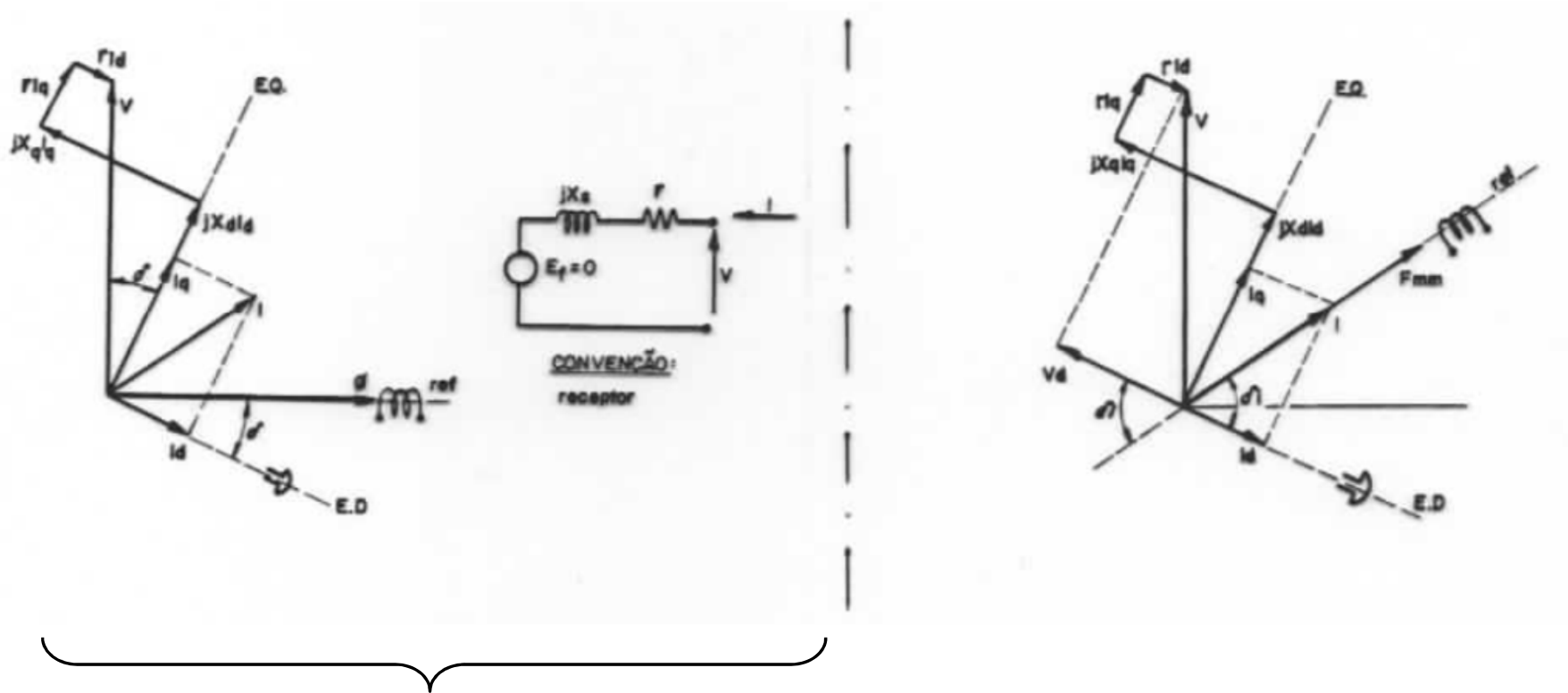
→ ALIMENTAÇÃO A PARTIR DE BARRAMENTO INFINITO

→ ALIMENTAÇÃO POR INVERSOR DE TENSÃO ($V/f = \text{cte.}$)

MODO DE OPERAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE:

→ ALIMENTAÇÃO POR INVERSOR DE CORRENTE IMPOSTA

→ ALIMENTAÇÃO COM C.C. CHAVEADA



MODO DE OPERAÇÃO MAIS COMUM !

ABORDAGEM FORMAL DA OPERAÇÃO DO MSR

→ EXPRESSÕES DAS POTÊNCIAS POR FASE DO MSR

- Potência ativa absorvida da linha pelo MSR ($P_{\text{joule estator}} + \text{Pot}_{\text{carga}} + P_{\text{rot.}}$)

$$P = \frac{V^2}{(X_d + r^2/X_q)} \left[\frac{r}{X_q} + \frac{1}{2}(X_d/X_q - 1)\text{sen}2\delta \right] \quad \Bigg| \quad P_i = I^2 \cdot X_q \left[r/X_q + \frac{1}{2}(X_d/X_q - 1)\text{sen}2\delta_i \right]$$

- Potência reativa absorvida da linha (relativa ao fluxo total, útil + disperso)

$$Q = \frac{V^2}{(X_d + r^2/X_q)} \left[(X_d/X_q - 1)\text{sen}^2 \delta + 1 \right] \quad \Bigg| \quad Q_i = I^2 X_q \left[X_d/X_q - (X_d/X_q - 1)\text{sen}^2 \delta_i \right]$$

- Fator de potência de operação :

$$\bullet \cos \varphi = f(r/X_q ; X_d/X_q ; \delta) \quad \Bigg| \quad \bullet \cos \varphi_i = f(r/X_q ; X_d/X_q ; \delta_i)$$

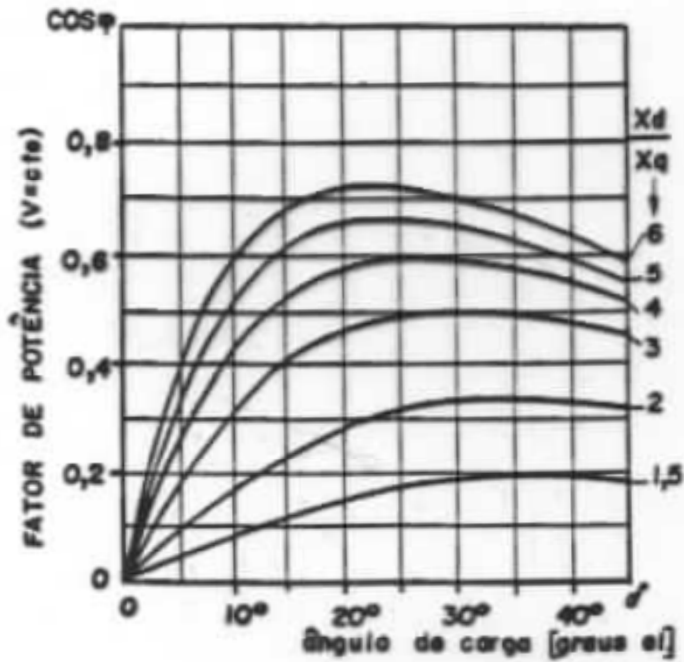
OPERAÇÃO A TENSÃO CONSTANTE

OPERAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE

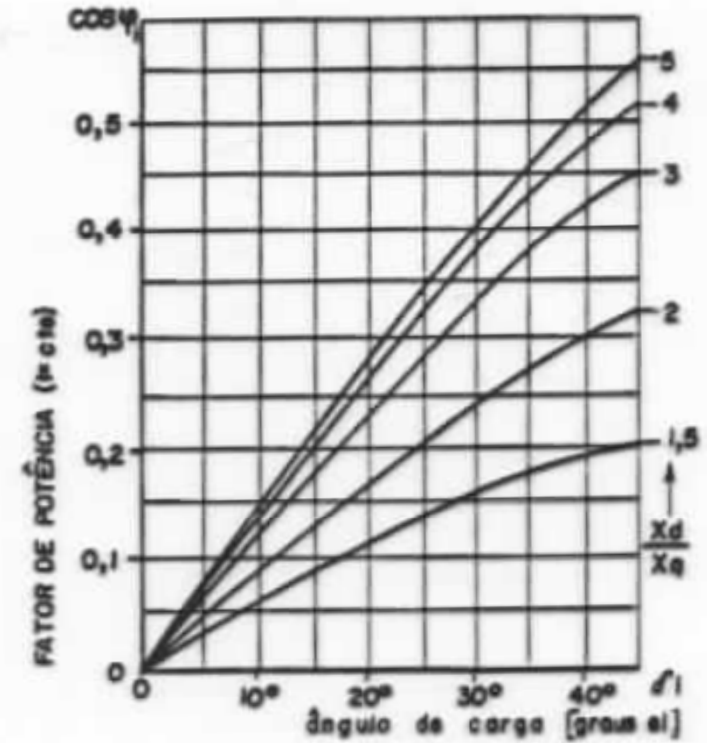
PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

ABORDAGEM FORMAL DA OPERAÇÃO DO MSR

→ COMPORTAMENTO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MSR EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE SALIÊNCIA



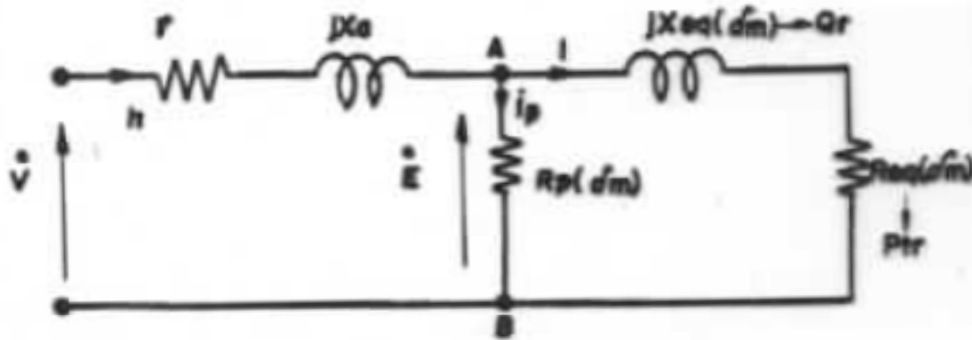
OPERAÇÃO A TENSÃO CONSTANTE



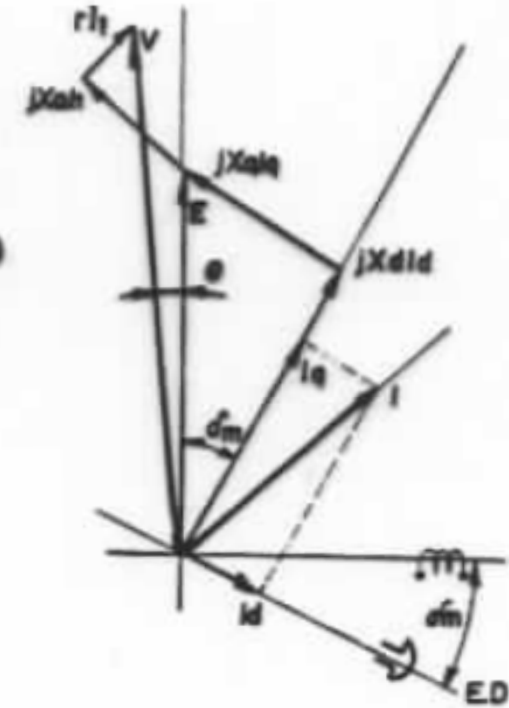
OPERAÇÃO A CORRENTE CONSTANTE

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O MSR OPERADO SOB TENSÃO CONSTANTE:



MODELO “IDEAL” VISTO PELOS PONTOS A e B



POTÊNCIA ATIVA TRANSFERIDA AO ROTOR:

$$P_{tr} = \frac{E^2}{2 \cdot X_{md}} \cdot \left[\left(\frac{X_{md}}{X_{mq}} - 1 \right) \cdot \text{sen} 2 \cdot \delta_m \right] = R_{eq}(\delta_m) \cdot I^2$$

POTÊNCIA REATIVA TRANSFERIDA ASSOCIADA:

$$Q_r = \frac{E^2}{2 \cdot X_{md}} \cdot \left[\left(\frac{X_{md}}{X_{mq}} - 1 \right) \cdot \text{sen}^2(2 \cdot \delta_m) + 1 \right] = X_{eq}(\delta_m) \cdot I^2$$

POTÊNCIA APARENTE:

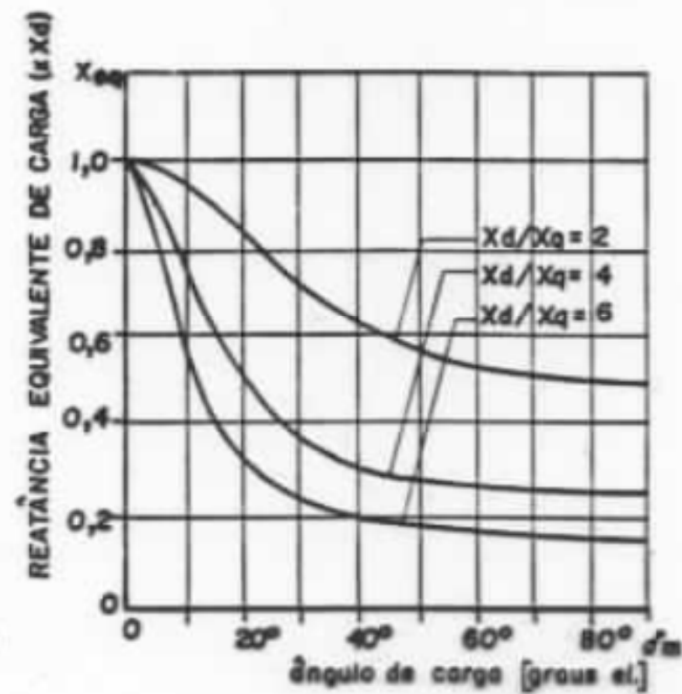
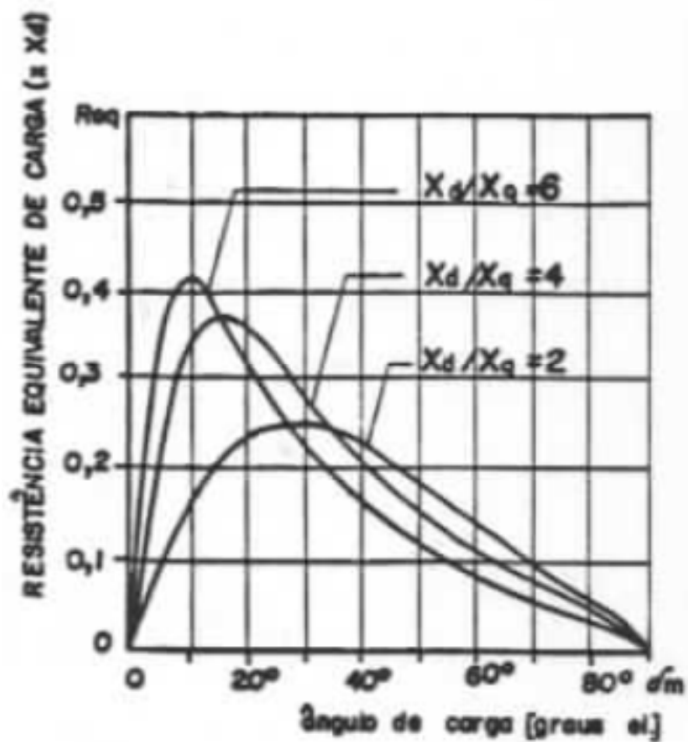
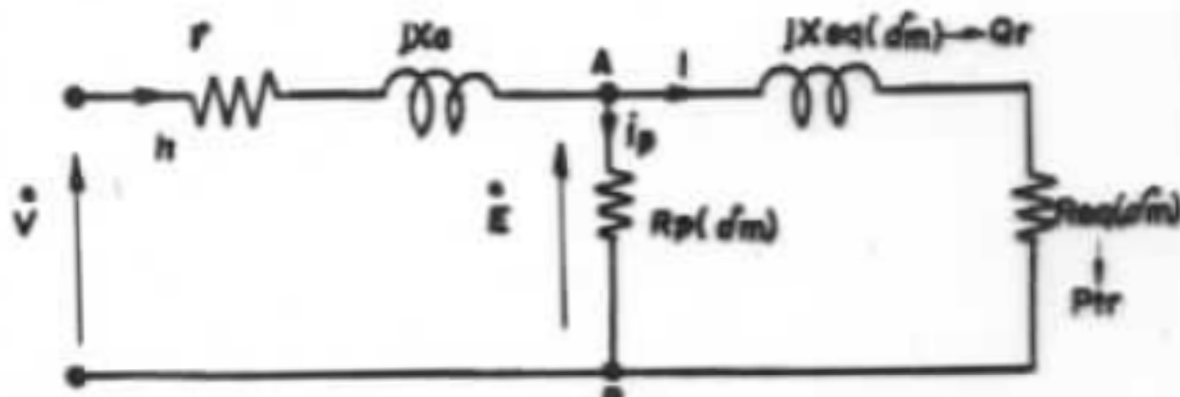
$$S = E \cdot I \quad ; \quad I = f(X_{md} ; X_{mq} ; \delta_m)$$

$$\rightarrow R_{eq}(\delta_m) \text{ e } X_{eq}(\delta_m)$$

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

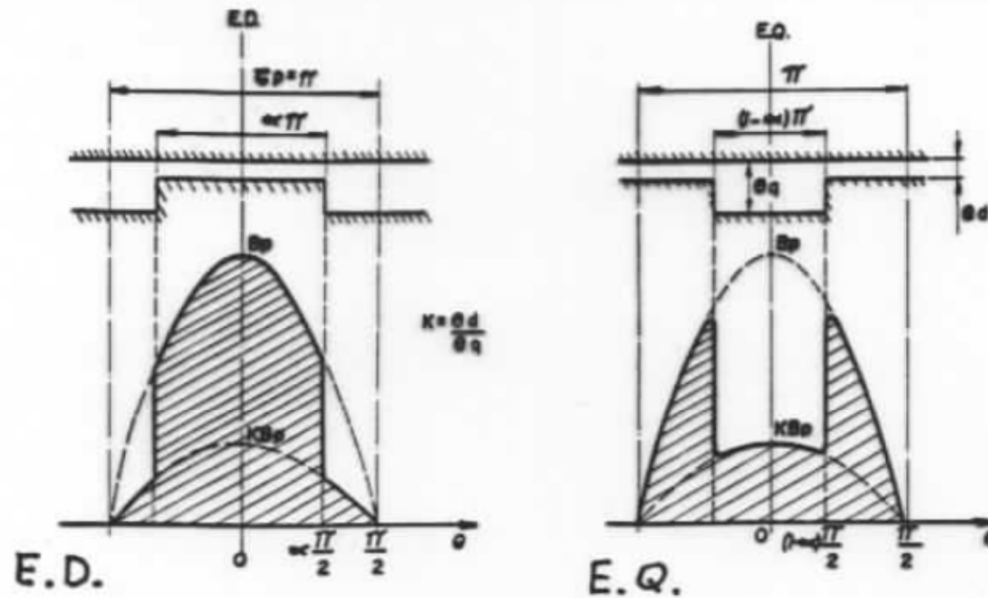
MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O MSR OPERADO SOB TENSÃO CONSTANTE:

COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS EQUIVALENTES EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE SALIÊNCIA



PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

REATÂNCIAS EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO MSR



→ F.M.M. SENOIDAL
 APLICADA AO ENTREFERRO
 COM RELUTÂNCIA
 VARIÁVEL DO ROTOR

- Fluxo por polo pode ser obtido por simples integração das distribuições de $B(\theta)$

$$\phi_p = \int_0^{\tau_p} B \cdot ds = DL/p \cdot \int_0^{\pi/2} B(\theta) \cdot d\theta = DL/p \cdot B_p \cdot f(\alpha; k)$$

onde : $f(\alpha; k) \rightarrow$ função geométrica do entreferro do MSR, e portanto :

No E.D.: $f(\alpha; k) = f_D(\alpha; k) = \left[K + (1 - K) \sin \frac{\alpha \pi}{2} \right]$

No E.Q.: $f(\alpha; k) = f_Q(\alpha; K) = \left[1 - (1 - K) \cos \frac{\alpha \pi}{2} \right]$

→ FATORES
 GEOMÉTRICOS

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

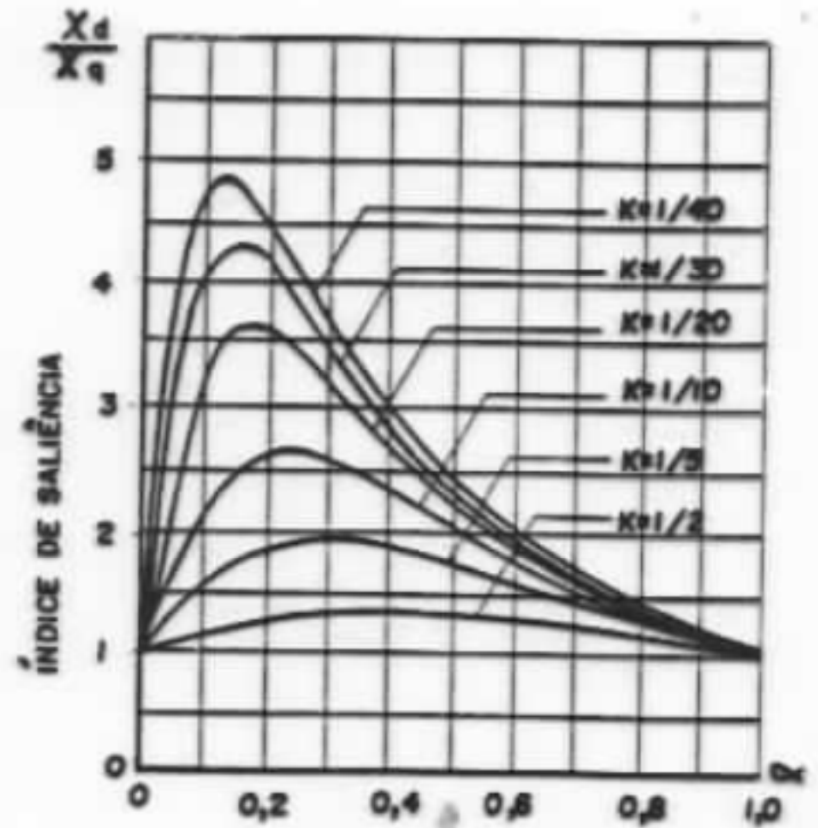
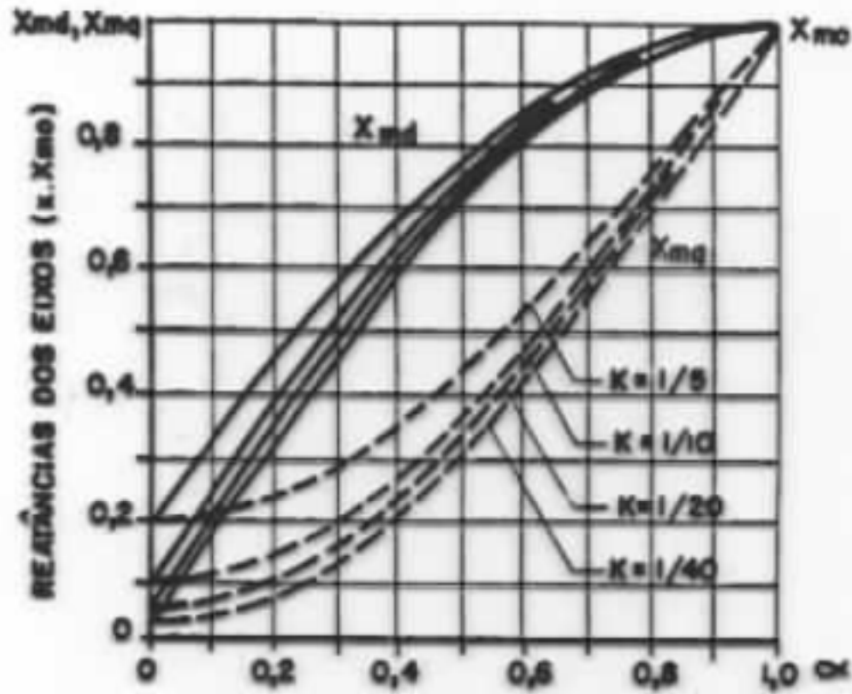
REATÂNCIAS E ÍNDICE DE SALIÊNCIA EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO MSR

REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO DO MSR: $X_m = X_{mo} \cdot (\alpha; k) \rightarrow X_{mo} = \frac{m \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot D \cdot L \cdot N_f^2}{\pi \cdot p^2 \cdot e_d}$

(X_{mo} : REATÂNCIA DE MÁQUINA EQUIVALENTE DE ROTOR CILÍNDRICO)

E.D. : $X_{md} = X_{mo} \cdot f_D(\alpha; k) \rightarrow X_d = X_{md} + x_a$

E.Q. : $X_{mq} = X_{mo} \cdot f_Q(\alpha; k) \rightarrow X_q = X_{mq} + x_a$

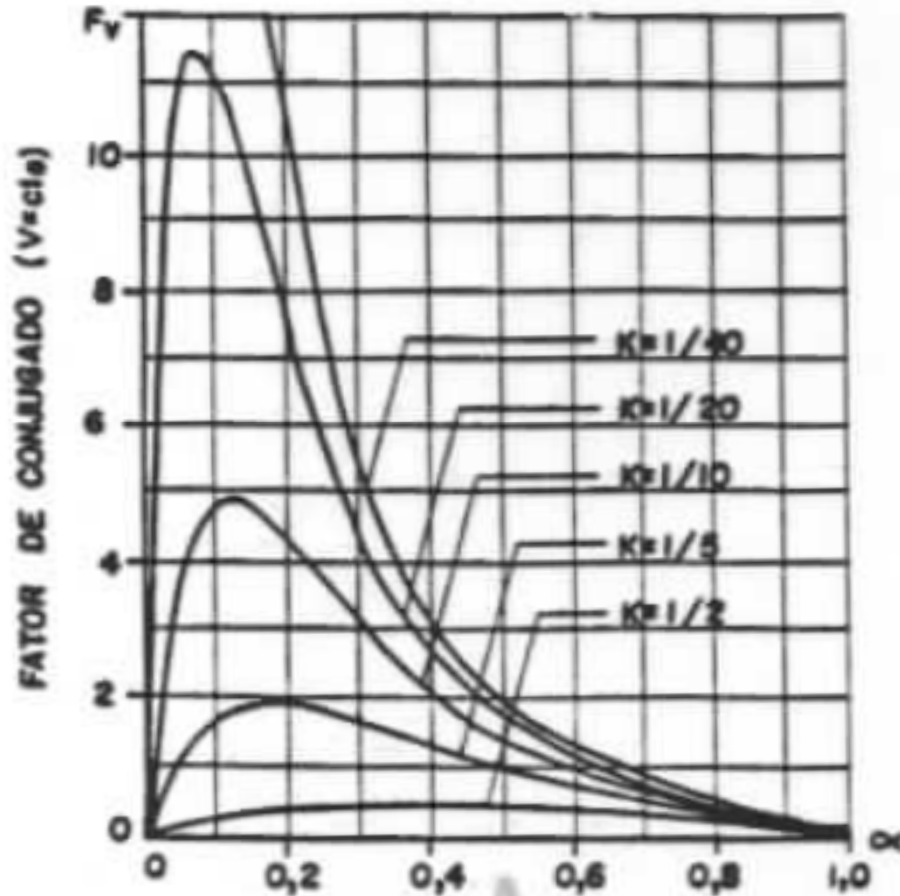


PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TORQUE NO MSR

POTÊNCIA ATIVA DO MSR (OPERAÇÃO SOB TENSÃO CONSTANTE): $P = \frac{V^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \text{sen}2 \cdot \delta$

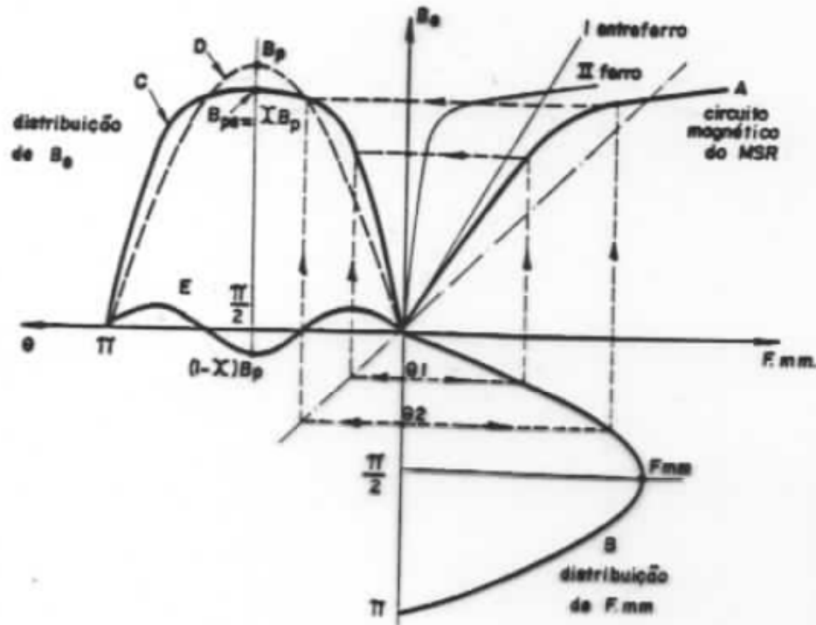
$$C_{max} = P_{max} / \omega_s \quad (\delta = 45^\circ) \quad - \quad C_{max} = \frac{m \cdot V^2}{2 \cdot \omega_s \cdot X_{mo}} \cdot F_V \quad - \quad F_V = \left(\frac{1}{f_Q(\alpha; k)} - \frac{1}{f_D(\alpha; k)} \right)$$



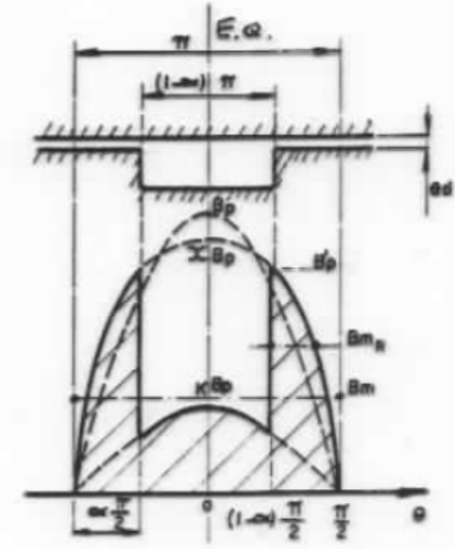
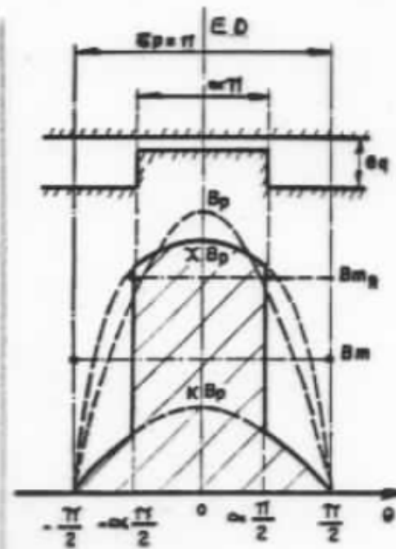
FATOR DE TORQUE PARA MSR OPERANDO
SOB TENSÃO CONSTANTE EM FUNÇÃO DE
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO ROTOR

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

EFEITO DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA SOBRE OS FATORES QUE AFETAM AS REATÂNCIAS NO MSR



- Fator de distorção : $\chi = B_{ps}/B_p$
- $B_{p3h} = (1 - \chi) \cdot B_p$
- MSR com configuração de dentes saturados, com $B_g = 0,7 \text{ Wb/m}^2$.
 $\dashrightarrow \chi = 0,88$



Integrando as distribuições de indução:

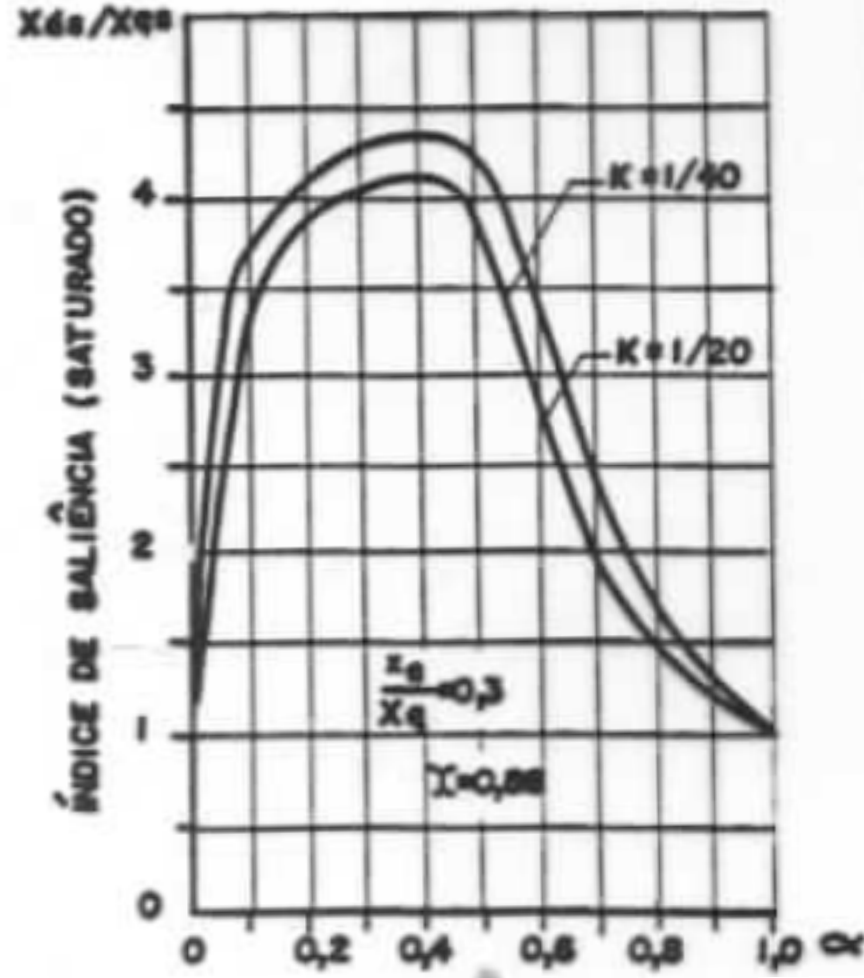
$$\phi_p = \frac{DL}{P} \cdot B_p \cdot f'(\alpha; k) \rightarrow \begin{cases} X'_{md} = X_{mo} \cdot f'_D(\alpha; k) \\ X'_{mq} = X_{mo} \cdot f'_Q(\alpha; k) \end{cases}$$

$$f'_D(\alpha; k) = \left[K + (1 - K) \sin \frac{\alpha \pi}{2} - \frac{(1 - \chi)}{3} \sin \frac{3\alpha \pi}{2} \right]$$

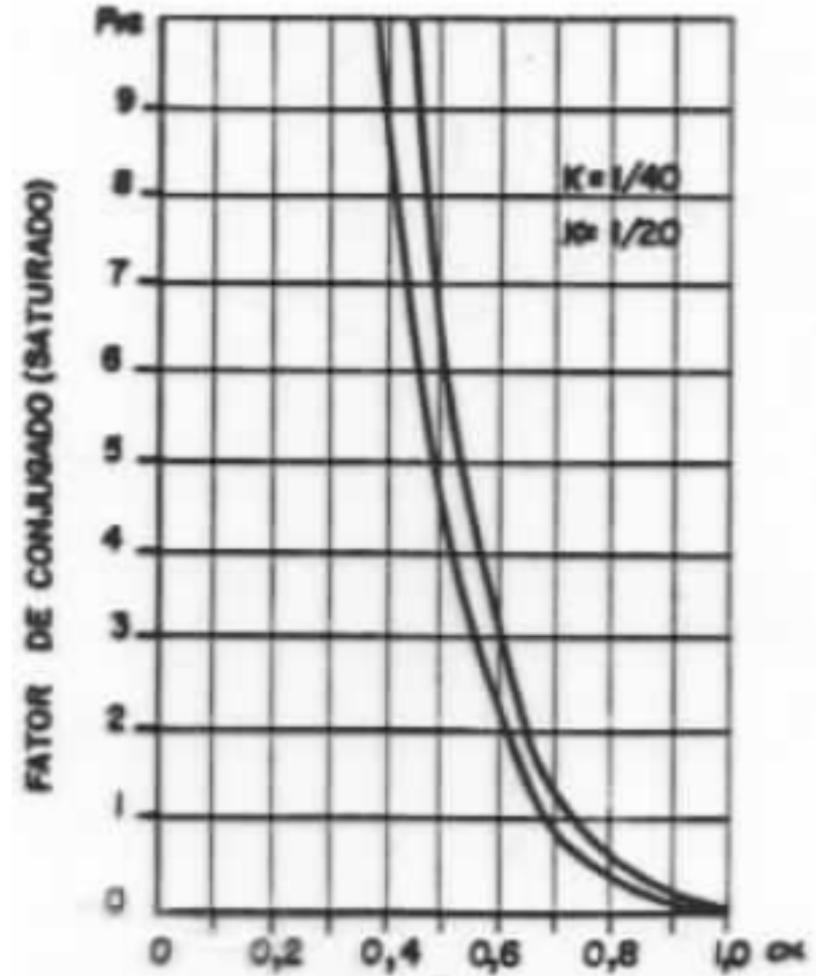
$$f'_Q(\alpha; k) = \left[1 - (1 - K) \cos \frac{\alpha \pi}{2} + \frac{(1 - \chi)}{3} (1 - \cos \frac{3\alpha \pi}{2}) \right]$$

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

EFEITO DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA SOBRE O ÍNDICE DE SALIÊNICA E O FATOR DE TORQUE NO MSR

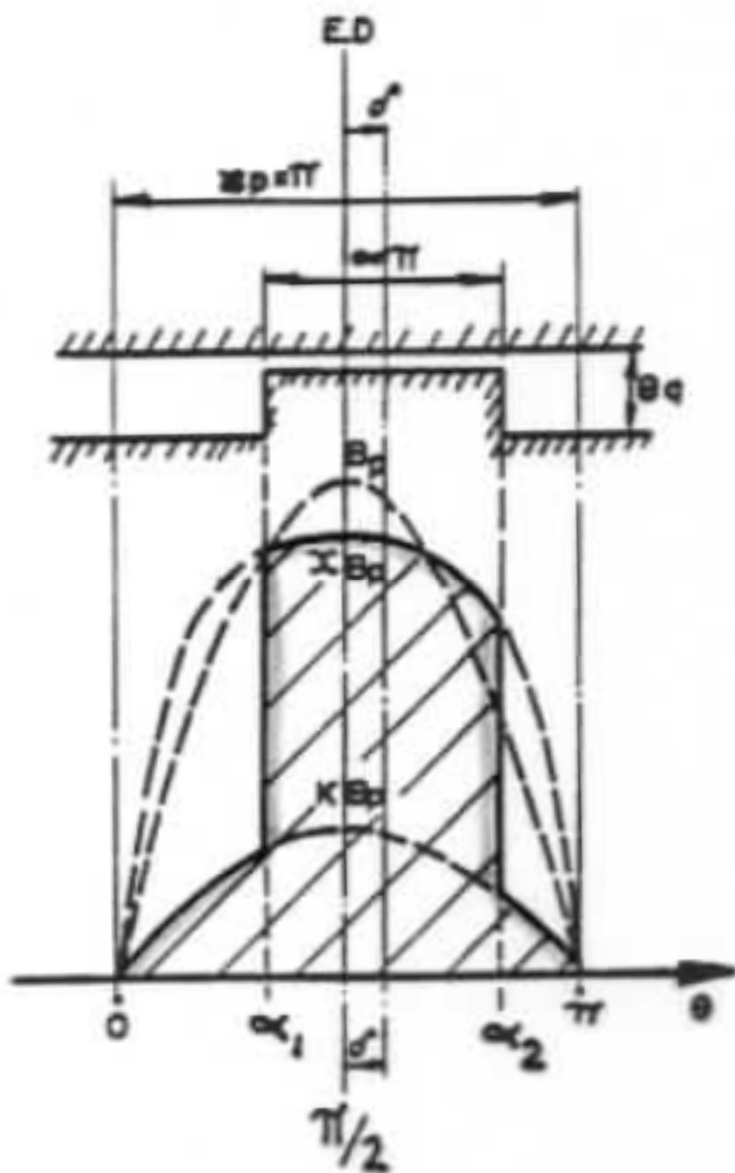


(X_d / X_q) saturado



(F_v) saturado

EFEITO DAS HARMÔNICAS DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO DO MSR



ASPECTO GERAL DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO DO MSR SOB CARGA (SATURAÇÃO INCLUÍDA)

Componentes harmônicas das induções :

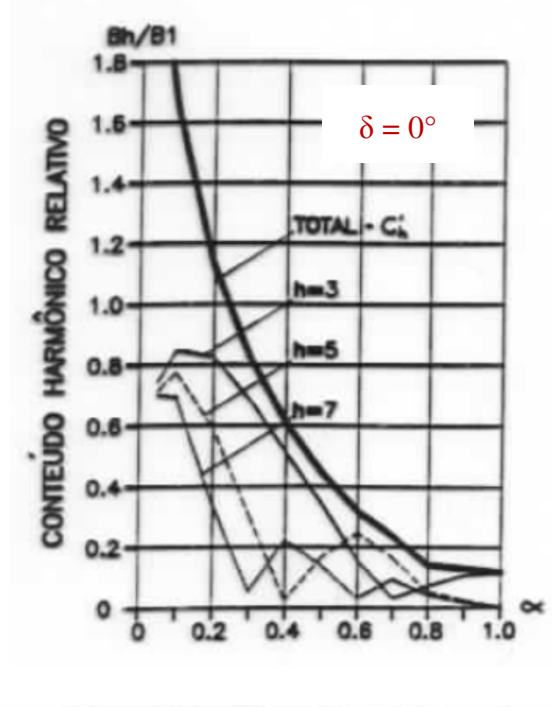
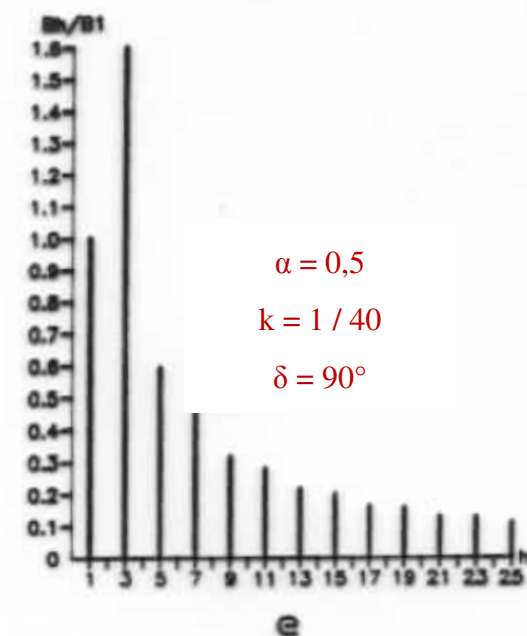
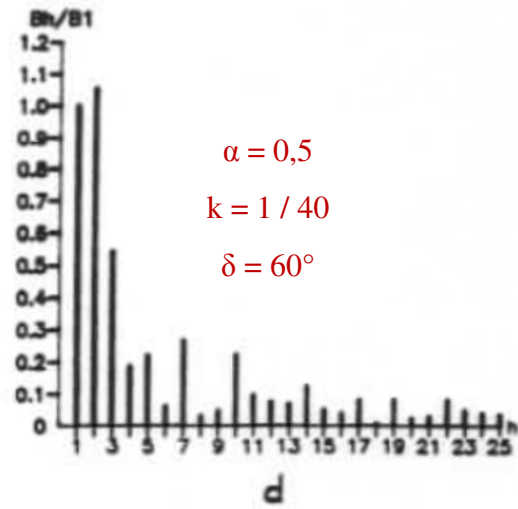
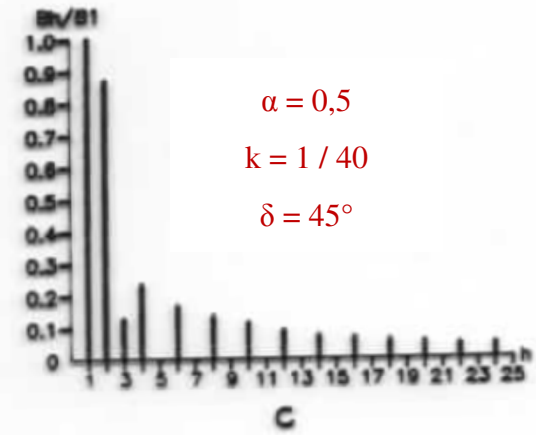
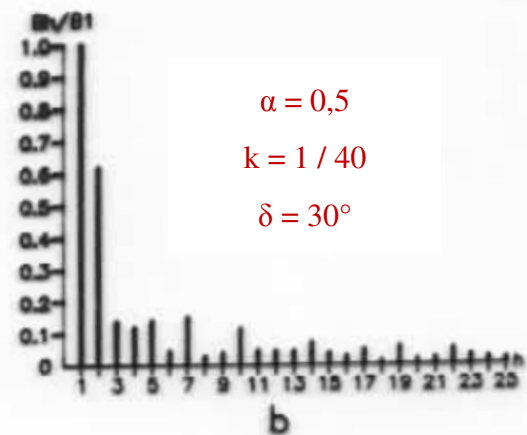
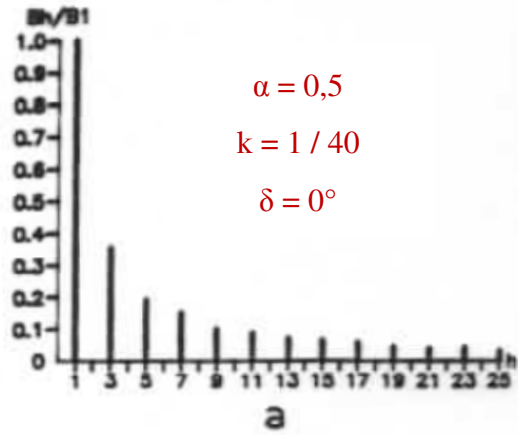
$$B_h(\theta) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B(\theta) \text{sen}.h\theta.d\theta$$

Contribuição harmônica total:

$$C_h = \sqrt{\sum_i^{\infty} (B_h/B_1)^2}$$

PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

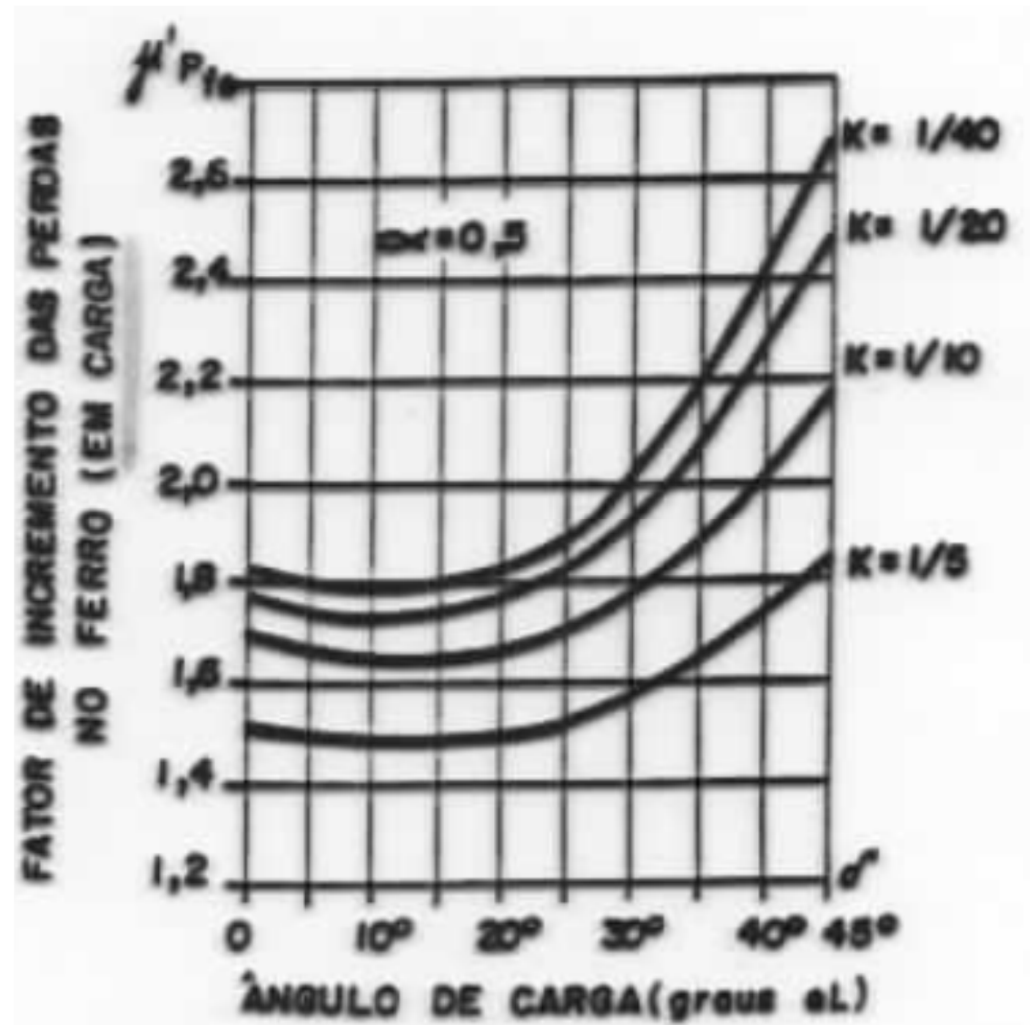
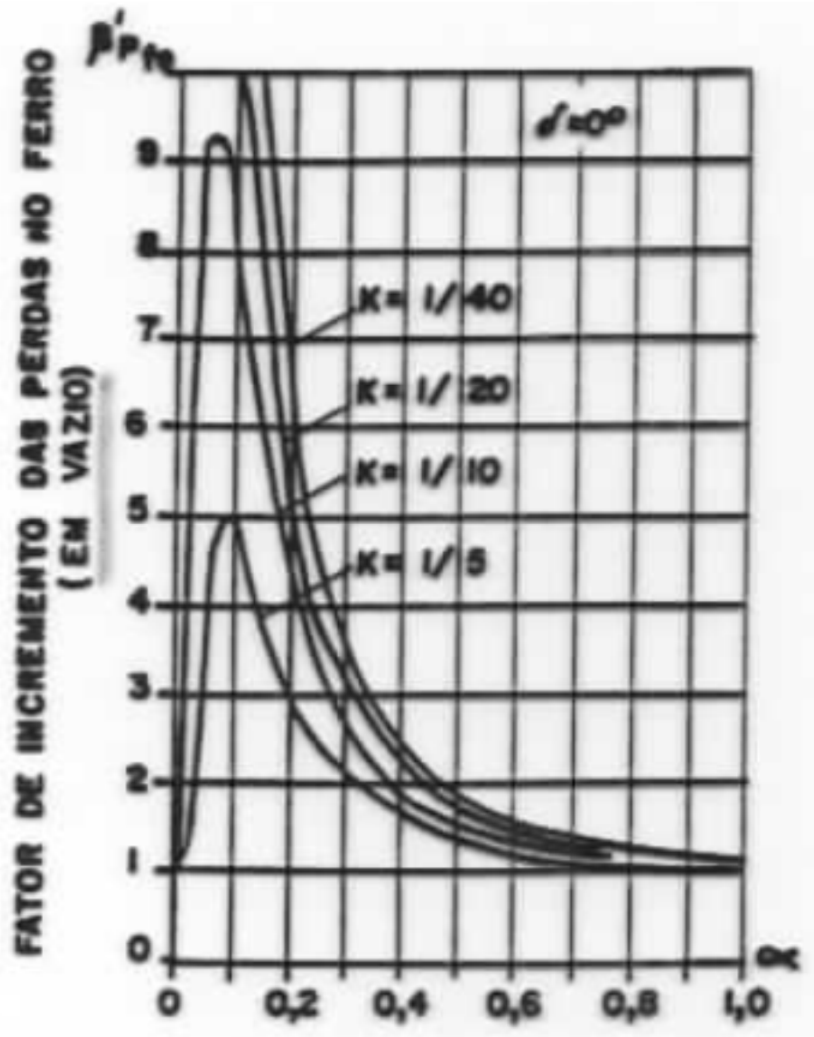
ESPECTRO DAS HARMÔNICAS DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO DO MSR



PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

EFEITO DAS HARMÔNICAS SOBRE AS PERDAS NO FERRO DO MSR

FATOR DE INCREMENTO DAS PERDAS NO FERRO EM RELAÇÃO A UM ROTOR LISO: $\gamma_{PFE} = \frac{P_{fe}}{P_{fe0}} = \sum_h \left(\frac{B_h}{B_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^{1,5}$

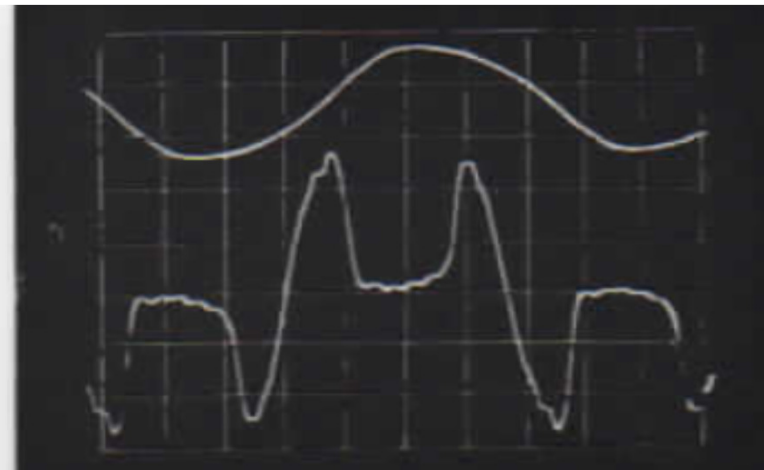
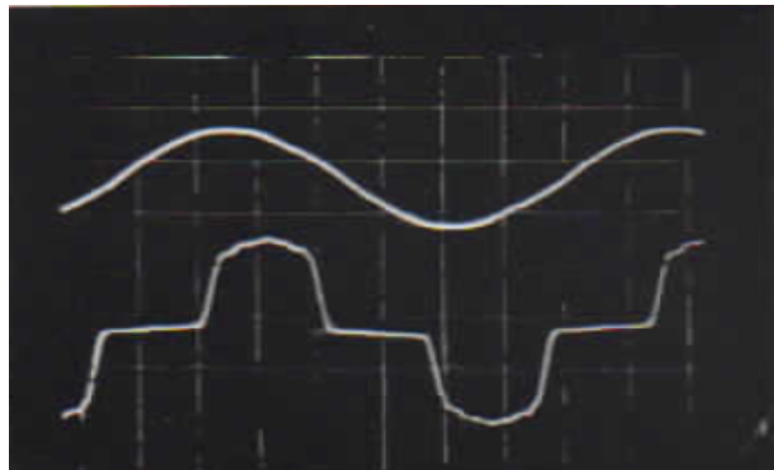


PEA – 5728 - Parte 5: MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA

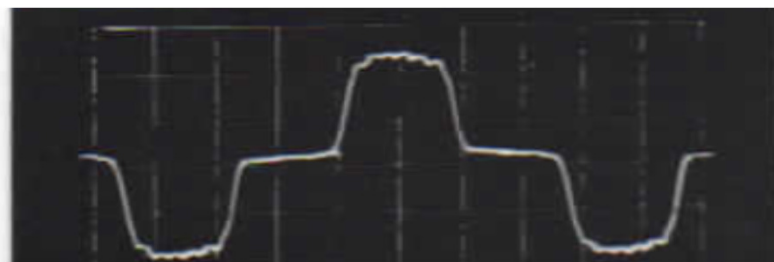
DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO REAL, MEDIDA EM PROTÓTIPO DE MSR

EIXO DIRETO - E.D.

EIXO EM QUADRATURA - E.Q.



F.M.M.
Bg



Bg
MAIOR
SATURAÇÃO