

Máquina Síncrona

Regime Permanente

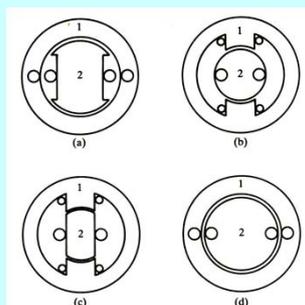
Prof. Antonio Carlos Ferreira
 Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Programa de Engenharia Elétrica
 ferreira@ufrj.br

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Torques de alinhamento e de relutância



Torque de alinhamento: age no sentido de alinhar os campos produzidos pelo estator e pelo rotor

Torque de relutância: age no sentido de reduzir a relutância do circuito magnético

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Torque de alinhamento (máquina rotor cilíndrico)

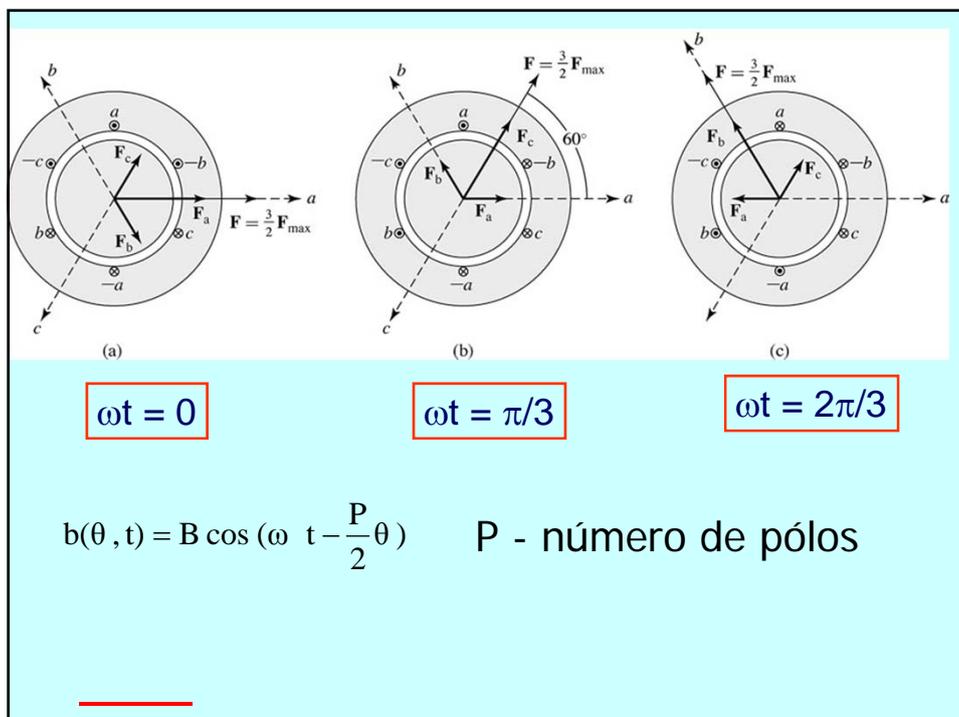
Para a produção de torque de alinhamento médio não-nulo precisamos de:

- **Campos com o mesmo número de pólos**
- **Estacionários entre si no espaço**

DEE-

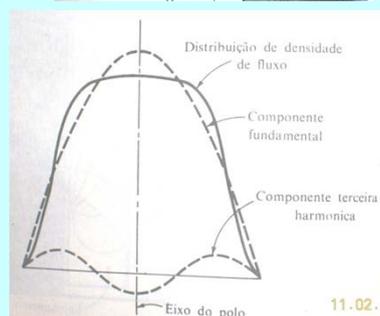
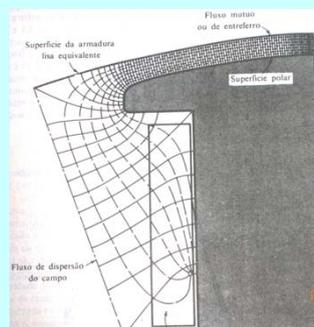
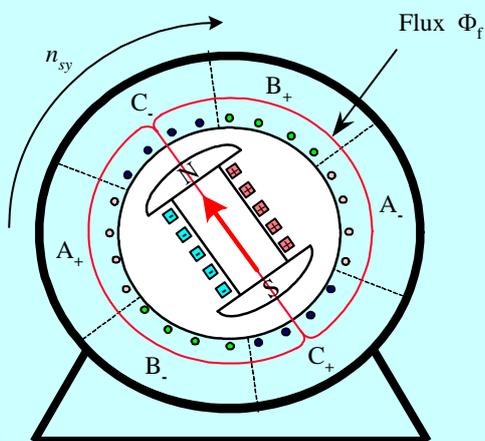
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira



Máquina síncrona

Rotor alimentado com corrente contínua (**campo**)



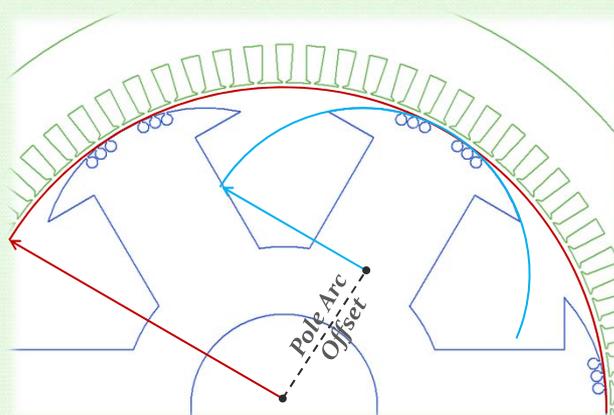
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquinas de Polos Salientes

- Variação do formato da sapata polar (*Pole Arc Offset*)



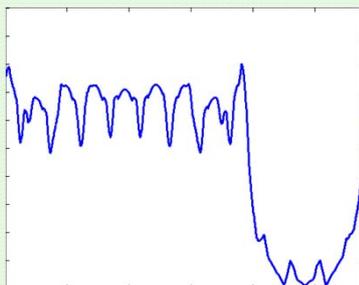
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Eléctricas

6

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FMM: *Offset* = 0 mm



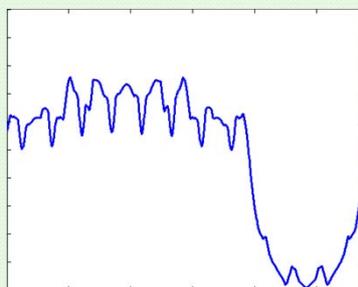
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

7

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FMM: *Offset* = 25,85 mm



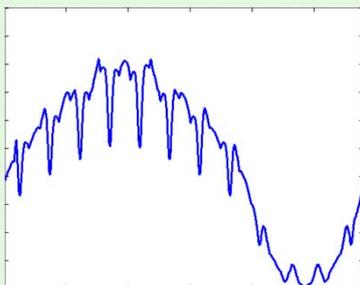
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

8

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FMM: *Offset* = 79,85 mm



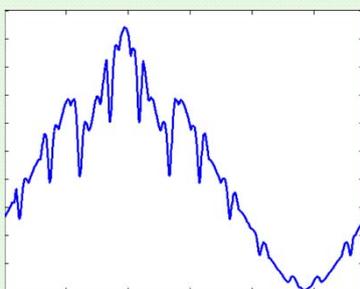
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

9

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FMM: *Offset* = 134,85 mm



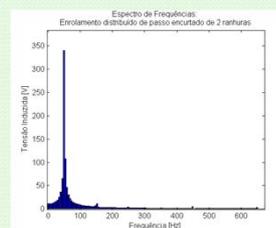
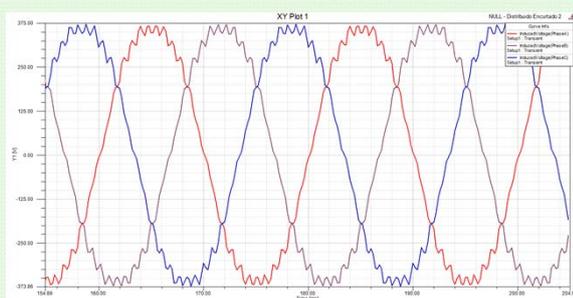
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

10

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FEM: *Offset* = 0 mm
 - Enrolamento distribuído de passo encurtado de 2 ranhuras



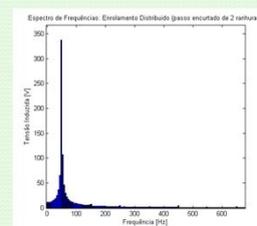
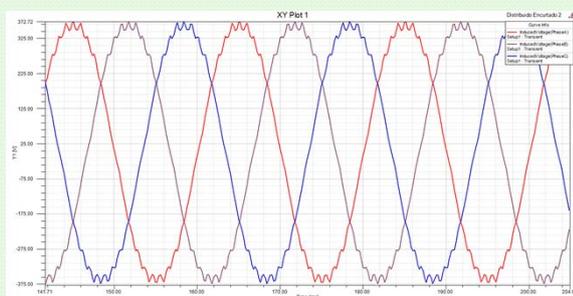
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

11

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FEM: *Offset* = 25,85 mm
 - Enrolamento distribuído de passo encurtado de 2 ranhuras



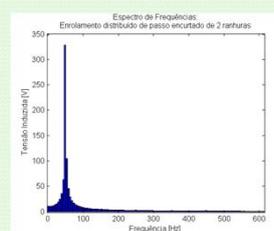
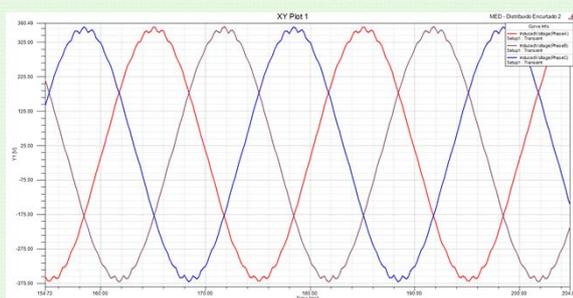
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

12

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FEM: *Offset* = 79,85 mm
 - Enrolamento distribuído de passo encurtado de 2 ranhuras



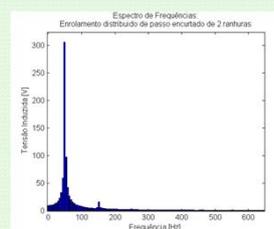
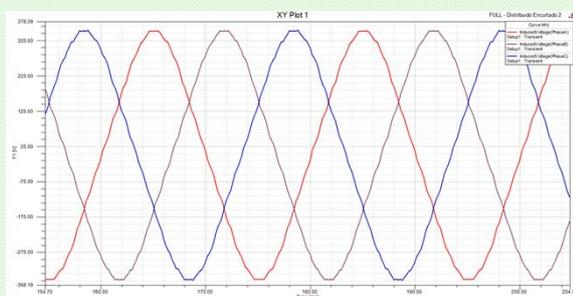
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

13

Máquinas de Polos Salientes

- Produção de FEM: *Offset* = 134,85 mm
 - Enrolamento distribuído de passo encurtado de 2 ranhuras



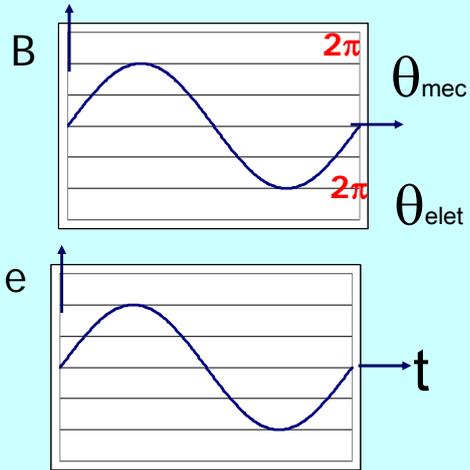
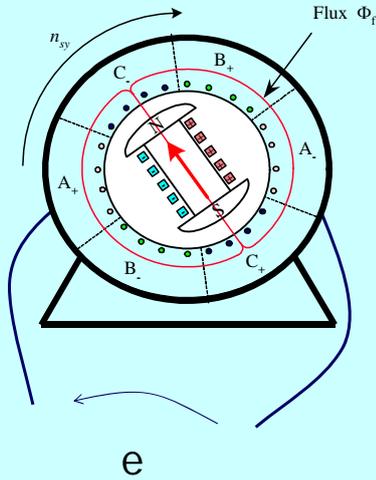
22/11/2012

Tópicos em Projetos de Máquinas Elétricas

14

Máquina síncrona (P = 2 pólos)

1 rotação → 1 ciclo

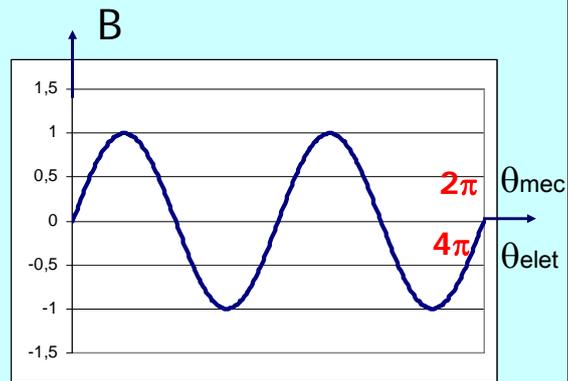
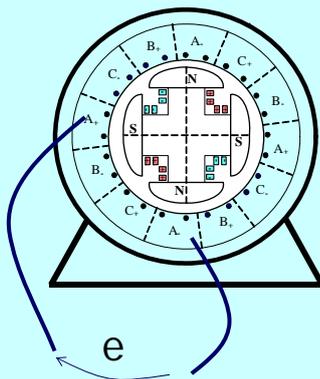


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona (P = 4 pólos)



1 rotação → 2 ciclos

$$\theta_{\text{elet}} = \frac{P}{2} \theta_{\text{mec}}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona

Pólos	Velocidade mec.	Freqüência fem induzida
$P = 2$	1 rotação/seg	1 Hz
$P = 4$	1 rotação/seg	2 Hz
$P = P$	1 rotação/seg	$P/2$ Hz

$$f = \frac{P}{2} \text{ rps} = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ [Hz]}$$

rps – velocidade em rot/s
n – velocidade de rotação em rpm

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Angra 1

Itaipu

P	2	4	6	78
n(rpm)	3600	1800	1200	92,3

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona

- Tensões induzidas nas três fases do estator (armadura) de mesmas amplitude e freqüência e defasadas de 120° no tempo.
- Se a máquina for conectada a uma carga, circulará corrente na armadura com as mesmas freqüência e defasagem das tensões.

$$\begin{cases} i_A(t) = I_M \cos(\omega t) \\ i_B(t) = I_M \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_C(t) = I_M \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad \begin{aligned} \omega &= 2\pi f \\ f &\text{ – freqüência da} \\ &\text{tensão induzida} \end{aligned}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona

- Fluxo produzido por enrolamento trifásico simétrico alimentado com corrente trifásica balanceada (CONVERSÃO)

$$b(\theta, t) = B \cos \left(\omega t - \frac{P}{2} \theta \right) \quad P - \text{número de pólos}$$

- Velocidade do campo (**velocidade síncrona**)

$$\omega_s = \frac{\omega}{P/2} [\text{rad/s}] \Rightarrow n_s = \frac{2}{P} 60 f [\text{rpm}]$$

- para $f = 60 \text{ Hz}$

P	2	4	6	8
n(rpm)	3600	1800	1200	900

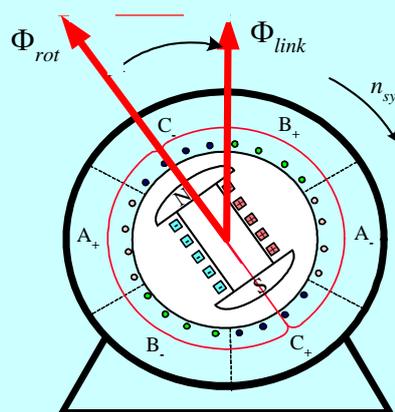
Fluxo produzido pela armadura tem a mesma velocidade que o rotor

DEE-

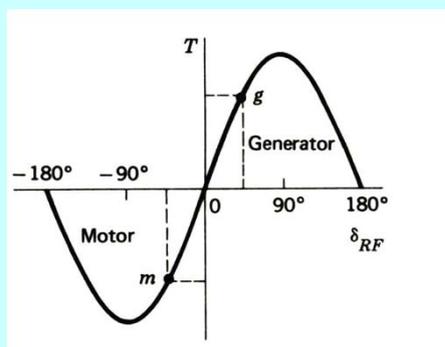
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Conjugado



$$T \propto B_r B_s \sin \delta$$



DEE-

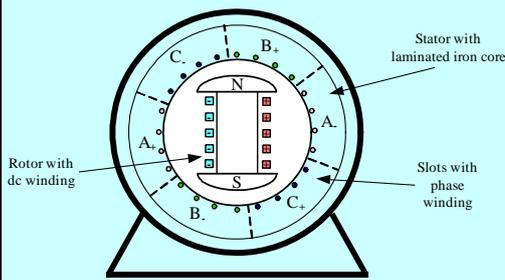
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

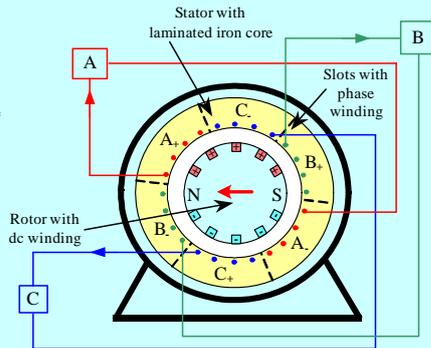
Máquina síncrona

- Estator alimentado com corrente trifásica balanceada (**armadura**)
- Rotor alimentado com corrente contínua (**campo**)

Pólos salientes



Rotor liso

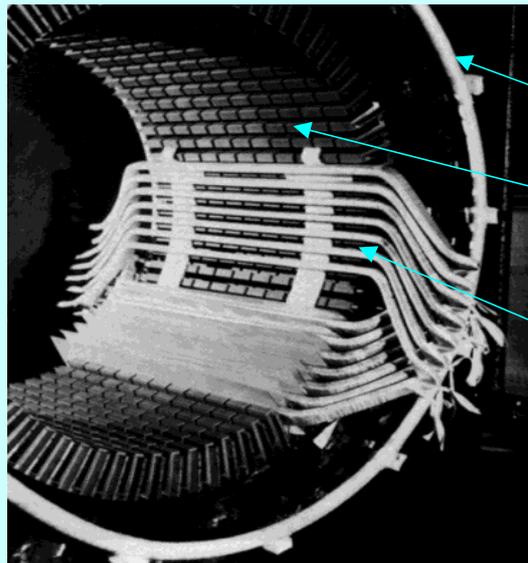


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Estator



Metal frame

Laminated iron core with slots

Insulated copper bars are placed in the slots to form the three-phase winding

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Armadura

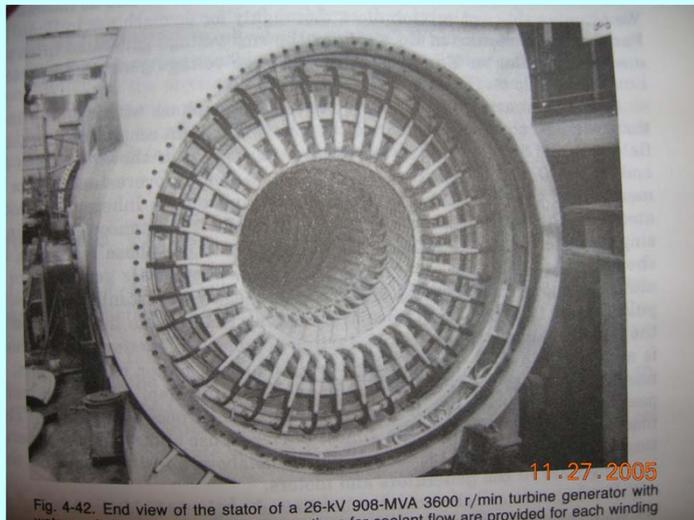


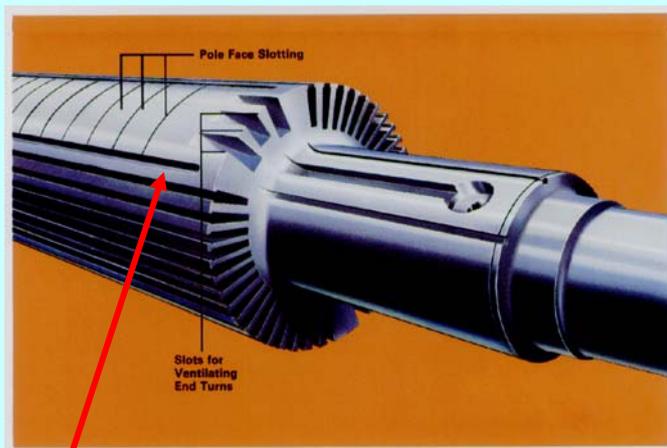
Fig. 4-42. End view of the stator of a 26-kV 908-MVA 3600 r/min turbine generator with water-cooled windings. Hydraulic connections for coolant flow are provided for each winding

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Rotor liso



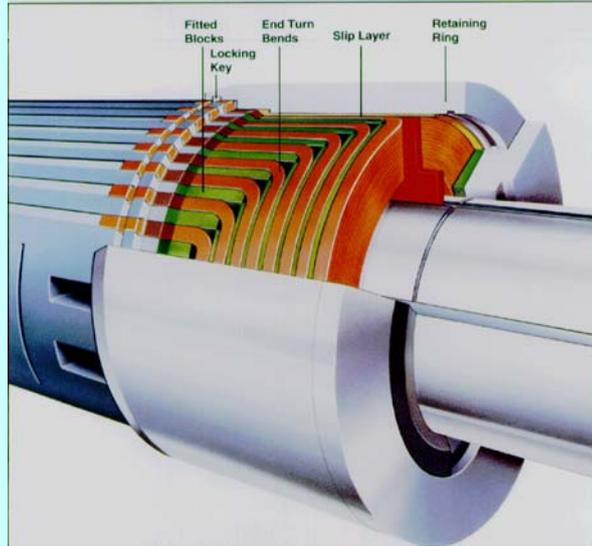
Cilindro maciço

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Rotor liso

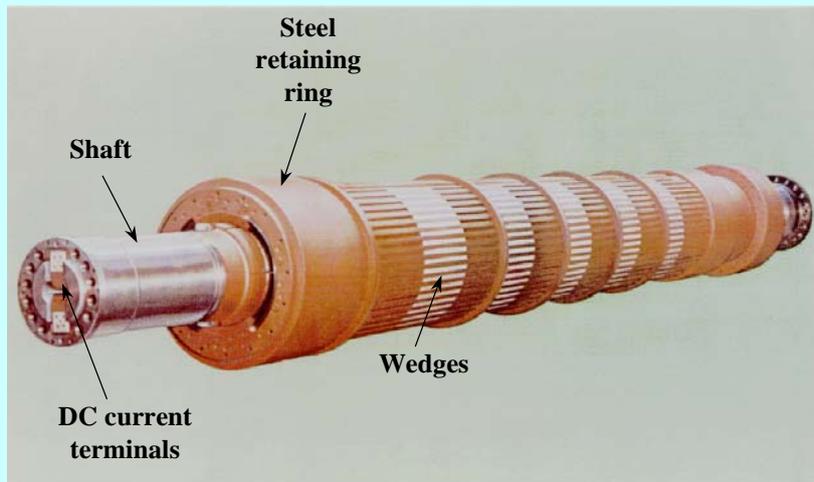


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Rotor liso

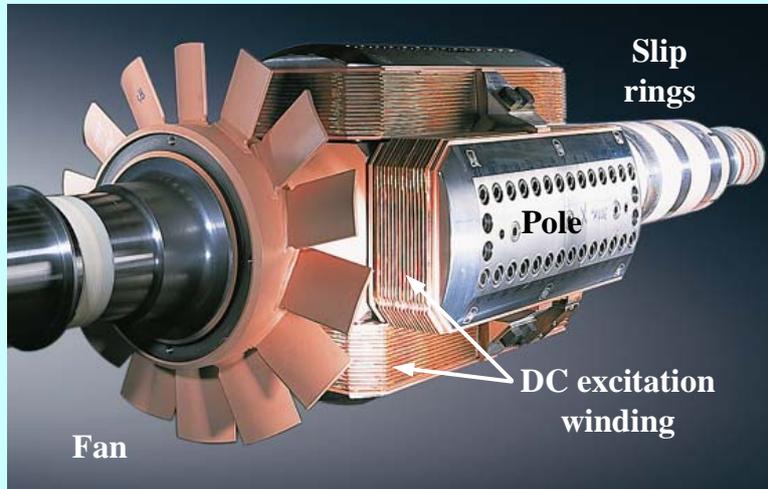


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Pólos Salientes



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina Síncrona



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Pólos Salientes

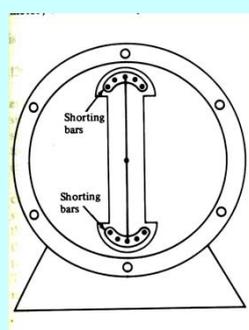
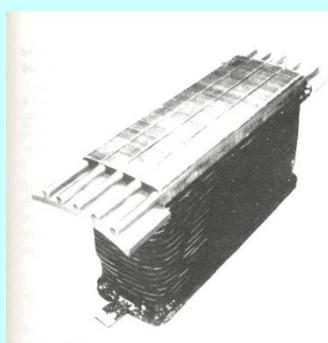


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Enrolamento amortecedor



Motor: auxiliar na partida
Gerador: ajuda a manter o sincronismo

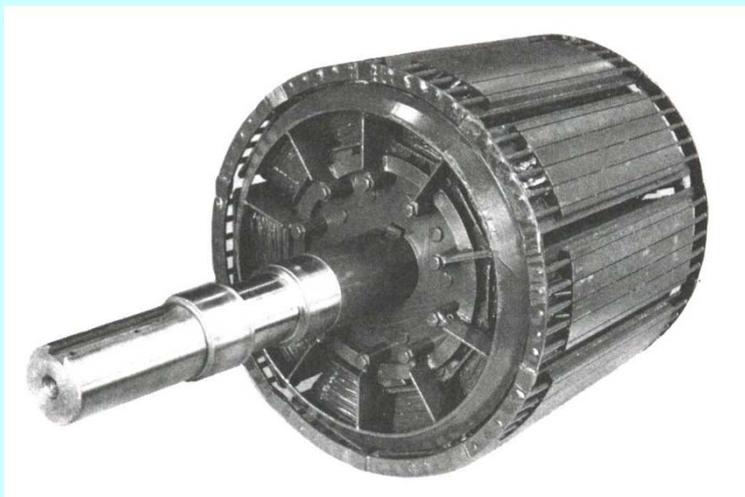
Não circula corrente em regime permanente

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Enrolamento amortecedor



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Enrolamento amortecedor

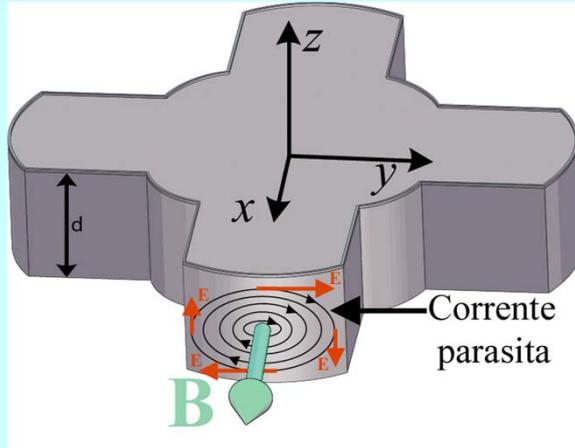


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Correntes no ferro



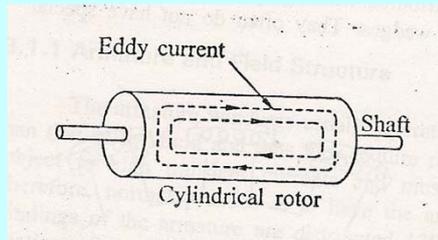
DEE-

Máquina Síncrona

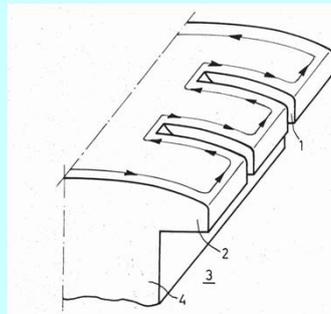
A.C.Ferreira

Correntes no ferro

Rotor liso



Pólos salientes sólidos

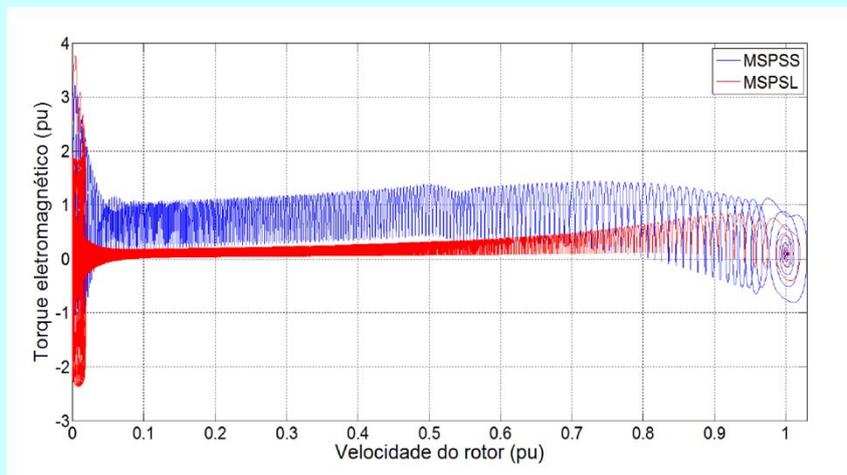


COE753/2010

Máq. Síncrona

A.C.Ferreira

Polos salientes laminados+amortecedor x sólidos

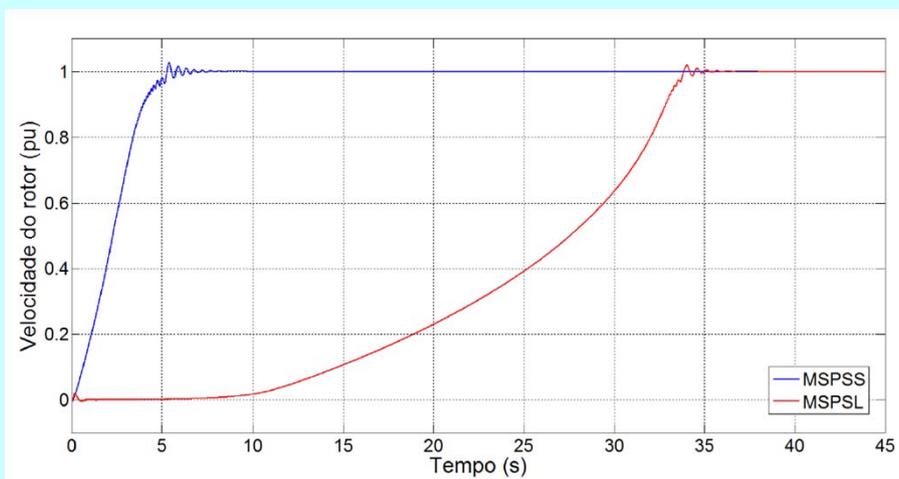


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Pólos salientes laminados+amortecedor x sólidos



DEE-

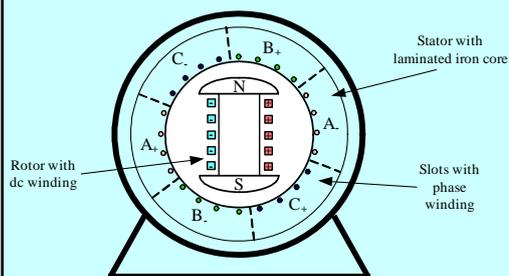
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

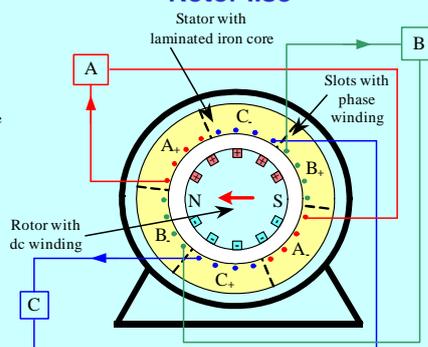
Máquina síncrona

- Estator alimentado com corrente trifásica balanceada (**armadura**)
- Rotor alimentado com corrente contínua (**campo**)

Pólos salientes



Rotor liso



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

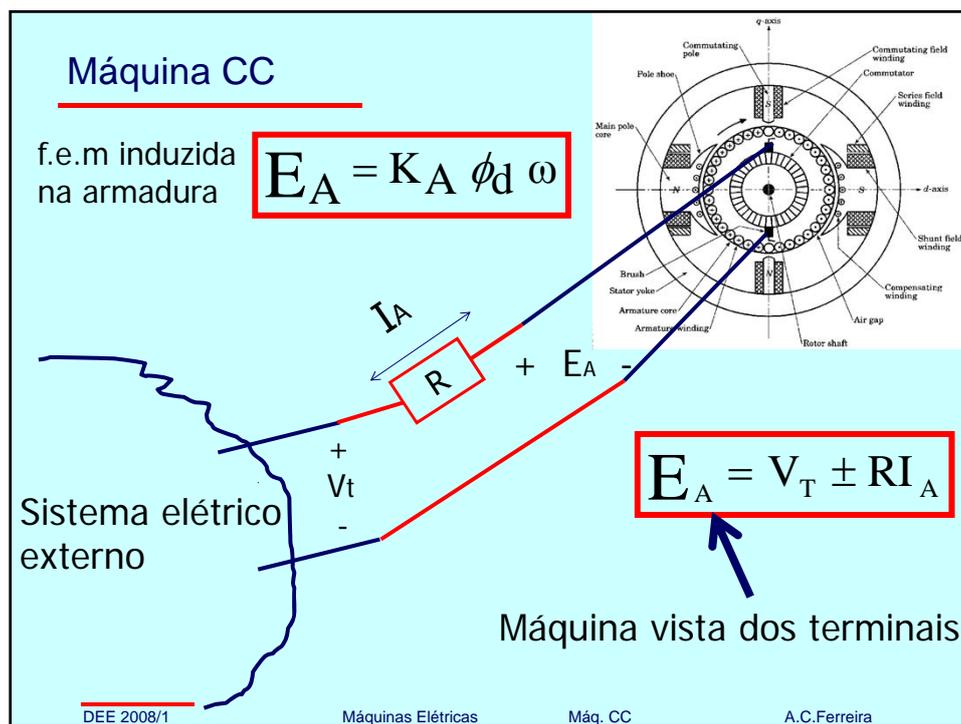
O que nos espera

- **Máquina de rotor liso**
 - Derivar circuito equivalente para máquina de rotor liso
 - Características de curto circuito e circuito aberto
 - Curvas características
 - Potência x ângulo de carga, curvas V, curvas compostas, curva de capacidade
- **Máquina de pólos salientes**
 - Teoria das duas reatâncias
 - Potência x ângulo de carga
- **Operação de geradores em paralelo**
- **Impedâncias de sequência**
- **Sistemas de excitação**

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

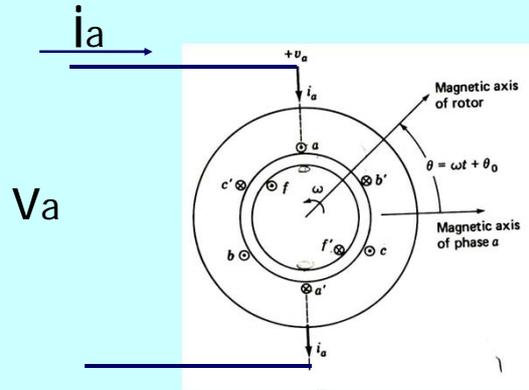


Máquina síncrona

Queremos circuito equivalente semelhante

REGIME PERMANENTE

Circuito equivalente (rotor liso)



$$v_a = r_a i_a + \frac{d}{dt} \lambda_a$$

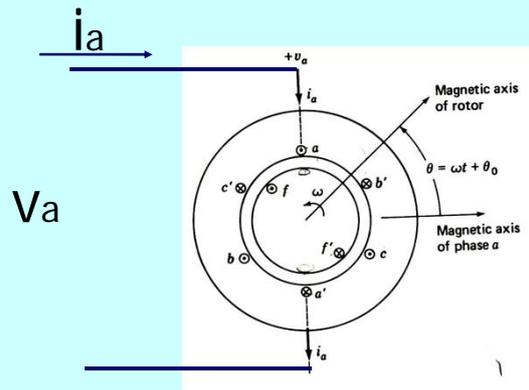
$$v_b = r_b i_b + \frac{d}{dt} \lambda_b$$

$$v_c = r_c i_c + \frac{d}{dt} \lambda_c$$

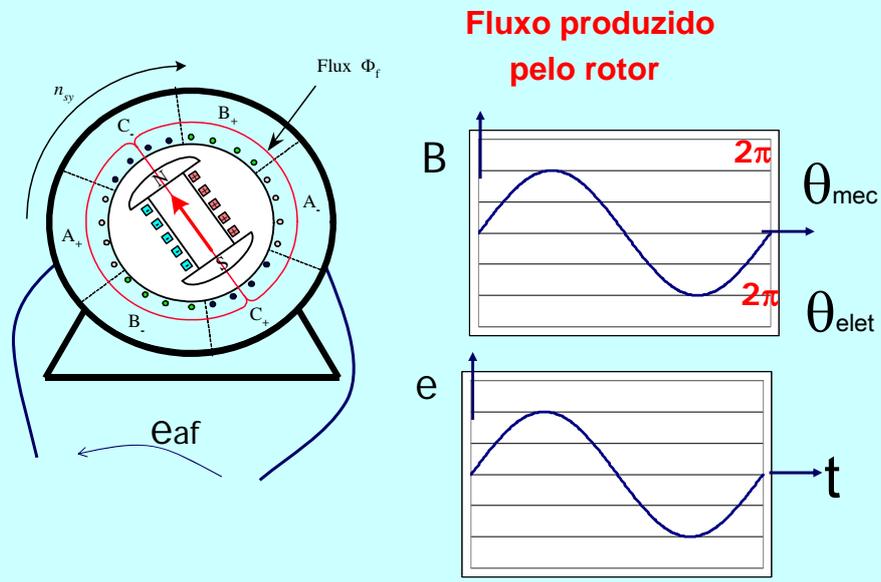
O que acontece em uma fase
Acontece nas outras defasado no tempo

$$v_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \lambda_f$$

Circuito equivalente (rotor liso)



Máquina síncrona (P = 2 pólos)

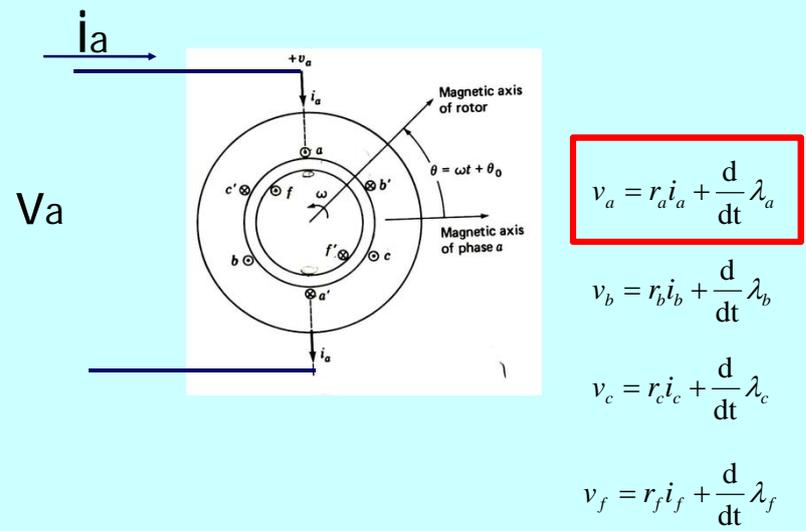


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Circuito equivalente (rotor liso)



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

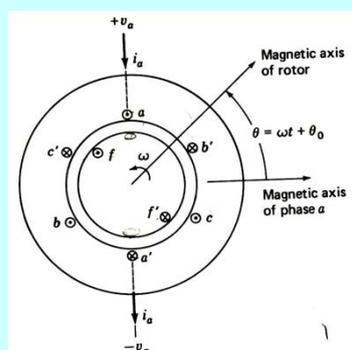
Circuito equivalente (rotor liso)

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f$$

$$\lambda_b = L_{ba} i_a + L_b i_b + L_{bc} i_c + L_{bf} i_f$$

$$\lambda_c = L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_c i_c + L_{cf} i_f$$

$$\lambda_f = L_{fa} i_a + L_{fb} i_b + L_{fc} i_c + L_{ff} i_f$$



Indutâncias variáveis com θ

DEE-

Máquina Síncrona

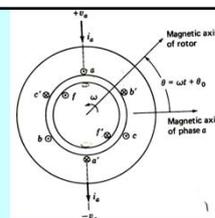
A.C.Ferreira

Indutâncias mútuas estator-rotor

$$L_{af} = L_{fa} = L_{af} \cos \theta$$

- O mesmo pode ser feito para as fases **b** e **c**, aplicando defasagem de 120 graus.
- Assumir rotor girando à velocidade síncrona (regime permanente)
- $\theta = \omega t + \theta_0$ (θ_0 é o ângulo em $t=0$ segundos)
- Enlace de fluxo na fase “**a**” devido à corrente no enrolamento de campo

$$\lambda_{af} = L_{af} I_f \cos (\omega t + \theta_0)$$



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Indutâncias do estator $\lambda_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \lambda_{af}$

- Com rotor cilíndrico, o entreferro independe de θ e as indutâncias próprias dos enrolamentos do estator são constantes e dadas por

$$L_a = L_b = L_c = L_{aa0} + L_{al}$$

- Onde L_{aa0} é devida ao fluxo no entreferro e L_{al} é devida à dispersão na armadura.
- As indutâncias mútuas podem ser calculadas admitindo-se que dependem apenas da componente fundamental do fluxo do entreferro. Como os enrolamentos estão defasados espacialmente de 120 graus, tem-se

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ac} = L_{ca} = -\frac{1}{2} L_{aa0}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Enlace de fluxo do estator

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \lambda_{af}$$

Substituindo por $L_a = L_{aa0} + L_{al}$ e $L_{ab} = L_{ac} = -\frac{1}{2} L_{aa0}$

Tem-se $\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} (i_b + i_c) + \lambda_{af}$

Lembrando que em regime permanente $i_a + i_b + i_c = 0$

$$\lambda_a = L_S i_a + \lambda_{af}$$

$L_S = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al}$ é **definida** como **indutância síncrona**

DEE-

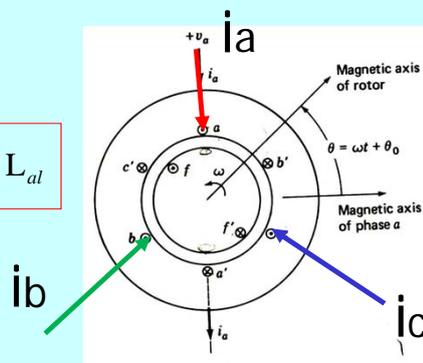
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Circuito equivalente (rotor liso)

$$\lambda_{as} = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c$$

$$\lambda_{as} = L_S i_a \quad L_S = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al}$$



Indutância síncrona

$$L_S = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al} = L_{aa0} + \frac{1}{2} L_{aa0} + L_{al}$$

- Indutância efetiva vista pela fase a (regime permanente, equilibrado)
- 3 componentes
- Indutância aparente: relaciona fluxo concatenado com a fase a, em termos de corrente na fase a, mesmo que parte deste fluxo seja produzido pelas fases b e c
- Independente de θ

Equação de tensão para a fase **a**

$$\lambda_a = L_S i_a + \lambda_{af}$$

$$v_a = r_a i_a + \frac{d}{dt} \lambda_a = r_a i_a + L_S \frac{di_a}{dt} + \frac{d\lambda_{af}}{dt}$$

- v_a – tensão aplicada na fase **a**
- Definindo **tensão de excitação** como

$$e_{af} = \frac{d\lambda_{af}}{dt} = -\omega L_{af} I_f \sin(\omega t + \theta_0) = \sqrt{2} E_{af} \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2})$$

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Equação de tensão para a fase **a**

- Tensão de excitação

$$e_{af} = -\omega L_{af} I_f \sin(\omega t + \theta_0) = \sqrt{2} \omega L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2})$$

$$\lambda_{af} = L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0)$$

- e_{af} está adiantada de 90° em relação λ_{af}
- E_{af} - valor eficaz da tensão de excitação

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}}$$

$$e_{af} = \sqrt{2} E_{af} \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2})$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Equação de tensão para a fase **a**

$$v_a = r_a i_a + L_S \frac{di_a}{dt} + e_{af}$$

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \beta)$$

$$L_S \frac{d}{dt} i_a = -\sqrt{2} \underbrace{\omega L_S}_{X_s} I_a \sin(\omega t + \beta) = \sqrt{2} X_s I_a \cos(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2})$$

X_s – reatância síncrona

$$e_{af} = \sqrt{2} E_{af} \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2})$$

Em notação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Equação de tensão na fase **a**

- Em representação fasorial

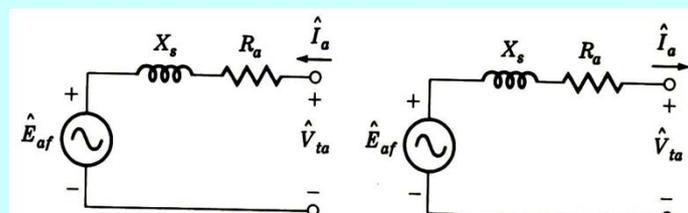
$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

motor

$$\hat{V}_a = -r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

gerador

Onde X_s é a reatância síncrona dada por $X_s = \frac{3}{2} \omega L_{aa0} + \omega L_{al} = X_A + X_{al}$



Motor

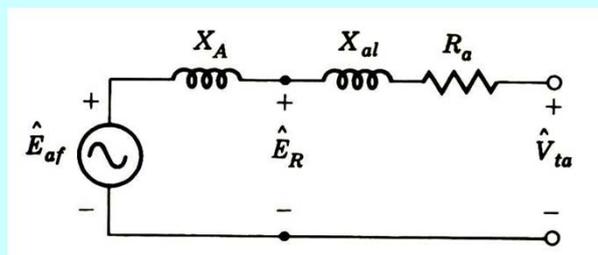
Gerador

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Circuito equivalente



- E_R : tensão de entreferro, tensão atrás da reatância de dispersão (depende do fluxo resultante no entreferro)
- X_A : reatância de reação da armadura
- R_a – 0,01 pu
- X_{al} – 0,1-0,2 pu
- X_A – 1,0-2,0 pu

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

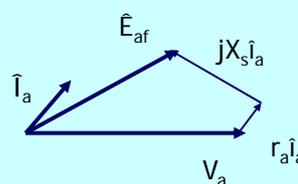
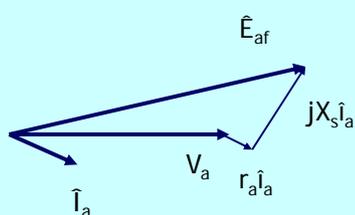
Diagrama fasorial Gerador

$$\hat{V}_a = \hat{E}_{af} - r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a$$

$$\hat{V}_a = V_a \angle 0^\circ$$

$$\hat{I}_a = I_a \angle \theta$$

$$\hat{E}_{af} = E_{af} \angle \delta$$



\hat{E}_{af} adiantado em relação a V_a

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Diagrama fasorial **Motor**

$$\hat{V}_a = \hat{E}_{af} + r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a$$

$$\hat{V}_a = V_a \angle 0^\circ$$

$$\hat{I}_a = I_a \angle \theta$$

$$\hat{E}_{af} = E_{af} \angle \delta$$



\hat{E}_{af} atrasado em relação a V_a

DEE-

Máquina Síncrona

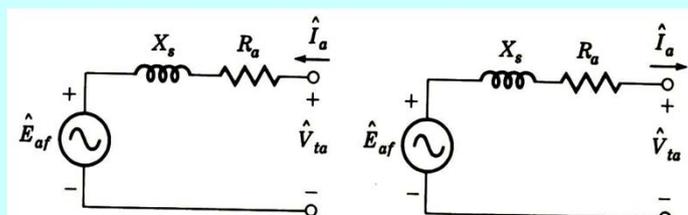
A.C.Ferreira

Equação de tensão na fase **a**

- Em representação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{motor}$$

$$\hat{V}_a = -r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{gerador}$$



Motor

Gerador

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exemplo 5.1 Fitzgerald

- Observa-se que um motor síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. Nestas condições de operação, a corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \Omega$ (0,794 por unidade, em uma base de 460 V e 100 kVA). Suponha que a resistência de armadura seja desprezível.
- Calcule (a) a tensão gerada E_{af} em volts, (c) a potência de entrada elétrica do motor em kW.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exemplo 5.2 Fitzgerald

- Supondo que a potência de entrada e a tensão terminal do motor do Exemplo 5.1 permaneçam constantes, calcule (a) o ângulo de fase δ da tensão gerada e (b) a corrente de campo necessária para conseguir um fator de potência unitário nos terminais do motor.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Problema prático 5.1 Fitzgerald

- A máquina síncrona dos exemplos 5.1 e 5.2 deve operar como gerador síncrono. Para uma operação em 60 Hz com uma tensão de terminal de 460 V, tensão de linha, calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência capacitivo de 0,95.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona – rotor liso

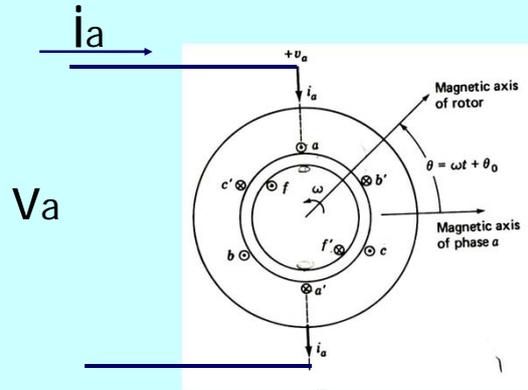
Modelo Matemático

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Circuito equivalente (rotor liso)

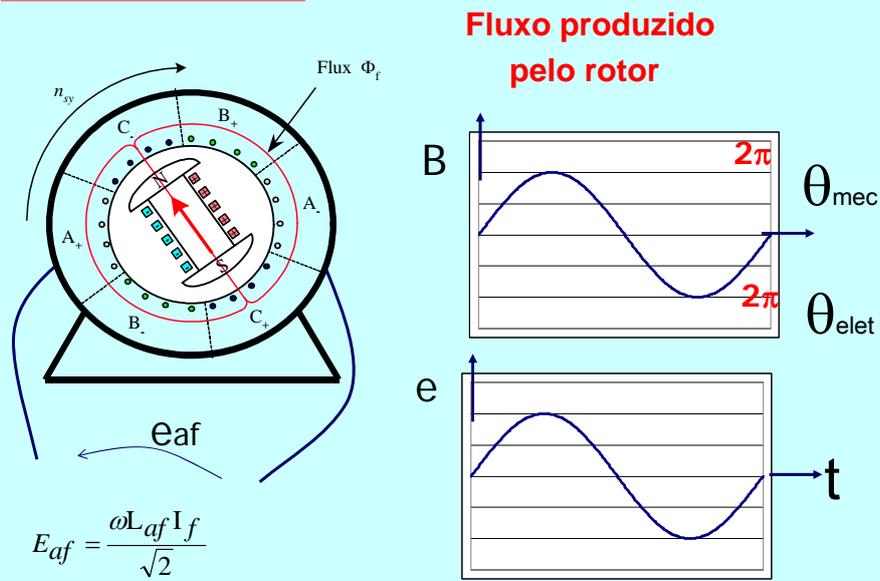


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona (P = 2 pólos)



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

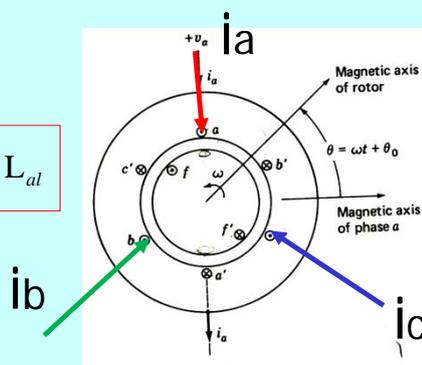
Circuito equivalente (rotor liso)

$$\lambda_{as} = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c$$

$$\lambda_{as} = L_S i_a \quad L_S = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al}$$

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \beta)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{as} = L_s \frac{d}{dt} i_a = \sqrt{2} X_s I_a \cos(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2})$$



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Circuito equivalente (rotor liso)

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \beta)$$

$$e_{af} = \sqrt{2} E_{af} \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2})$$

$$L_s \frac{d}{dt} i_a = \sqrt{2} X_s I_a \cos(\omega t + \beta + \frac{\pi}{2})$$

mesma
frequência

Em notação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_S \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

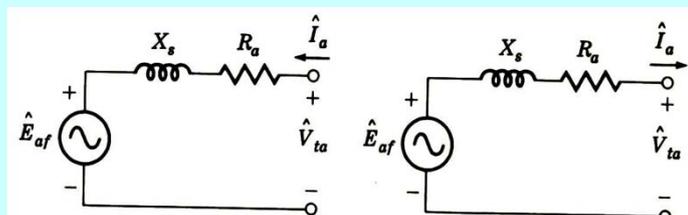
Equação de tensão na fase **a**

- Em representação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{motor}$$

$$\hat{V}_a = -r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{gerador}$$

Onde X_s é a reatância síncrona dada por $X_s = \frac{3}{2} \omega L_{aa0} + \omega L_{al} = X_A + X_{al}$



Motor

Gerador

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exemplo 5.1 Fitzgerald

- Observa-se que um motor síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. Nestas condições de operação, a corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω (0,794 por unidade, em uma base de 460 V e 100 kVA). Suponha que a resistência de armadura seja desprezível.
- Calcule (a) a tensão gerada E_{af} em volts, (c) a potência de entrada elétrica do motor em kW.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exemplo 5.2 Fitzgerald

- Supondo que a potência de entrada e a tensão terminal do motor do Exemplo 5.1 permaneçam constantes, calcule (a) o ângulo de fase δ da tensão gerada e (b) a corrente de campo necessária para conseguir um fator de potência unitário nos terminais do motor.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Determinação de X_s

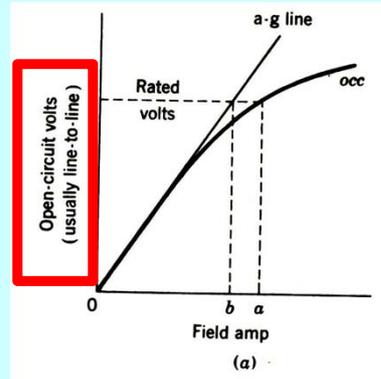
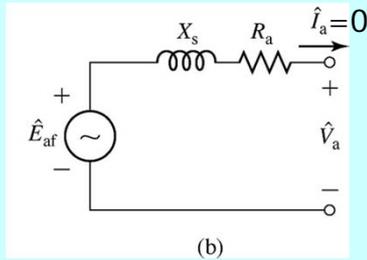
- Característica de circuito aberto (Característica a vazio)
- Característica de curto-circuito

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica de circuito aberto (occ)



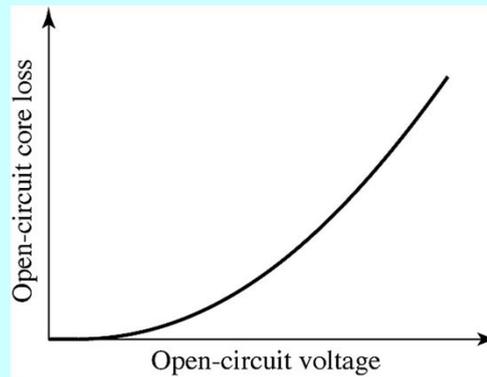
$$\omega_m = cte = \omega_{sinc}$$

$$E_{af} = \frac{\omega I_f L_{af}}{\sqrt{2}}$$

Meço V_t que é numericamente igual a E_{af}

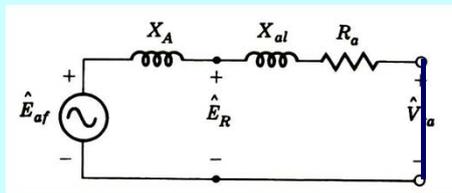
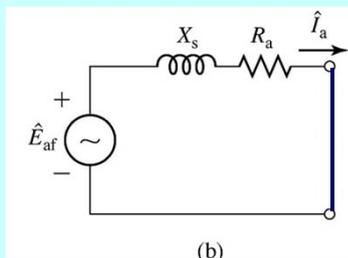
Perdas rotacionais a vazio

- Mecânicas (velocidade)
- Núcleo (fluxo / tensão)



Perdas mecânicas podem ser medidas retirando-se a excitação

Característica de curto-circuito



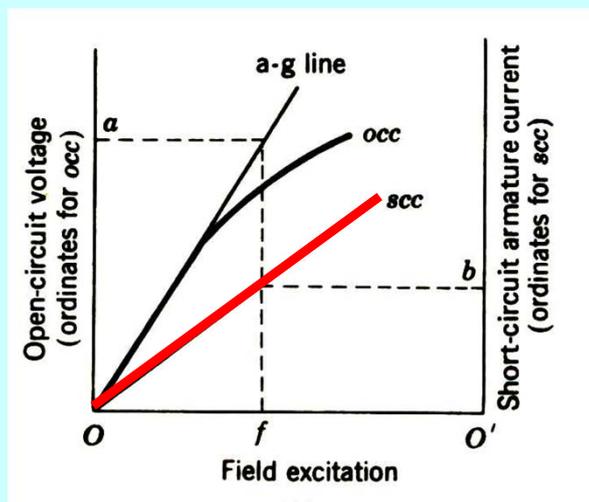
$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_R = (r_a + jX_{al}) \hat{I}_a$$

$$\omega_m = \text{cte} = \omega_{\text{sinc}}$$

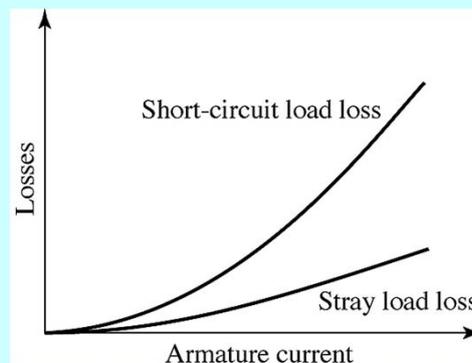
depende do fluxo resultante no entreferro

Característica de curto-circuito (scc)



Perdas de curto-circuito

- Mecânicas
(velocidade)
- Corrente de armadura
(curto-circuito)
ôhmicas, suplementares

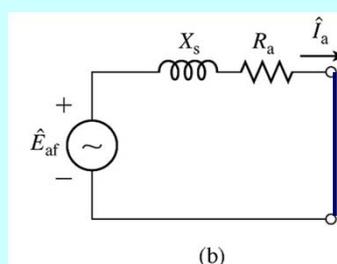
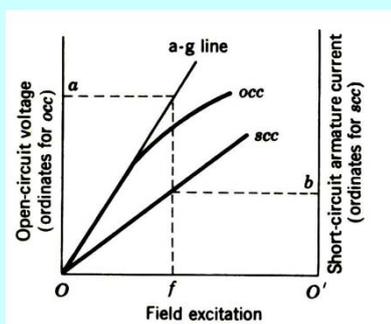


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Reatância Síncrona



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

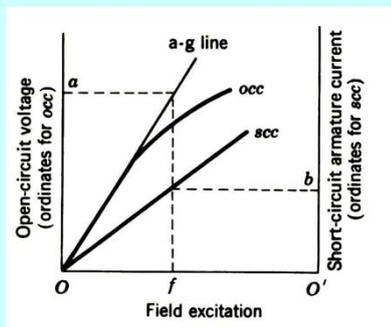
$$\hat{E}_{af} = (\cancel{X}_a + jX_s) \hat{I}_a$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Reatância Síncrona



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = (\cancel{r_a} + jX_s) \hat{I}_a$$

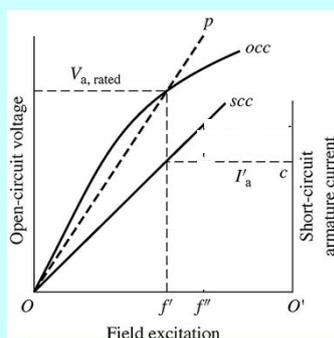
Reatância síncrona não-saturada: relação entre tensão obtida da linha de entreferro e a corrente de armadura obtida de "scc" para um mesmo valor de corrente de campo.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Reatância Síncrona



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = (\cancel{r_a} + jX_s) \hat{I}_a$$

Reatância síncrona saturada: relação entre a tensão nominal e a corrente de armadura obtida de "scc" para um mesmo valor de corrente de campo.

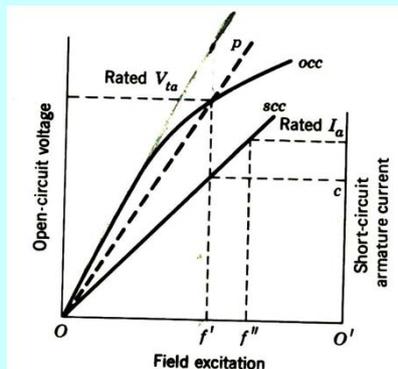
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Relação de curto-circuito (RCC)

- Razão entre a corrente de campo necessária para obter tensão nominal em circuito aberto e a corrente de campo necessária para obter corrente de armadura nominal em curto circuito.



$$RCC = \frac{Of'}{Of''}$$

- Pode-se demonstrar que RCC é o inverso do valor por unidade da reatância síncrona saturada.

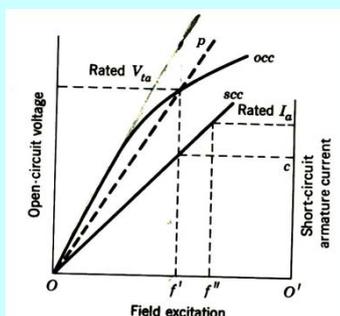
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Relação de curto-circuito (RCC)

Pode-se demonstrar que RCC é o inverso do valor por unidade da reatância síncrona saturada.



$$RCC = \frac{Of'}{Of''} \quad I_a = \frac{V_{nom}}{X_{S_{sat}}}$$

Por semelhança de triângulos

$$RCC = \frac{Of'}{Of''} = \frac{I_a}{I_{anom}}$$

$$RCC = \frac{I_a}{I_{anom}} = \frac{V_{nom}}{X_{S_{sat}} I_{anom}} = \frac{Z_{base}}{X_{S_{sat}}} = \frac{1}{X_{S_{sat}, pu}}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

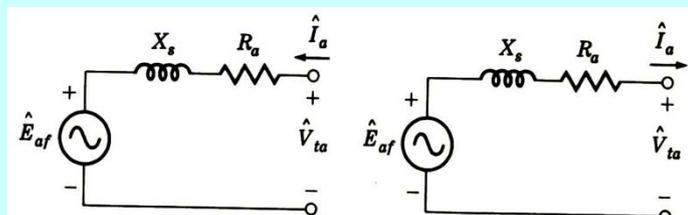
Equação de tensão na fase a

- Em representação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{motor}$$

$$\hat{V}_a = -r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{gerador}$$

Onde X_s é a reatância síncrona dada por $X_s = \frac{3}{2} \omega L_{aa0} + \omega L_{al} = X_A + X_{al}$



Motor

Gerador

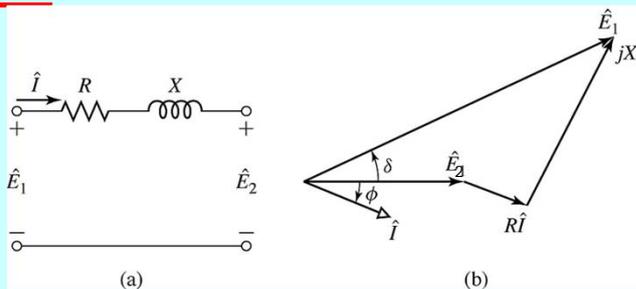
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica potência x ângulo de carga

$$P_2 = E_2 I \cos \phi$$



$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1 \angle \delta - E_2 \angle 0^\circ}{Z} = \frac{E_1}{|Z|} \angle (\delta - \phi_z) - \frac{E_2}{|Z|} \angle -\phi_z$$

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \quad \text{ou} \quad P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta + \alpha_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2}$$

$$\text{onde} \quad \alpha_z = (90^\circ - \phi_z) = \tan^{-1} \frac{R}{X}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica potência x ângulo de carga

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta + \alpha_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \quad \text{e} \quad P_1 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta - \alpha_z) + \frac{E_1^2 R}{|Z|^2}$$

Desprezando-se a resistência, tem-se

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin \delta$$

Para a máquina síncrona sob análise

$$P = 3 \frac{E_{af} V_a}{X_s} \sin \delta$$

δ - é denominado **ângulo de carga** da máquina

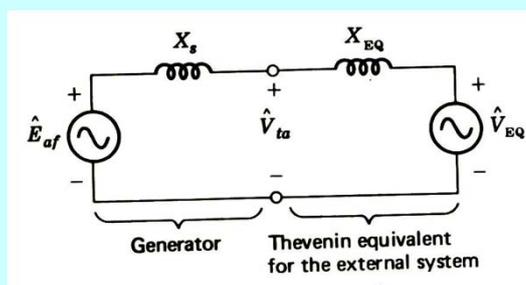
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina ligada a um sistema externo

$$P = 3 \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta$$

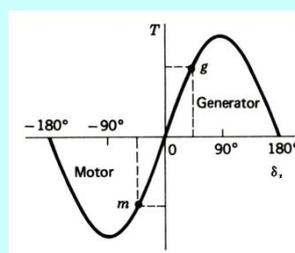


- Potência máxima

$$P = 3 \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}}$$

- Torque

$$T = \frac{P}{\omega_s} = 3 \frac{E_{af} V_a}{\omega_s X_s} \sin \delta$$

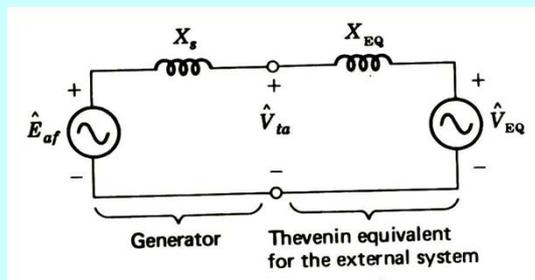


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina ligada a um sistema externo



$$\hat{V}_{EQ} = \hat{E}_{af} \pm (r_a + jX_s)\hat{I}_a \pm jX_{EQ}\hat{I}_a$$

$$P = 3 \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta$$

A three-phase, 75-MVA, 13.8-kV synchronous generator with saturated synchronous reactance $X_s = 1.35$ per unit and unsaturated synchronous reactance $X_{s,u} = 1.56$ per unit is connected to an external system with equivalent reactance $X_{EQ} = 0.23$ per unit and voltage $V_{EQ} = 1.0$ per unit, both on the generator base.

- Find the maximum power P_{max} (in MW and per unit) that can be supplied to the external system if the internal voltage of the generator is held equal to 1.0 per unit.
- Now assume that the generator is equipped with an *automatic voltage regulator* which controls the field current to maintain constant terminal voltage. If the generator is loaded to its rated value, calculate the corresponding power angle, per-unit internal voltage.

A 2000-hp, 2300-V, unity-power-factor, three-phase, Y-connected, 30-pole, 60-Hz synchronous motor has a synchronous reactance of $1.95 \Omega/\text{phase}$. For this problem all losses may be neglected.

- a. Compute the maximum power and torque which this motor can deliver if it is supplied with power directly from a 60-Hz, 2300-V infinite bus. Assume its field excitation is maintained constant at the value which would result in unity power factor at rated load.

- b. Instead of the infinite bus of part (a), suppose that the motor is supplied with power from a three-phase, Y-connected, 2300-V, 1500-kVA, two-pole, 3600 r/min turbine generator whose synchronous reactance is $2.65 \Omega/\text{phase}$. The generator is driven at rated speed, and the field excitations of generator and motor are adjusted so that the motor runs at unity power factor and rated terminal voltage at full load. Calculate the maximum power and torque which could be supplied corresponding to these values of field excitation.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curvas características

- Curvas compostas

- Curvas de capacidade (capacidade)

- Curvas V

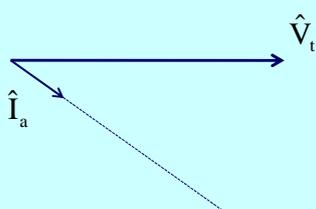
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- **Curvas compostas:** corrente de campo necessária para manter constante a tensão terminal, quando a carga de fator de potência constante é variada.



Gerador

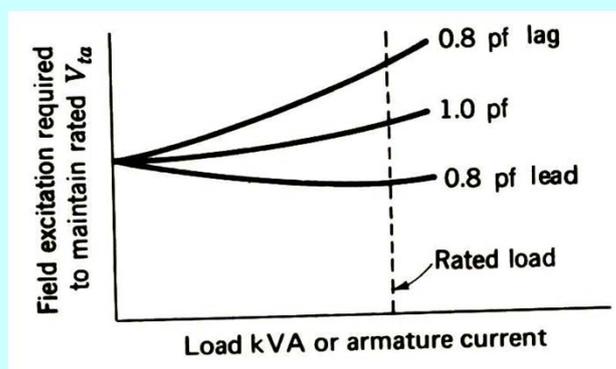
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- **Curvas compostas:** aumenta-se a carga, mantendo-se seu fp e a tensão terminal da máquina constantes.



Gerador

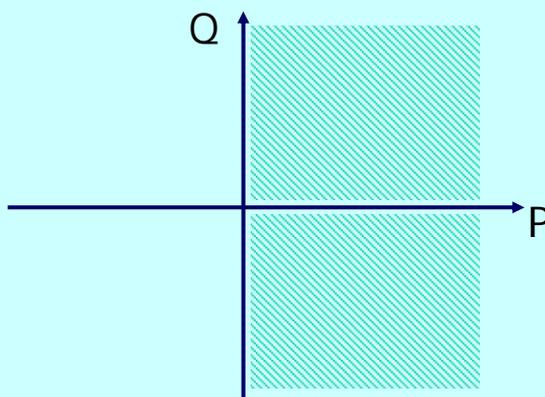
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- **Curvas de capacidade:** relaciona a capacidade de potência reativa para uma dada potência ativa



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- **Curvas de capacidade:** relaciona a capacidade de potência reativa para uma dada potência ativa
- Limite de corrente de armadura

$$|S| = |\hat{V}_a \hat{I}_a^*| = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_a I_a$$

$$P^2 + Q^2 = (V_a I_a)^2$$

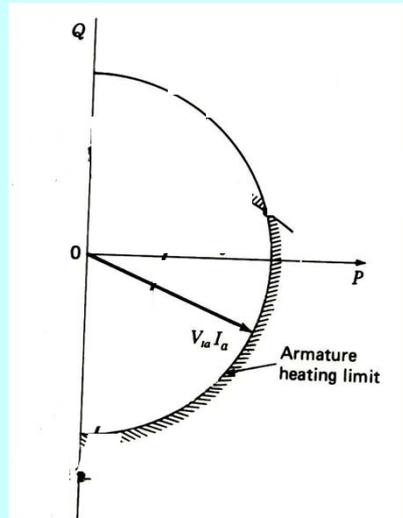
círculo com centro na origem

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curvas de capacidade



DEE-

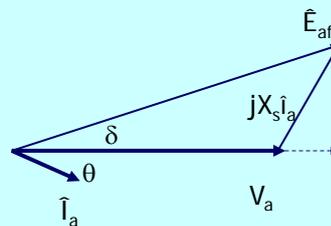
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- Limite de corrente de campo (limita E_{af})

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V_a I_a \cos \theta \\ Q = V_a I_a \sin \theta \end{array} \right.$$



DEE-

Máquina Síncrona

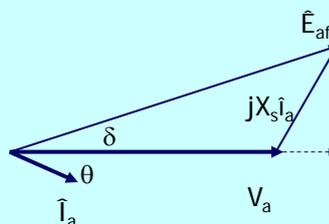
A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- Limite de corrente de campo (limita E_{af})

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V_a I_a \cos \theta \\ Q = V_a I_a \sin \theta \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{af} \sin \delta = X_s I_a \cos \theta \\ E_{af} \cos \delta = X_s I_a \sin \theta + V_a \end{array} \right.$$



DEE-

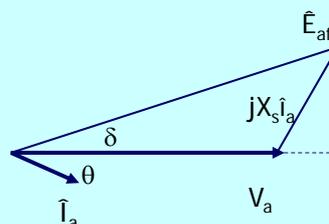
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- Limite de corrente de campo (limita E_{af})

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V_a I_a \cos \theta = \frac{V_a E_{af} \sin \delta}{X_s} \\ Q = V_a I_a \sin \theta = \frac{V_a E_{af} \cos \delta}{X_s} - \frac{V_a^2}{X_s} \end{array} \right.$$



DEE-

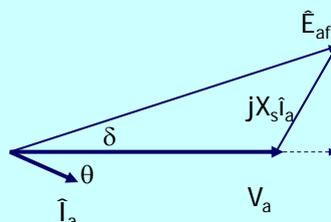
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- Limite de corrente de campo (limita E_{af})

$$\left\{ \begin{aligned} P &= V_a I_a \cos \theta = \frac{V_a E_{af} \sin \delta}{X_s} \\ Q &= V_a I_a \sin \theta = \frac{V_a E_{af} \cos \delta}{X_s} - \frac{V_a^2}{X_s} \end{aligned} \right.$$



$$P^2 + \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{E_{af} V_a}{X_s} \right)^2$$

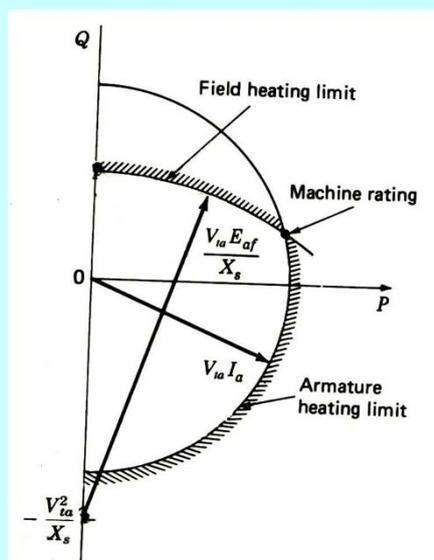
círculo com centro em $(0, -V_a^2/X_s)$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curvas de capacidade

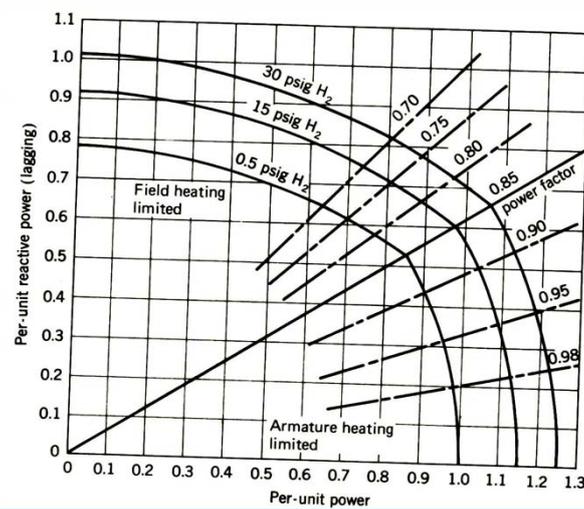


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curvas de capacidade



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

- **Curva V:** mostra a relação entre corrente de armadura e de campo a uma tensão terminal constante e uma potência ativa constante

- $$P = 3 \frac{E_{af} V_a}{X_s} \sin \delta \quad \text{e} \quad P = 3 V_a I_a \cos \theta$$

- Para P e V_a constantes

$$\text{cte} = E_{af} \sin \delta$$

$$\text{cte} = I_a \cos \theta$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Características de operação em regime permanente

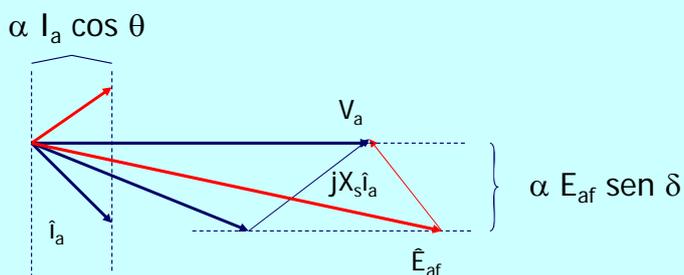
- **Curva V:** mostra a relação entre corrente de armadura e de campo a uma tensão terminal constante e uma potência ativa constante

- $P = 3 \frac{E_{af} V_a}{X_s} \sin \delta$ e $P = 3 V_a I_a \cos \theta$

- Para P e V_a constantes

$$\text{cte} = E_{af} \sin \delta$$

$$\text{cte} = I_a \cos \theta$$



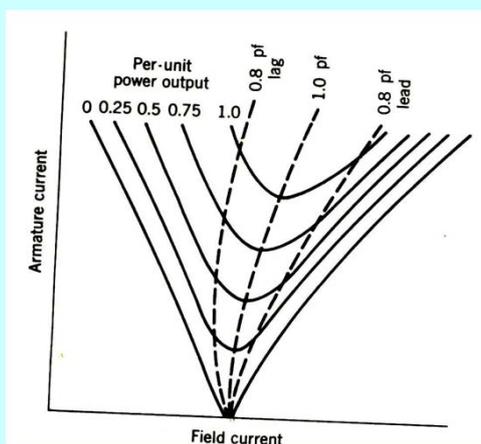
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curva V

- **Motor síncrono**



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exercício 5.16 Fitzgerald

- Qual é a potência reativa máxima por unidade que pode ser fornecida por uma máquina síncrona cuja reatância síncrona é 1,6 pu e cuja corrente máxima de campo está limitada a 2,4 vezes a necessária para que a tensão nominal de terminal seja obtida sob condições de circuito aberto (a vazio) ? Sabe-se que a máquina opera na tensão nominal de terminal.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exercício 5.19 Fitzgerald

Uma máquina síncrona com reatância síncrona de 1,28 pu está operando como um gerador cuja potência ativa de carga é de 0,6 pu e que foi ligado a um sistema por uma reatância em série de 0,07 pu. Observa-se que um aumento em sua corrente de campo causa uma diminuição na corrente de armadura.

- a) Antes do aumento, o gerador estava fornecendo ou absorvendo potência reativa do sistema de potência?
- b) Como resultado desse aumento de excitação, a tensão de terminal do gerador aumentou ou diminuiu?
- c) Repita as partes a) e b) considerando que a máquina síncrona está operando como um motor.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exercício 5.22 Fitzgerald

Um gerador síncrono de quatro pólos, 60 Hz, 24 kV, 650 MVA e uma reatância síncrona de 1,82 pu está operando em um sistema de potência que pode ser representado por um barramento infinito de 24 kV em série com uma reatância de 0,24 pu. O gerador está equipado com um regulador de tensão que mantém a tensão terminal do gerador em 24 kV independentemente da carga do gerador.

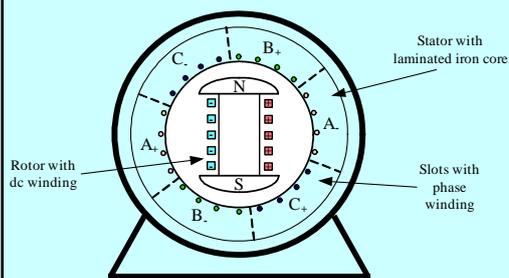
- a) A potência de saída do gerador é ajustada para 375 MW
- I. Desenhe um diagrama fasorial para esta condição
 - II. Encontre o módulo e o ângulo de fase da corrente terminal em relação à tensão de terminal do gerador
 - III. Determine o fator de potência nos terminais do gerador
 - IV. Encontre o módulo da tensão de excitação do gerador

Máquina Síncrona de Pólos Salientes

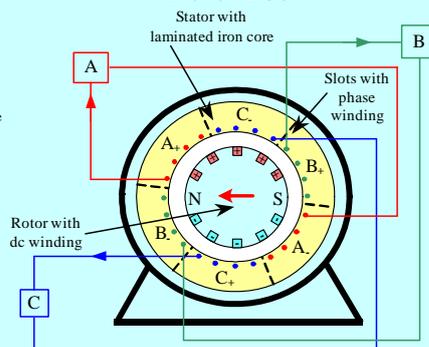
Máquina síncrona

- Estator alimentado com corrente trifásica balanceada (**armadura**)
- Rotor alimentado com corrente contínua (**campo**)

Pólos salientes



Rotor liso

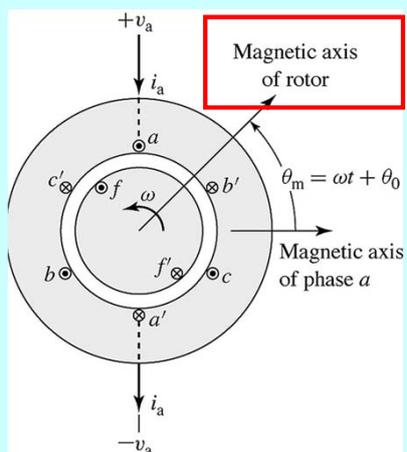


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona rotor liso (corrente no campo)



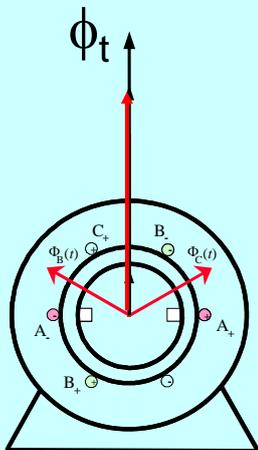
Fluxo produzido por correntes no rotor independe da posição do rotor

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona rotor liso (corrente na armadura)

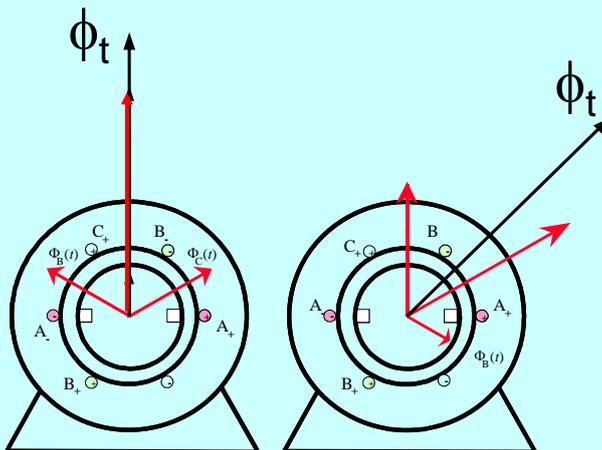


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona rotor liso (corrente na armadura)



Fluxo produzido por correntes no estator independe da posição do rotor

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Equações de balanço de tensão **Estator**

$$v_a = r_a i_a + \frac{d}{dt} \lambda_a$$

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \lambda_{af}$$

Substituindo por $L_a = L_{aa0} + L_{al}$ e $L_{ab} = L_{ac} = -\frac{1}{2} L_{aa0}$

$$\lambda_a = L_S i_a + \lambda_{af}$$

$L_S = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al}$ é **definida** como **indutância síncrona**

Equações de balanço de tensão

Eixo quadratura "q"

$$\hat{E}_{af}$$

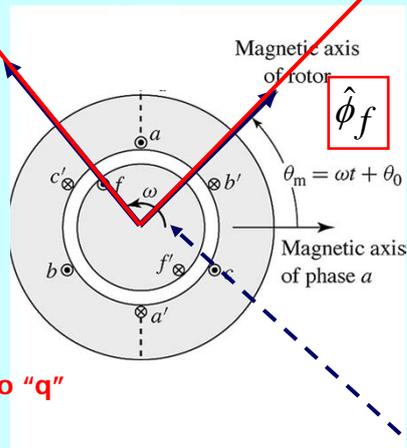
$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}}$$

\hat{E}_{af} adiantado de 90° em relação a ϕ_f

Posição de \hat{E}_{af} define a posição do eixo "q"

Eixo direto "d"

$$\hat{\phi}_f$$



Sentido de rotação

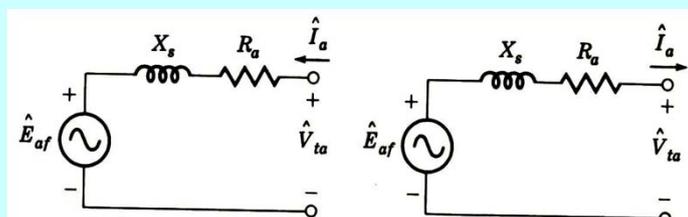
Equação de tensão na fase **a**

- Em representação fasorial

$$\hat{V}_a = r_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{motor}$$

$$\hat{V}_a = -r_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad \text{gerador}$$

- Ângulo de \hat{E}_{af} varia com o carregamento da máquina



Motor

Gerador

DEE-

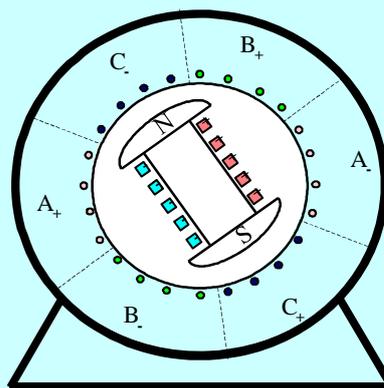
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

Indutância própria do rotor
Independente da sua posição

Indutâncias próprias e mútuas
de enrolamentos do estator
dependem da posição do rotor

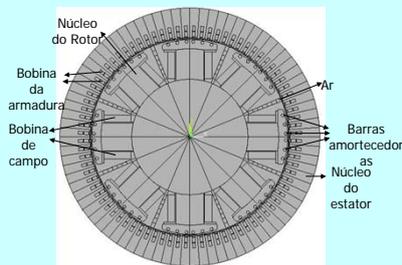


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

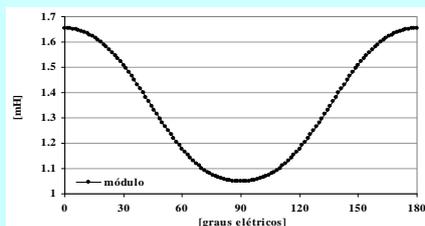
Indutâncias do estator



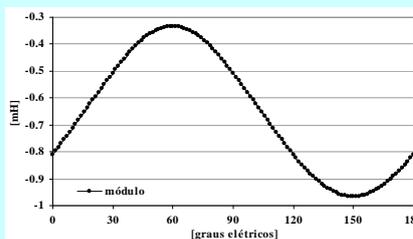
$$\mathcal{L}_{aa}(\theta) = L_{al} + L_{ag} + L_{aa2} \cos(2\theta)$$

$$\mathcal{L}_{ab}(\theta) = -\frac{1}{2} L_{ag} - L_{aa2} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$\mathcal{L}_{aF} = L_{aF} \cos \theta$$



Indutância própria da fase a.



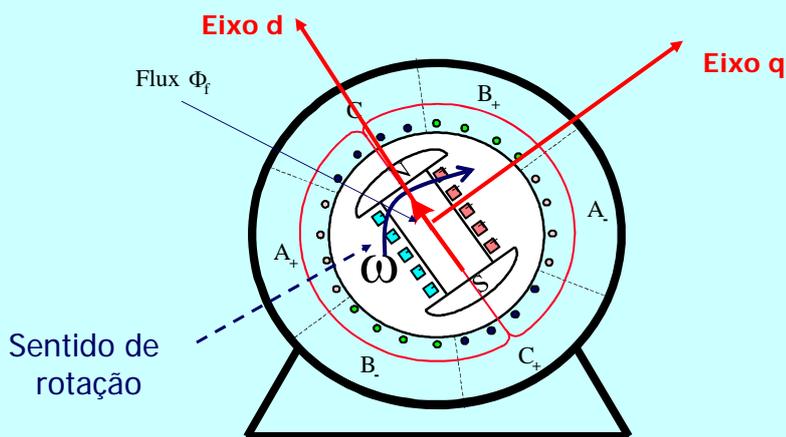
Indutância mútua entre a fase a e a fase b .

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



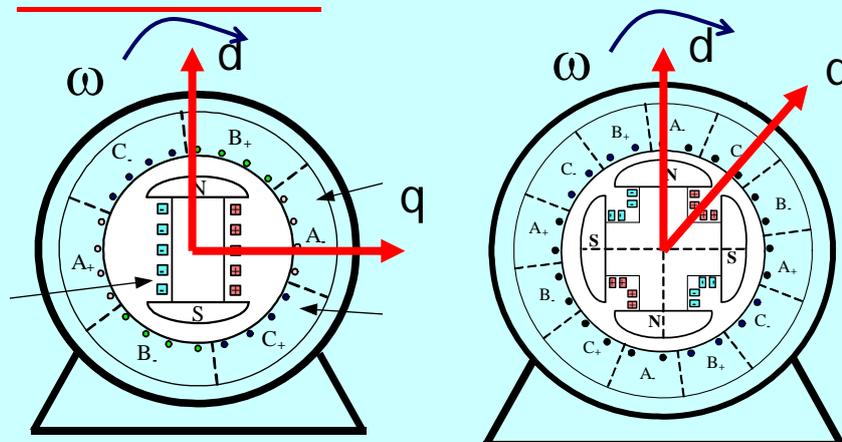
Fluxo produzido por corrente no rotor independe da posição do rotor

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



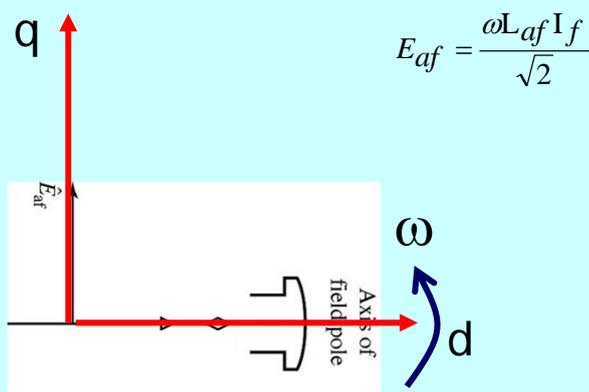
Eixo q adiantado 90° elétricos em relação ao eixo d

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



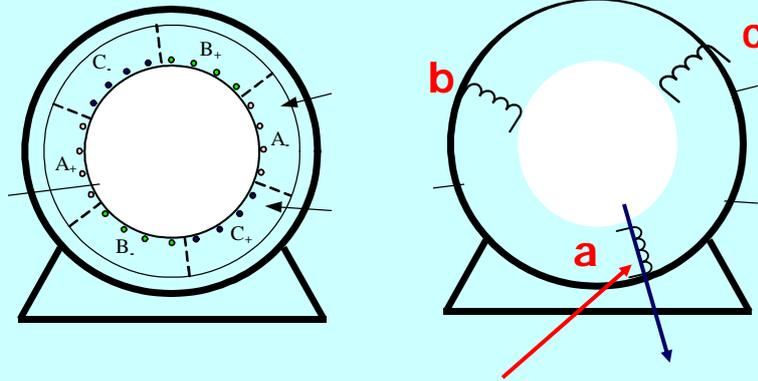
O fasor \hat{E}_{af} está alinhado com o eixo q

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



Eixo magnético da fase a

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

$$i_A(t) = I_M \cos(\omega t)$$

$$i_B(t) = I_M \cos(\omega t - 120^\circ)$$

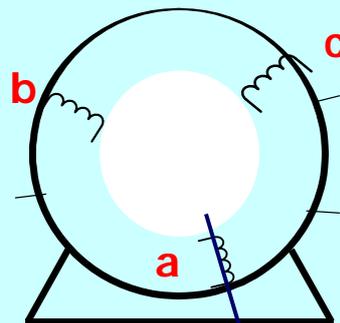
$$i_C(t) = I_M \cos(\omega t + 120^\circ)$$

t=0 s

$$i_A = I_M$$

$$i_B = -\frac{1}{2} I_M$$

$$i_C = -\frac{1}{2} I_M$$



**Só depende da corrente
e do enrolamento**

FMM_{total}

DEE-

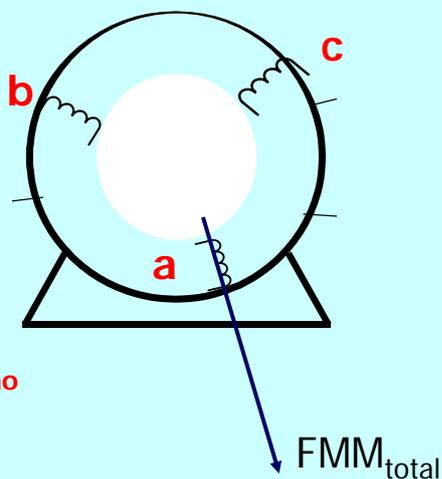
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

FMM_{total} só depende da corrente e do enrolamento

B depende da relutância do caminho magnético

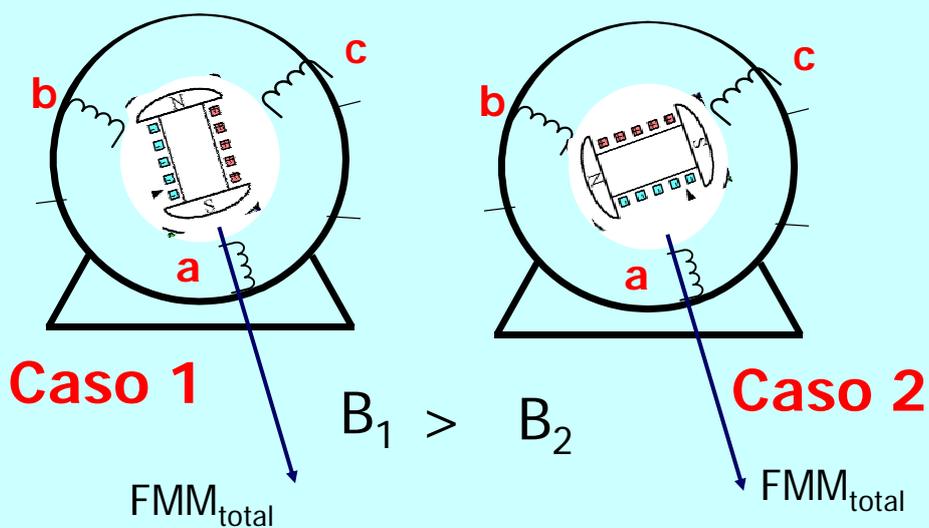


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

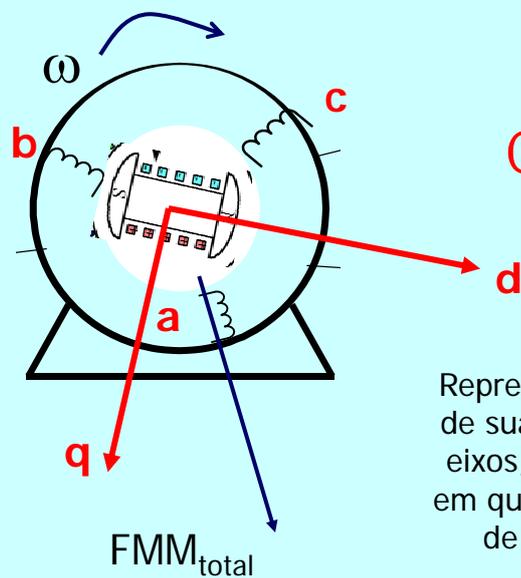


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



Caso geral

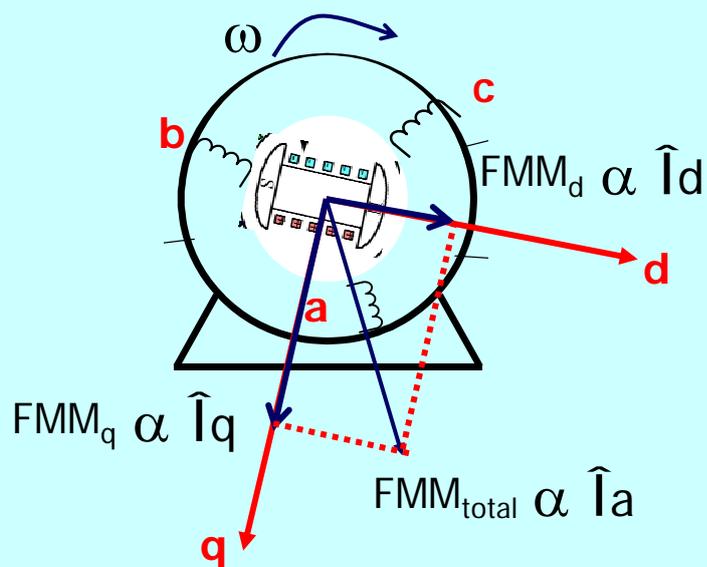
Representa-se o efeito através de suas componentes em dois eixos, eixo direto (d) e eixo em quadratura (q), defasados de 90° elétricos entre si.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes



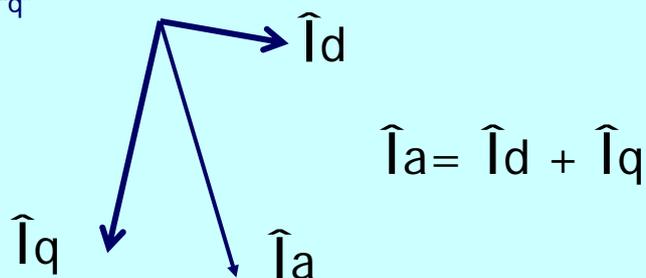
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

- \hat{I}_d – corrente fictícia proporcional à componente da FMM_{total} alinhada com o eixo “d”
- \hat{I}_q – corrente fictícia proporcional à componente da FMM_{total} alinhada com o eixo “q”



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

- x_d – associada aos efeitos indutivos da corrente de armadura no eixo “d” (**reatância síncrona de eixo direto**)
- x_q – associada aos efeitos indutivos da corrente de armadura no eixo “q” (**reatância síncrona de eixo em quadratura**)

Motores síncronos			Geradores para turbina hidráulica		
	Alta velocidade	Baixa velocidade	Condensadores síncronos		Turbogeradores
x_d	0,65 (min)	0,80	0,60	
	0,80 (med)	1,10	1,60	1,00	1,15
	0,90 (max)	1,50	1,25	
x_q	0,50 (min)	0,60	0,40	
	0,65 (med)	0,80	1,00	0,65	1,00
	0,70 (max)	1,10	0,80	

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

Representa-se o efeito através de reatâncias e correntes de eixo direto (x_d, I_d) e de eixo em quadratura (x_q, I_q)

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a \pm r_a \hat{I}_a \pm jX_d \hat{I}_d \pm jX_q \hat{I}_q$$

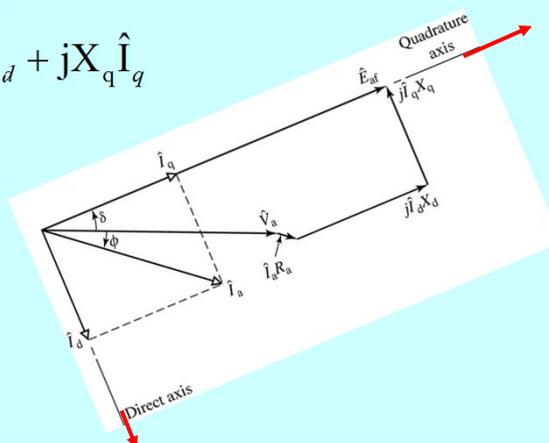
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Gerador síncrono de pólos salientes

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + r_a \hat{I}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$



Para calcular \hat{E}_{af} , preciso de I_d e I_q , que dependem da posição de \hat{E}_{af} (δ).

???

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

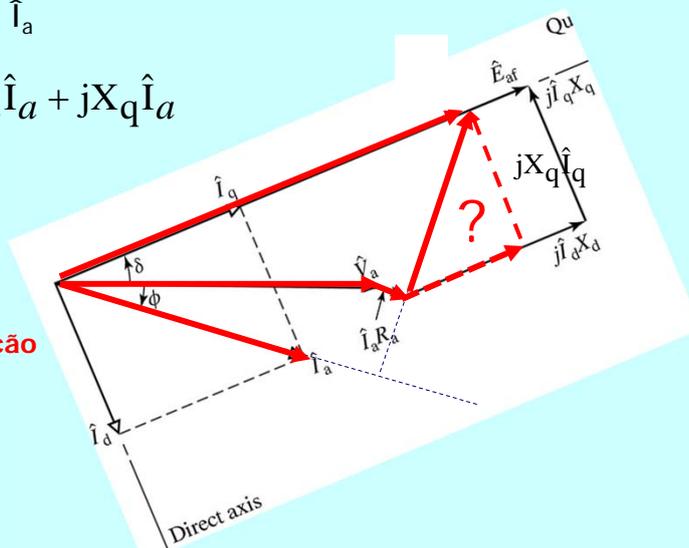
Gerador síncrono de pólos salientes

Conheço V_a e \hat{I}_a

$$\hat{E}_q = \hat{V}_a + r_a \hat{I}_a + jX_q \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_q = E_q \angle \delta$$

\hat{E}_q me dá a posição do eixo q



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

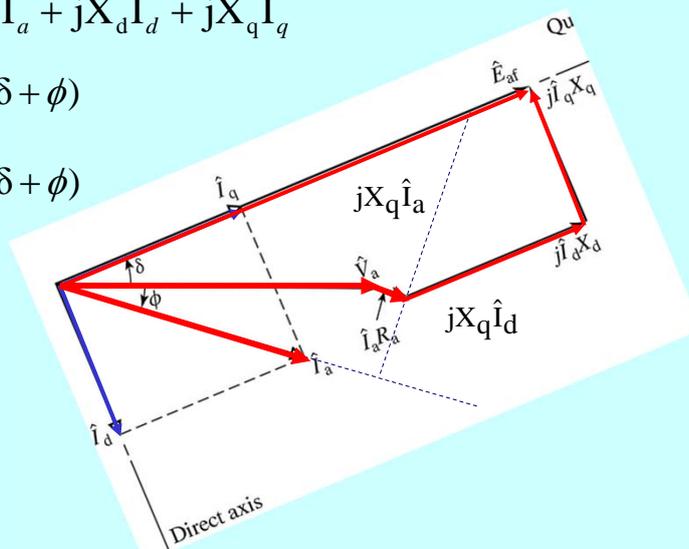
Gerador síncrono de pólos salientes

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + r_a \hat{I}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$\hat{I}_q = I_a \cos(\delta + \phi)$$

$$\hat{I}_d = I_a \sin(\delta + \phi)$$

OU...



DEE-

Máquina Síncrona

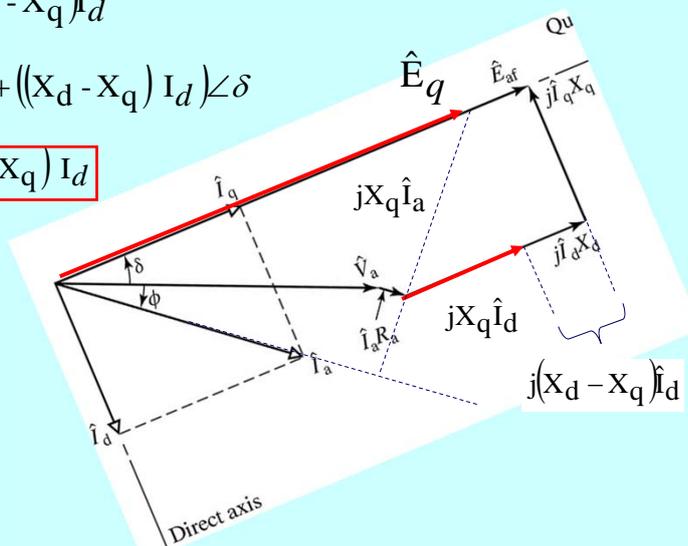
A.C.Ferreira

Gerador síncrono de pólos salientes

$$\hat{E}_{af} = \hat{E}_q + j(X_d - X_q)\hat{I}_d$$

$$E_{af} \angle \delta = E_q \angle \delta + ((X_d - X_q) I_d) \angle \delta$$

$$E_{af} = E_q + (X_d - X_q) I_d$$



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exemplo 5.9 Fitzgerald

As reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de pólos salientes são 1,00 e 0,60 por unidade, respectivamente. A resistência de armadura pode ser considerada desprezível. Calcule a tensão gerada quando o gerador fornece sua potência aparente nominal em kVA, com fator de potência 0,8 indutivo e tensão nominal de terminal.

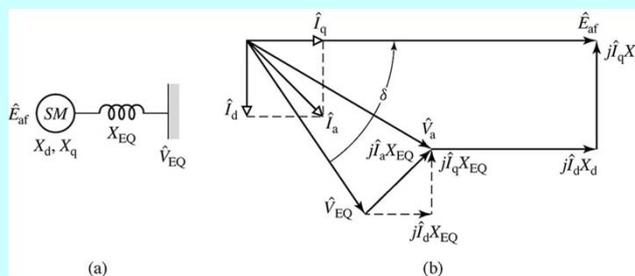
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica conjugado x ângulo de carga

$$R_a = 0$$



Potência monofásica entregue ao barramento EQ

$$P = \Re\left(\hat{V}_{EQ} \hat{I}_a^*\right)$$

GERADOR

DEE-

Máquina Síncrona

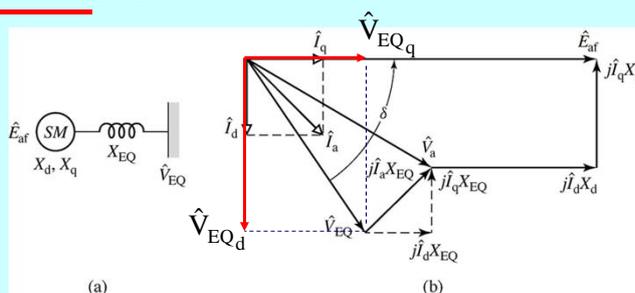
A.C.Ferreira

Característica conjugado x ângulo de carga

$$R_a = 0$$

$$\hat{V}_{EQd} = V_{EQ} \sin \delta$$

$$\hat{V}_{EQq} = V_{EQ} \cos \delta$$



$$P = \Re\left[\left(V_{EQd} + j V_{EQq}\right)\left(I_d + j I_q\right)^*\right]$$

$$P = V_{EQd} I_d + V_{EQq} I_q$$

$$P = V_{EQ} I_d \sin \delta + V_{EQ} I_q \cos \delta$$

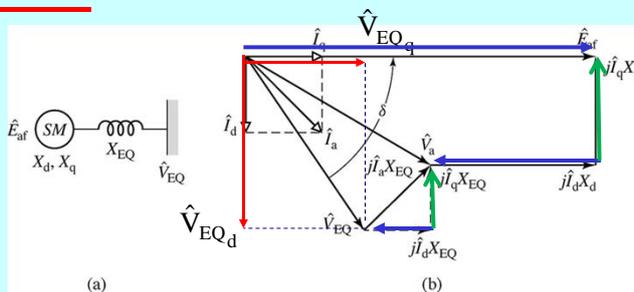
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica conjugado x ângulo de carga

$R_a = 0$



Potência trifásica entregue ao barramento E_e $P = V_{EQ} I_d \sin \delta + V_{EQ} I_q \cos \delta$

$E_{af} - (X_d + X_{EQ}) I_d = V_{EQ} = V_{EQ} \cos \delta \rightarrow I_d = \frac{E_{af} - V_{EQ} \cos \delta}{X_{dt}}$

$(X_q + X_{EQ}) I_q = V_{EQ} \sin \delta \rightarrow I_q = \frac{V_{EQ} \sin \delta}{X_{qt}}$ onde $\begin{cases} X_{dt} = X_d + X_{EQ} \\ X_{qt} = X_q + X_{EQ} \end{cases}$

DEE-

Máquina Síncrona

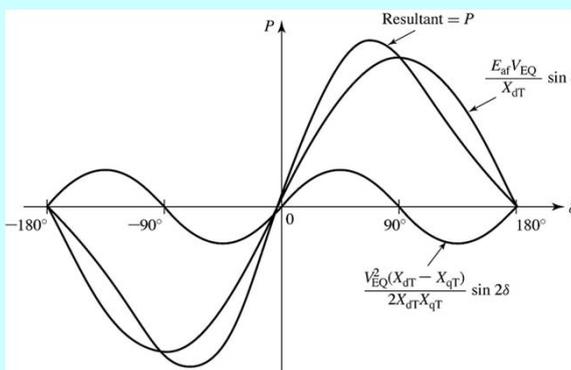
A.C.Ferreira

Característica conjugado x ângulo de carga

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_{dT}} \sin \delta + V_{EQ}^2 \frac{X_{dT} - X_{qT}}{2X_{dT} X_{qT}} \sin 2\delta$$

alinhamento

relutância



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Chapman

Um gerador síncrono, 2300 V 60 Hz 1000 kVA FP 0,8 atrasado 4 polos conectado em Y, possui reatâncias $x_d=1,1 \Omega/\text{fase}$ e $x_q=0,8 \Omega/\text{fase}$. A resistência de armadura pode ser desprezada.

- a) Calcule a tensão de excitação quando a máquina estiver nas condições nominais.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Fitzgerald Exemplo 5.11

Um motor síncrono trifásico, 1500 kW FP=1,0 conectado em Y 2300V, possui $x_d=1,95 \Omega/\text{fase}$ e $x_q=1,40 \Omega/\text{fase}$. Calcule a máxima potência mecânica (kW) que este motor pode desenvolver quando alimentado por um sistema com tensão nominal e com a excitação de campo ajustada no valor que resulta em FP=1,0 com carga nominal.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exerc. 5.33 Fitzgerald

Um gerador síncrono de pólos salientes, com reatâncias síncronas saturadas $x_d = 0,78$ pu e $x_q = 0,63$ pu, conectado a um barramento infinito, de tensão igual à sua tensão nominal, por meio de uma impedância externa $x_{bar} = 0,9$ pu .

- a) Supondo que o gerador esteja fornecendo apenas potência reativa,
 - i. encontre as excitações de campo mínima e máxima, por unidade (onde 1 pu é a corrente de campo requerida para obter a tensão nominal a vazio), tais que o gerador não exceda a sua corrente nominal de terminal.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Exerc 5.30 Fitzgerald

Qual a percentagem máxima da potência de saída nominal que um motor de polos salientes irá entregar, sem perda de sincronismo, quando estiver operando com tensão nominal de terminal e excitação de campo nula ($E_{af} = 0$) se $X_d = 0,90$ pu e $X_q = 0,65$ pu? Calcule, por unidade, a corrente de armadura e a potência reativa nestas condições.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

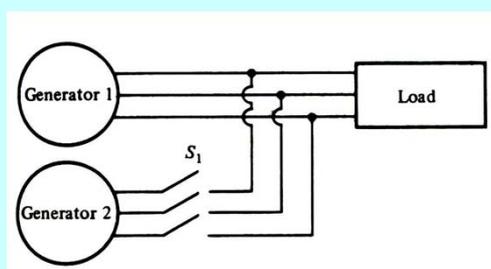
Operação em paralelo de geradores síncronos

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Operação em paralelo de geradores síncronos



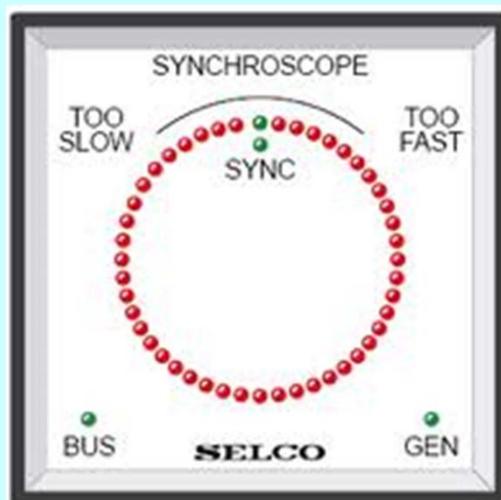
- Mesma tensão eficaz
- Mesma seqüência de fase
- Fases "a" em fase
- Gerador que será conectado deverá ter freqüência ligeiramente superior à do sistema ao qual será conectado

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Sincronoscópio



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

SYNCHROTECT® 5

- Sistemas e equipamentos de sincronização e paralelismo para redes e máquinas síncronas



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

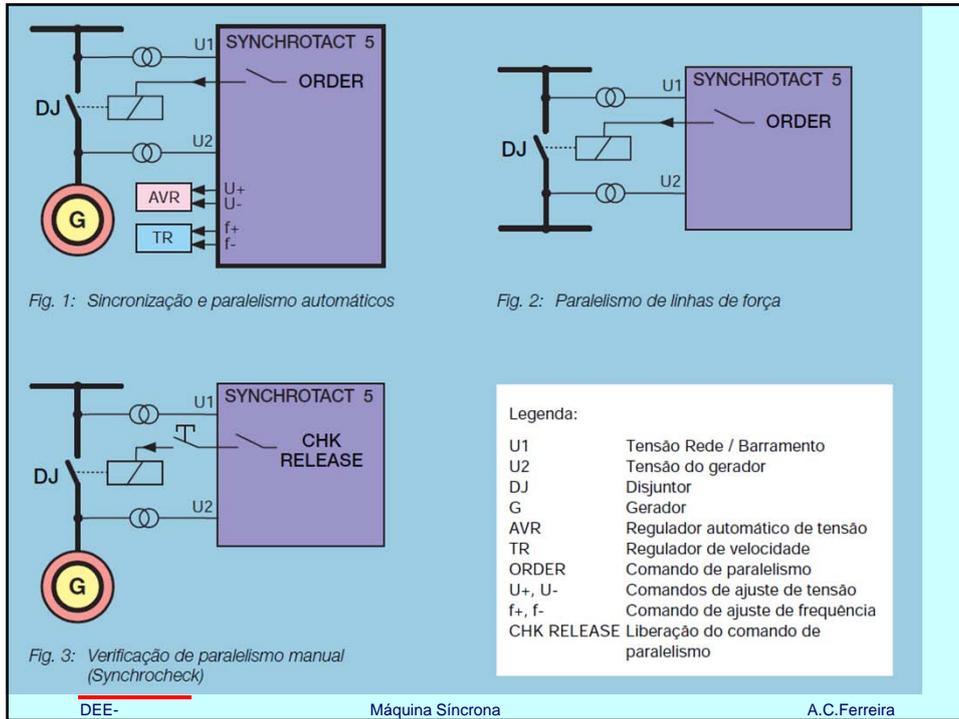


Fig. 12: Ajuste de parâmetros usando o SynView

No.	Parameter name	Abbrev	Value	Unit
1 Actual value calibration				
1.1	Nominal voltage	Un	110	VAC
1.2	Nominal frequency	fn	50	Hz
1.3	Voltage tuning	dUOffset	0.0	%
1.4	Angle tuning	dOffset	0	DEG
2 Command generation				
3 Paralleling conditions				
3.1	Slip limit, over-synchronous	-msl	0.40	%
3.2	Slip limit, sub-synchronous	+msl	0.40	%
3.3	Angle limit, negative	-alpha_max	10	DEG
3.4	Angle limit, positive	+alpha_max	10	DEG
3.5	Max. voltage difference, overexcited	-delta_U_max	5	%
3.6	Max. voltage difference, underexcited	+delta_U_max	5	%
3.7	Maximum voltage	Umox	120	%
3.8	Minimum voltage	Umin	80	%
4 Dead bus conditions				
5 Voltage matcher				
6 Frequency matcher				
7 General parameters				
7.1	Blocking time after selection	t_block	2	s
7.2	Total paralleling time	t_tot	5.0	ms

Fig. 13: Janela de medição do SynView

Voltage [%] Synchroscope (dU/f) Diagram Frequency [Hz]

Voltage Difference [%] Phase Difference Angle [DEG] Slip [%]

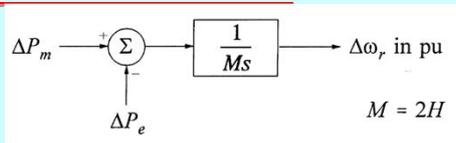
-0.1 -64 0.14

Fig. 14: Janela do registrador de transitórios do SynView

Fig. 15: Registrador de eventos/falhas do SynView

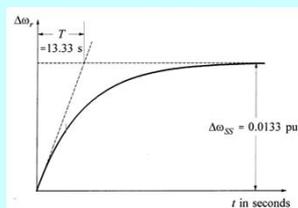
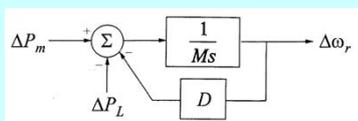
Date / Time	Relative Time	Code	Text
30-03-2000 11:28:43.23	00:00:00.00	3	SYNCHROTACT selected
30-03-2000 11:28:45.31	00:00:02.14	23	Adjusting command U+
30-03-2000 11:28:45.46	00:00:02.23	21	Adjusting command U-
30-03-2000 11:28:46.29	00:00:03.07	25	Release contact classes
30-03-2000 11:28:46.21	00:00:02.99	28	Release contact opens
30-03-2000 11:28:46.12	00:00:02.90	25	Release contact closes
30-03-2000 11:28:46.05	00:00:02.82	27	Paralleling command contact closes
30-03-2000 11:28:46.04	00:00:02.81	29	Release contact opens
30-03-2000 11:28:45.94	00:00:02.71	28	Paralleling command contact opens
30-03-2000 11:28:45.95	00:00:02.72	4	SYNCHROTACT stopped
30-03-2000 11:32:48.33	00:03:03.10	5	Device ready
30-03-2000 11:32:48.63	00:03:03.40	6	Device not ready
30-03-2000 11:32:47.43	00:03:02.20	11	Changed data
30-03-2000 11:32:52.95	00:03:07.72	5	Device ready
30-03-2000 11:33:05.93	00:03:20.70	6	Device not ready
30-03-2000 11:33:06.93	00:03:21.70	11	Changed data
30-03-2000 13:04:00.01	00:00:00.00	1	Auxiliary voltage on
30-03-2000 13:04:02.91	00:00:02.90	5	Device ready
30-03-2000 13:04:02.92	00:00:02.91	181	Select parameter set 1
30-03-2000 13:07:25.34	00:03:25.34	4	SYNCHROTACT stopped
30-03-2000 13:07:26.35	00:03:26.35	3	SYNCHROTACT selected
30-03-2000 13:07:26.48	00:03:26.48	23	Adjusting command U+
30-03-2000 13:07:26.57	00:03:26.57	21	Adjusting command U-
30-03-2000 13:07:51.26	00:03:24.95	25	Release contact classes
30-03-2000 13:07:51.05	00:03:24.74	28	Release contact opens
30-03-2000 13:08:01.50	00:03:35.15	25	Release contact closes
30-03-2000 13:08:01.89	00:03:35.54	27	Paralleling command contact closes
30-03-2000 13:08:02.17	00:03:35.82	26	Release contact opens
30-03-2000 13:08:02.99	00:03:36.64	28	Paralleling command contact opens
30-03-2000 13:08:06.31	00:03:40.00	4	SYNCHROTACT stopped
30-03-2000 13:08:06.96	00:03:40.65	5	Device ready

Gerador sem regulador de velocidade



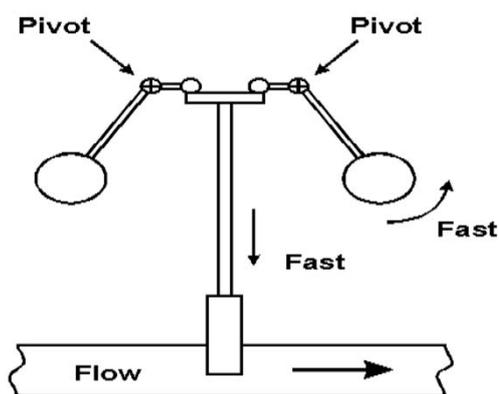
- Dependência da carga com frequência

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r$$



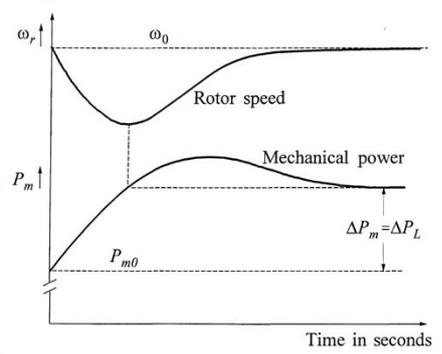
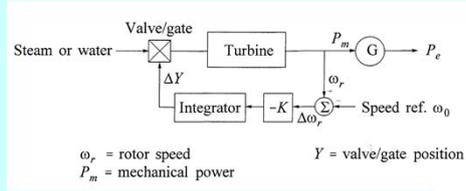
- Variação de velocidade depende da inércia da máquina e do amortecimento da carga

Regulador de velocidade (princípio)



(a)
Simplified Mechanical Governor

Regulador isócrono



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Regulador com queda de velocidade

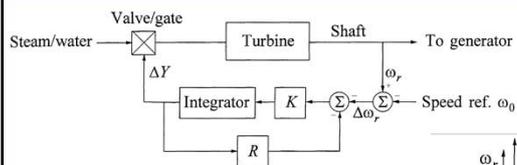


Figure 11.8 Governor with steady-state feedback

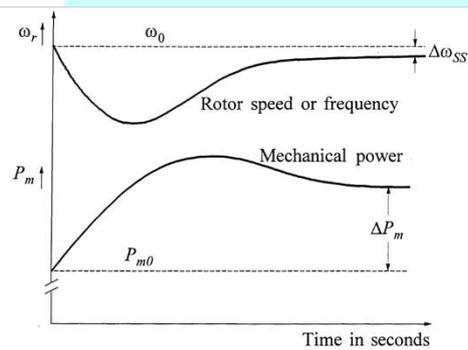


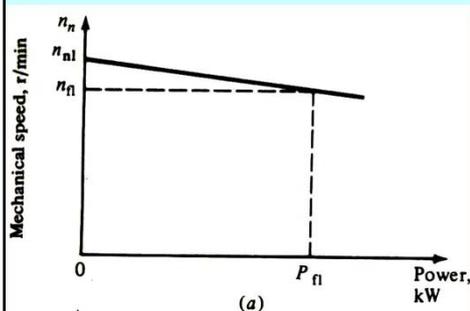
Figure 11.12 Response of a generating unit with a governor having speed-droop characteristic

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Regulador com queda de velocidade



- Característica do acionador primário: ligeira queda de velocidade com o aumento da carga (Speed Droop)

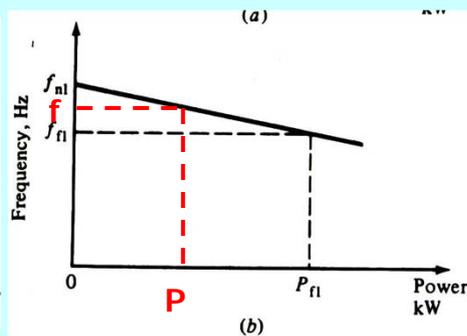
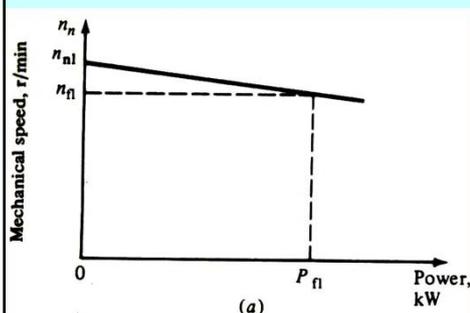
$$SD = \frac{n_{\text{vazio}} - n_{\text{plena carga}}}{n_{\text{plena carga}}} \times 100\%$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Regulador com queda de velocidade



- Característica do acionador primário: ligeira queda de velocidade com o aumento da carga (Speed Droop)

$$SD = \frac{n_{\text{vazio}} - n_{\text{plena carga}}}{n_{\text{plena carga}}} \times 100\%$$

$$sP = \frac{MW}{Hz}$$

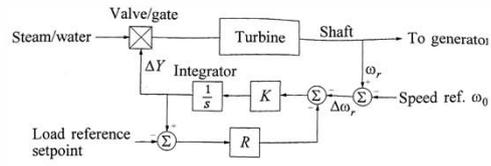
$$P = sP(f_{n1} - f)$$

DEE-

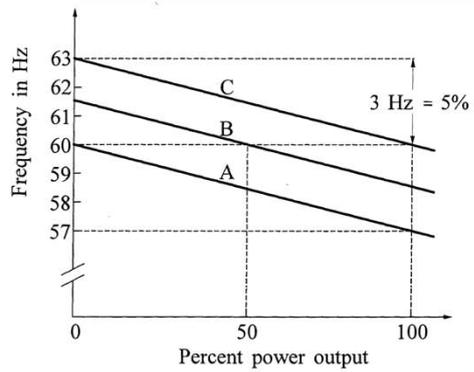
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Regulador com queda de velocidade



(a) Schematic diagram of governor and turbine

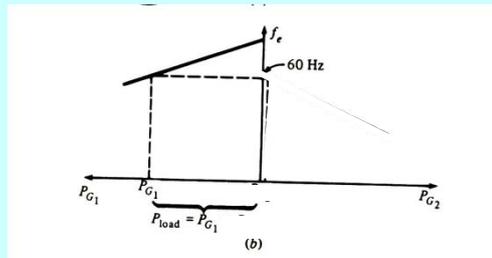


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Operação em paralelo de geradores síncronos

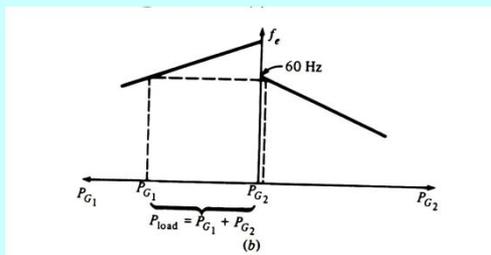


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Operação em paralelo de geradores síncronos



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Operação em paralelo de geradores síncronos

Dois geradores, conectados em paralelo, alimentam uma carga. O gerador 1 possui frequência a vazio de 61,5 Hz com inclinação de 1MW/Hz. O gerador 2 possui frequência a vazio de 61 Hz e inclinação de 1MW/Hz. Os dois geradores estão alimentando uma carga de 2,5 MW.

- Qual a frequência de operação do sistema e qual a parcela da carga é suprida por cada gerador ?
- Uma carga adicional de 1MW é conectada ao sistema. Qual a frequência de operação do sistema e qual a parcela da carga é suprida por cada gerador ?
- Com o sistema conforme o item b), qual a frequência de operação do sistema e qual a parcela da carga é suprida por cada gerador, se a frequência a vazio do gerador 2 for aumentada de 1 Hz ?

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Cálculo de parâmetros de máquinas síncronas

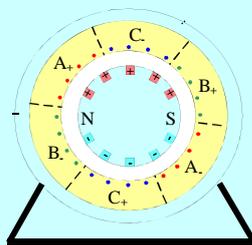
- Rotor liso
- Polos salientes

DEE-

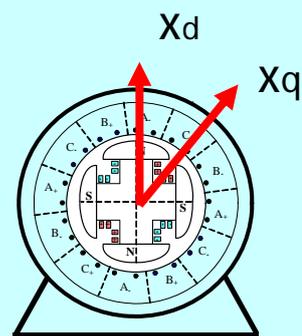
Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Regime permanente - balanceado



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$



$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a \pm r_a \hat{I}_a \pm jX_d \hat{I}_d \pm jX_q \hat{I}_q$$

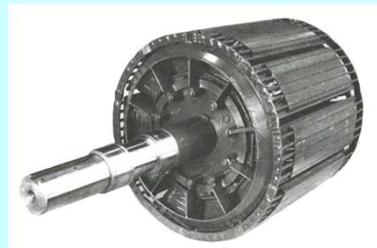
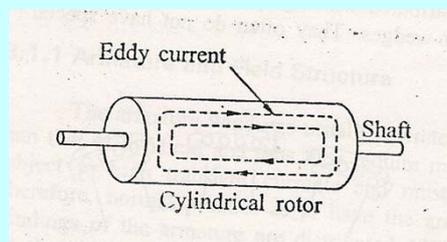
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Desbalanceado – seq. negativa e zero

- Correntes induzidas nos circuitos do rotor (campo, amortecedor, ferro)



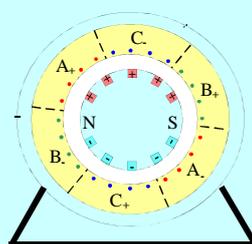
- Z_2 e Z_0

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Rotor liso

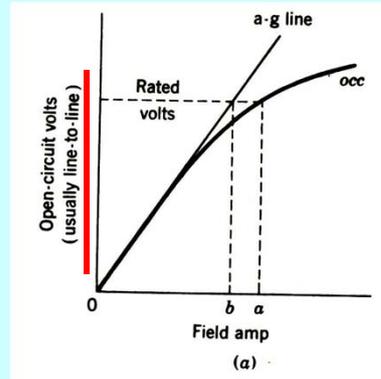
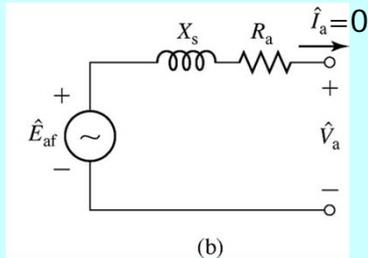


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Característica de circuito aberto (occ)

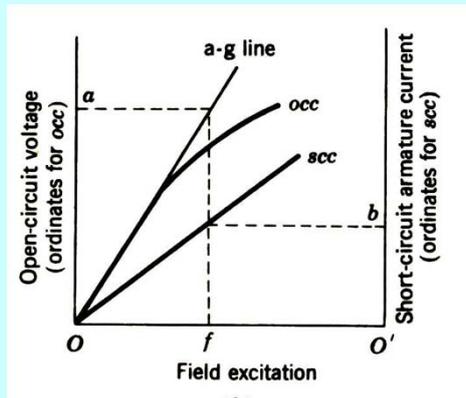
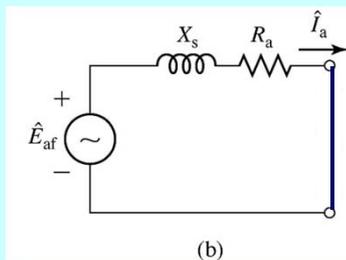


$$\omega_m = cte = \omega_{sinc}$$

$$E_{af} = \frac{\omega I_f L_{af}}{\sqrt{2}}$$

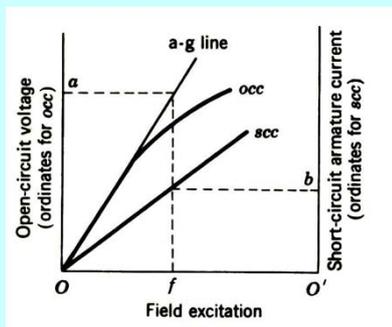
Meço V_t que é numericamente igual a E_{af}

Característica de curto-circuito



$$\omega_m = cte = \omega_{sinc}$$

Reatância Síncrona



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = (\cancel{r_a} + jX_s) \hat{I}_a$$

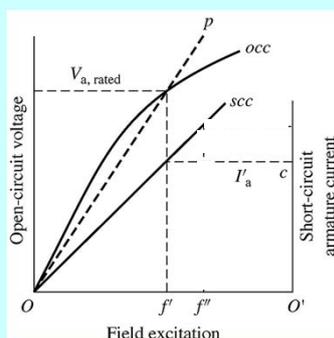
Reatância síncrona não-saturada: relação entre tensão obtida da linha de entreferro e a corrente de armadura obtida de "scc" para um mesmo valor de corrente de campo.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Reatância Síncrona



$$\hat{E}_{af} = (r_a + jX_s) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = (\cancel{r_a} + jX_s) \hat{I}_a$$

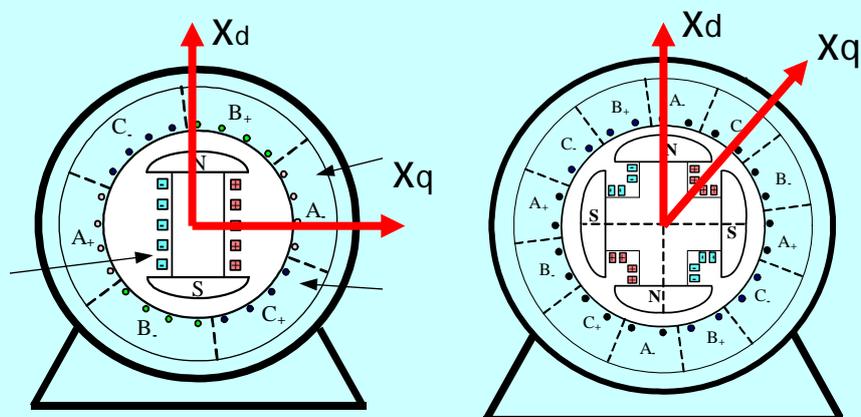
Reatância síncrona saturada: relação entre a tensão nominal e a corrente de armadura obtida de "scc" para um mesmo valor de corrente de campo.

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona de pólos salientes

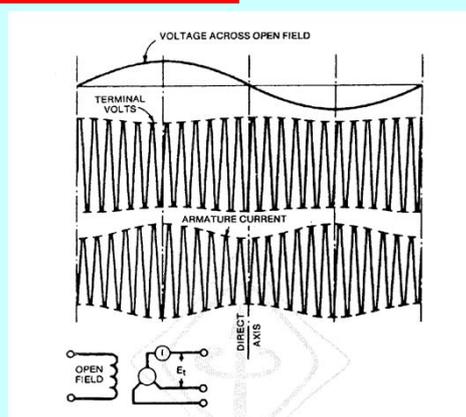


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Polos Salientes (Teste com escorregamento)



$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\max}}$$

$$X_{ds} = \frac{E_{\max}}{I_{\min}}$$

- Enrolamento de campo aberto
- Máquina girando com velocidade ligeiramente diferente da síncrona

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Polos Salientes



$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\max}}$$

$$X_{ds} = \frac{E_{\max}}{I_{\min}}$$

- Enrolamento de campo aberto
- Máquina girando com velocidade síncrona

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

- Impedância de seqüência negativa

Pode ser usado $x_2 = \frac{x'_d + x'_q}{2}$

- Em laboratório: aplicar alimentação de seqüência negativa com o enrolamento de campo curto-circuitado (velocidade síncrona)

$$Z_2 = \frac{E}{I} \quad \text{negative-sequence impedance, p.u.}$$

$$R_2 = \frac{P}{I^2} \quad \text{negative-sequence resistance, p.u.}$$

$$X_2 = \sqrt{(Z_2)^2 - (R_2)^2} \quad \text{negative-sequence reactance, p.u.}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

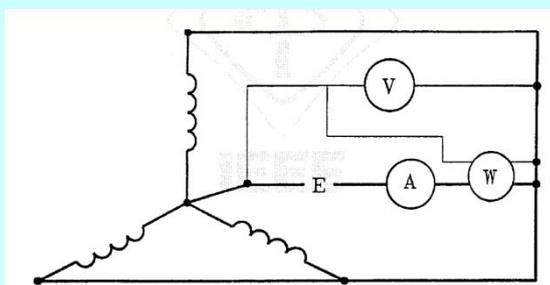
Sequência zero

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Sequência zero



$$Z_0 = \frac{3E}{I} \text{ p.u.}$$

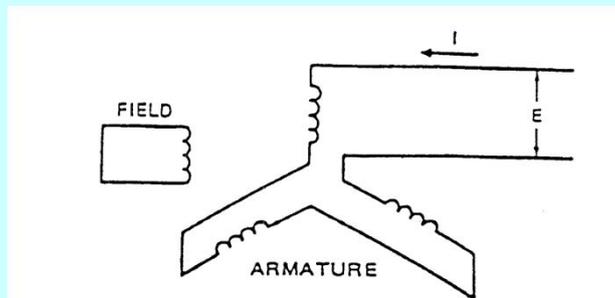
$$X_0 = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{P}{EI}\right)^2} \text{ p.u.}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Sequência zero



$$Z_0 = \frac{E}{3I} \text{ p.u.}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

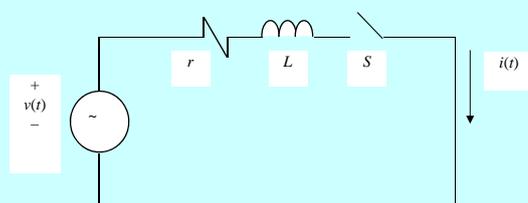
- Até agora – Regime permanente
- Transitório

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curto em um circuito RL



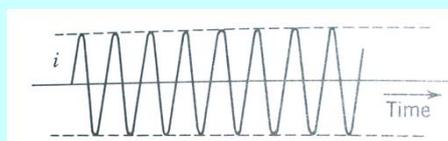
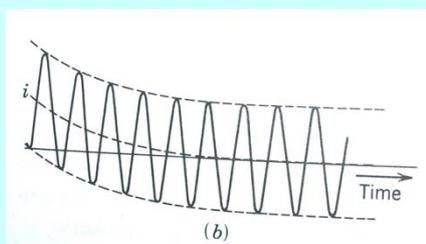
$$v(t) = V_{m\acute{a}ximo} \times \text{sen}(\omega \times t + \alpha)$$

- Em $t=0$ a chave S fecha.
- O ângulo α determina o valor da tensão no instante de fechamento .

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira



$$v(t) = r \times i(t) + L \times di(t)/dt$$

$$i(t) = \frac{V_{m\acute{a}ximo}}{|Z|} \times \left\{ \text{sen}(\omega \times t + \alpha - \theta) - e^{-(r/L)t} \times \text{sen}(\alpha - \theta) \right\}$$

$$|Z| = \sqrt{r^2 + (\omega \times L)^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega \times L}{r}\right)$$

$$\tau = \frac{L}{r}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

- Máquina síncrona com parâmetros constantes
- Sem considerar os enrolamentos de campo e amortecedor

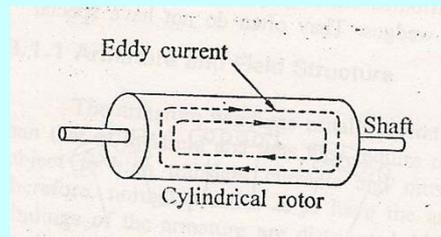
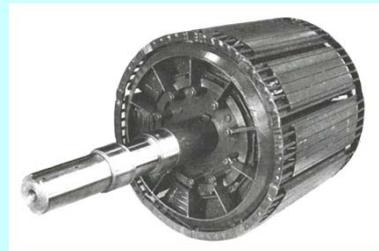
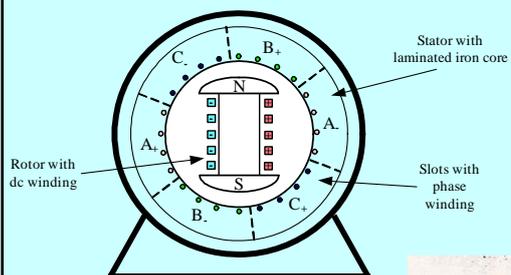
DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Máquina síncrona real

Pólos salientes

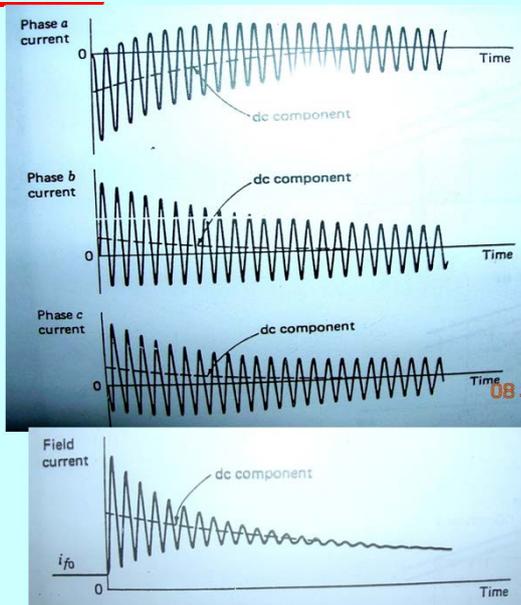


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Curto trifásico em máquina síncrona (sem carga)

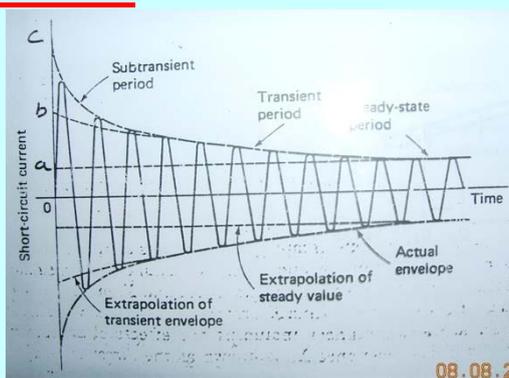


DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Corrente de falta simétrica



$$i(t) = \sqrt{2} \times E_{af0} \times \left[\left(\frac{1}{x_d} \right) + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \times e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \times e^{-t/T''_d} \right] \times \cos(\omega \times t + \theta_0)$$

$$x''_d = \frac{E_{af0}^{(eficaz)}}{OC/\sqrt{2}}$$

$$x'_d = \frac{E_{af0}^{(eficaz)}}{OB/\sqrt{2}}$$

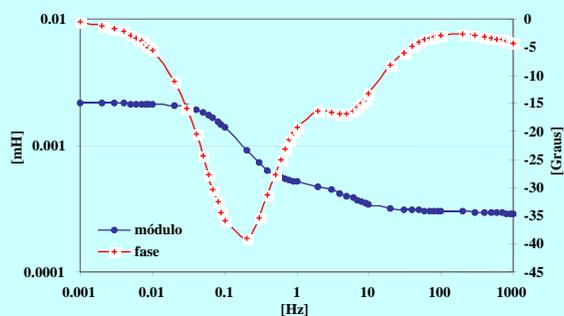
$$x_d = \frac{E_{af0}^{(eficaz)}}{OA/\sqrt{2}}$$

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Ensaio de resposta em freqüência (SSFR)



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Reatâncias operacionais

Para esta máquina, as constantes de tempo estão em segundos,

Constante de máquina	Geradores de rotor cilíndrico			Motores de polos salientes (baixa velocidade)		Condensadores síncro
	Rotor sólido	Rotor laminado	Geradores de polos salientes			
x_d	1.10	1.10	1.00	1.10	1.60	
x'_d	0.20	0.20	0.35	0.50	0.60	
x''_d	0.10	0.10	0.23	0.35	0.25	
x_q	1.00	1.00	0.65	0.80	1.00	
x'_q	0.20	1.00	0.65	0.80	1.00	
x''_q	0.15	0.25	0.65	0.40	0.30	
T'_d	1.0	1.0	1.8	1.4	2.0	
T''_d	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	
T_a	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	

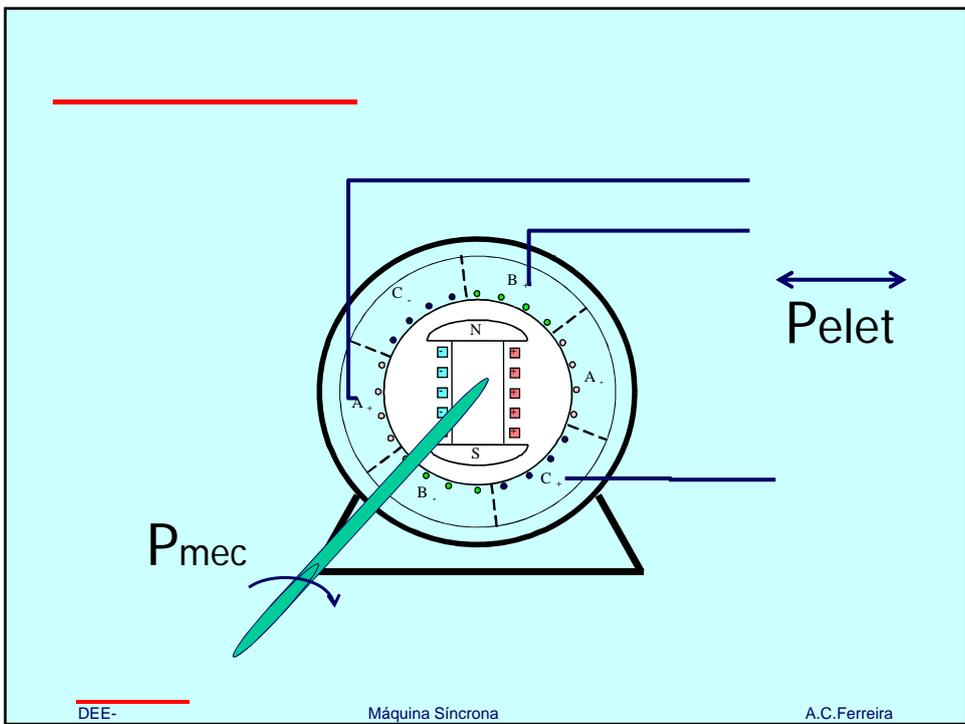
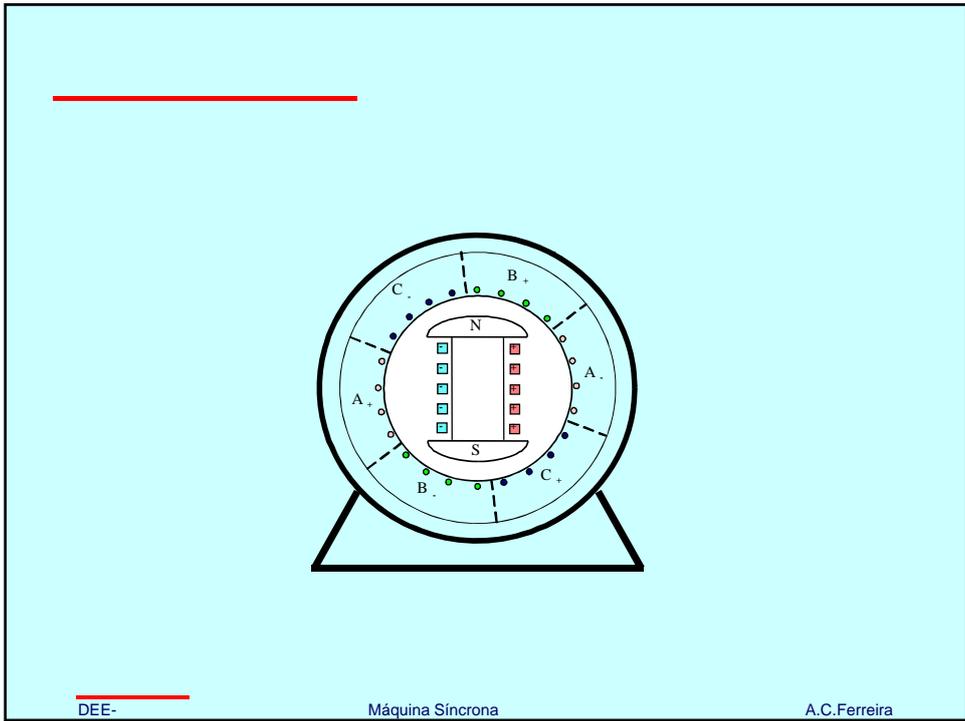
10-4

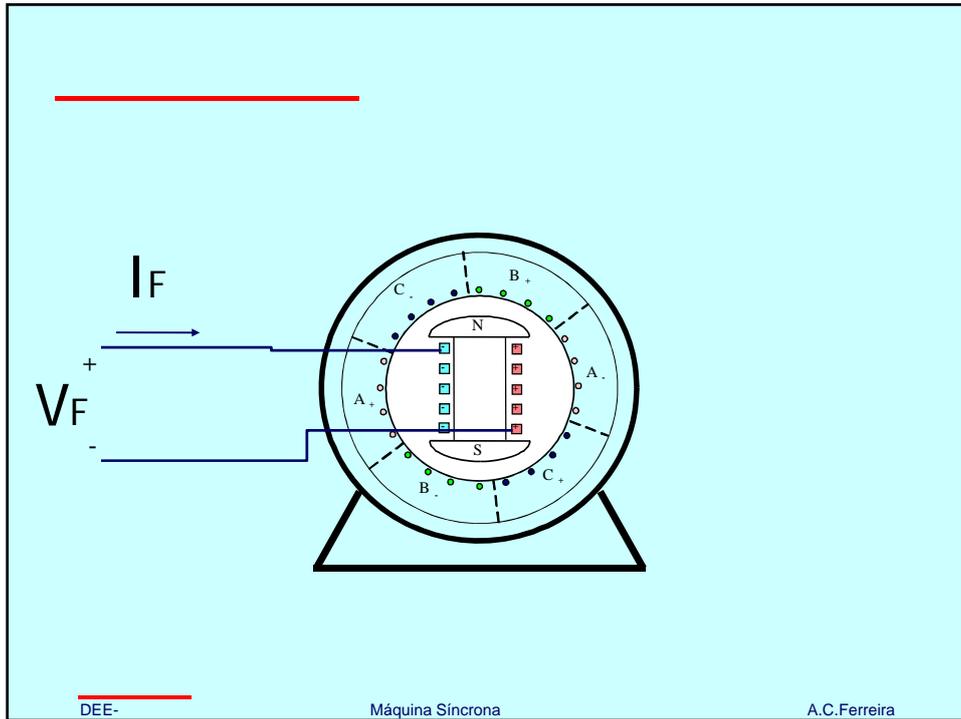
CIRCUITO EQUIVALENTE DA

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira





DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

Sistema de excitação

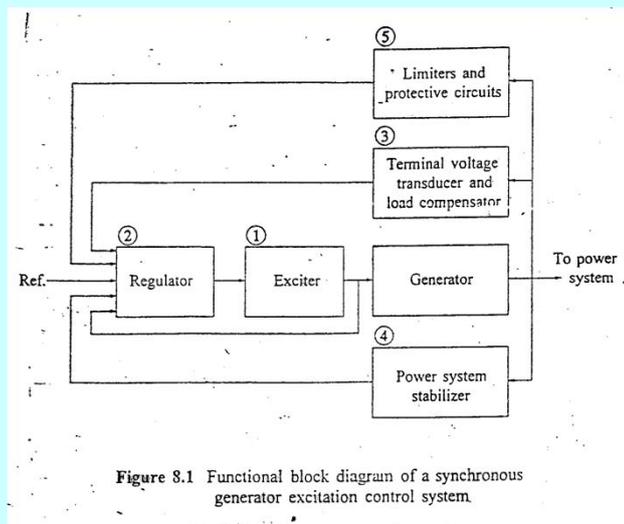
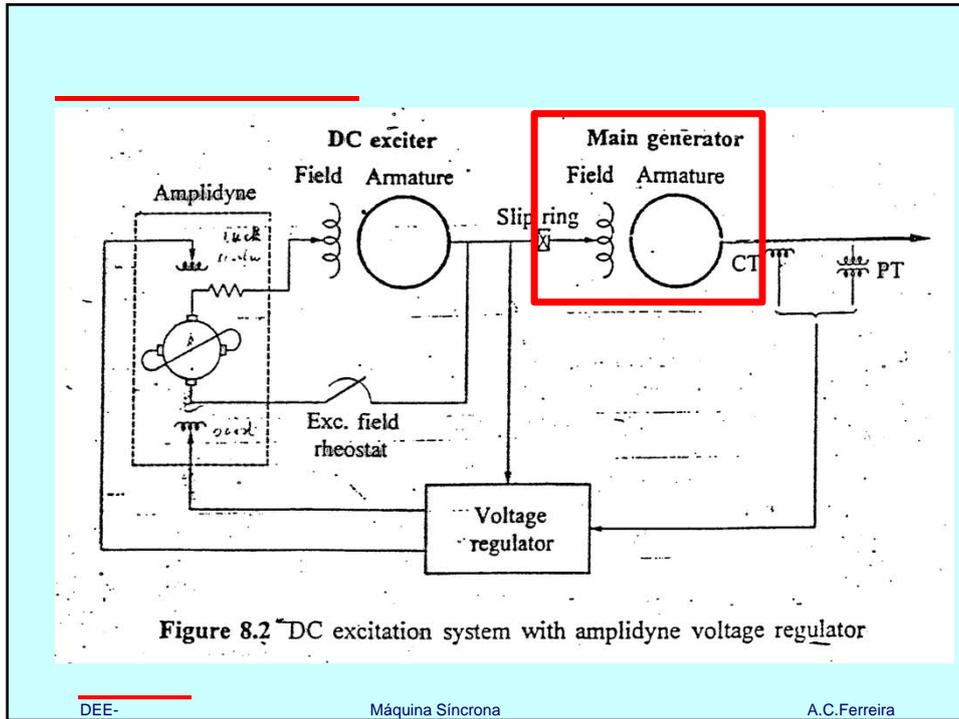


Figure 8.1 Functional block diagram of a synchronous generator excitation control system.

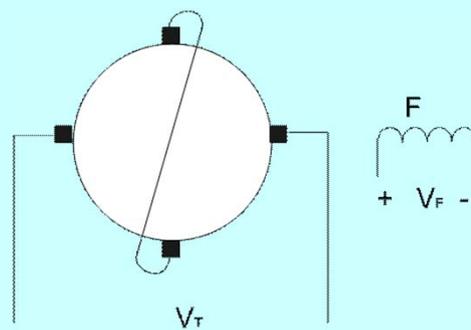
DEE-

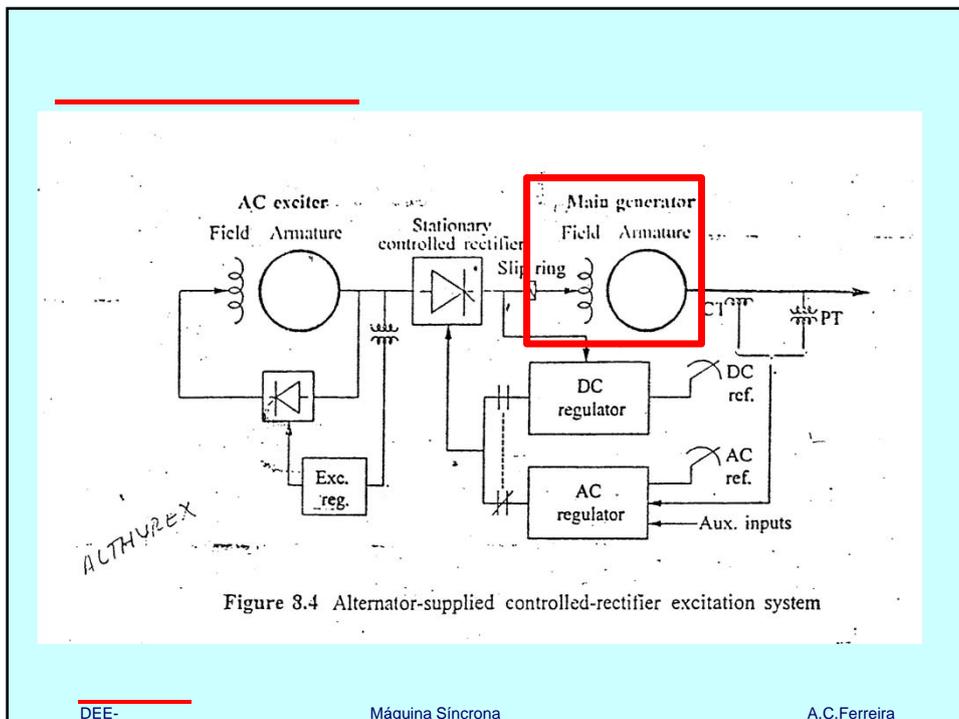
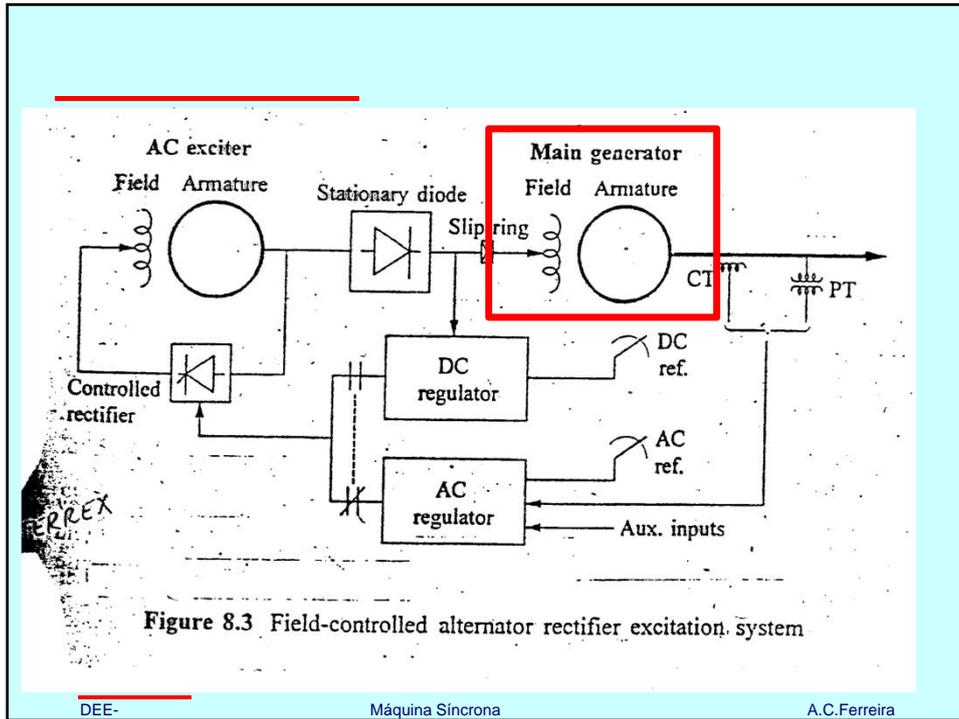
Máquina Síncrona

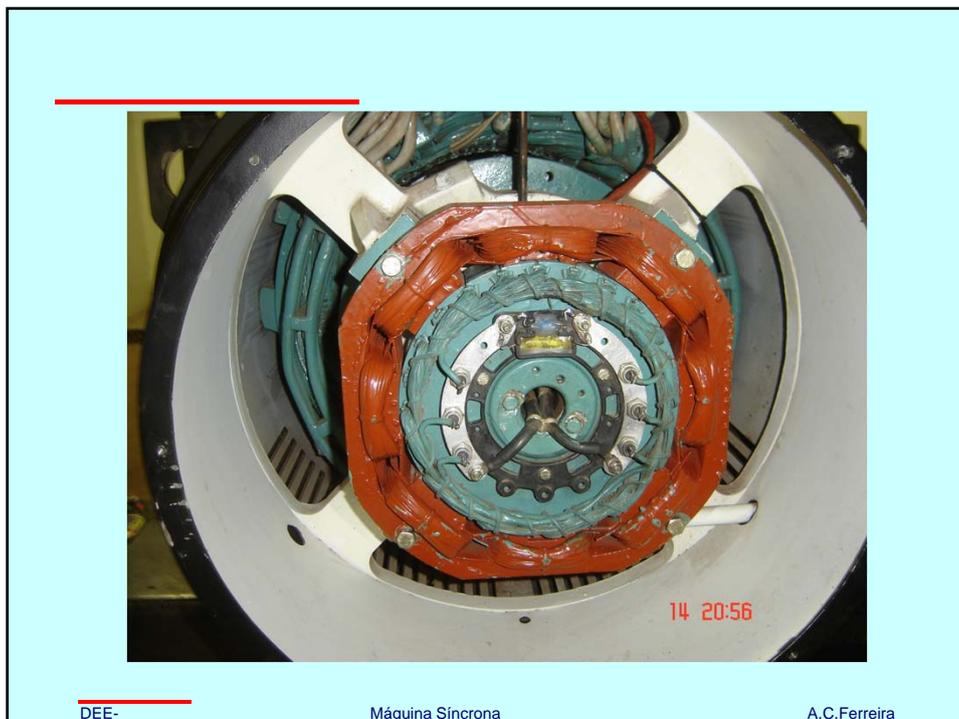
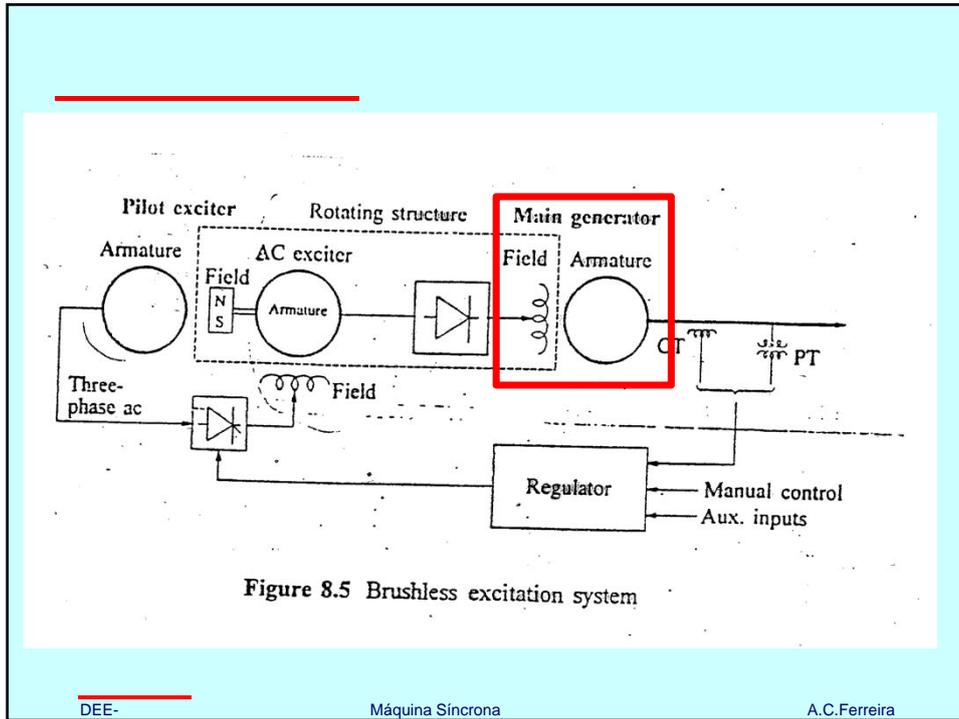
A.C.Ferreira



Amplidínamo







Sistema de excitação

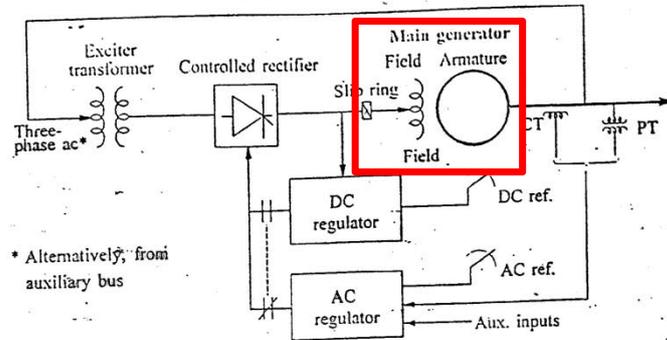


Figure 8.6 Potential-source controlled-rectifier excitation system

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira

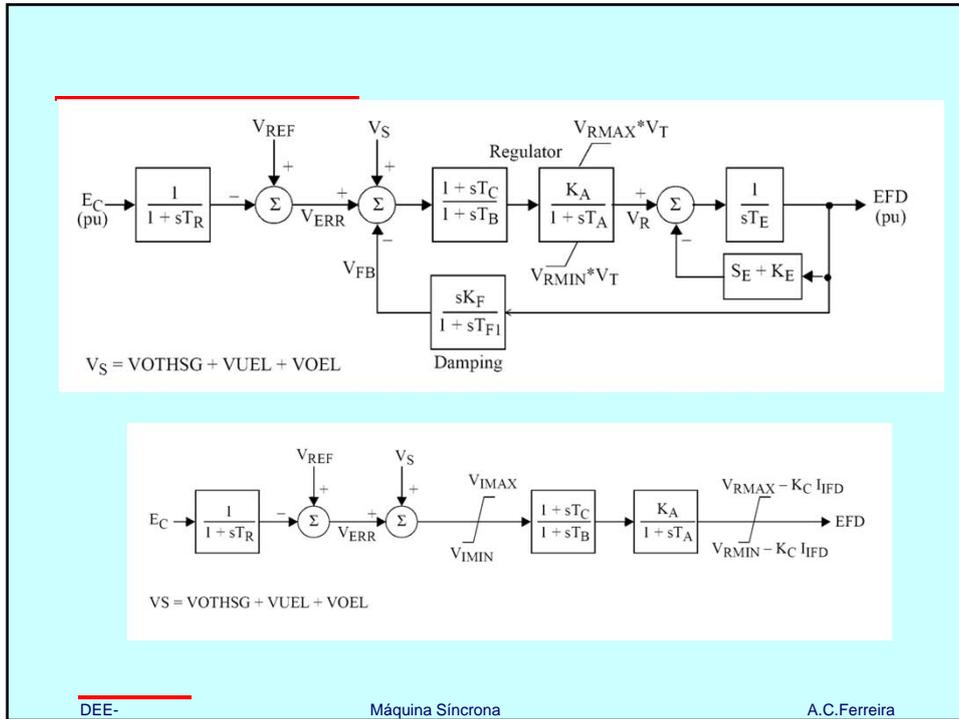
Tabela 5.1 – Resumo das Características dos Sistemas de Excitação

	Tipo de Sistema de Excitação		Excitatriz Rotativa	Componentes que Necessitam de Manutenção	Resposta do Sistema	Adequabilidade para Cargas Súbitas
Auto-Excitação	Excitatriz Estática	Direta Simples 1	-	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa
		Direta Composta 2	-	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa
	Excitatriz Rotativa	Indireta Simples	CC	Anéis Coletores e Comutadores	Regular	Regular
			CA	-	Boa	Boa
		Indireta Composta	CC	Anéis Coletores e Comutadores	Regular	Regular
			CA	-	Boa	Boa
Excitação Independente	Rotativa	Direta	CA	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa
		Indireta	CA	-	Boa	Boa

DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira



DEE-

Máquina Síncrona

A.C.Ferreira