

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

As máquinas de corrente alternada são geradores que convertem energia mecânica em energia elétrica e motores que executam o processo inverso.

As duas maiores classes de máquinas CA são:

- ❖ Máquinas síncronas
- ❖ Máquinas de indução

Na máquina síncrona, a corrente de campo é suprida por uma fonte CC separada.

No caso da máquina de indução ocorre ação transformadora em virtude da indução de corrente em um determinado enrolamento.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## **Construção da máquina de indução**

O enrolamento de armadura é localizado no estator e pode ser conectado a uma fonte monofásica ou polifásica CA.

OBS: Para esse tipo de máquina, o rotor não é excitado através de corrente contínua.

Assim como a máquina de corrente contínua, a máquina de indução é duplamente excitada, entretanto há fluxo de corrente alternada em ambos enrolamentos, tanto o estator quanto o rotor.

Deve-se observar que mesmo operando como motor ou como gerador, a máquina de indução requer que a armadura seja conectada a uma fonte CA.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## **Construção da máquina de indução**

O enrolamento de armadura é localizado no estator e pode ser conectado a uma fonte monofásica ou polifásica CA.

OBS: Para esse tipo de máquina, o rotor não é excitado através de corrente contínua.

Assim como a máquina de corrente contínua, a máquina de indução é duplamente excitada, entretanto há fluxo de corrente alternada em ambos enrolamentos, tanto o estator quanto o rotor.

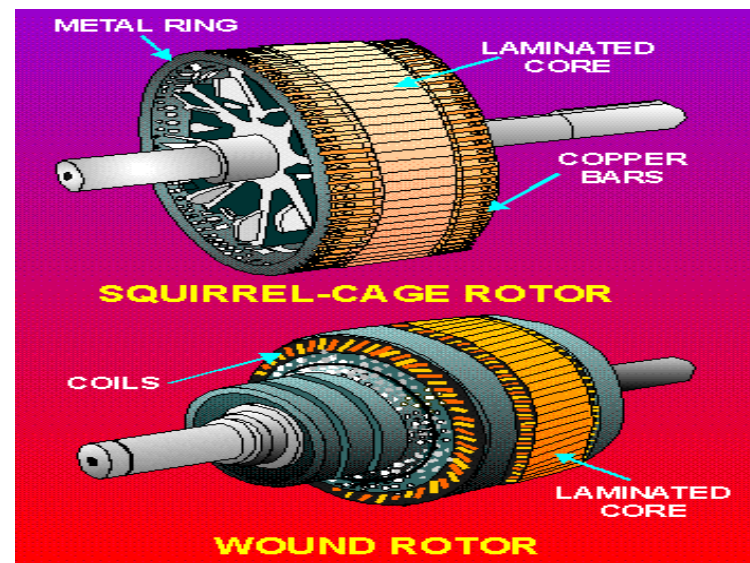
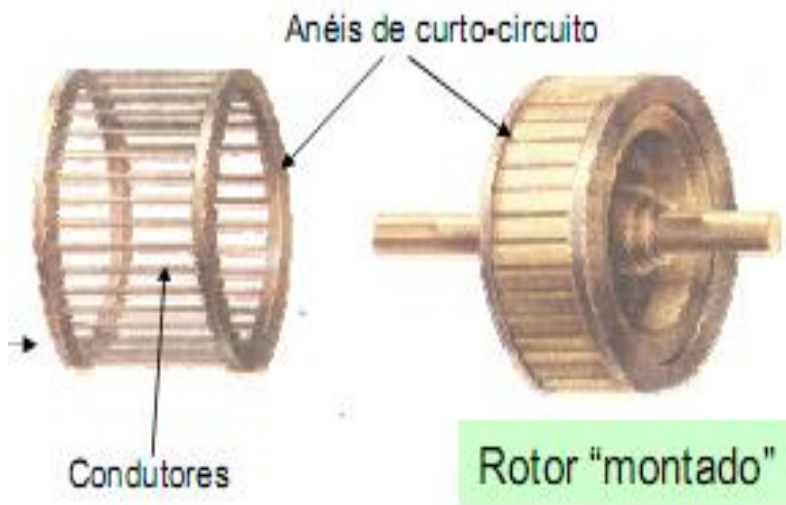
Deve-se observar que mesmo operando como motor ou como gerador, a máquina de indução requer que a armadura seja conectada a uma fonte CA.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Tipos de rotores

### 1) Rotor tipo gaiola de esquilo

Os condutores do rotor estão curto-circuitados em cada terminal por anéis terminais contínuos.



# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## 2) Rotor bobinado

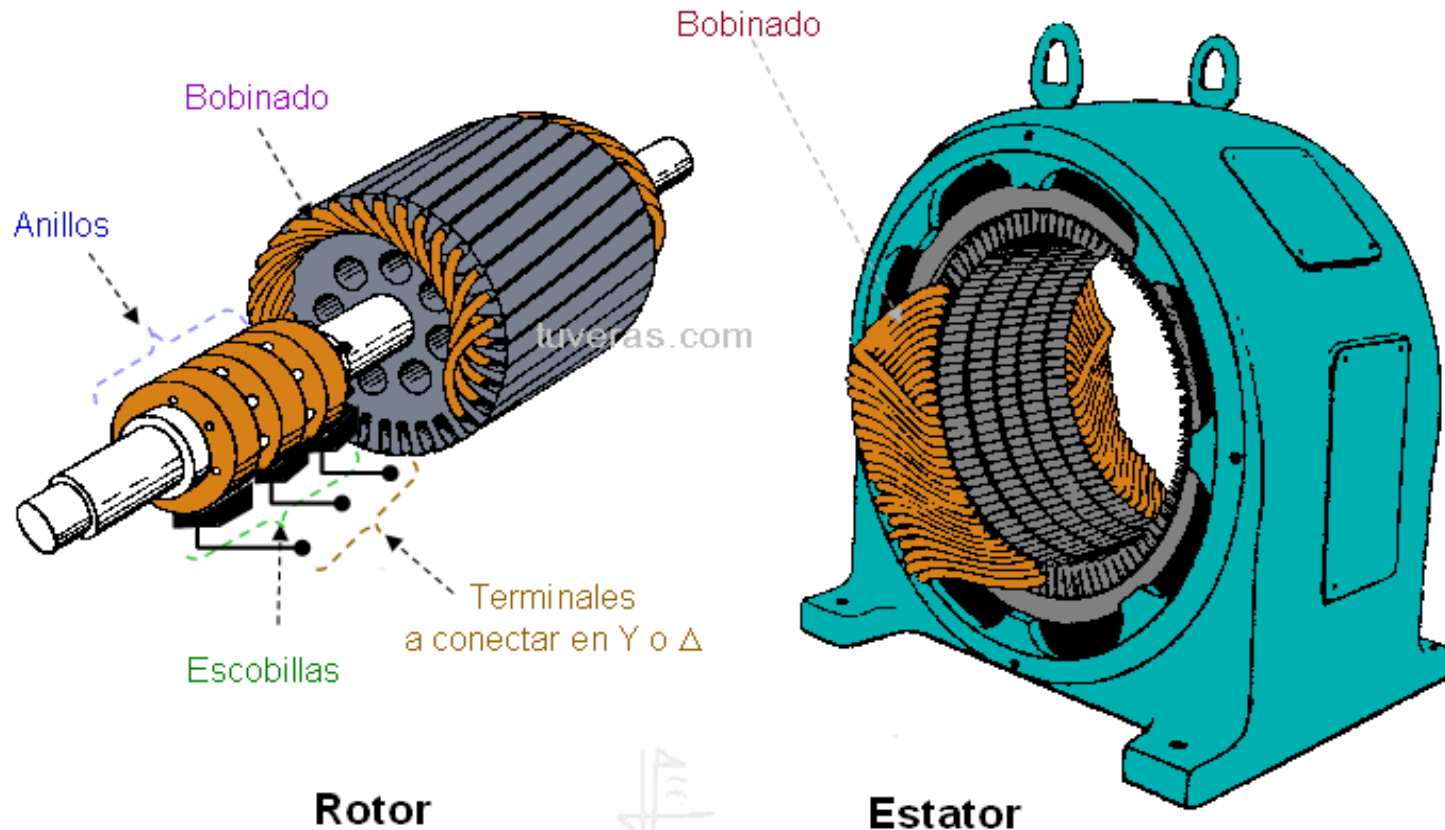
Nesse tipo de rotor os condutores de cobre são colocados em ranhuras (fendas) isoladas do núcleo de ferro e podem ser ligados em delta ou em estrela.

Cada terminal do enrolamento é levado a anéis coletores que são isolados do eixo do rotor.

Usualmente um resistor trifásico equilibrado variável é ligado aos anéis coletores através das escovas, como meio de variar a resistência total do rotor por fase.

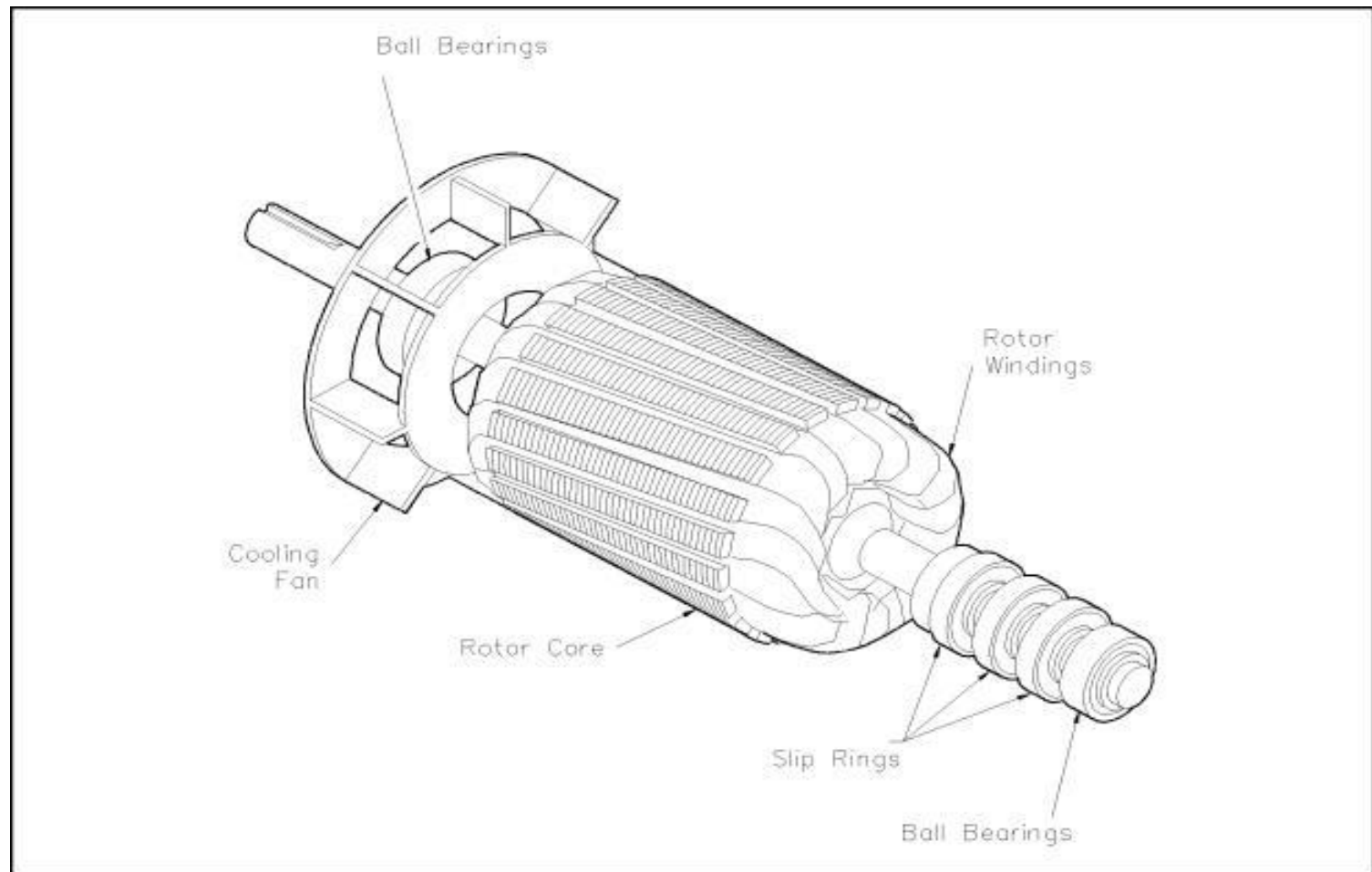
# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## 2) Rotor bobinado



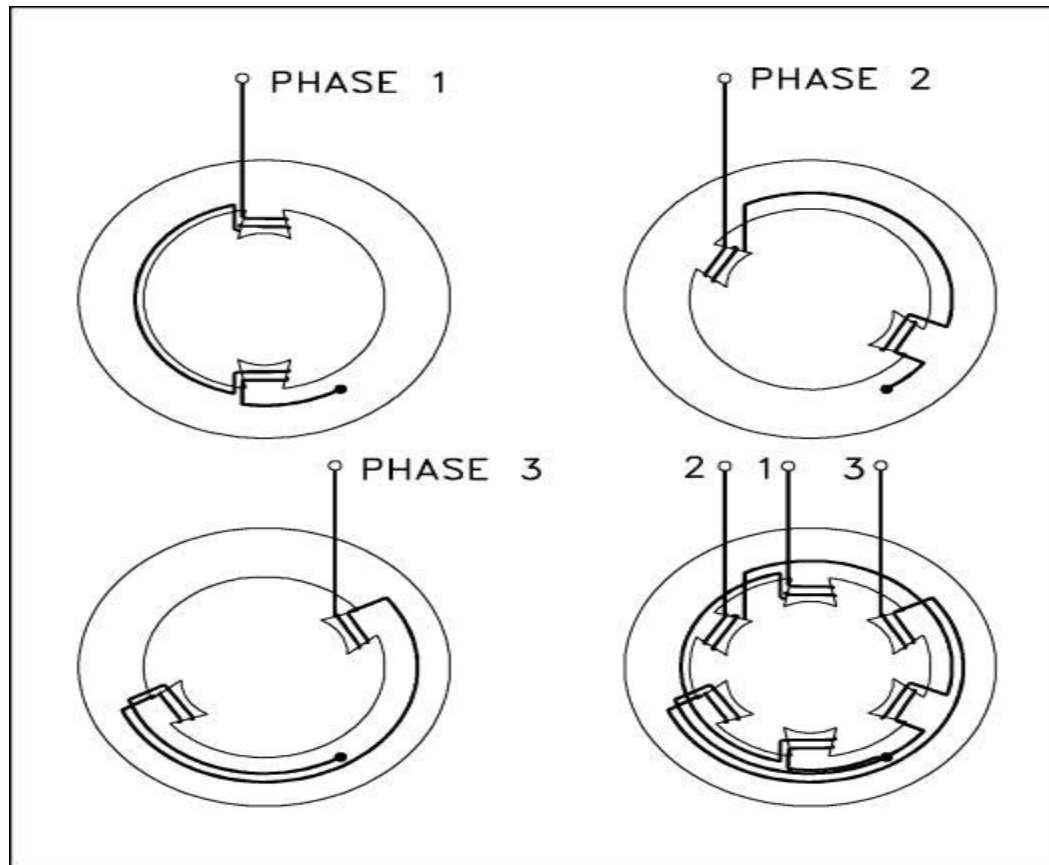
# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## 2) Rotor bobinado



# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Enrolamento trifásico no estator





# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## **Campo magnético girante**

Se um conjunto de corrente trifásica balanceada flui através de um conjunto de enrolamentos trifásicos distribuídos, um campo magnético de amplitude e velocidade constantes será produzido no entreferro (air gap) e induzirá correntes no circuito do rotor para produzir torque.

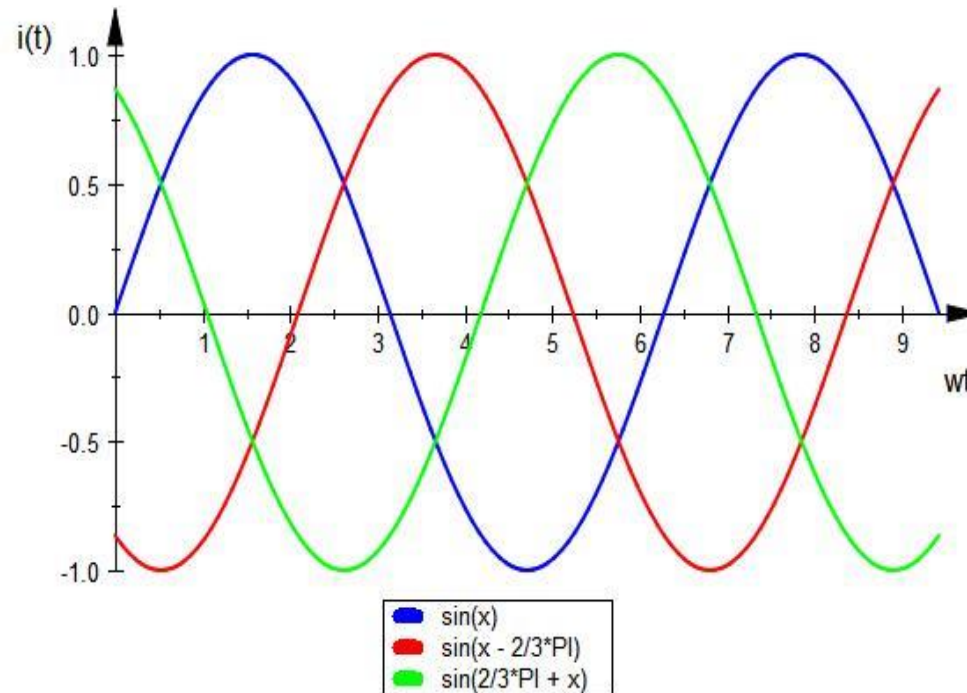
Quando uma corrente flui através de uma determinada bobina de fase, ela produz uma força magnetomotriz ou intensidade magnetizante (campo  $H$ ) distribuída senoidalmente orientada ao longo do respectivo eixo da bobina de fase.

Ao fluir uma corrente alternada através da bobina, ela produz um campo magnético pulsante cuja amplitude e direção dependem do valor instantâneo da corrente que flui através do enrolamento.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

Método gráfico – Análise por fasor



# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

Cada corrente conforme gráfico do slide anterior produzirá um vetor intensidade de campo magnético.

A corrente que flui por cada fase (1), (2) ou (3) produzirá um vetor intensidade de campo magnético em cada uma:

$$\vec{H}_1(t) = [H_M \sin(\omega t)] \angle 0^\circ$$

$$\vec{H}_2(t) = [H_M \sin(\omega t - 120^\circ)] \angle 120^\circ$$

$$\vec{H}_3(t) = [H_M \sin(\omega t - 240^\circ)] \angle 240^\circ$$

Observar que o módulo do vetor intensidade de campo magnético varia com o tempo, pois depende do valor da corrente elétrica. Entretanto a direção de cada vetor permanece constante, pois está relacionada com o arranjo do enrolamento da fase no estator.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

Por exemplo, no tempo  $\omega t = 0^\circ$  o vetor intensidade de campo magnético da fase 1 será:

$$\vec{H}_1(t) = 0$$

O campo magnético para fase 2 será igual:

$$\vec{H}_2(t) = [H_M \sin(0 - 120^\circ)] \angle 120^\circ$$

$$\vec{H}_2(t) = [H_M \sin(-120)] \angle 120$$

O campo magnético para a fase 3 será igual:

$$\vec{H}_3(t) = [H_M \sin(0 - 240)] \angle 240^\circ$$

$$\vec{H}_3(t) = [H_M \sin(-240)] \angle 240^\circ$$

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

O campo magnético resultante total nesse instante será igual a :

$$\vec{H}_R(t) = 0 + \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} H_M \right) \angle 120^\circ + \left( \frac{\sqrt{3}}{2} H_M \right) \angle 240^\circ$$

$$\vec{H}_R(t) = 1,5 H_M \angle -90^\circ$$

Fazendo os mesmos cálculos em outro instante de tempo teremos a mudança na direção do vetor intensidade de campo magnético.

Para  $\omega t = 90^\circ$  os valores de corrente nesse instante serão modificados e conseqüentemente mudarão também o valor do vetor intensidade de campo magnético de cada fase.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

Por exemplo, no tempo  $\omega t = 0^\circ$  o vetor intensidade de campo magnético da fase 1 será:

$$\vec{H}_1(t) = H_M \angle 0^\circ$$

O campo magnético para fase 2 será igual:

$$\vec{H}_2(t) = [H_M \sin(90 - 120^\circ)] \angle 120^\circ$$

$$\vec{H}_2(t) = [H_M \sin(-30)] \angle 120^\circ$$

O campo magnético para a fase 3 será igual:

$$\vec{H}_3(t) = [H_M \sin(90^\circ - 240^\circ)] \angle 240^\circ$$

$$\vec{H}_3(t) = [H_M \sin(-150^\circ)] \angle 240^\circ$$

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Campo magnético girante

O campo magnético resultante total nesse instante será igual a :

$$\vec{H}_R(t) = \vec{H}_1(t) + \vec{H}_2(t) + \vec{H}_3(t)$$

$$\vec{H}_R(t) = H_M \angle 0^\circ + [H_M \sin(-30)] \angle 120^\circ + [H_M \sin(-150^\circ)] \angle 240^\circ$$

$$\vec{H}_R(t) = 1,5H_M \angle 0^\circ$$

**OBS: EMBORA A DIREÇÃO DO CAMPO RESULTANTE TOTAL TENHA MUDADO, A MAGNITUDE PERMANECEU CONSTANTE. O CAMPO MAGNÉTICO TEM MÓDULO CONSTANTE ENQUANTO GIRA NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.**

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Tensão induzida

Sabemos que quando correntes polifásicas balanceadas fluem através de um conjunto de enrolamentos polifásicos distribuídos, um campo magnético rotaciona no air gap da máquina.

Esse campo magnético induzirá tensões alternadas nos enrolamentos da máquina.

$$E_{\text{rms}} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi_p$$

É a tensão rms por fase que tem a mesma forma que a tensão induzida em transformadores.

Entretanto, em uma máquina real cada enrolamento é distribuído em um número de slots (ranhuras) na superfície do estator. Existe um fator, denominado de fator de enrolamento ( $K_w$ ) que deve ser colocado na fórmula acima.

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



# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## OPERAÇÃO COM ROTOR BLOQUEADO

Considere uma máquina de indução de rotor bobinado cujo circuito é mantido em aberto. Se os enrolamentos trifásicos do estator são conectados a uma fonte trifásica, um campo magnético rotativo será produzido no entreferro (air gap).

Este campo gira na velocidade síncrona e induzirá tensões em ambos enrolamentos do estator e do rotor na mesma frequência  $f_1$  (frequência do sistema de suprimento)

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \phi_p \cdot K_{w1} \longrightarrow \text{ESTATOR}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \phi_p \cdot K_{w2} \longrightarrow \text{ROTOR}$$

Considerando que os fatores de enrolamentos para o estator e para o rotor são iguais tem-se que:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## **OPERAÇÃO NORMAL (EM ROTAÇÃO)**

Se os enrolamentos do estator são conectados a uma fonte trifásica e o circuito do rotor estiver fechado, tensões induzidas nos enrolamentos do rotor produzirão correntes no rotor que interagem com campo do air gap para produção de torque.

De acordo com a Lei de Lenz, o rotor gira na direção do campo rotativo tal que a velocidade relativa entre o campo girante e os enrolamentos diminua. O rotor então alcança a velocidade de regime ( $n$ ) que é menor que a velocidade síncrona ( $n_s$ ), a qual é velocidade do campo rotativo que gira no air gap.

OBS: Se  $n=n_s$  não haverá tensão induzida e corrente no circuito do rotor e conseqüentemente não existirá torque.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## OPERAÇÃO NORMAL (EM ROTAÇÃO)

### ESCORREGAMENTO (s)

A diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona é chamada de *escorregamento*.

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

Situando sobre o rotor, é como se o rotor estivesse “movendo” atrás do campo girante com velocidade de escorregamento (*slip rpm*).

$$\text{slip rpm} = n_s - n = s \cdot n_s$$

A frequência  $f_2$  da tensão e da corrente induzidas no circuito do rotor correspondente a essa velocidade de escorregamento, pois esta é a velocidade relativa entre o campo girante e os enrolamentos do rotor.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## OPERAÇÃO NORMAL (EM ROTAÇÃO)

A frequência é dada então por:

$$f_2 = \frac{p}{120} \cdot (n_s - n)$$

$$f_2 = \frac{p}{120} \cdot (n_s - n)$$

$$f_2 = \frac{p}{120} \cdot s \cdot n_s$$

$$f_2 = s \cdot f_1$$

A frequência  $f_2$  também é chamada de frequência de escorregamento. A tensão induzida no circuito do rotor sobre um escorregamento ( $s$ ) é dada por:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_p \cdot K_{w2}$$

$$E_{2s} = 4,44 \cdot s f_1 \cdot N_2 \cdot \phi_p \cdot K_{w2}$$

$$E_{2s} = s \cdot [4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \phi_p \cdot K_{w2}]$$

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

Tensão induzida para um determinado escorregamento

Tensão induzida para o rotor bloqueado

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## OPERAÇÃO NORMAL (EM ROTAÇÃO)

As correntes induzidas no enrolamento trifásico do rotor também produzem um campo rotativo. Sua velocidade em rpm ( $n_2$ ) **com relação ao rotor** é:

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

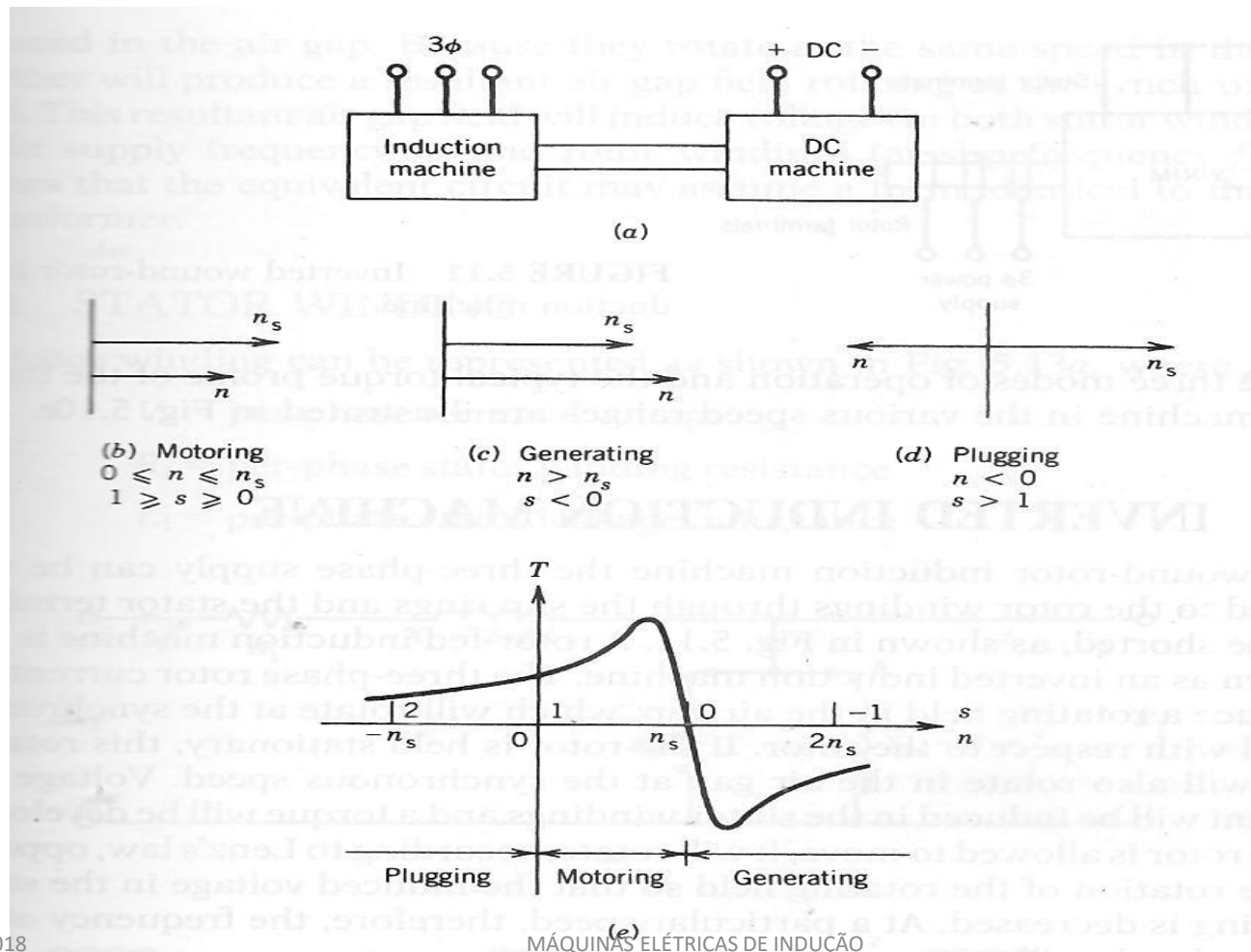
Como o rotor já está girando na velocidade de  $n$  rpm, então o campo do rotor induzido gira no air gap na velocidade:

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

OBS: Ambos campos do estator e campo magnético induzido do rotor giram no air gap na mesma velocidade síncrona. O campo magnético do estator e o campo magnético do rotor são estacionários um com relação ao outro. A interação entre esses dois campos é que produz o torque.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## TRÊS MODOS DE OPERAÇÃO



# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## **Circuito Equivalente**

Estudaremos o circuito equivalente por fase em regime permanente da máquina de indução.

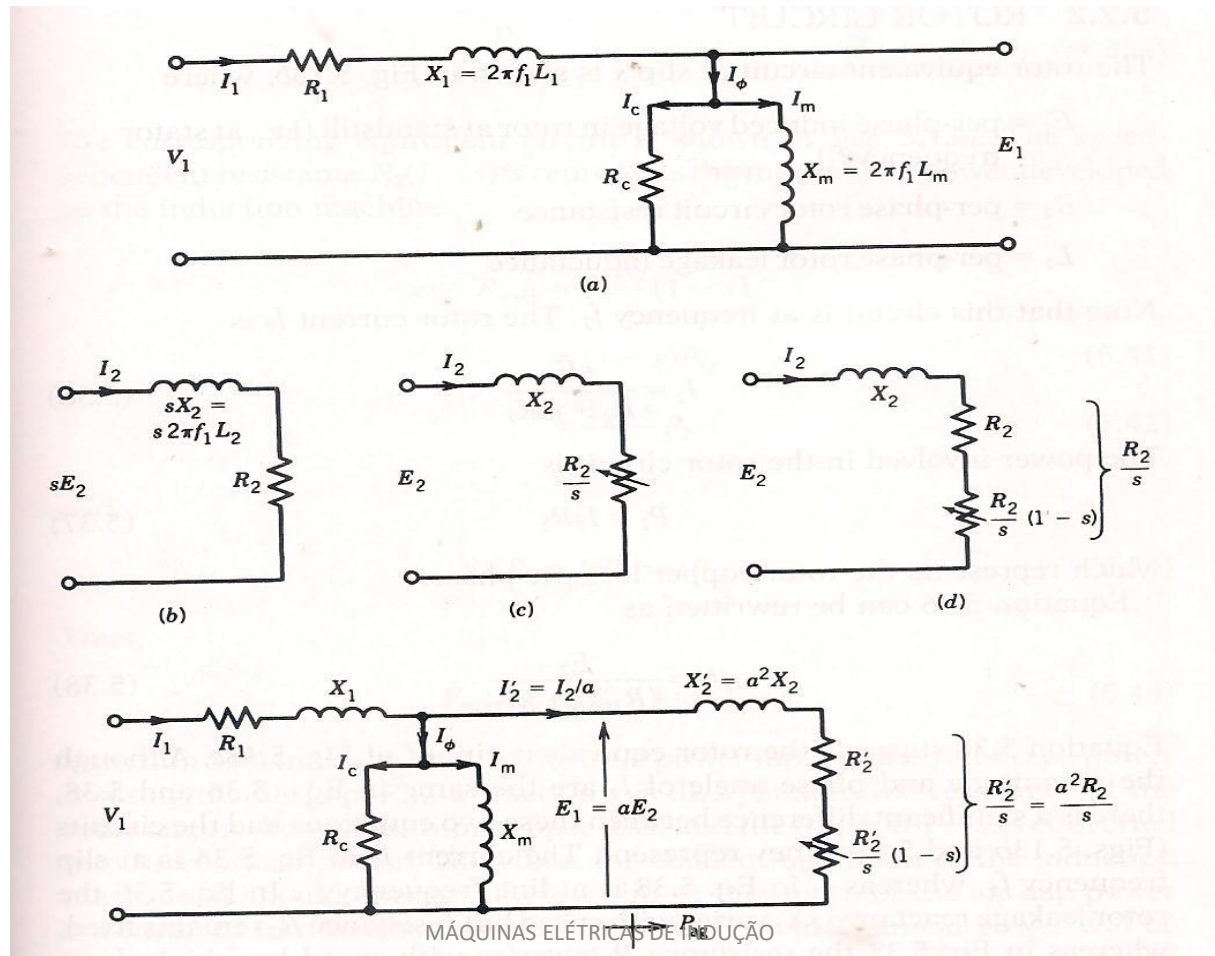
Por conveniência iremos considerar uma máquina com rotor do tipo bobinado trifásico

*Enrolamento do estator e do rotor representado através de circuito equivalente*

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Circuito Equivalente

Enrolamentos do estator e do rotor representado através de circuito equivalente





# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Circuito Equivalente

$V_1$  = tensão terminal por fase

$R_1$  = resistência por fase do enrolamento no estator

$L_1$  = indutância de dispersão por fase no enrolamento do estator

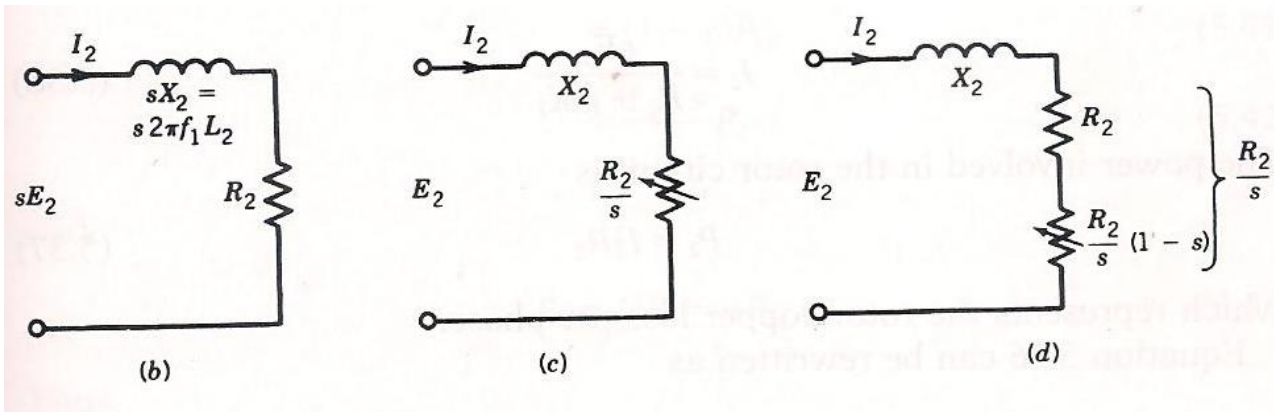
$E_1$  = tensão induzida por fase no enrolamento do estator

OBS: Circuito equivalente semelhante ao circuito equivalente do transformador. A diferença está relacionada com os valores de alguns parâmetros. A corrente de excitação é mais elevada na máquina de indução por causa do air gap. É de 30 a 50% da corrente nominal, dependendo do tamanho da máquina.

A reatância de dispersão é mais elevada por causa do air gap e também porque os enrolamentos do estator e do rotor são distribuídos.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Circuito Equivalente do Rotor



$E_2$  = tensão induzida por fase no rotor bloqueado (parado), isto é na frequência do estator

$R_2$  = resistência do circuito do rotor por fase

$L_2$  = indutância de dispersão por fase

Na figura (b) a corrente está na frequência do rotor  $f_2$ .

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Circuito Equivalente do Rotor

A corrente na frequência  $f_2$  é dada por:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{R_2 + jsX_2}$$

A potência envolvida no circuito do rotor é dada por:

$$P_2 = R_2 \cdot I_2^2$$

Qual a diferença?

A equação da corrente pode escrita como:

$$I_2 = \frac{E_2}{\left(\frac{R_2}{s}\right) + jX_2}$$

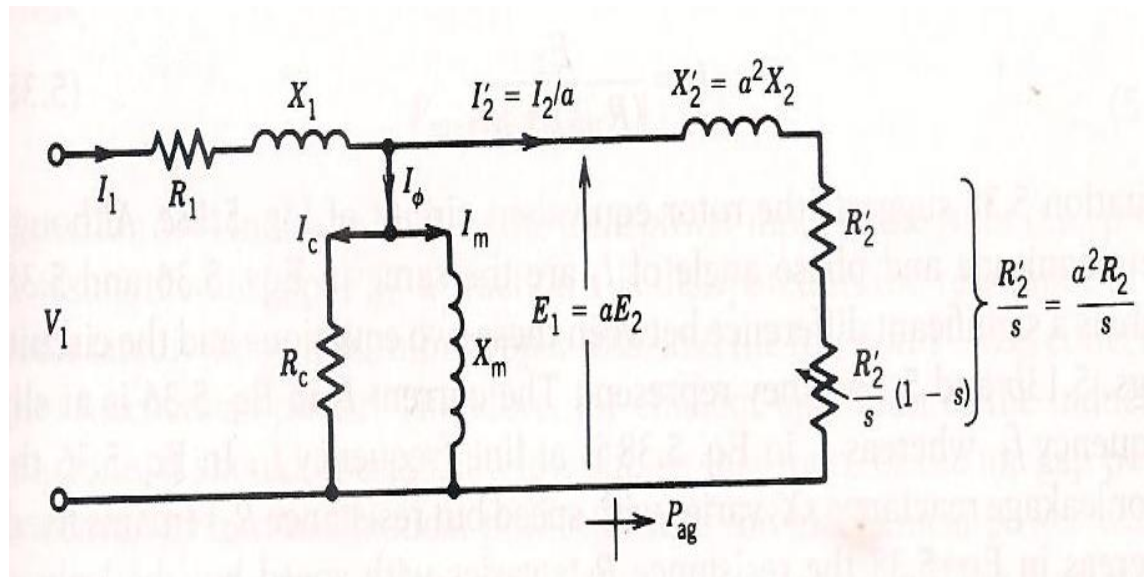
A potência por fase associada com o circuito equivalente da figura (c) é:

$$P = \left(\frac{R_2}{s}\right) \cdot I_2^2$$

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

## Circuito Equivalente

Desde que ambos os circuitos estão na mesma frequência  $f_1$  (frequência da rede) podemos dessa maneira uni-los.



O circuito equivalente do rotor passa a ser visto pelo estator.

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

A potência (P) é a potência que atravessa o entreferro (air gap) e inclui as perdas no cobre e a potência mecânica desenvolvida.

$$P = P_{ag} = \left( \frac{R_2}{s} \right) \cdot I_2^2$$

$$P = P_{ag} = I_2^2 \cdot \left[ R_2 + \frac{R_2}{s} \cdot (1-s) \right]$$

A resistência dependente da velocidade  $\left[ \frac{R_2}{s} \cdot (1-s) \right]$  representa a potência mecânica desenvolvida pela máquina de indução.

$$P_{mec} = I_2^2 \cdot \left[ \frac{R_2}{s} \cdot (1-s) \right]$$

$$P_{mec} = (1-s) \cdot P_{ag}$$

$$P_{mec} = \frac{1-s}{s} \cdot P_2$$

# MÁQUINA DE INDUÇÃO

A perda no cobre é:

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 = s \cdot P_{ag}$$

A potência que atravessa o air gap é dada por:

$$P = P_{ag} = I_2^2 \cdot \left[ R_2 + \frac{R_2}{s} \cdot (1-s) \right]$$

Pela equação acima:

- ❑ Do total da potência que entra no rotor (potência que atravessa o air gap), uma parte é dissipada na resistência do rotor e a outra parte é convertida em potência mecânica.
- ❑ Parte da potência mecânica será perdida (atrito+ventilação) e o restante será disponível como potência de saída no eixo da máquina.