

PEA3391 - Máquinas Elétricas

Aula 01 - Máquinas de Indução (Assíncronas)
Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos

São Paulo - junho de 2020



Máquinas de Indução (Assíncronas)

- ① Introdução
- ② Características Construtivas
- ③ Campo Magnético Girante
- ④ Máquina de Indução Polifásica
- ⑤ Modos de Operação
- ⑥ Teste de Rotor Sem Carga, Rotor Bloqueado e Circuito Equivalente
- ⑦ Desempenho de Máquinas de Indução
- ⑧ Partida de Motor de Indução
- ⑨ Motor de Indução Linear (MIL)

Introdução

Introdução

- **Máquinas elétricas** são dispositivos capazes de converter energia elétrica em energia mecânica e vice-versa;
- **Geradores:** convertem energia mecânica em elétrica.
- **Motores:** convertem energia elétrica em mecânica.
- De maneira geral, os motores elétricos são divididos em duas grandes classes:
 - ① Motores de Corrente Contínua (CC);
 - ② Motores de Corrente Alternada (CA).

Introdução

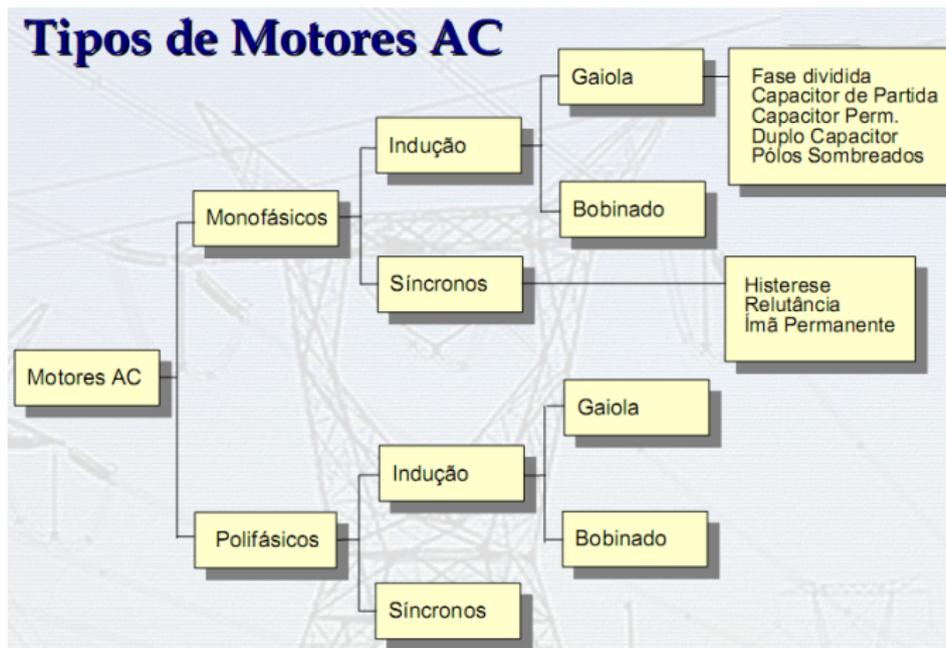


Fig.: Tipos de motores CA.

Introdução

- A máquina de indução é a mais robusta e mais comumente usada na indústria;
- Semelhante às máquinas CC, as máquinas CA têm estator e rotor separados por um *gap* de ar;
- Todavia, na máquina de indução ambos os enrolamentos, do estator e do rotor, conduzem corrente alternada;
- A corrente alternada é fornecida para o enrolamento do estator diretamente, enquanto que no rotor a corrente flui por indução – por isso o nome **MÁQUINA DE INDUÇÃO**;
- Máquinas de indução podem operar tanto como GERADOR como MOTOR;
- Exemplos de operação como motor **monofásico de pequeno porte**: liquidificador, cortador de grama, máquina de lavar roupas, refrigeradores, etc.;
- Exemplos de operação como motor **trifásico de grande porte**: bombas d'água, ventilador, compressor, fábricas de papel, fábricas têxteis, etc.;
- A máquina de indução linear (MIL) foi desenvolvida prioritariamente para uso em sistemas de transporte.

Introdução

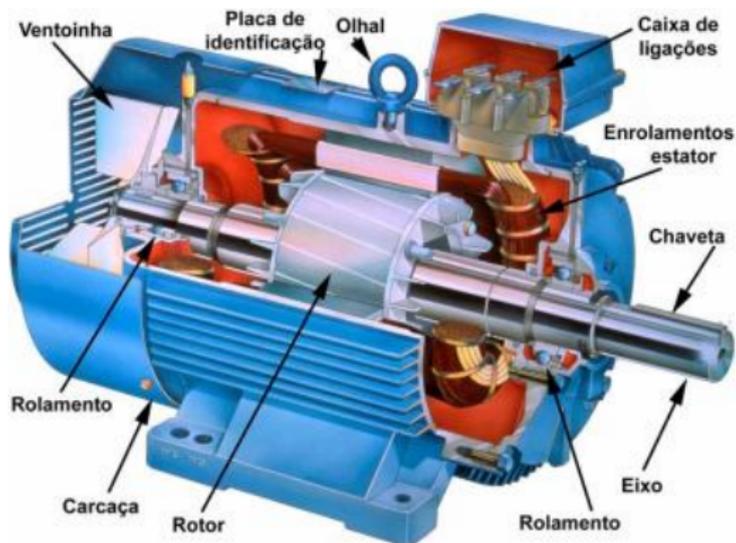


Fig.: Motor de indução (imagem ilustrativa).

Introdução

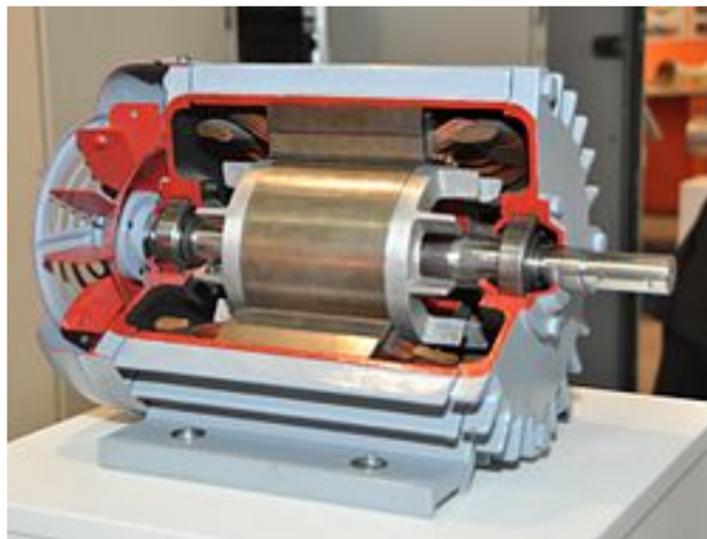


Fig.: Motor de indução (imagem real).

Introdução

- **Vantagens e desvantagens de motor de indução**
 - **Vantagens:**
 - Baixo custo de aquisição;
 - Baixo custo de manutenção;
 - Torque de partida não nulo;
 - Robustez;
 - Disponível em potências de $\frac{1}{4}$ HP a mais de 30.000 HP.
 - **Desvantagens:**
 - Controle de velocidade difícil;
 - Corrente de partida elevada;
 - Fator de potência baixo e sempre indutivo.

Características Construtivas

Características Construtivas – Estator

- A respeito do estator e do número de pólos, tem-se que:

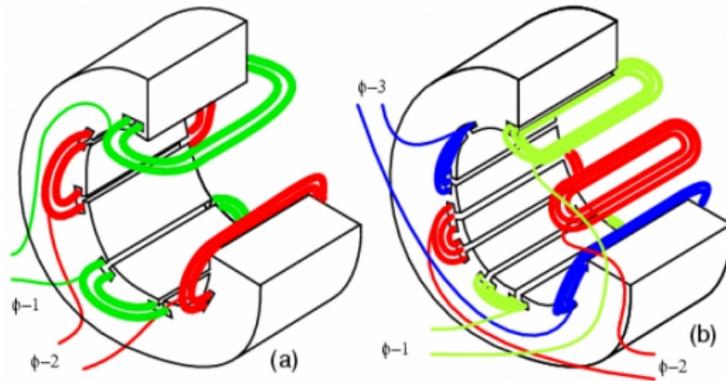


Fig.: Estator de uma máquina de indução monofásica (a) com 4 pólos e (b) 6 pólos.

Características Construtivas – Estator

- A respeito do estator e do número de pólos, tem-se que:

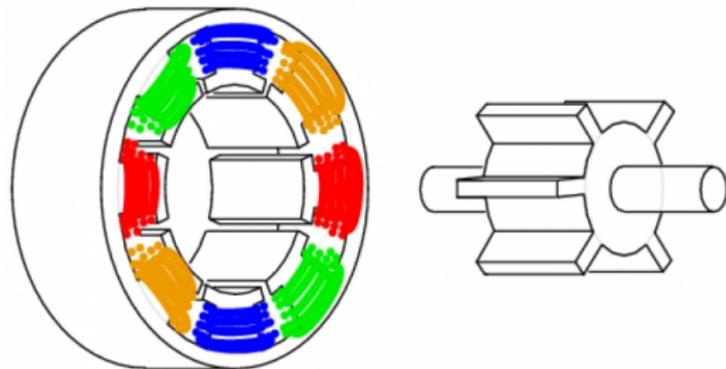


Fig.: Estator da máquina de indução monofásica com 8 pólos.

Características Construtivas – Estator

- A respeito do estator e do número de pólos, tem-se que:

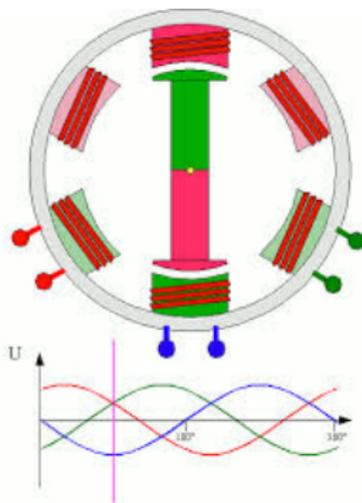


Fig.: Estator de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, trifásico e 2 pólos.

Características Construtivas – Rotor

- Construtivamente, o rotor das máquinas de indução podem ser de dois tipos:
 - ① **Rotor Gaiola de Esquilo**; ou
 - ② **Rotor Bobinado** (ou rotor enrolado).
- **Rotor Gaiola de Esquilo**: consiste de barras de alumínio ou de cobre embutidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Sua simplicidade e robustez de construção são vantajosos, sendo o tipo de motor mais comumente usado.
- **Rotor Bobinado**: consiste de um enrolamento polifásico igual ao estator e com o mesmo número de pólos. Os terminais do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados e montados sobre o eixo. Escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor tornem-se disponíveis externamente ao motor. Essas máquinas são relativamente incomuns, sendo encontradas apenas em um número limitado de aplicações específicas.

Características Construtivas – Rotor



Fig.: Rotor Gaiola de Esquilo vs Rotor Bobinado (imagem real).

Características Construtivas – Rotor

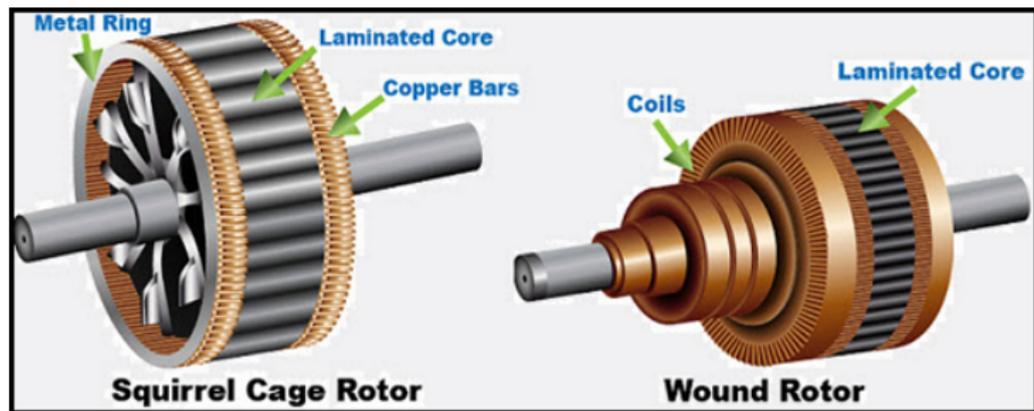


Fig.: Rotor Gaiola de Esquilo vs Rotor Bobinado (imagem ilustrativa).

Características Construtivas – Rotor

- 1) **Rotor Gaiola de Esquilo:** consiste de barras de alumínio ou de cobre embutidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Sua simplicidade e robustez de construção são vantajosos, sendo o tipo de motor mais comumente usado.



Fig.: Rotor gaiola de esquilo e estator (imagem real).

Características Construtivas – Rotor

- 1) **Rotor Gaiola de Esquilo:** consiste de barras de alumínio ou de cobre embutidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Sua simplicidade e robustez de construção são vantajosos, sendo o tipo de motor mais comumente usado.

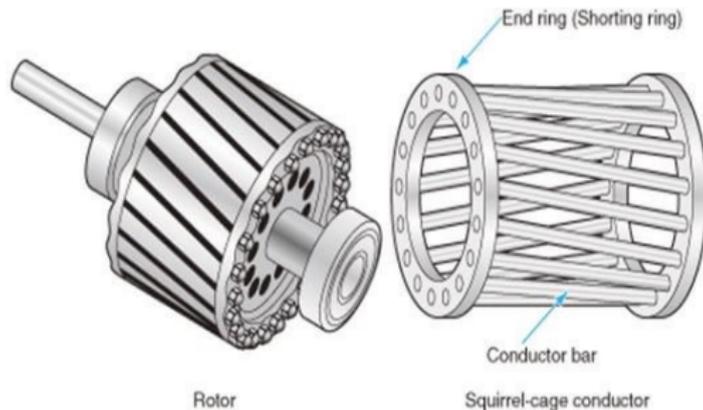


Fig.: Rotor gaiola de esquilo (imagem ilustrativa).

Características Construtivas – Rotor

- 1) **Rotor Gaiola de Esquilo:** consiste de barras de alumínio ou de cobre embutidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Sua simplicidade e robustez de construção são vantajosos, sendo o tipo de motor mais comumente usado.

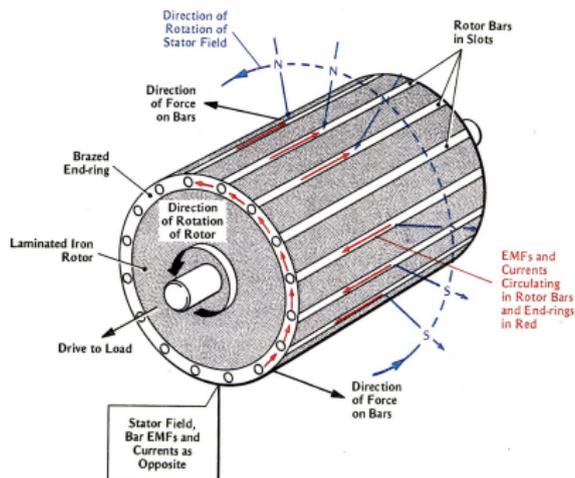


Fig.: Fluxos das correntes no rotor gaiola de esquilo (imagem ilustrativa).

Características Construtivas – Rotor

- 1) **Rotor Gaiola de Esquilo:** consiste de barras de alumínio ou de cobre embutidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Sua simplicidade e robustez de construção são vantajosos, sendo o tipo de motor mais comumente usado.

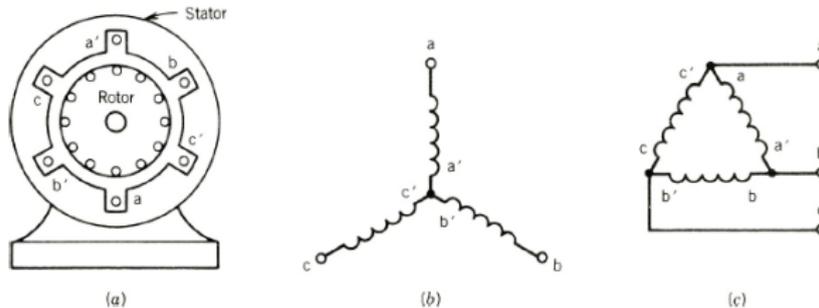


Fig.: Máquina de indução trifásica com rotor gaiola de esquilo (a) corte transversal, (b) enrolamento do estator conectado em Y, (c) enrolamento do estator conectado em Δ .

Características Construtivas – Rotor

- **2) Rotor Bobinado:** consiste de um enrolamento polifásico igual ao estator e com o mesmo número de pólos. Os terminais do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados e montados sobre o eixo. Escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor tornem-se disponíveis externamente ao motor. Essas máquinas são relativamente incomuns, sendo encontradas apenas em um número limitado de aplicações específicas.

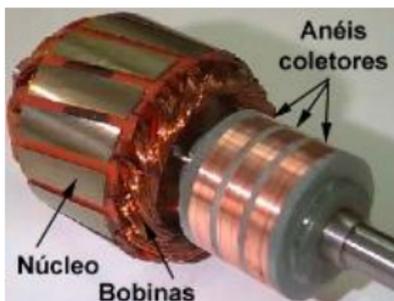


Fig.: Máquina de Indução com rotor bobinado (imagem real).

Características Construtivas – Rotor

- 2) Rotor Bobinado:** consiste de um enrolamento polifásico igual ao estator e com o mesmo número de pólos. Os terminais do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados e montados sobre o eixo. Escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor tornem-se disponíveis externamente ao motor. Essas máquinas são relativamente incomuns, sendo encontradas apenas em um número limitado de aplicações específicas.

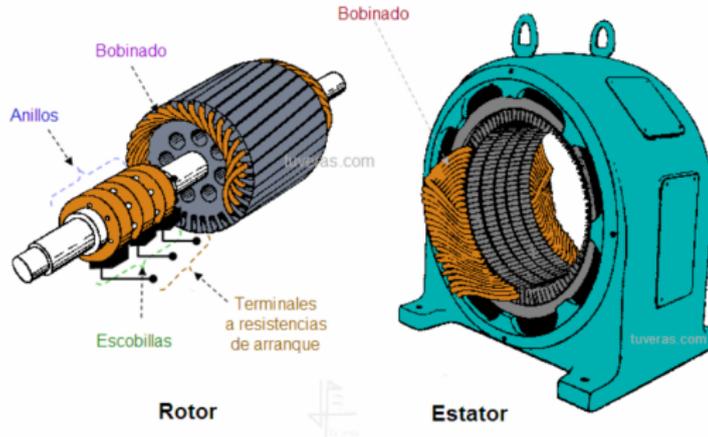


Fig.: Máquina de Indução com rotor bobinado (imagem ilustrativa).

Campo Magnético Girante

Campo Magnético Girante

- Nesta seção estudaremos o campo magnético produzido pelas correntes que fluem nos enrolamentos polifásicos de uma máquina CA;
- Na Figura a seguir, os enrolamentos trifásicos aa' , bb' , cc' estão defasados de 120° um dos outro;

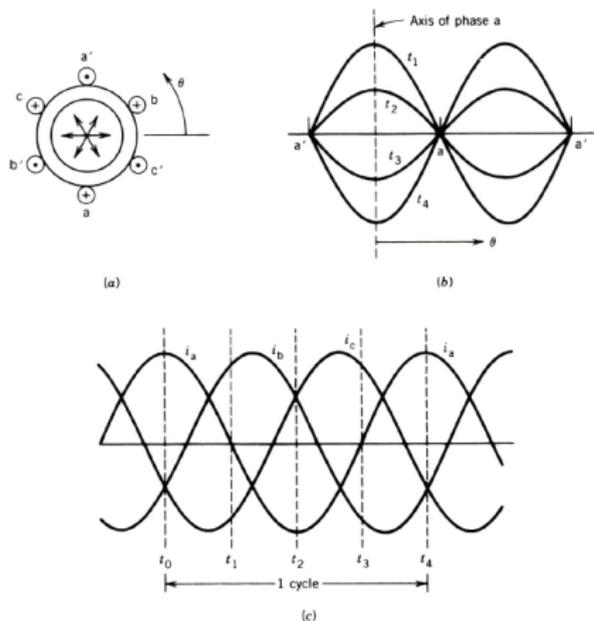


Fig.: Máquina trifásica com (a) 2 pólos, com (b) distribuição espacial da força magnetomotriz (fmm) no ramo aa' e (c) corrente elétrica nas fases a , b e c .

Campo Magnético Girante

- As **rotações por minuto** (n) em [RPM] de uma onda viajante em uma máquina de (p) pólos e frequência (f) em [ciclos por segundo] é dada por:

$$n = \frac{2}{p} \cdot 60 f \rightarrow \boxed{n = \frac{120 \cdot f}{p}} \text{ (IMPORTANTE SABER!!!!)}$$

- Se uma corrente i_a flui pelo enrolamento de fase-a, mas i_b flui na fase-c e i_c flui na fase-b, então a fmm provocará rotação no sentido horário;
- Se, por um acaso, quaisquer uma das fases for comutada com outra, a fmm provocará rotação no sentido anti-horário.

Campo Magnético Girante

- No eletromagnetismo, sabemos que o **fluxo total** que atravessa uma ou mais espiras é:

$$\lambda_a(\omega t) = N \Phi_p \cos(\omega t)$$

- A tensão induzida em um enrolamento de fase aa' pela Lei de Faraday é expressa por:

$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt}$$

- Logo:

$$e_a = \omega \cdot N \cdot \Phi_p \cdot \sin(\omega t)$$

- Se pensarmos o valor da tensão induzida em termos de valor RMS, tem-se que:

$$E_{rms} = \frac{\omega \cdot N \cdot \Phi_p}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_p$$

$$E_{rms} = 4,44 f N \Phi_p$$

- Na prática, existe um fator de redução K_w denominado de *fator de enrolamento*.
- K_w é um número entre **0,85** e **0,95**, tipicamente. Assim, tem-se que:

$$E_{rms} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_p \cdot K_w$$

- onde: f é a frequência em Hz, N_{ph} é o número de espiras por fase e Φ_p é o fluxo magnético gerado por polo da máquina.

Máquina de Indução Polifásica

Máquina de Indução Polifásica

- Considere vários comportamentos de operação de máquinas de indução polifásicas:
 - a. Operação com Rotor Bloqueado;
 - b. Operação com Deslocamento de Fase;
 - c. Operação com Rotor em Movimento.

Máquina de Indução Polifásica

- Em [a.] **Operação com Rotor Bloqueado**, considere um rotor bobinado com circuito do rotor em circuito aberto. Se o estator está conectado a uma alimentação trifásica, o campo magnético induzido no rotor será de:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \Phi_p K_{w1}}{4,44 f_1 N_2 \Phi_p K_{w2}} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \rightarrow \text{Se } K_{w1} = K_{w2} \rightarrow \boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

- Em [b.] **Operação com Deslocamento de Fase**, o rotor pode ser construído em uma posição de modo que o seu eixo de enrolamento de estator e de rotor façam um ângulo β . Assim, um rotor bobinado pode ser usado para que haja deslocamento de fase entre E_1 e E_2 .

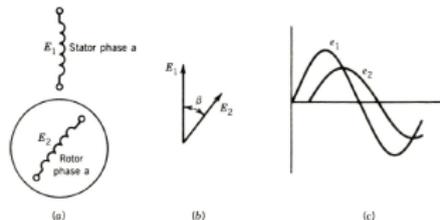


Fig.: Máquina de Indução operando com deslocamento de fase.

Máquina de Indução Polifásica

- Em [c.] **Operação com Rotor em Movimento**, considere que o estator está conectado a um fornecimento trifásico e o rotor está em circuito fechado.
- As tensões induzidas no rotor produzem correntes que interagem com o campo magnético que flui no *gap* de ar e produz torque;
- Pela Lei de Lenz, o rotor gira na direção de rotação do campo girante;
- A velocidade relativa entre o campo girante e a velocidade de rotação do rotor diminui até eventualmente atingir a velocidade nominal de operação (i.e., rotação da máquina em regime permanente);
- A *velocidade nominal* n de giro que é menos que a *velocidade síncrona* n_s que corresponde a velocidade do campo girante produzido pelo estator.
- **É importante notar que se $n = n_s$ não haverá tensão induzida e nem corrente no circuito do rotor, logo, NÃO HAVERÁ TORQUE.**

Máquina de Indução Polifásica

- Sendo assim, a diferença entre a *velocidade do rotor* n e a *velocidade síncrona* n_s do campo girante é chamada de escorregamento s , e é definido por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

(Um valor de **2%** de escorregamento pode ser entendido como um valor típico.)

- E, com desenvolvimentos matemáticos, algumas relações de frequência e velocidades relativas, são:

$$f_{rotor} = s \cdot f_{estator}, \text{ ou } f_2 = s f_1$$

$$E_{rotor-movimento} = s \cdot E_{rotor-bloqueado}, \text{ ou } E_{2s} = s \cdot E_2$$

$$n_{campo-da-corrente-no-rotor} = s \cdot n_s, \text{ ou } n_2 = s \cdot n_s$$

- Vale ressaltar que, ambos, **campo do estator** e **campo induzido do rotor** giram na **mesma velocidade síncrona** n_s , pois:

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

No fim, o campo do estator e o campo do rotor são estacionários um em relação ao outro. A interação entre esses dois campos, portanto, que produzem torque.

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - a. Velocidade síncrona (n_s) e a velocidade do motor (n).
 - b. Velocidade de rotação do campo girante no *gap* de ar, isto é, campo produzido pelo estator.
 - c. Frequência do circuito do rotor (f_2).
 - d. Escorregamento em RPM.
 - e. Velocidade do campo do rotor **relativo a**
 - i. estrutura do rotor.
 - ii. estrutura do estator.
 - iii. campo de rotação do estator.
 - f. Tensão induzida no rotor na velocidade de operação nominal, se a relação de espiras do estator-para-rotor é de 1:0,5.

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - a. Velocidade síncrona (n_s) e a velocidade do motor (n).

Solução:

$$n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

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

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - b. Velocidade de rotação do campo girante no *gap* de ar, isto é, campo produzido pelo estator.

Solução:

Resposta: 1800 rpm (mesmo que a velocidade síncrona).

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - Frequência do circuito do rotor (f_2).

Solução:

Resposta: $f_2 = s \cdot f_1 = 0,05 \times 60 = 3Hz$.

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - Escorregamento em RPM.

Solução:

Resposta: escorregamento rpm = $s \cdot n_s = 0,05 \times 1800 = 90$ rpm

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3 ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - e. Velocidade do campo do rotor **relativo a**
 - i. estrutura do rotor.
 - ii. estrutura do estator.
 - iii. campo de rotação do estator.

Solução:

Resposta: (i) 90 rpm, (ii) 1800 rpm, (iii) 0 rpm

Máquina de Indução Polifásica

- **Exercício 1:** Uma máquina de indução 3ϕ , 460 V, 100 HP, 60 Hz, 4 polos, entrega potência de saída a um escorregamento de 0,05. Determine:
 - f. Tensão induzida no rotor na velocidade de operação nominal, se a relação de espiras do estator-para-rotor é de 1:0,5.

Solução:

Resposta: Assumindo que a tensão induzida no enrolamento do estator é a mesma que a tensão aplicada, tem-se que:

$$E_{2s} = s \cdot E_2$$

$$E_{2s} = s \cdot \frac{N_2}{N_1} E_1$$

$$E_{2s} = 0,05 \times 0,5 \times \frac{460}{\sqrt{3}}$$

$$E_{2s} = 6,64 \text{ V/fase}$$

Modos de Operação

Modos de Operação

- O motor de indução pode ser operado em três modos: motor, gerador e "plugging":
 - **Motor:** Torque positivo;
 - **Gerador:** Torque negativo;
 - **Plugging:** Dissipador.
- Para ilustrar cada caso, considere um motor de indução acoplado à uma máquina CC, conforme figura a seguir:

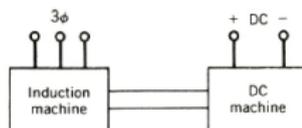
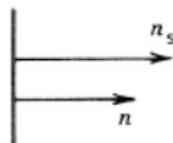


Fig.: Três modos de operação de máquinas de indução.

Modos de Operação

- **Motor**

- Se os terminais do estator estão conectados a um fornecimento trifásico, o **rotor irá rotacionar na direção do campo magnético do estator**;
- Esse é o modo natural de operação de máquinas de indução;
- **A velocidade de rotação do rotor em regime permanente n é menor que a velocidade síncrona n_s** , como mostra a figura a seguir:



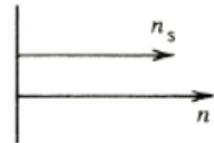
(b) Motoring
 $0 \leq n \leq n_s$
 $1 \geq s \geq 0$

Fig.: Modo de operação motor.

Modos de Operação

- **Gerador**

- Se o motor CC for ajustado a uma **velocidade superior à velocidade síncrona** e o sistema rotacionar na mesma direção do campo girante do estator, como na figura:
- A máquina de indução irá produzir torque, isto é, um **torque que se opõe a rotação do rotor** (or atuando em oposição ao campo girante do estator);
- O modo de operação gerador é usado em aplicações de acionamento tais como na *frenagem regenerativa*;
- Suponha uma máquina de indução alimentada por uma fonte variável para controle de velocidade. Para parar o acionamento dessa máquina, a frequência do fornecimento é gradualmente reduzida.
- No processo, a velocidade instantânea do sistema de acionamento é maior que a velocidade síncrona instantânea por causa da inércia do sistema de acionamento.
- Como resultado, a máquina de indução causará a inversão do fluxo de energia e a energia cinética do sistema de acionamento será suprida de volta para o fornecimento.
- Esse processo é conhecido como "**Frenagem Regenerativa**" (*i.e., regenerative breaking*).



(c) Generating
 $n > n_s$
 $s < 0$

Fig.: Modo de operação gerador.

Modos de Operação

- **Plugging (Dissipador)**

- Se o motor CC for ajustado para que o sistema rotacione em uma **direção OPOSTA ao sentido de rotação do campo girante do estator** (figura a seguir), então o torque produzido será na direção do campo girante e oposto ao sentido de giro do rotor;
- Este torque é um **torque de FRENAGEM**;
- Este modo de operação é utilizado algumas vezes em sistemas de acionamento que requer parada abrupta da máquina elétrica;
- Suponha uma máquina de indução rotacionando em regime permanente. Se a sequência de fase que alimenta o estator muda abruptamente, o campo girante do estator se opõe a rotação do rotor, produzindo uma operação *plugging*;
- O motor irá para **velocidade zero** rapidamente e irá acelerar na direção oposta, a menos que o suprimento seja desconectado na velocidade zero.

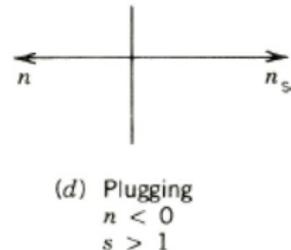


Fig.: Modo de operação plugging.

Modos de Operação

- Os três modos de operação e o perfil de torque típico de máquinas de indução nas várias faixas de velocidade de rotação estão ilustradas a seguir:

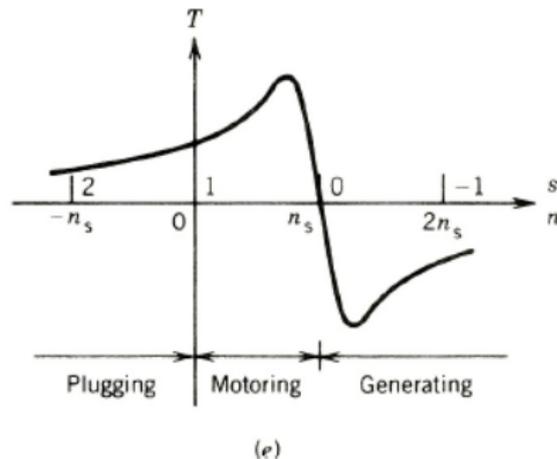


Fig.: Três modos de operação de máquina de indução.

Teste de Rotor Sem Carga, Rotor Bloqueado e Circuito Equivalente

Teste de Rotor Sem Carga, Rotor Bloqueado e Circuito Equivalente

- .

Desempenho de Máquinas de Indução

Desempenho de Máquinas de Indução



Partida de Motor de Indução

Partida de Motor de Indução

- .

Motor de Indução Linear (MIL)

Motor de Indução Linear (MIL)



PEA3391 - Máquinas Elétricas

Aula 01 - Máquinas de Indução (Assíncronas)
Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos

São Paulo - junho de 2020

