

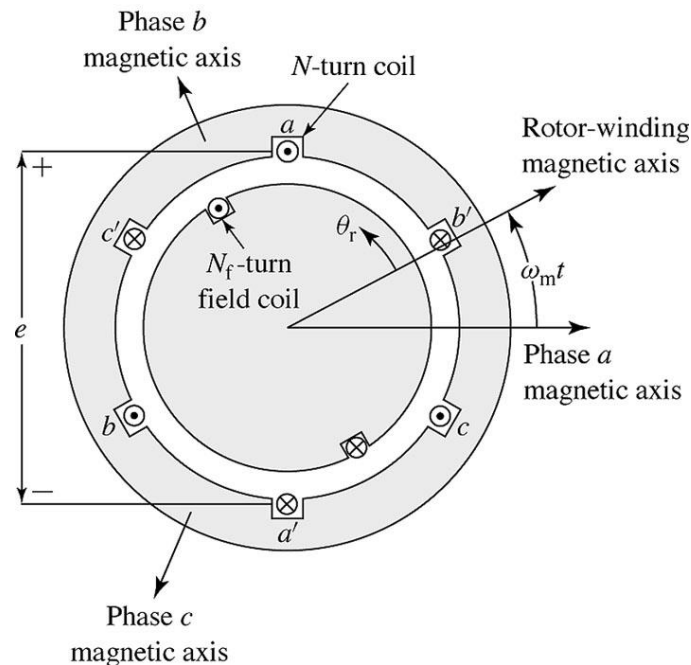
SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA DE ENERGIA

Aula 18

- Introdução à máquina de indução trifásica (MIT)
- Introdução à máquina síncrona trifásica

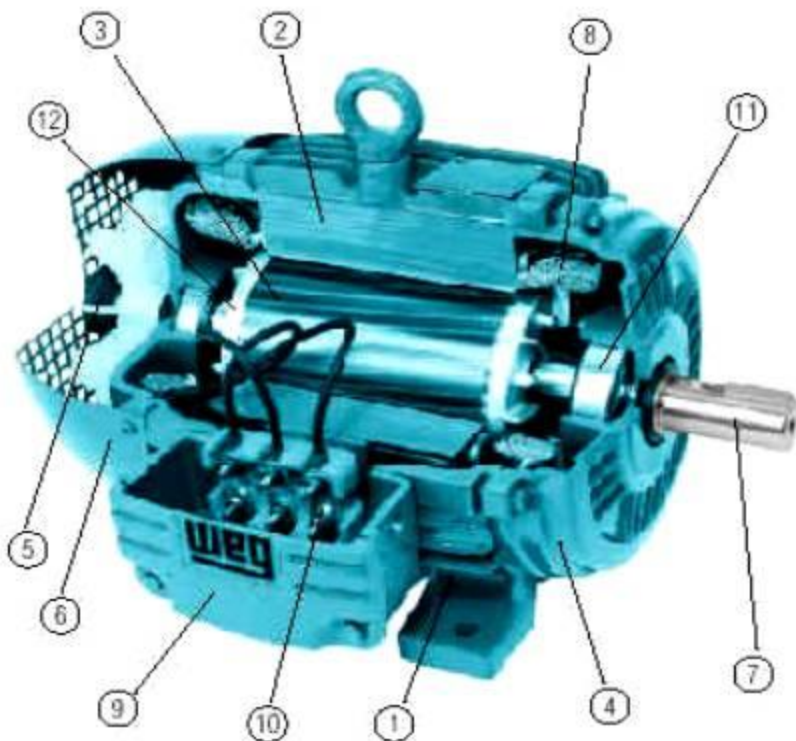
Características Básicas de uma MIT

- Os enrolamentos do estator (armadura) são conectados a uma fonte de alimentação CA;
- O fluxo produzido nos enrolamentos do estator, e que atravessa o entreferro e o rotor, é girante, com a velocidade síncrona da tensão de alimentação;
- O fluxo girante (variável) induz tensão nos enrolamentos do rotor;



Características Básicas de uma MIT

- Se os enrolamentos do rotor estiverem em curto-circuito, surgirão correntes induzidas;
- As correntes induzidas produzem uma segunda distribuição de fluxo no rotor;
- A produção de torque na máquina de indução ocorre devido à busca de alinhamento entre os fluxos girantes do estator e do rotor;

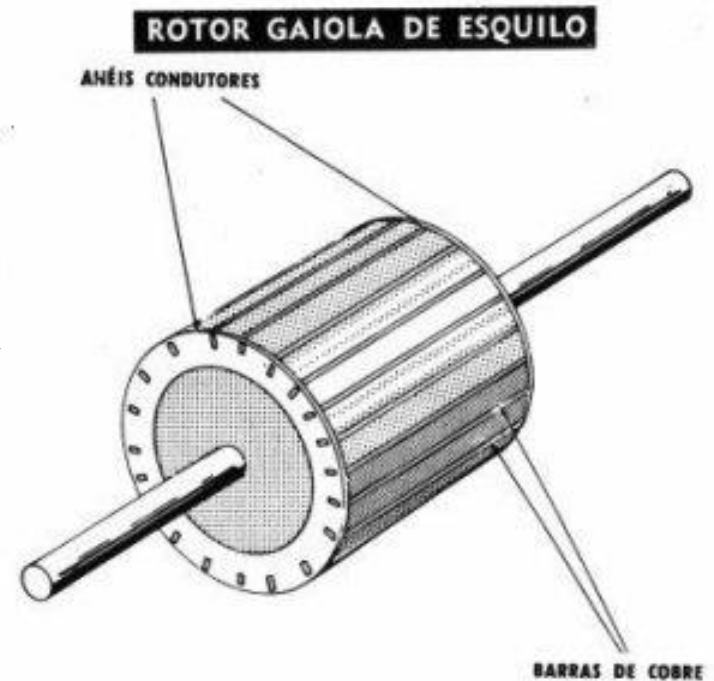
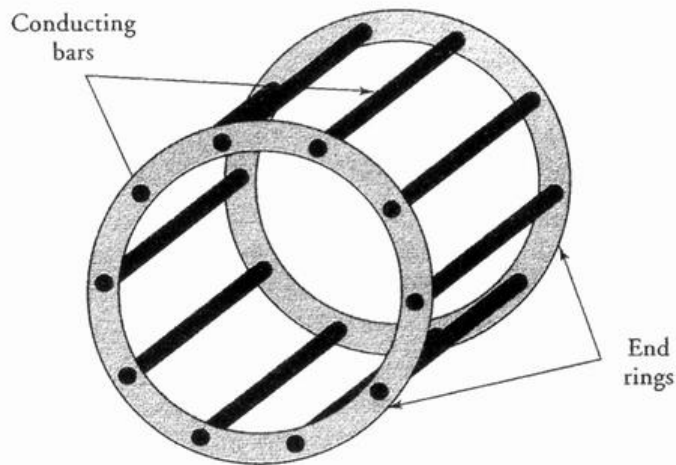


Características Básicas de uma MIT

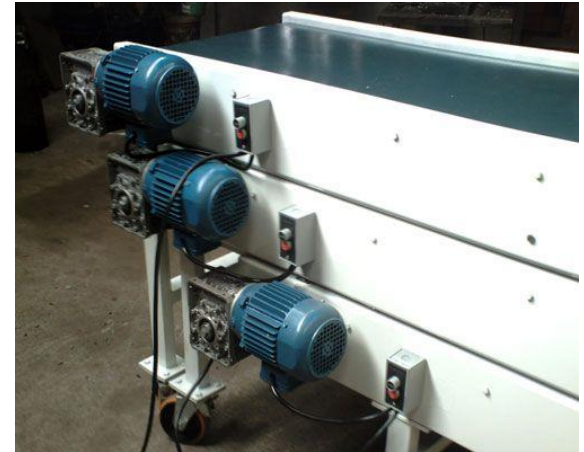
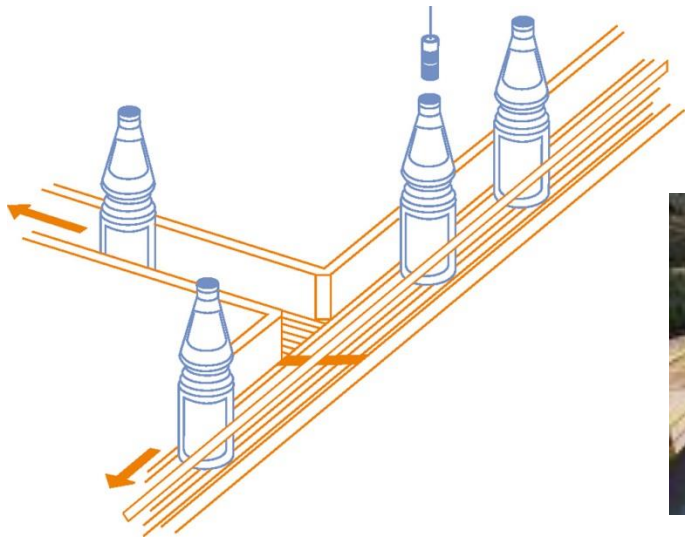
- A velocidade de regime do eixo nunca será síncrona com o campo girante do estator, pois assim, o enrolamento do rotor estaria sujeito a fluxo magnético constante, e não haveria correntes induzidas, e nem torque; ($60 \text{ Hz} \rightarrow 377 \text{ rad/s} \rightarrow 3600 \text{ rpm}$)
- Por isso, o motor de indução sempre gira um pouco abaixo da velocidade síncrona, e é denominado motor assíncrono.
- Um único enrolamento é alimentado por corrente alternada, o outro enrolamento (do rotor) é alimentado por indução;

Características Básicas de uma MIT

- O enrolamento do rotor pode ser bobinado como o do estator, ou em forma de gaiola, formado por barras metálicas acomodadas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas nos finais por anéis metálicos (cobre ou alumínio);



Uso de MITs



ELEVADOR PERSONAS Y MATERIALES EPM-1500/150

Características Técnicas

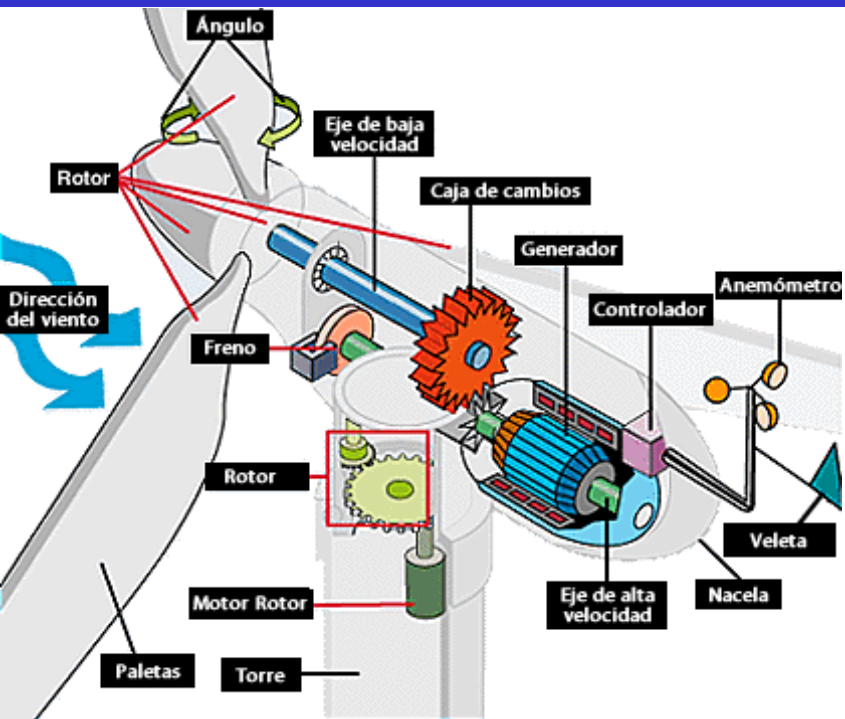
Altura máxima	m. 150
Distancia entre anclajes	m. 6
Carga útil	Kg. 1500
Capacidad como Ascensor (personas)	14
Largo Cabina	mm. 2000
Ancho Cabina	mm. 1750
Alto Cabina	mm. 2000
Tensión trifásica	220/380 - 50 Hz.
Velocidad de subida	m/min. 30
Potencia motor con variador de frecuencia	Kw. 8

FRENO DE EMERGENCIA CENTRÍFUGO-MECÁNICO

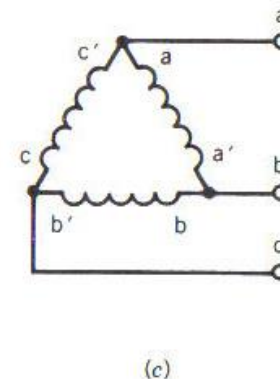
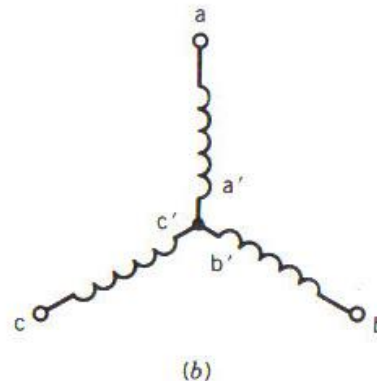
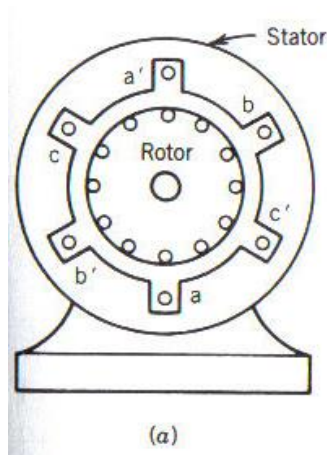


Em países industrializados de 40 a 75% da carga é formada por motores de indução

Uso de MITs – Turbinas Eólicas



- Estator com enrolamento trifásico. Cada bobina é posicionada a 120° da outra e é alimentada por um sistema trifásico. Podem ser conectadas à fonte elétrica em Y ou Δ ;
- Produz um campo girante no entreferro, com a mesma frequência da tensão de alimentação;
- O campo girante induz tensão no enrolamento do rotor, o qual não é alimentado diretamente, mas por INDUÇÃO;



- O campo girante do estator induz tensão no enrolamento do rotor;
- Se o enrolamento do rotor for curto-circuitado surgirão correntes induzidas, que produzirão um campo magnético no rotor em oposição à variação do campo do estator, resultando na produção de torque e no giro do rotor em uma dada velocidade;
- Para existirem correntes induzidas no rotor, a velocidade do eixo deverá ser sempre diferente da velocidade do campo girante, caso contrário um condutor sobre o rotor estaria sujeito a um campo fixo, e não haveria correntes induzidas. Daí a denominação de **máquina assíncrona**.

Operação da MIT – Rotor Aberto

- Não há corrente induzida, e o rotor permanecerá parado.
- O campo girante no entreferro induz tensão nos enrolamentos do rotor e do estator (com a mesma frequência);

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1} \Rightarrow \text{estator}$$

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 \phi_p k_{w2} \Rightarrow \text{rotor}$$

Daí:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1}}{4,44 f_1 N_2 \phi_p k_{w2}} = \frac{N_1}{N_2} \frac{k_{w1}}{k_{w2}} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

- Com o enrolamento do rotor em aberto e o eixo estacionário o MI funciona como um transformador, em que o estator representa o primário e o rotor representa o secundário;

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A tensão induzida no rotor produz corrente induzida, que interage com o campo girante no entreferro produzindo torque;
- O rotor começará a girar;
- O rotor gira na direção do campo girante, de forma a diminuir a velocidade relativa entre os dois (Lei de Lenz);
- O rotor chega a uma velocidade de equilíbrio em regime permanente (**n**) menor do que a velocidade síncrona (**n_s**) do campo girante do estator;

$$n_s = \frac{60 f_1}{\frac{p}{2}} = \frac{120 f_1}{p}$$

- Se $n = n_s$, não há corrente induzida no rotor, e o torque é nulo

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A diferença entre a velocidade do campo girante do estator e a velocidade do rotor define o **escorregamento** da MI;

$$\begin{cases} s = \frac{n_s - n}{n_s} \\ n = (1 - s)n_s \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n = 0 \text{ (máquina parada)} \Rightarrow s = 1 \\ n = n_s \text{ (torque nulo)} \Rightarrow s = 0 \end{cases}$$

- $n_s - n = sn_s$ é a velocidade relativa do rotor em relação ao campo girante do estator;
- A frequência da corrente induzida no enrolamento do rotor é:

$$f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} sn_s = s \frac{p}{120} n_s = sf_1$$

- f_2 é denominada por frequência de escorregamento;

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A tensão induzida no enrolamento do rotor para um dado escorregamento é:

$$E_2 \Big|_s = 4,44 f_2 N_2 \phi_p k_{w2} = 4,44 s f_1 N_2 \phi_p k_{w2} = s E_2 \Big|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

- A velocidade do campo girante produzido pelo enrolamento do rotor é:

$$n_2 = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 s f_1}{p} = s n_s$$

- Como o rotor gira a n RPM, o campo girante do rotor gira no entreferro a $n+n_2$:

$$n + n_2 = (1 - s) n_s + s n_s = n_s$$

- Ou seja, os campos girantes do rotor e do estator giram no entreferro com a mesma velocidade síncrona (n_s);
- Eles são estacionários entre si, no entanto, o campo do rotor é atrasado em relação ao do estator;
- A tendência de alinhamento entre os dois campos é que produz torque.

Exemplo 1

- Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:
- a) a velocidade síncrona e a velocidade do motor;

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{ RPM}$$

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0,05) * 1800 = 1710 \text{ RPM}$$

Exemplo 1

- Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:
- b) a velocidade do campo girante no entreferro;

$$\text{velocidade síncrona} = 1800 \text{ RPM}$$

- c) A frequência do circuito do rotor:

$$f_2 = sf_1 = 0,05 * 60 = 3 \text{ Hz}$$

Exemplo 1

➤ Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:

d) O escorregamento em RPM;

$$sn_s = 0,05 * 1800 = 90 \text{ RPM} \quad \text{ou} \quad n_s - n = 1800 - 1710 = 90 \text{ RPM}$$

e) A velocidade do campo do rotor em relação a:

1. Estrutura do rotor: 90 RPM
2. Estrutura do estator: $90 + 1710 = 1800$ RPM
3. Ao campo girante do estator: $1800 - 1800 = \text{zero}$

Exemplo 1

- Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:

f) A tensão induzida no rotor se a relação de espiras estator-rotor é 1:0,5

Parado

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1}}{4,44 f_1 N_2 \phi_p k_{w2}} = \frac{N_1}{N_2} \frac{k_{w1}}{k_{w2}} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{460 / \sqrt{3}}{E_2} \approx \frac{1}{0,5}$$

$$E_2 = 132,9 \text{ V}$$

Em regime

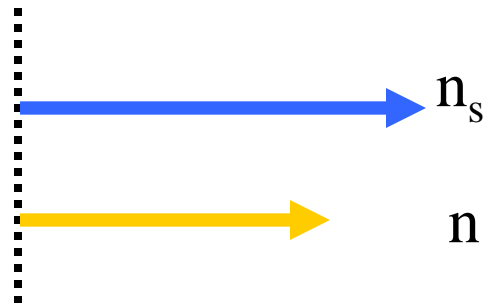
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1}}{4,44 s f_1 N_2 \phi_p k_{w2}} = \frac{N_1}{s N_2} \frac{k_{w1}}{k_{w2}} \approx \frac{N_1}{s N_2}$$

$$\frac{460 / \sqrt{3}}{E_2} \approx \frac{1}{0,05 * 0,5}$$

$$E_2 = 6,64 \text{ V}$$

Operação como Motor

- O rotor gira na direção do campo girante do estator
- A velocidade do rotor é menor do que a do campo girante;

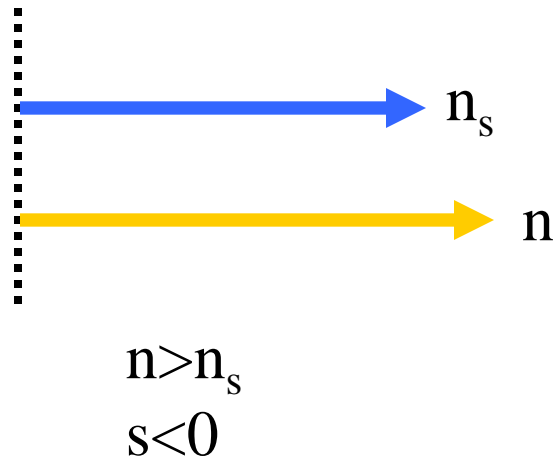


$$0 \leq n \leq n_s$$

$$1 \geq s \geq 0$$

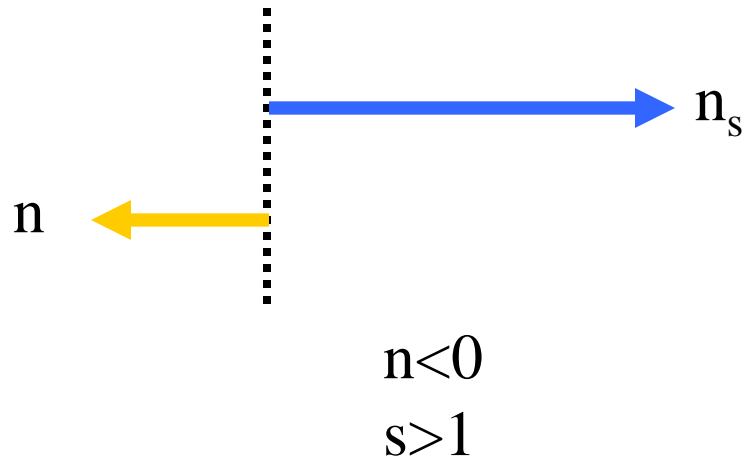
Operação como Gerador

- O rotor gira na direção do campo girante do estator
- A velocidade do rotor é maior do que a do campo girante;

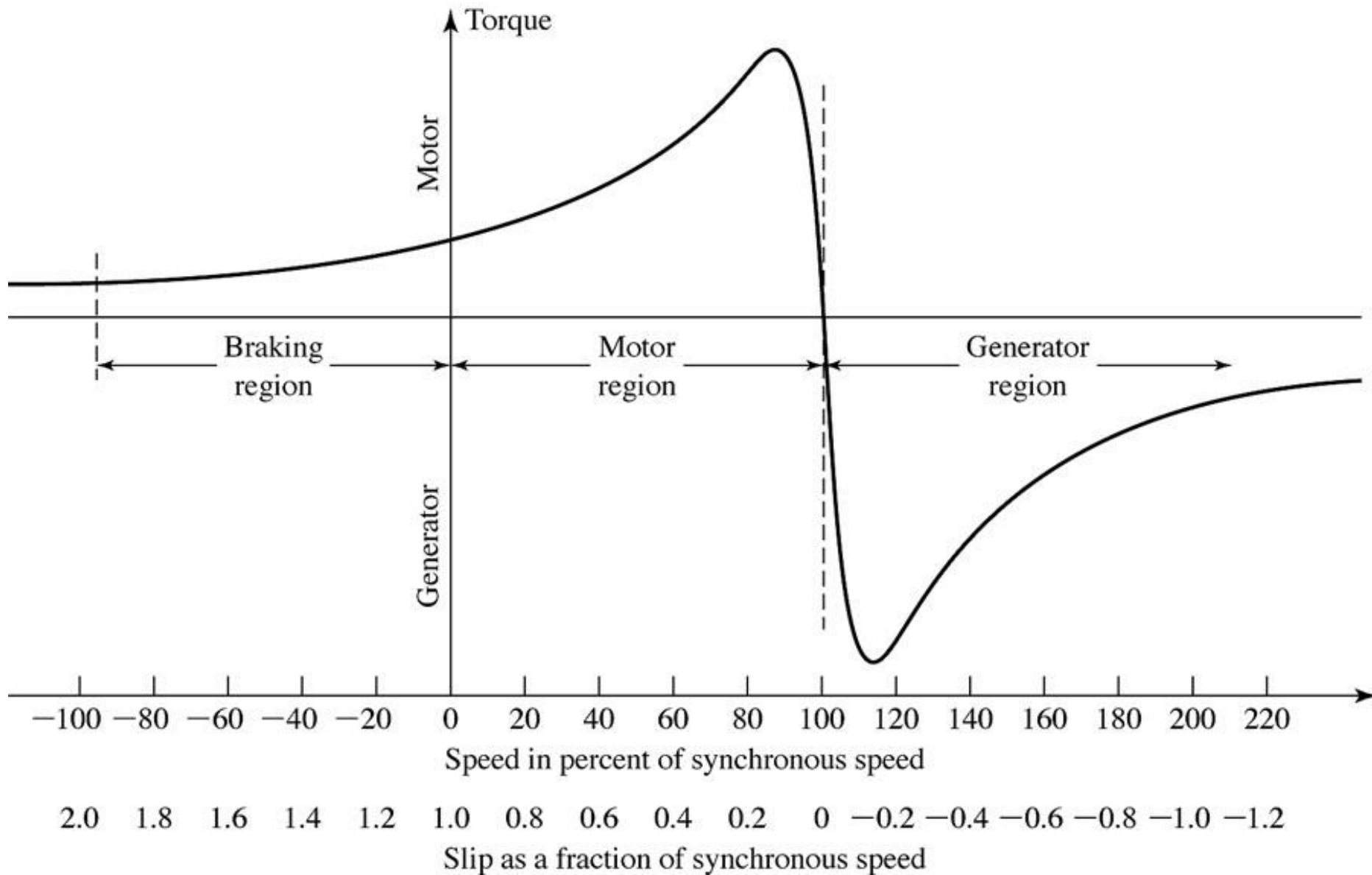


Operação como em Modo Frenante

- O rotor gira na direção oposta do campo girante do estator
- O torque produzido é frenante;

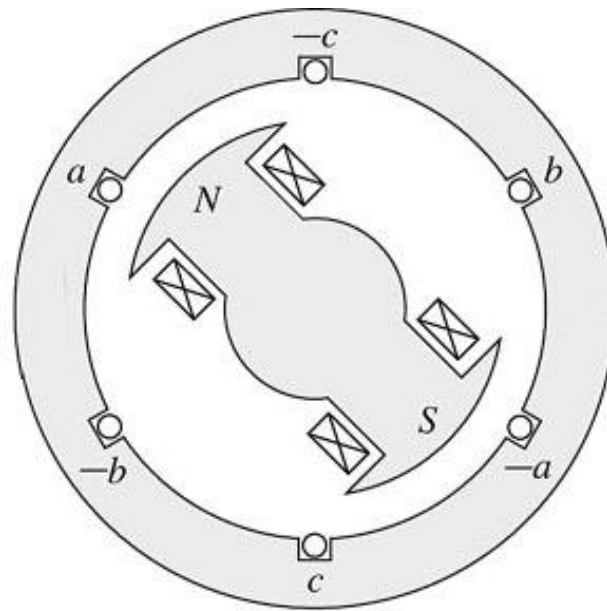


Curva Torque x Velocidade de uma MIT



Características Básicas de uma Máquina Síncrona

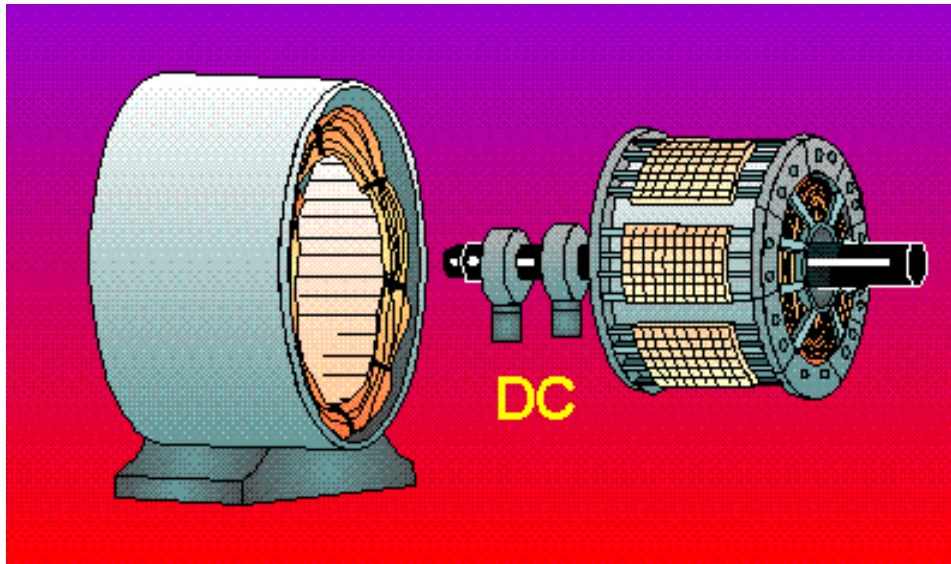
- O enrolamento de campo é posicionado no rotor;
- O enrolamento de armadura é posicionado no estator;
- O enrolamento de campo é alimentado em CC, produzindo fluxo unidirecional no entreferro e no estator;
- Quando o rotor gira, o enrolamento de armadura é atravessado por campo variável, surgindo em seus terminais tensão induzida variável;



(a)

Características Básicas de uma Máquina Síncrona

- A frequência de variação da tensão induzida é síncrona com a velocidade do eixo, daí a denominação de máquina síncrona;
- Os enrolamentos da armadura são posicionados com diferença angular de 120° , de forma que a tensão induzida nos três enrolamentos serão defasadas de 120° ;
- O enrolamento de campo é alimentado através de escovas deslizantes sobre anéis coletores, que giram com o rotor;

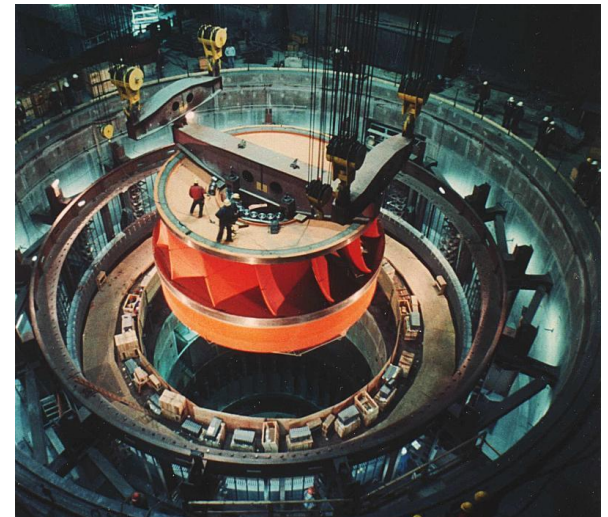


Emprego da máquina síncrona como Motor

- O controle da corrente de campo permite que o motor síncrono opere com fator de potência unitário, indutivo ou capacitivo;
- Usado em situações que demandem velocidade constante com carga variável;

Emprego da máquina síncrona como Gerador

- Independente da fonte primária e da capacidade, o gerador síncrono é usualmente o mais indicado;
- Com isso, um sistema interligado pode operar com uma única frequência, ou seja, em sincronismo;



Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

- Com turbinas hidráulicas de alta inércia, a velocidade do rotor deve ser baixa; para isso o rotor deve ter muitos polos;

74 polos em 60 Hz \rightarrow 97,3 RPM

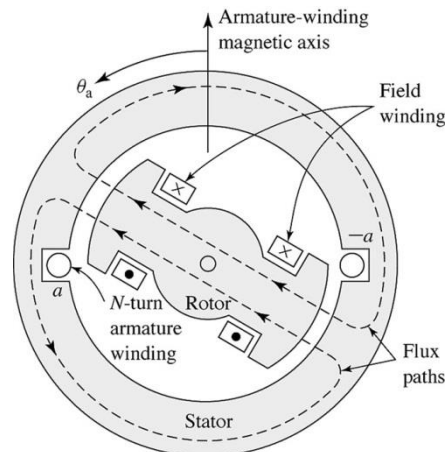
- Com turbinas térmicas (vapor ou gás) de baixa inércia, a velocidade do rotor pode ser alta; com isso o rotor pode ter poucos polos;

4 polos em 60 Hz \rightarrow 1800 RPM

Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

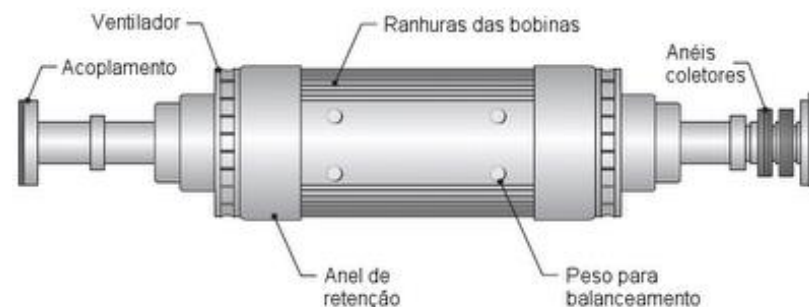
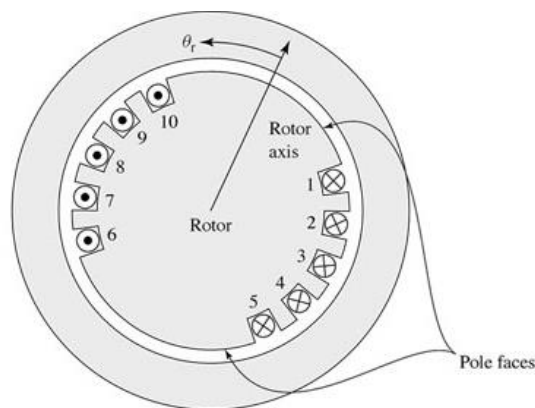
- Máquinas com muitos polos e baixa velocidade em geral têm o rotor de polos salientes;

- diâmetro grande
- comprimento pequeno
- eixo vertical



- Máquinas com poucos polos e alta velocidade em geral têm o rotor cilíndrico;

- diâmetro pequeno
- comprimento grande
- eixo horizontal



Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

- O enrolamento do estator (armadura) é trifásico e distribuído (igual ao da máquina de indução);
- Pode ser conectado em Y ou em Δ ;
- O controle independente da corrente de campo permite que o motor/gerador síncrono opere com fator de potência indutivo ou capacitivo, absorvendo ou injetando potência reativa;

Máquina Síncrona Trifásica: Característica de Magnetização

- O campo do rotor, produzido pela corrente de excitação I_f , torna-se um campo girante senoidal no entreferro com o acionamento da máquina primária;
- O campo girante induz tensão trifásica senoidal nos enrolamentos do estator;
- A velocidade do rotor e a frequência das tensões induzidas são relacionadas por:

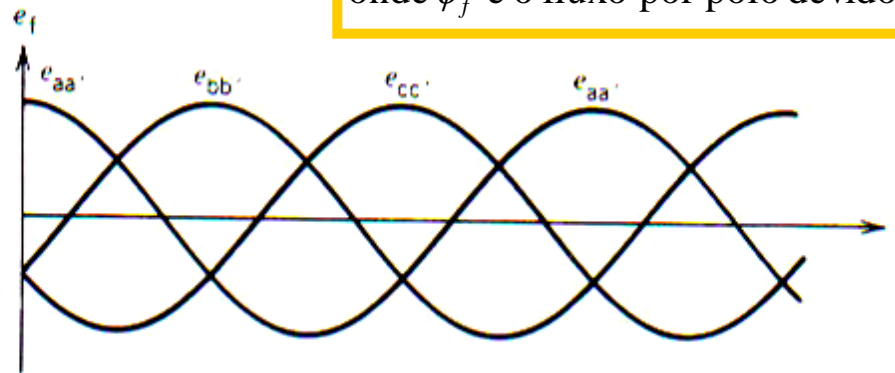
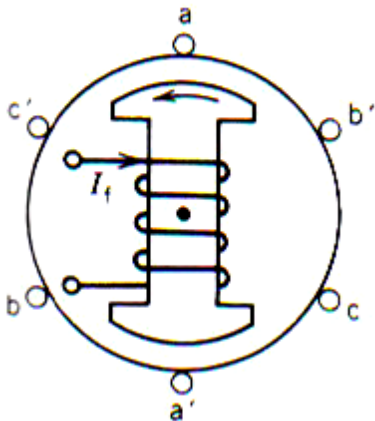
$$n = \frac{120 f}{p}$$

- A tensão induzida E_f é dada por:

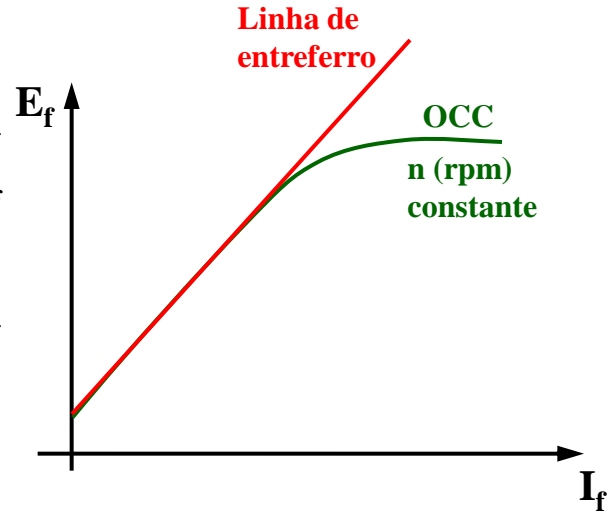
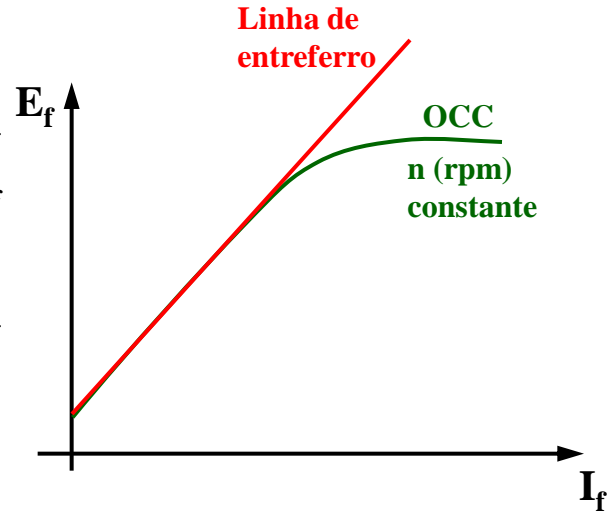
$$E_f^{\text{rms}} = 4,44 f N_{ph} \phi_f k_w$$

$$\text{ou seja, } E_f^{\text{rms}} \propto n \phi_f$$

onde ϕ_f é o fluxo por pólo devido a corrente I_f



Máquina Síncrona Trifásica: Característica de Magnetização

- Portanto, a tensão induzida é proporcional à velocidade da máquina e ao fluxo de excitação, o qual depende da corrente I_f .
- A curva ao lado representa a curva de magnetização da máquina síncrona. Inicialmente, a tensão induzida E_f cresce linearmente com o aumento da corrente de campo, porém para altos valores de I_f ocorre a saturação do núcleo, e a relação tensão induzida *versus* corrente de campo deixa de ser linear;

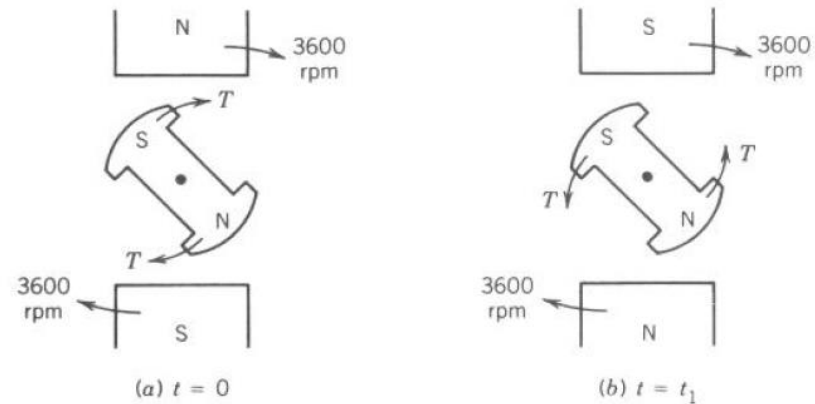
Linha de entreferro

OCC
 n (rpm) constante
- Se os terminais do circuito de armadura estão em aberto, a tensão induzida E_f é igual a tensão terminal, e, portanto, pode ser medida através de um voltímetro. Essa curva é denominada “característica de circuito aberto” (OCC, *open-circuit characteristic*) ou “característica de magnetização” da máquina síncrona.
- A relutância do núcleo não saturado é muito menor que a relutância do entreferro, por isso, a fmm está praticamente toda concentrada no entreferro, resultando em um aumento linear do fluxo. A parte linear da curva é denominada “linha de entreferro”.

Motor Síncrono: Torque de Partida

- A máquina síncrona não tem torque de partida, devido à oscilação do campo girante do estator em alta frequência e elevada inércia do rotor.
- Se o estator de uma máquina síncrona de dois polos for conectado a uma fonte trifásica, 60 Hz, campo girante sob uma velocidade de 3600 rpm será produzido no entreferro. Na figura abaixo, o campo girante é representado por dois polos no estator girando a 3600 rpm.

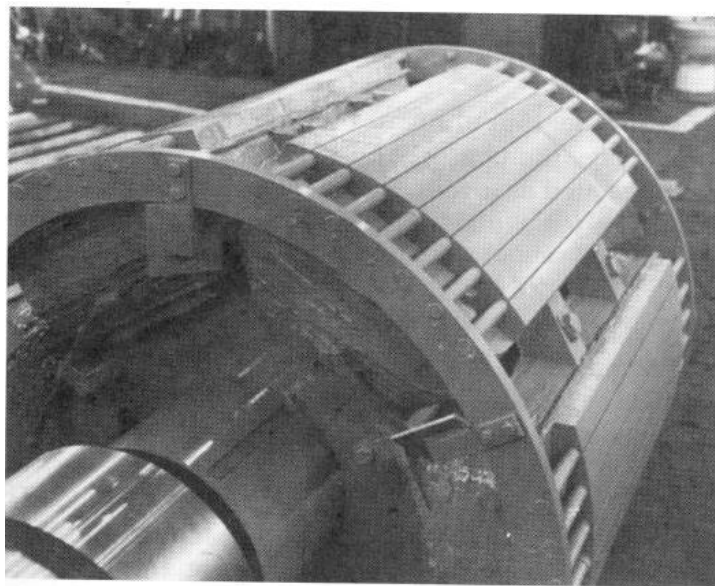
- No instante $t = 0$, torque no sentido horário é produzido sobre os polos do rotor, fazendo com que o mesmo gire no sentido dos polos do estator (campo girante).



- No instante $t = t_1$, os polos do estator giraram de 180°, porém os polos do rotor pouco moveram, devido à elevada inércia do rotor. Portanto, neste instante, um torque anti-horário age no rotor, fazendo com que o mesmo tenda a girar no sentido contrário do campo girante.
- O torque líquido no rotor em uma revolução é nulo, e o motor não desenvolve torque de partida. O motor não irá acelerar e sim, vibrar.

Motor Síncrono: Soluções para a Partida

- Partir com frequência reduzida, diminuindo a velocidade do campo girante;
- Partida como motor de indução:
 1. Usa-se uma gaiola externa ao enrolamento de campo para acelerar a máquina na partida;
 2. Próximo da velocidade síncrona ($s = 2\%$ a 5%) o enrolamento de campo é alimentado em CC, o que leva a máquina ao sincronismo;
 3. A gaiola ajuda a máquina a recuperar a velocidade síncrona em caso de perturbações, sendo por isso, denominado de enrolamento amortecedor;



Reação da Armadura na Máquina Síncrona

- Se os terminais do estator são conectados a uma carga trifásica, corrente circula pelo circuito de armadura I_a , que cria um segundo campo, girante, no entreferro, o qual também gira a velocidade síncrona.
- A magnitude do fluxo resultante no entreferro, assumindo que não há saturação, é a soma do fluxo Φ_a (reação da armadura) devido à corrente de armadura I_a e do fluxo Φ_f devido à corrente de campo I_f .

$$\Phi_r = \Phi_f + \Phi_a = \text{fluxo resultante no entreferro}$$

