

**ELE 0941 - ELETROTÉCNICA**

**CAPÍTULO 4 - MOTORES DE INDUÇÃO**

Máquinas elétricas fazem a interface entre um sistema mecânico e um sistema elétrico; sendo que o acoplamento entre os dois sistemas ocorre através do campo magnético.

São denominadas máquinas CA quando ligadas a um sistema de corrente alternada, e denominadas máquinas CC quando ligadas a um sistema de corrente contínua. Máquinas de corrente contínua (CC), máquinas de indução (assíncrona) e máquinas síncronas representam os três maiores grupos com aplicações práticas

As máquinas CA são ditas síncronas: quando a velocidade do eixo estiver em sincronismo com a frequência da tensão elétrica de alimentação e assíncronas: quando a velocidade do eixo estiver fora de sincronismo (velocidade diferente) com a tensão elétrica de alimentação, ou seja. Quando as correntes no rotor surgem somente devido ao efeito de indução, sem alimentação externa, a máquina é denominada de indução

Os motores têm como função transformar a energia elétrica em energia mecânica através de interações eletromagnéticas, onde a energia elétrica cria um eletroímã que varia o campo magnético. Nos dias de hoje tem-se pensado em como melhorar a eficiência, pensando também nos custos, para isso estuda-se os melhores isolamentos, elementos magnéticos mais eficientes, a melhora da condutibilidade entre outras características dos materiais.

Atualmente, a esmagadora maioria dos acionamentos industriais são feitos com motores de indução, além de representar um investimento muito menor se comparado aos outros tipos de motores elétricos, essas máquinas possuem confiabilidade elevada e características construtivas simples, o que resulta em robustez e poucos requisitos de manutenção, visto que não há contato com escovas ou contato direto entre rotor e estator.

Com o advento da eletrônica de potência, as desvantagens e dificuldades inerentes aos motores de indução como altas correntes de partida e velocidade essencialmente constante vem se tornando irrisórias, permitindo um maior controle quando condições mais rigorosas de torque ou velocidade são necessárias.

## I Motor de Indução Trifásico (MIT)

### 1.0 Construção

#### 1.1 Estator

O estator possui um pacote magnético cilíndrico, vazado e ranhurado internamente. Nas ranhuras são alojados os enrolamentos de campo. O pacote magnético é formado de lâminas de aço silício.

#### 1.2 Rotor

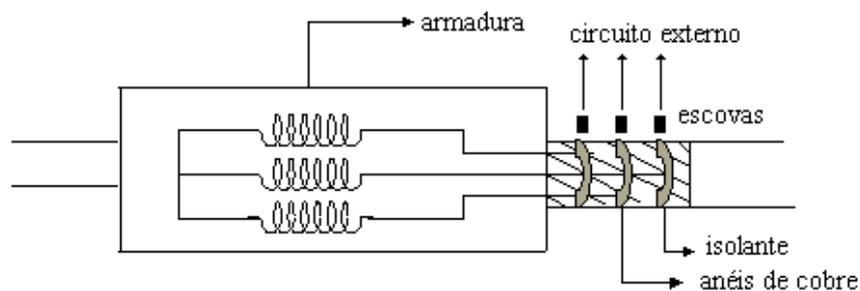
O rotor é formado por pacote magnético cilíndrico, ranhurado, feito também de chapas de aço silício. É onde se desenvolve o torque.

São usados dois tipos de construção.

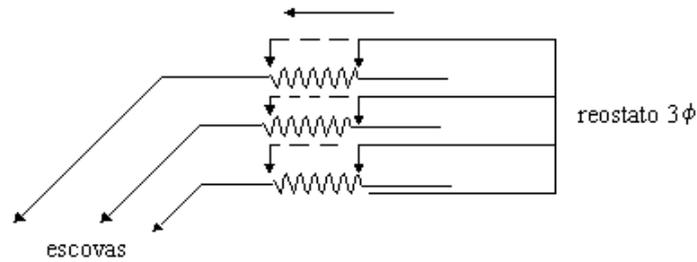
##### 1.2.1 Rotor Bobinado

Neste caso o rotor possui ranhuras abertas que recebem os enrolamentos de armadura. Cada fase dos enrolamentos possui um dos terminais ligados a anéis montados no eixo.

Para um sistema trifásico teremos:



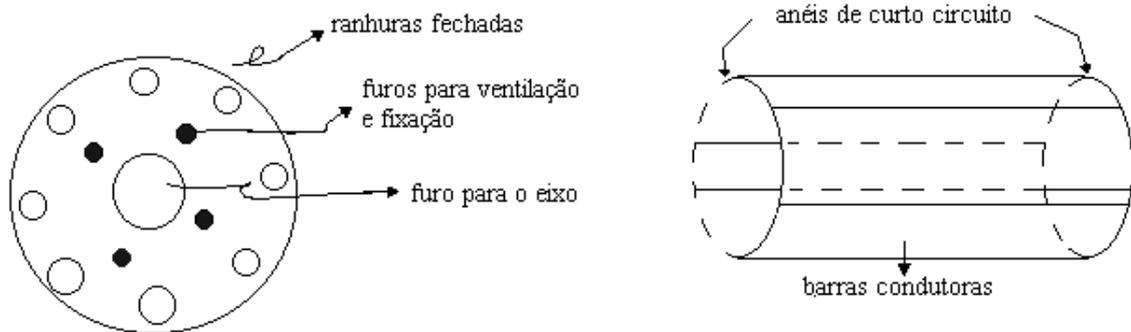
O circuito externo é composto por um reostato trifásico ( $3\phi$ ) que é inserido durante a partida e eliminado gradativamente à medida que o motor acelera.



∴ O fechamento dos enrolamentos (curto) é feito externamente

### 1.2.2 Rotor de Gaiola de Esquilo

As ranhuras são fechadas e nelas é injetado alumínio fundido, que, depois de resfriado, formarão barras condutoras no sentido axial. Estas barras têm seus terminais curto circuitados através de um anel, também fundido em alumínio.



A gaiola é alojada nas ranhuras do pacote magnético.

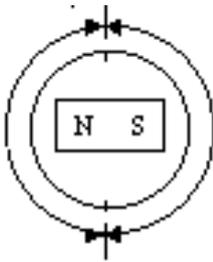
### 1.3 Carcaça

É feita de ferro, servindo de suporte para o estator e o rotor. A carcaça não faz parte do circuito magnético do estator.

### 2.0 Graus elétricos / Graus mecânicos

Por definição um par de pólos corresponde a 360° elétricos ou  $2\pi$  rad.

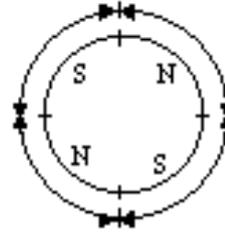
Máquina de 2 pólos:



$$P = 2$$

$$1^\circ \text{ mec} = 1^\circ \text{ e\acute{l}t.}$$

Máquinas de 4 pólos :

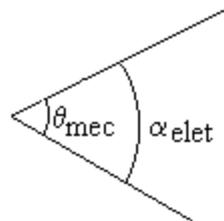


$$P = 4$$

$$1^\circ \text{ mec} = 2^\circ \text{ e\acute{l}t.}$$

Para uma máquina de “P” pólos temos:

$$\theta^\circ \text{ mec} = \frac{2}{P} \alpha^\circ \text{ el}$$



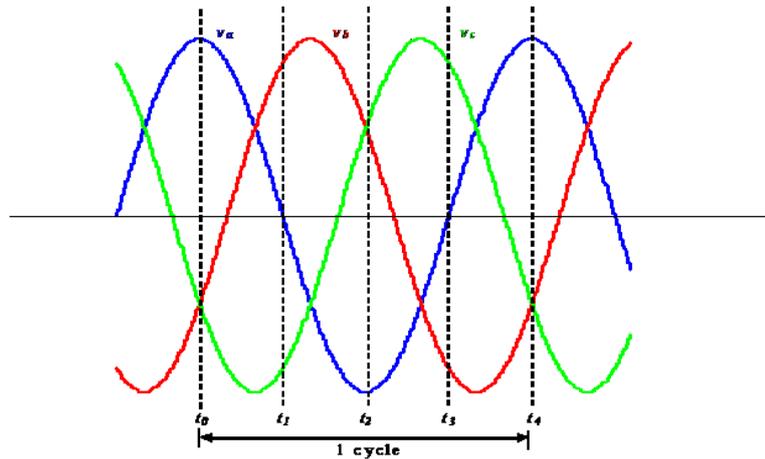
$$1^\circ \text{ mec} = \frac{P}{2}^\circ \text{ elet}$$

EXEMPLO: Quantos graus mecânicos equivalem à 180° elet. Para uma máquina com 8 pólos

$$P=8 \quad \phi^\circ \text{ mec} = \frac{2}{P} \alpha^\circ \text{ el} \longrightarrow \phi = \frac{2}{8} \times 180 = 45^\circ \text{ mec} . \quad \therefore 1^\circ \text{ mec} = 4^\circ \text{ elet}.$$

### 3.0 Campo Girante

Uma rede de alimentação trifásica balanceada possui tensões senoidais de mesma amplitude, porém defasadas no tempo de 120° elet.



Em cada instante, a soma das tensões das 3 fases é zero.

As bobinas (embobinamentos) do estator do motor de indução trifásico (MI3φ ou MIT) são idênticos e montados a 120° geométricos um do outro.

As bobinas são alimentadas por correntes elétricas trifásicas (defasadas 120° elet. entre si e com mesma amplitude).

$$i_a = I_{am} \text{ sen } (\omega t) \quad i_b = I_{bm} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) \quad i_c = I_{cm} \text{ sen } (\omega t + 120^\circ)$$

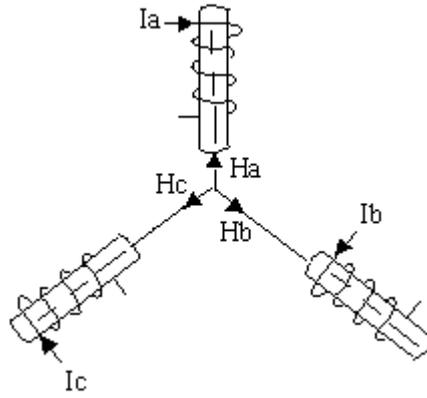
sendo  $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_m$

Como  $H$  é proporcional a  $I$ , temos

$$h_a = H_{am} \cdot \text{sen } (\omega t) \quad h_b = H_{bm} \cdot \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \quad h_c = H_{cm} \cdot \text{sen } (\omega t + 120^\circ)$$

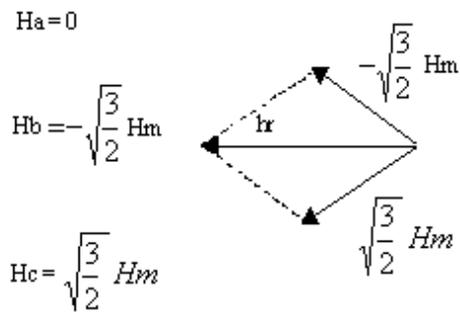
$$H_{am} = H_{bm} = H_{cm} = H_m$$

As bobinas de campo de um MI3φ, podem ser representados da seguinte forma.

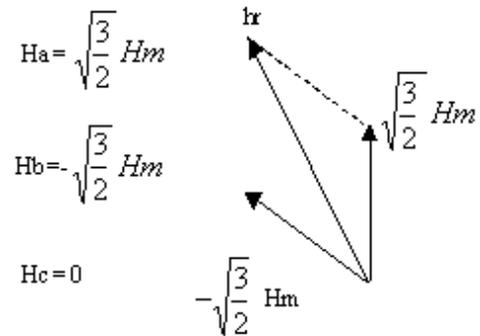


### 3.1 Estudo da direção do campo resultante ( $h_r$ ) para vários instantes

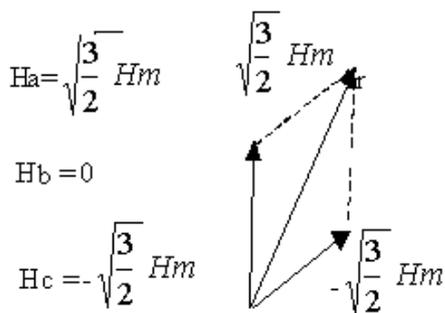
Para  $\omega t = 0$



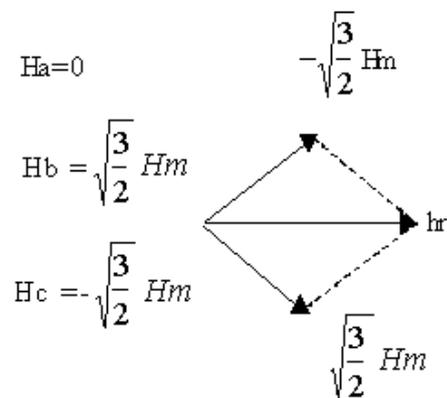
Para  $\omega t = 60^\circ$



Para  $\omega t = 120^\circ$



Para  $\omega t = 180^\circ$



Para  $\omega t = 360^\circ$ , volta-se à posição inicial.

Podemos determinar o valor de **hr** utilizando, por exemplo, a lei dos cossenos.

$$hr^2 = \left( \sqrt{\frac{3}{2}} H_m \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{3}{2}} H_m \right)^2 + 2 \left( \sqrt{\frac{3}{2}} H_m \right) \left( \sqrt{\frac{3}{2}} H_m \right) \cos(60)$$

$$hr^2 = \frac{3}{4} H_m^2 + \frac{3}{4} H_m^2 + 2 \frac{3}{4} H_m^2 \frac{1}{2} = \frac{9}{4} H_m^2$$

$$hr = \frac{3}{2} H_m$$

Observamos que a intensidade de campo resultante é constante (vale  $hr = \frac{3}{2} H_m$ ) e gira com velocidade  $\omega_s$ .

### 3.2 Velocidade síncrona

É a velocidade de giro do campo girante, definida como  $\omega_s$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f \left( \frac{\text{rad elet}}{\text{seg}} \right) = 2 \cdot \pi \cdot f \frac{2}{P} \left( \frac{\text{rad mec}}{\text{seg}} \right)$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{P} \frac{60}{2\pi} \text{ (rpm)} = \frac{120 \cdot f}{P}$$

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ (rpm)}$$

Campo girante é uma onda de f.m.m. que se desloca ao longo do entreferro com velocidade síncrona  $\omega_s = \frac{120 f}{P}$  formando “P” pólos girantes ao longo do entreferro.

Considerando a frequência de alimentação de 60 Hz pode-se montar a seguinte tabela:

Nº de pólos	2	4	6	8
$\omega_s$ (rpm)	3.600	1.800	1.200	900

#### 4.0 Princípio de Operação do Motor de indução trifásico

Quando os enrolamentos do estator (campo) são ligados a um sistema 3  $\phi$  balanceado de tensões, o campo girante é produzido. Neste instante a velocidade relativa entre o campo girante e gaiola do rotor é igual à velocidade síncrona do campo girante.

Nos condutores da gaiola são induzidas voltagens e como a gaiola forma diversos caminhos fechados, nela circulará corrente. Como consequência da circulação da corrente nos condutores da gaiola imersos no campo magnético do campo girante, há o aparecimento de torque sobre o rotor no sentido do campo girante. Se este torque motor for maior que o torque resistente, o motor parte.

O motor de indução não pode atingir a velocidade síncrona. Se tal ocorrer, a velocidade relativa entre o campo girante e o rotor se anula. Assim não há voltagem induzida na gaiola, anulando, portanto o torque.

Portanto, o MI3  $\phi$  opera sempre abaixo da velocidade síncrona mantendo sempre uma velocidade relativa com o campo girante.

Por isso, o MI3  $\phi$  é conhecido como motor assíncrono.

Observe também que a energia levada do estator para o rotor é de forma indutiva, sem nenhuma conexão elétrica.

#### 5.0 Escorregamento 'S' (Slip)

Velocidade de escorregamento é a velocidade relativa entre o rotor e o campo girante.

$$\omega_{esc} = \omega_s - \omega_r$$

Definimos escorregamento pela relação

$$S = \frac{\omega_{esc}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad \text{ou} \quad \omega_r = (1 - S) \omega_s$$

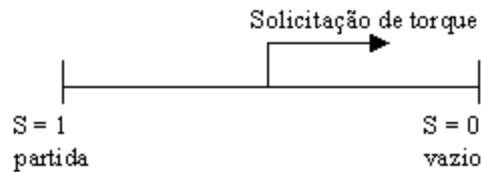
Na partida (instante), a velocidade relativa entre o rotor e o campo girante é máxima, ou seja:

$$\omega_r = 0 \quad S = 1$$

Se o rotor alcançar a velocidade síncrona

$$\omega_r = \omega_s \longrightarrow S = 0$$

Em carga:



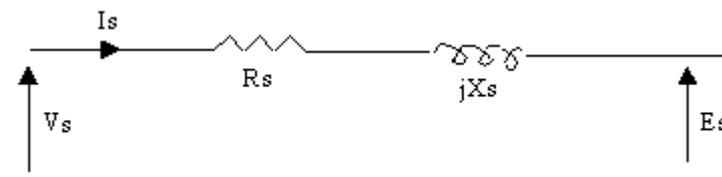
Com isto podemos concluir que  $0 \leq S \leq 1$  e ainda, a f.e.m. induzida na armadura tem módulo e frequência proporcionais ao escorregamento.

$$\mathbf{r_b} \rightarrow \text{rotor bloqueado} \quad E_r = S \cdot E_{rb} \quad f_r = S f_{rb}$$

## 6.0 Circuito equivalente do MI3φ

### 6.1 No Estator

Circuito elétrico equivalente, por fase, do estator.



$$\dot{V}_s = \dot{E}_s + (R_s + jX_s) \cdot \dot{I}_s$$

Onde;

$\dot{V}_s$  - Tensão por fase aplicada ao motor.

$\dot{E}_s$  - Força contra eletromotriz (tensão induzida) nos enrolamentos do estator.

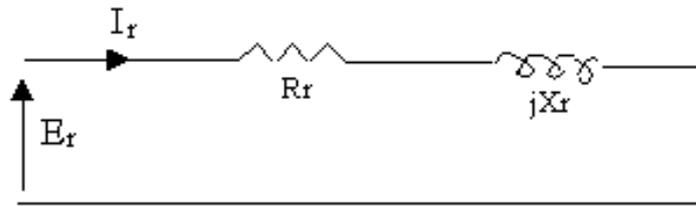
$\dot{I}_s$  - Corrente no estator

$R_s$  - Resistência ôhmica dos enrolamentos do estator

$X_s$  - Reatância indutiva devido aos fluxos dispersos no enrolamento do estator.

## 6.2 No Rotor

Circuito elétrico equivalente, por fase, do rotor.



$$E_r = (R_r + jX_r) I_r \quad X_r = 2\pi f_r L_r$$

Devemos atentar para o fato de que as tensões e correntes induzidas no rotor são variáveis durante o processo de aceleração, uma vez, que são funções da velocidade do rotor.

Em particular no caso do rotor bloqueado as grandezas tem valores constantes e tornam-se função da frequência do estator (rede  $\pm$  comum 60 Hz).

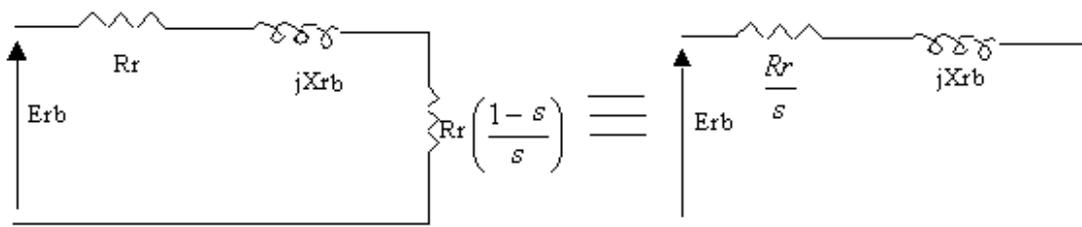
$$\therefore E_r = S E_{rb} \quad X_r = S X_{rb} \quad X_{rb} = 2\pi \cdot f_s \cdot L_r$$

$$\text{logo} \quad S \cdot E_{rb} = [R_r + j S X_{rb}] \cdot I_r \Rightarrow E_{rb} = \left[ \frac{R_r}{S} + j X_{rb} \right] \cdot I_r$$

Onde  $\frac{R_r}{S}$  representa a resistência  $R_r$  próprio dos enrolamentos do rotor em série com uma resistência fictícia  $R_c$ , que traduz o comportamento da carga no eixo do rotor.

$$R_c = R_r \left[ \frac{1 - S}{S} \right]$$

O circuito equivalente, por fase do rotor fica:

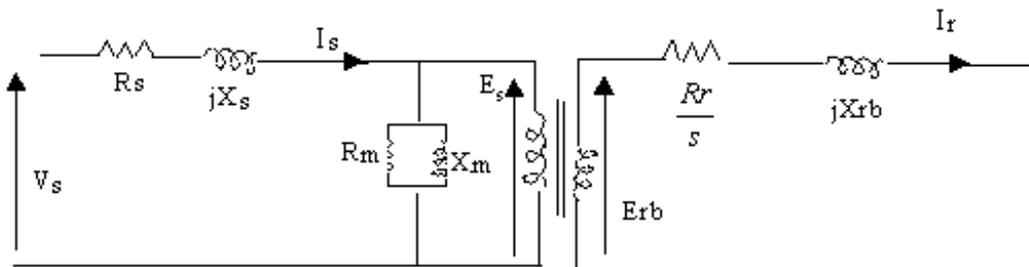


### 6.3 Circuito equivalente completo por fase.

Agrupando os circuitos do estator e do rotor e introduzindo no circuito do estator o ramo magnetizante, constituído de uma resistência  $R_m$ , traduzindo as perdas magnéticas em paralelo com uma reatância  $jX_m$  responsável pela produção do fluxo magnético girante.

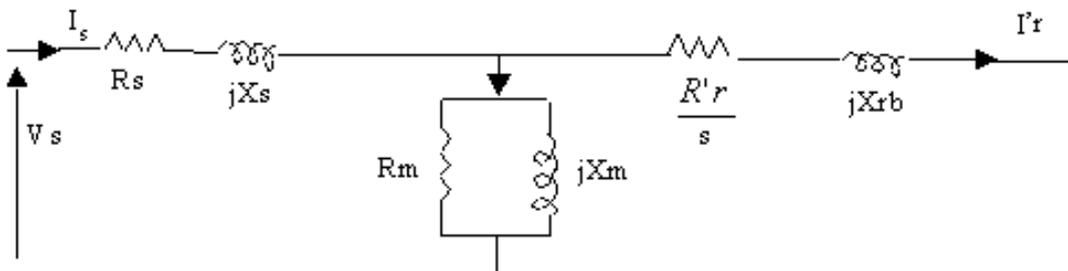
Como a transferência de energia do estator para o rotor se faz de forma indutiva, podemos assemelhar esta parte do circuito a um transformador ideal.

Então resulta:

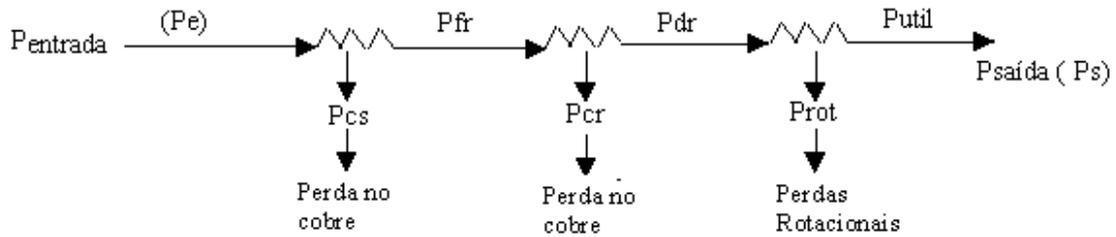


### 6.4 Circuito equivalente do MI3φ por fase, referido ao estator.

A fim de obter o circuito equivalente acoplado eletricamente é necessário expressar as quantidades do rotor como referidas ao estator, através da razão de transformação  $E_s$  e  $E_{rb}$ , resultando em:



## 7.0 Análise do circuito equivalente do MI3φ



### 7.1 Potência absorvida da rede ou potência de entrada ou potência de alimentação

$$P_e = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos\varphi$$

### 7.2 Perda no cobre do estator

$$P_{cs} = 3 \cdot R_s \cdot (I_s)^2$$

### 7.3 Potência fornecida no rotor

$$P_{fr} = P_e - P_{cs} = 3 \cdot \frac{R'_r}{S} \cdot (I'_r)^2$$

### 7.4 Perdas no cobre do rotor

$$P_{cr} = 3 \cdot R'_r \cdot (I'_r)^2$$

### 7.5 Potência desenvolvida pelo rotor ou potência interna

$$P_{dr} = P_{fr} - P_{cr} = 3 \frac{R'_r}{S} (1-S) \cdot (I'_r)^2 = (1-S)P_{fr}$$

### 7.5 Torque interno

$$T_i = \frac{P_{int}}{\omega_r} = \frac{P_{dr}}{\omega_r} = \frac{P_{dr}}{(1-S)\omega_s} = \frac{P_{fr}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{R'_r}{S} (I'_r)^2$$

### 7.7 Perdas rotacional a vazio (no ensaio a vazio medimos $P_o$ , $V_o$ , $I_o$ )

$$P_{rot} = P_o - P_{cs} = P_o - R_s \cdot (I_s)^2 = P_o - R_s \cdot (I_o)^2$$

### 7.8 Torque de Perdas

$$T_{\text{perdas}} = \frac{P_{\text{rot}}}{\omega r}$$

### 7.9 Potência útil ou potência de saída (Ps) ou potência no eixo

Seu valor nominal (plena carga) é dado de placa do motor

$$P_u = P_{\text{dr}} - P_{\text{rot}}$$

### 7.10 Torque útil ou de saída

$$T_u = T_i - T_{\text{perdas}}$$

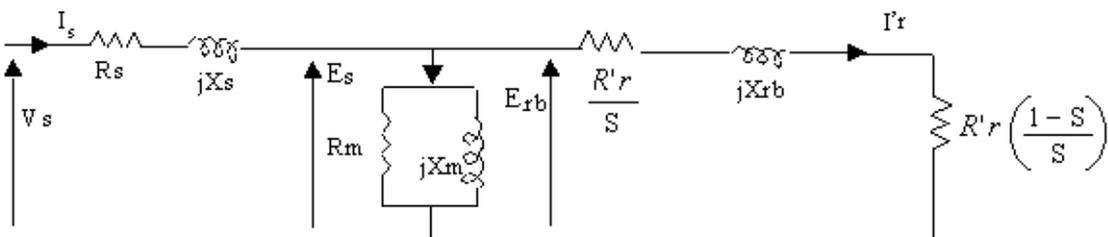
### 7.11 Rendimento

$$\eta (\%) = \frac{P_s}{P_e} \cdot 100$$

obs: 1 CV = 735 W

1 HP = 746 W

## 8.0 Equação Geral do Torque (ou conjugado)



Potência ativa  $\rightarrow P = R \cdot I^2$

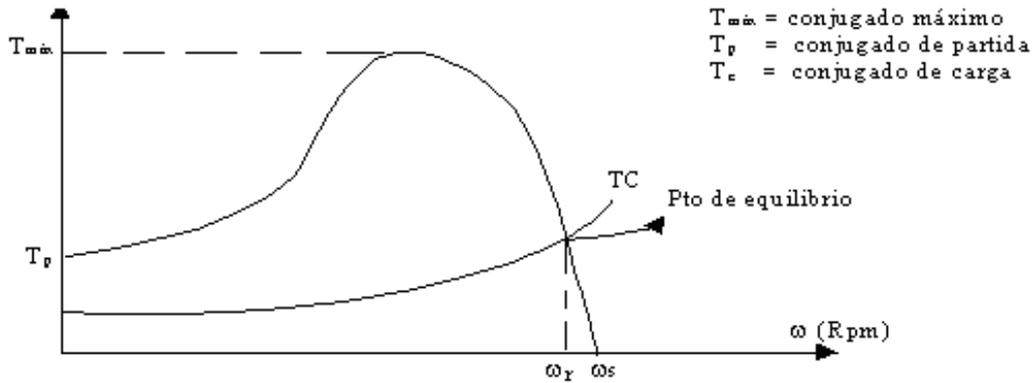
Potência mecânica  $\rightarrow P_{\text{mec}} = R_c \cdot P_{\text{mec}} = R_c \cdot (I'_r)^2 = R'_r \left( \frac{1-S}{S} \right) \cdot (I'_r)^2$

Torque  $\rightarrow T = 3 \cdot \frac{P_{\text{mec}}}{\omega r} = \frac{3}{\omega s \cdot (1-S)} \cdot R'_r \left( \frac{1-S}{S} \right) \cdot (I'_r)^2 = \frac{3 \cdot R'_r}{\omega s \cdot S} \cdot (I'_r)^2$

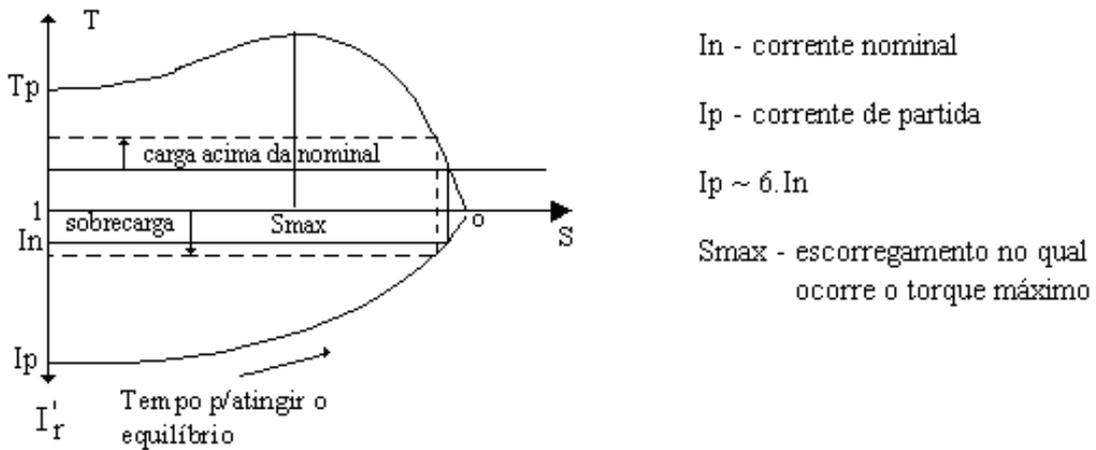
Como  $I'_r = \frac{E_{rb}}{|R'_r + jX'_{rb}|} = \frac{E_{rb}}{\sqrt{\left[ \frac{R'_r}{S} \right]^2 + [X'_{rb}]^2}} = \left[ \frac{S^2 \cdot (E_{rb})^2}{R'^2_r + (S \cdot X'_{rb})^2} \right]^2$

$$\therefore T = \frac{3}{\omega s} \cdot \frac{R'r}{S} \cdot \frac{S^2 \cdot (E_{rb})^2}{(R'r)^2 + (S \cdot X'_{rb})^2} = \frac{3}{\omega s} \cdot R'r \cdot \frac{S \cdot (E_{rb})^2}{R_r'^2 + (S \cdot X'_{rb})^2}$$

### 8.1 Característica T = f(ω)

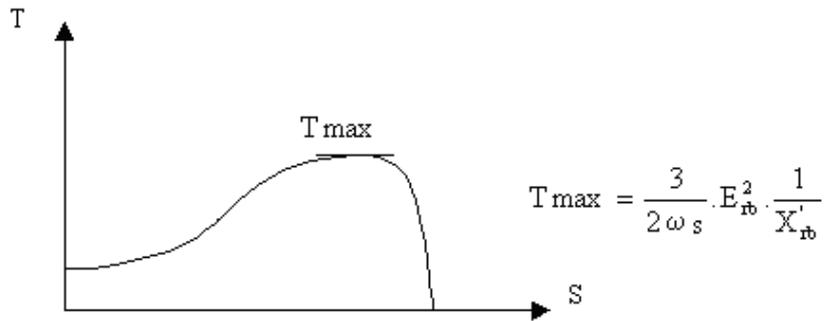


### 8.2 Características T = f(s) e I'r = f(s)



Na sobrecarga a corrente excede o valor nominal, o motor passa a ter aquecimento acima do permitido.

A máxima transferência de potência se dá quando:



## 9.0 Influência da tensão e da resistência do rotor sobre o conjugado (T) do motor.

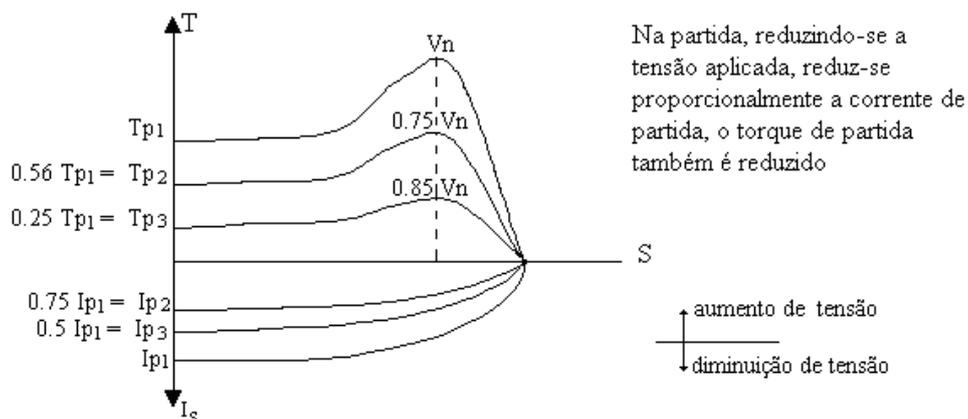
### 9.1 Influência da tensão

A menos de um pequeno erro podemos desprezar a queda de tensão sobre a impedância do estator  $I_s (R_s + j X_s)$  e tomamos.

$$V_s \cong E_{rB} \quad I_s = I_r \cong I'_r$$

$$\therefore T = \frac{3}{\omega_s} \cdot S \cdot R'_r \cdot \frac{(E_{rb})^2}{(R'_r)^2 + (S X'_{rb})^2} \cong \frac{3}{\omega_s} \cdot S \cdot R'_r \cdot \frac{V_s^2}{(R'_r)^2 + (S X'_{rb})^2} = V_s^2 \cdot cte$$

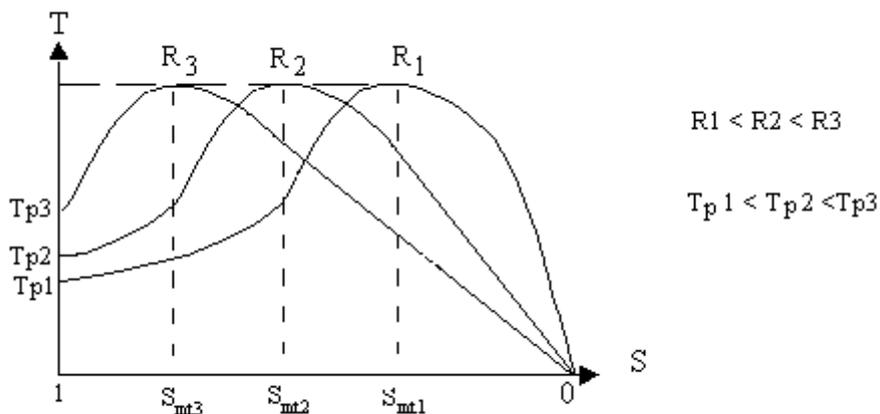
$$I_s \cong I'_r \cong \frac{V_s}{\left[ \frac{R'_r}{S} \right]^2 + [X'_{rb}]^2} = V_s \cdot cte$$



## 9.2 Influência da resistência do rotor (R'r)

$$\delta_{mt} = \frac{R'r}{X'_{rb}} \rightarrow \text{escorregamento no qual ocorre } T_{max} \text{ depende de } R'r \rightarrow \delta_{mt}$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_s} \cdot E_{rb}^2 \cdot \frac{1}{X'_{rb}} \rightarrow \text{valor de } T_{max} \text{ independente de } R'r$$



**Conclusão:** Se quisermos aumentar o torque do motor na partida, basta inserir resistência no circuito rotórico, (reostato).

À medida que o motor ganha velocidade a resistência deve ser retirada aos poucos.

Método interessante de se usar quando o motor deve partir em carga.

## 10.0 Sistemas Usuais de Partida dos Motores Assíncronos.

Sempre que possível, a partida de um motor trifásico, rotor em gaiola, deve ser direta, isto é, a plena tensão. Caso a partida direta não seja possível, quer por imposição da concessionária (>7,5 CV deve partir com tensão reduzida) quer por exigência da própria instalação, deve-se usar um sistema de partida indireta, com tensão reduzida para reduzir a corrente de partida.

### 10.1 Métodos de Partida do MI3φ

Corrente nominal do motor de indução trifásico – corrente de linha

$$I_N = I_L = \frac{\text{Potência Nominal no Eixo}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{P_{mec}}{\sqrt{3} V_{IL} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

$$I_{snom} \cong I'r \cong \frac{V_{Sn}}{\left[ \left( \frac{R'r}{S_n} \right)^2 + [X'_{rB}]^2 \right]^{1/2}}$$

No instante da partida do motor ( $\omega_r = 0$   $S = 1$ )

$$I_{spartida} = I'_r \cong \frac{V_{snom}}{R'r^2 + (X'rb)^2} \cong V_1 \cdot cte$$

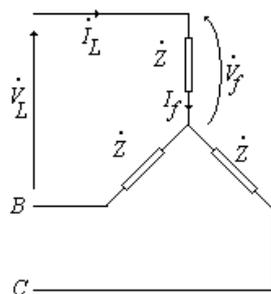
Para que o motor tenha condição de giro  $T_p > T_{carga\ mec}$

### 10.1.1 Partida com chave estrela-triângulo (Y - Δ)

O motor deve necessariamente possuir 6 terminais acessíveis e dispor de dupla tensão nominal, tal como 220/380V e 380/660V.

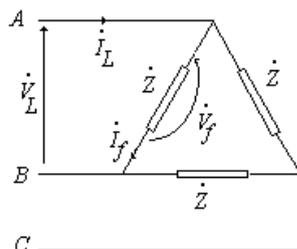
A tensão da rede deve necessariamente coincidir com a tensão em Δ do motor

Na partida o MI3 φ é ligado em estrela, após o transitório de partida os enrolamentos do estator tem as conexões externas mudada de Y para Δ.



$$V_{F_Y} = \frac{V_{L_Y}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{L_Y} = I_{F_Y} = \frac{V_{L_Y}}{\sqrt{3} Z}$$

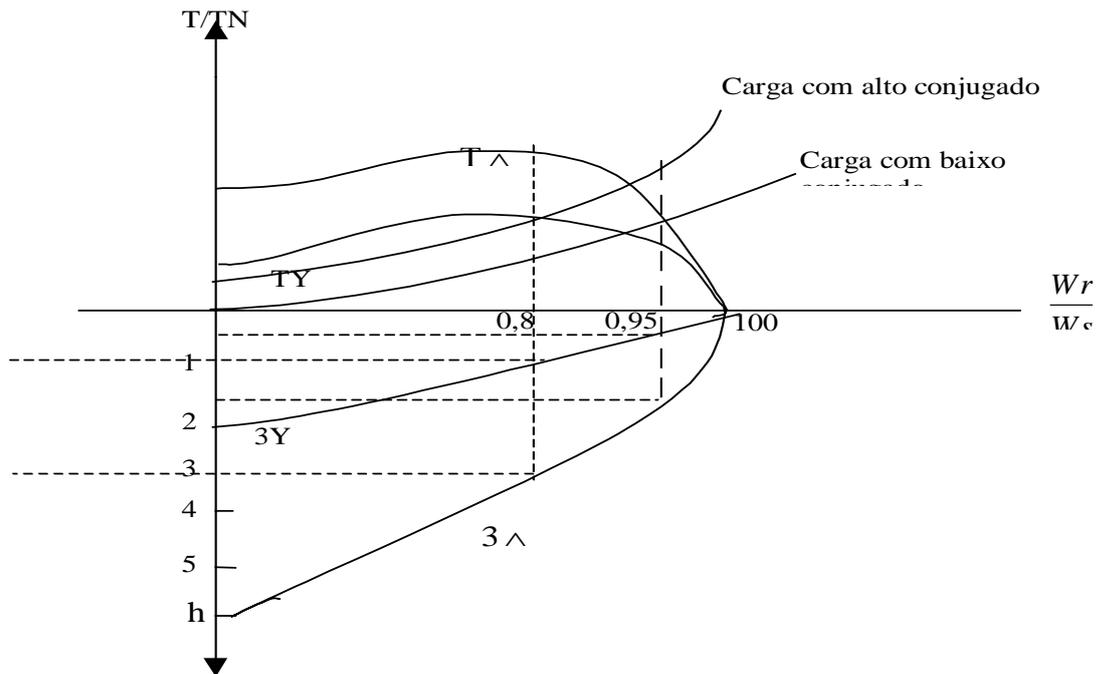


$$V_{F_\Delta} = V_{L_\Delta}$$

$$I_{F_\Delta} = \frac{I_{L_\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{L_\Delta}}{Z}$$

$$\frac{I_{L\Delta}}{I_{LY}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L}{V_L} = \frac{3 \cdot V_L}{Z} \cdot \frac{3 \cdot Z}{V_L} = 3 \longrightarrow I_{LY} = \frac{1}{3} I_{L\Delta}$$

O torque também é reduzido na mesma proporção  $T_Y \frac{T_{\Delta}}{3}$



### 10.1.1.1 Carga de alto conjugado

Partida em Y o motor acelera a carga até 85% da rotação nominal, com  $I_Y \cong I_N$  ou seja 100% então a chave deverá ser ligada em  $\Delta$  e a  $I_{\Delta} \cong 300\% \rightarrow I_{\Delta} \cong 300\% > I_{pY} = 200\%$  o que não é vantagem uma vez que na partida a corrente era somente 200%.

### 10.1.1.2 Carga de baixo conjugado

Partida em Y: O motor acelera a carga até 95% da rotação nominal com  $I_V = 50\%$  então a chave deverá ser ligada em b e  $I_{\Delta} \cong 180\%$  ou seja praticamente igual a partida em Y.

Aqui a ligação Y –  $\Delta$  apresenta vantagem, pois caso a ligação do motor fosse direta a corrente de partida seria 600%.

**Conclusão:** A partida Y –  $\Delta$  somente compensa quando a carga mecânica for baixa durante a partida, ou insere-se a carga total, somente quando o motor estiver à velocidade nominal.

### 10.2 Partida com Chave Compensadora

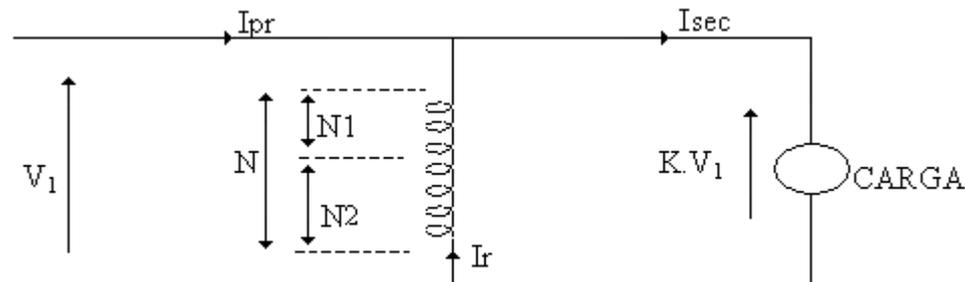
A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz  $I_p$ , evitando uma sobrecarga no circuito deixando, porém o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração.

A tensão na chave compensadora é reduzida através de um autotransformador que possui normalmente tapes de 65 e 80% da tensão nominal. Nestas condições  $I_p$  e  $T_p$  ficam reduzidas a  $K^2$ .

(valores de plena tensão), onde K é o valor do tap

$$\therefore K = 0,80 / 0,65 / 0,50$$

$$I_{pch} = K^2 I_{pdireta}$$



$$K = \frac{N_2}{N} \rightarrow N = \frac{N_2}{K} \rightarrow K \text{ relação de transformação}$$

$$K \leq 1$$

$$N_1 \cdot I_{\rho r} = N_2 \cdot I_y \rightarrow \overbrace{(N - N_2)}^{N_1} \cdot I_{\rho r} = N_2 \cdot I_y$$

$$\left[ \frac{N_2}{K} - N_2 \right] I_{\rho r} = N_2 \cdot I_y \rightarrow I_y = \left[ \frac{1}{K} - 1 \right] I_{\rho r}$$

$$\text{porém } I_{\text{sec}} = I_{\text{pr}} + I_y \rightarrow \boxed{I_{\text{sec}} = \frac{I_{\rho r}}{K}}$$

para carga  $I_{\text{pp}} =$  corrente de partida à plena tensão

$I_{\text{p}} =$  corrente de partida tensão reduzida

$$\begin{cases} I_{\text{sec}} = I_{\text{p}} = K \cdot I_{\text{pp}} \\ I_{\text{pr}} = K I_{\text{sec}} \end{cases} \rightarrow I_{\rho r} = K^2 \cdot I_{\rho p}$$

## 11.0 Controle de Velocidade do MI3φ

$$\omega_r = (1-S) \omega_s \quad \omega_s = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ (rpm)}$$

Para se alterar a velocidade do MI3φ ou se altera o número de pólos ou se altera a frequência da alimentação do mesmo.

### 11.1 Variação da Frequência de Alimentação

Variando-se a frequência de alimentação consegue-se uma variação contínua da velocidade como se consegue:

$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{geração própria} \\ \rightarrow \text{fonte de frequência variável} \end{array} \right\}$

- É necessário um controle simultâneo da tensão aplicada ( $V_s$ )

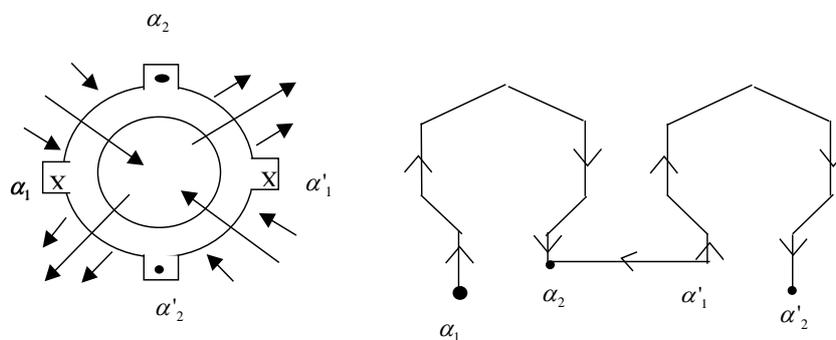
$$\downarrow X_L = 2\pi \cdot L \cdot f \downarrow$$

$$\downarrow V_s = X_L \downarrow \cdot I_s \uparrow$$

### 11.1 Método pólos consequentes (ligação Dahlander)

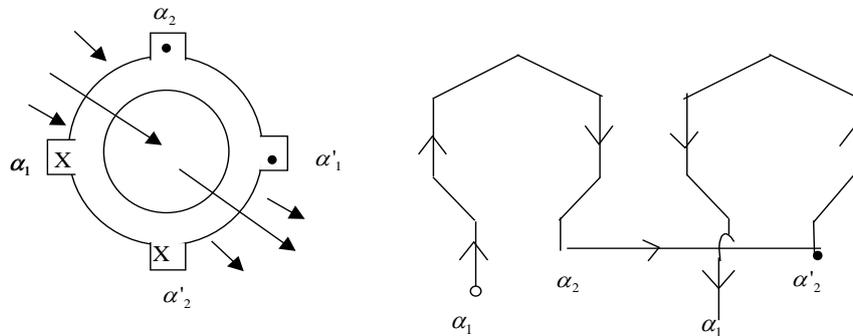
Alterar o número de pólos na razão 2:1

Máq. 4 pólos – Considerando 2 bobinas de uma das fases



Invertendo-se o sentido da corrente numa das bobinas formaremos 2 pólos apenas:

$$P = 4 \xrightarrow{P1} P = 2$$



Método eficiente e barato.

Desvantagens:

- Não permite controle contínuo da velocidade
- Difícil de ser empregado no motor de anéis

## II –Motor de Indução monofásico

Atualmente, os motores elétricos se tornaram indispensáveis nos equipamentos elétricos e eletro-eletrônicos, sendo que raramente encontram-se indústrias, comércios e residências sem que estes estejam desempenhando um papel essencial em um processo específico. Nas indústrias são utilizados motores trifásicos de grande potência em larga escala, porém, há numerosas instalações comerciais ou residenciais onde a alimentação de energia elétrica é feita apenas através de sistemas monofásicos CA, tornando-se indispensável a utilização de motores monofásicos. Todas estas instalações demandam motores pequenos que, operando em redes monofásicas, acionam diversas máquinas como aspiradores, condicionadores de ar, máquinas de lavar e de costura, portões automáticos, além de motores com a finalidade de produzir circulação de ar. Um motor pequeno pode ser entendido como aquele que possui potência igual ou menor que 1HP, também conhecidas como potências fracionárias.

A maioria dos motores monofásicos é de pequena potência, porém, estes também são encontrados com potências de 1,5, 2, 3, 5, 7,5 e 10 HP, para redes monofásicas de 115V, 230V e 440V, mostrando que existe uma grande versatilidade na utilização.

Podemos enquadrar os motores de indução monofásicos (MIM) em seis tipos, considerando o princípio de partida e funcionamento. Estes motores necessitam de técnicas específicas para a sua partida com a finalidade de gerar um torque inicial, sendo que cada uma é mais adequada para uma diferente utilização do mesmo. Existem os MIM de fase separada ou dividida (split-phase), os com capacitor de partida permanentes ou temporários, com dois capacitores, de pólo sombreado ou anel de arraste e os motores síncronos de relutância com partida própria.

## **2.0 Construção**

Assim como qualquer motor de indução, o motor monofásico possui basicamente um rotor do tipo gaiola, um estator onde serão enroladas as bobinas, rolamentos ou buchas, ventiladores de resfriamento e caixa para conexão elétrica. Outras partes dependerão dos tipos de partida e, como consequência, da sua construção. Não existem ligações físicas entre o rotor e o estator, como visto anteriormente, havendo um entreferro uniforme entre eles. As ranhuras do estator são uniformemente distribuídas e normalmente utilizam-se dois enrolamentos, sendo um principal e outro auxiliar. Um enrolamento monofásico simples não produz campo magnético girante nem torque de partida e, portanto, é necessário modificar ou dividir o enrolamento do estator em duas partes, cada uma delas deslocada no espaço e no tempo.

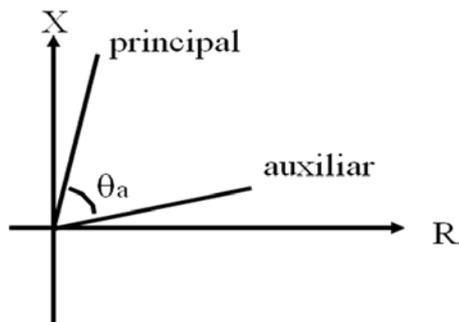
## **3.0 Princípio de funcionamento**

Motores de indução monofásicos não possuem torque de partida, devido ao alinhamento no espaço e no tempo entre o campo produzido pelo enrolamento do estator e o campo produzido pelas correntes induzidas no enrolamento do rotor; não havendo defasagem angular entre os dois fluxos pulsantes não há produção de torque.

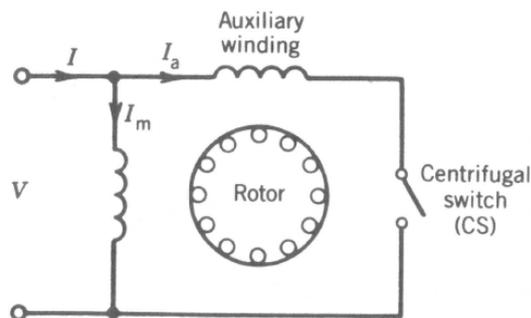
Um estator com dois enrolamentos idênticos defasados de 90 graus produz um campo girante com magnitude constante; isto é, na presença de dois campos defasados no tempo e no espaço produzidos por enrolamentos no estator, tem-se um campo

girante. Portanto, as principais formas empregadas para partir um motor de indução são baseadas no uso de enrolamentos auxiliares que criam dois campos defasados.

Um enrolamento auxiliar é usado para proporcionar uma defasagem inicial entre os campos principal e auxiliar de forma a criar um campo girante; este enrolamento tem alta taxa R/X (resistência elevada: fio fino e baixa reatância: poucas espiras) de forma a aumentar a defasagem, O enrolamento principal tem baixa taxa R/X de forma a garantir melhor rendimento em regime permanente e magnetização suficiente para a máquina (baixo R e X elevada/muitas espiras);



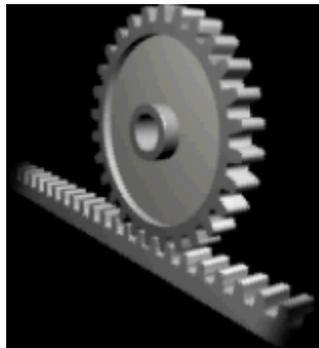
A defasagem vai ser sempre menor que 90 graus (tipicamente em torno de 25°), fornecendo torque de partida moderado, para baixa corrente de partida. Uma chave centrífuga desliga o enrolamento auxiliar a 75% da velocidade nominal.



Para inverter o sentido de rotação é necessário inverter a ligação do enrolamento auxiliar com a máquina parada (não reversível), visto que o torque produzido pelo enrolamento auxiliar (operação bifásica) é menor que o torque produzido pelo enrolamento principal (operação monofásica)

### III –Motor linear de Indução (MLI)

Em certas situações (como por exemplo em transporte ferroviário e metroviário) deseja-se obter movimento translacional (em vez de rotacional). Neste caso pode-se utilizar um sistema de cremalheira para mecanicamente converter o movimento rotacional em translacional. Sendo que a vantagem desse sistema é a simplicidade e a desvantagem é o aumento das perdas mecânicas e maior necessidade de manutenção devido ao desgaste



Outra opção é empregar um motor linear que produz diretamente movimento translacional. Tais motores são denominados motores lineares.

Os motores lineares, que tem seu surgimento datado na segunda metade do século XIX, antes do desenvolvimento das primeiras máquinas rotativas de Tesla, em 1888, no entanto, foi a partir de meados do século XX que o emprego das máquinas lineares tornou-se mais notória.

O funcionamento desses motores é semelhante ao dos motores rotativos, no qual uma força eletromagnética decorrente da interação entre a corrente no enrolamento do motor e um campo magnético produz o deslocamento do cursor. Dessa forma, a força e a velocidade de deslocamento que o motor produz podem ser consideradas como fatores de desempenho para esse tipo de motor. O MLI tem um começo e um fim, este recurso produz um efeito final, este é uma das mais importantes diferenças entre o motor de indução linear e o motor de indução rotativo.

Os motores lineares, que tem seu surgimento datado na segunda metade do século XIX, antes do desenvolvimento das primeiras máquinas rotativas de Tesla, em

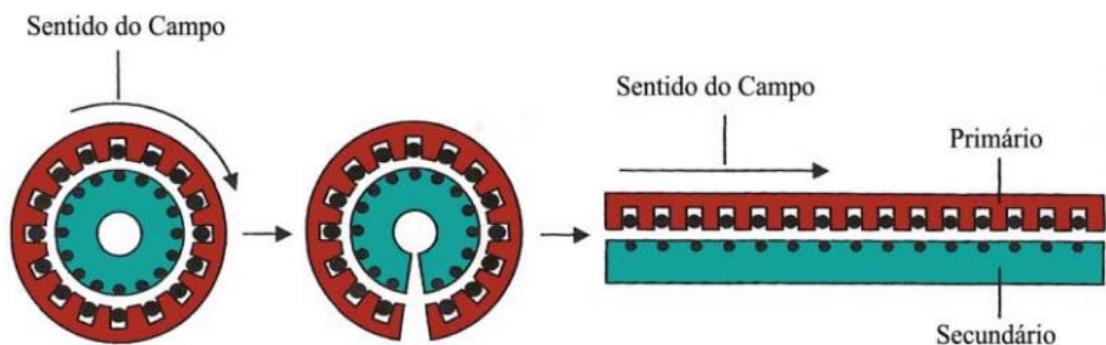
1888, no entanto, foi a partir de meados do século XX que o emprego das máquinas lineares tornou-se mais notória.

O funcionamento desses motores é semelhante ao dos motores rotativos, no qual uma força eletromagnética decorrente da interação entre a corrente no enrolamento do motor e um campo magnético produz o deslocamento do cursor. Dessa forma, a força e a velocidade de deslocamento que o motor produz podem ser consideradas como fatores de desempenho para esse tipo de motor. O MLI tem um começo e um fim, este recurso produz um efeito final, este é uma das mais importantes diferenças entre o motor de indução linear e o motor de indução rotativo.

## 2.0 Construção

O estator e rotor são as duas partes principais. O estator é constituído por um enrolamento polifásico equilibrado que é colocado de forma uniforme nas ranhuras do estator ao longo da sua periferia. O estator produz um campo magnético distribuído senoidal no entreferro. O movimento relativo entre os condutores do rotor e do campo magnético induz uma tensão no rotor. Esta tensão induzida vai fazer com que uma corrente flua no rotor e gere um campo magnético. As interações desses dois campos magnéticos vão produzir um binário que arrasta o rotor na direção do campo.

Derivado do motor rotativo, “fazendo um corte” neste, obtém o motor linear



Para o motor rotativo o campo magnético recebe o nome de campo girante, já para o motor linear o campo magnético recebe o nome de campo viajante, ou seja, ao invés de gerar um torque útil, o motor linear cria uma força longitudinal no sentido do campo. E o secundário do MLI é constituído por uma lamina de um material paramagnético com alta condutibilidade elétrica.

Tem-se que o primário de um motor linear é a parte fixa ou estator, e o secundário é a parte móvel ou cursor. Pode ser classificado também em rotor curto ou estator curto. E com relação ao número de estator, classifica-se em simples estator ou duplo estator. Sendo que os de simples estator apresentam um circuito ferromagnético acima do rotor para concatenar melhor o fluxo magnético diminuindo a dispersão das linhas de fluxo.

### **3.0 Princípio de funcionamento**

O princípio de funcionamento de um MLI é o mesmo de um motor rotativo de indução, sendo que o MLI é obtido basicamente abrindo o motor do tipo gaiola de esquilo e colocando-o deitado. Esta estrutura plana produz uma força linear em vez de produção de torque rotativo como em uma máquina cilíndrica. A frequência de projeto e o número de enrolamento determinam a velocidade de MLI.

### **4.0 Aplicações**

Máquinas envolvidas em processos industriais que exigem movimentos lineares

- Transporte (metro/trem)
- Coração artificial (sistema de êmbolos)
- Portas deslizantes
- Bombeamento de líquidos (sistema de êmbolo)

#### **VANTAGENS**

- Não são necessárias partes mecânicas para transformar o movimento rotacional em linear
- Permitem altas acelerações e velocidades

#### **DESVANTAGENS**

- Efeito longitudinal de extremidade
- Existência de uma força normal