

# MOTORES DE INDUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é de apresentar um estudo dos motores de indução trifásicos. Este tipo de motor é em geral mais simples, mais robusto, necessita menor manutenção, por isso é muito utilizado como força motriz na indústria. Com a evolução do acionamento eletrônico de motores de corrente alternada (inversores de frequência e soft-starter) este tipo de motor ganha ainda mais espaço no mercado.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1- Conjugado:

O conjugado  $C$ , também chamado de torque ou momento é a medida do esforço necessário para se girar um eixo:

$$C = F \times \text{raio (N.m)}$$

$F$  = força em Newtons. [N]

$r$  = distância do braço de alavanca em metros, [m]

### 2.2 - Energia ou Trabalho realizado ou Potência Mecânica

A potência mecânica  $P$  exprime a rapidez com que a energia ou trabalho mecânico é realizado.

$$P = - \tau/t \quad (\text{J/s}) \text{ ou } (W)$$

#### Definição de C.V.(cavalo-vapor)

$$1CV = 736 W$$

1CV = é a potência em "watts" necessária para se elevar uma massa de 75Kg à uma altura de 1 metro num tempo de 1 segundo.

Assim, para a definição de C.V., temos :

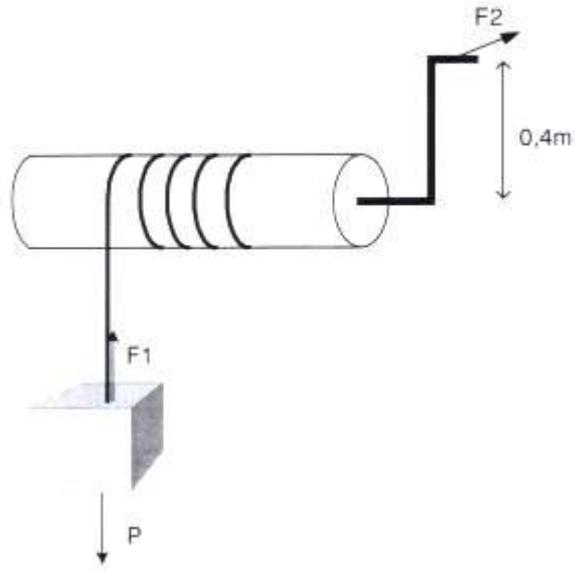
$$\text{peso da massa de 75Kg} \rightarrow P = m.g = 75 \cdot 9,81 \rightarrow 736N$$

$$\text{trabalho realizado} \rightarrow \tau = F.d = 736.1 = 736N.m \text{ 736J.}$$

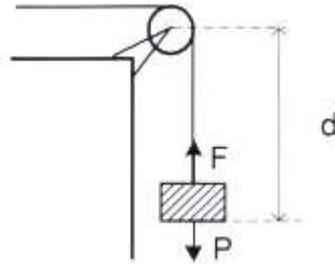
Potências normalizadas em C.V. de motores de indução:

1/3 ; 1/2 ; 3/4 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7,5 ; 10 ; 12,5 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 75 ; 100 ; 125 ; 150 ; 175 ; 200 ; 250 .

**exercício 1:** Na figura, dado  $P = 20\text{N}$  e o diâmetro do tambor é de  $20\text{cm}$ . Se o comprimento  $R_2$  da manivela for de  $40\text{cm}$ , qual deve ser a força aplicada na manivela para equilibrar a carga. (5N).



**exercício 2:** Um peso de  $600\text{N}$  deve ser elevado a uma altura de  $2\text{m}$  por um motor. Se usarmos um motor que realize este trabalho em  $12\text{s}$  e outro que realize em  $2\text{s}$ , qual a potência de cada motor? ( $1/3\text{cv}$  e  $1\text{cv}$ )



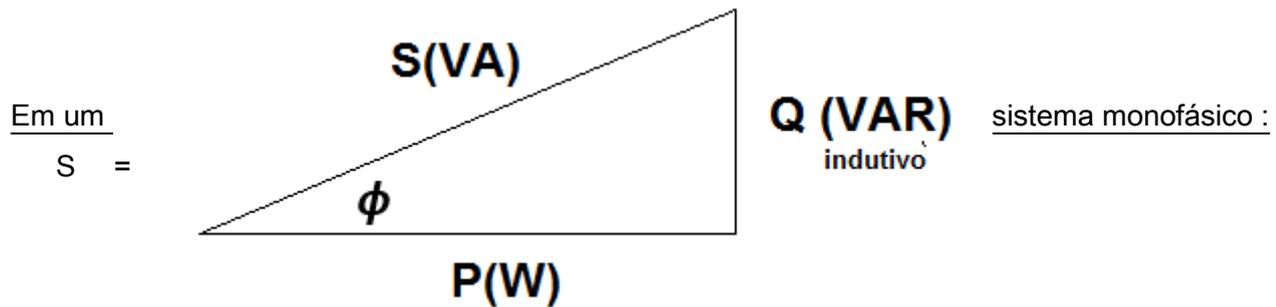
### 2.3 - Energia e Potência Elétrica:

Um motor ligado a uma rede de alimentação absorve energia elétrica e a transforma em energia mecânica. A rede deve estar apta a fornecer a potência aparente  $S$ , necessária para a operação do motor. O consumo de energia elétrica está ligado com a potência ativa ( $P$ ). A corrente total circulante é ligada com  $S$ .

A potência aparente,  $S$  (V.A) é o produto da tensão pela corrente total.

A potência ativa,  $P$  (W) representa trabalho realizado (aquecimento, energia mecânica, iluminação, etc).

A potência reativa indutiva,  $Q$  (V.Ar) representa a criação dos campos magnéticos necessários para operação do motor.



Paparente =  $V \cdot I$  (VA), potência aparente.

Em um sistema trifásico :

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}} \text{ (V.A)}$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{linha}} \cdot I_{\text{linha}} \text{ (V.A)}$$

$$\cos\phi = \text{fator de potencia} = P(W)/S(VA)$$

### 2.4 - Rendimento :

É a relação entre Potência Mecânica Útil entregue ao eixo do motor e a Potência Elétrica Ativa em watts solicitada ou consumida pelo motor da rede de alimentação.

$$\eta (\%) = P_{\text{mecânica}} / P_{\text{ativa}} \cdot 100\%$$

**exercício 3:** Um motor elétrico trifásico (ligação  $\Delta$ ) com um rendimento de 85% absorve uma corrente de linha eficaz de 10A e opera com uma tensão de 220V em triângulo.

Se a potência consumida é de 1800W, pede-se:

- A potência aparente (3810,5 V.A)
- O fator de potência. (0,47)
- A potência mecânica disponível no eixo. (1530 W ou 2cv)
- Desenhe o esquema do sistema de alimentação conectado ao motor,

## 2.5 - Relação entre conjugado e potência:

Na especificação e seleção de motores pode ser importante a avaliação da quantidade de torque disponível {numa polia ou eixo de motor) para se executar um determinado trabalho mecânico a uma certa velocidade. A equação que relaciona a potência fornecida com o torque externo e a velocidade é dada por:

$$P_{\text{mecanica}} = C \cdot n \quad (\text{W})$$

$C = \text{conjugado}(\text{N.m})$  ,  $n = \text{velocidade} \text{ (rad/s)}$

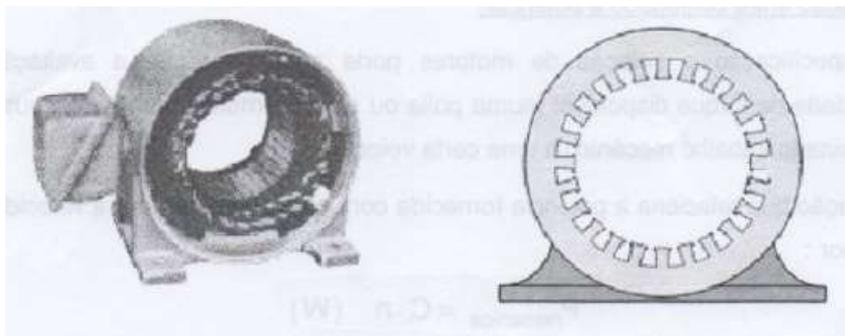
Exercício 4: Qual o torque disponível no eixo do motor de 7,5 CV com o eixo girando a 1760 rpm?(29,93N.m)

### 3. CARACTERÍSTICAS construtivas

Os motores de indução são máquinas elétricas rotativas constituídas essencialmente de 2 partes :

- o estator

que é a parte fixa;



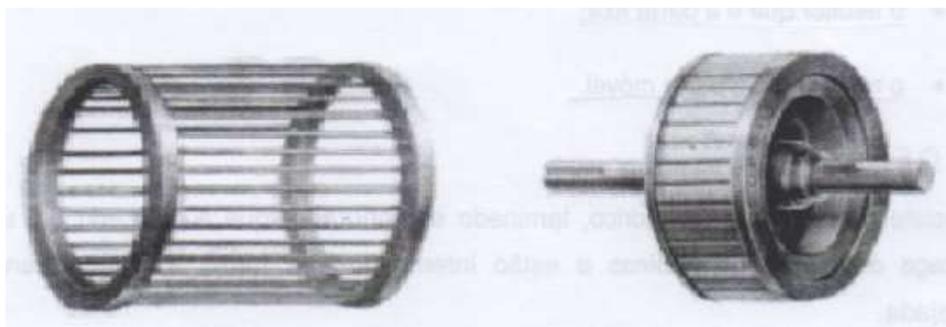
#### b.) O Rotor

O rotor do motor de indução pode ser de 2 tipos :

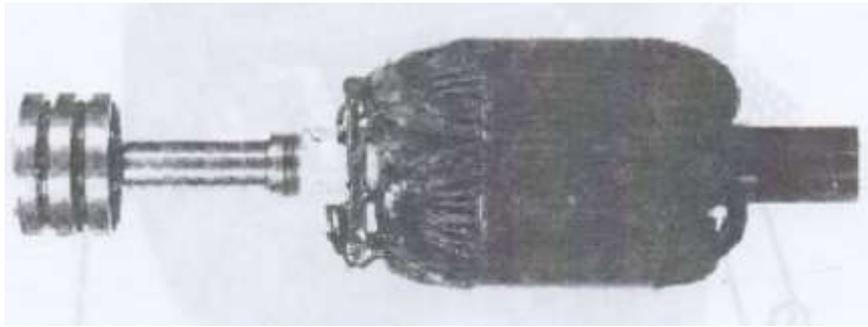
- Rotor em gaiola de esquilo ou rotor em curto.
- Rotor bobinado ou rotor de anéis.

b.1.) **Rotor em gaiola** : no rotor em gaiola, os enrolamentos são constituídos por barras condutoras (cobre ou alumínio) fundidas sob pressão em uma peça cilíndrica com os terminais curto-circuitados nas duas extremidades. Esta estrutura é semelhante a uma gaiola de esquilo.

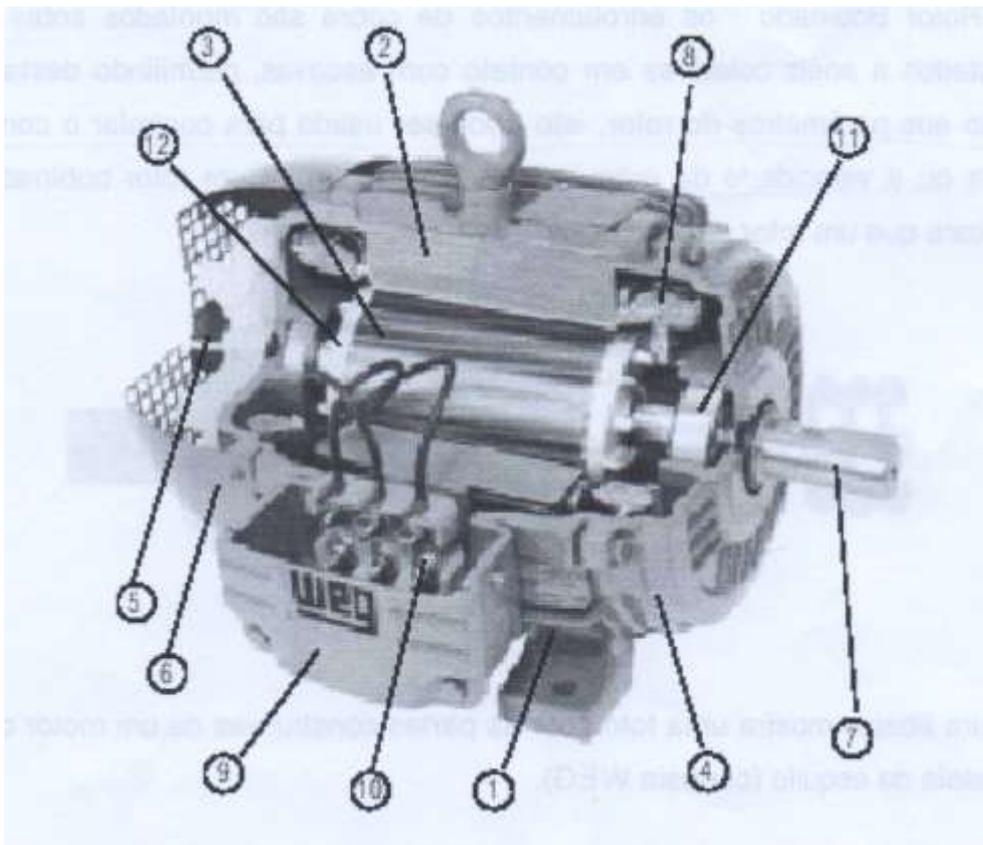
É o tipo de rotor mais empregado (mais barato e não requer manutenção elétrica).



b.2.) **Rotor Bobinado** : os enrolamentos de cobre são montados sobre o rotor e conectados a anéis coletores em contato com escovas, permitindo desta forma ter acesso aos parâmetros do rotor, isto pode ser usado para controlar o conjugado de partida ou a velocidade da máquina. A construção de um rotor bobinado é muito mais cara que um rotor em gaiola.



A Figura abaixo mostra uma foto com as partes construtivas de um motor de indução tipo gaiola de esquilo (cortesia WEG).



#### **Estator:**

(1) **Carcaça** - é a estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas.

(2) **Núcleo de chapas** - as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro.

(8) **Enrolamento trifásico** - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

#### **Rotor:**

(7) **Eixo transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.** É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga.

(3) Núcleo de chapas - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.

(12) Barras e anéis de curto-circuito - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça. Outras partes do motor de Indução trifásico

(4) Tampa,

(5) Ventilador

(6) Tampa defletora,

(9) Caixa de ligação

(10) Terminais.

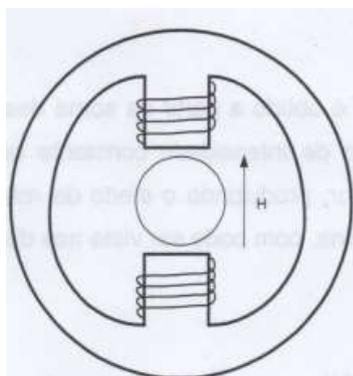
(11) Rolamentos

#### 4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

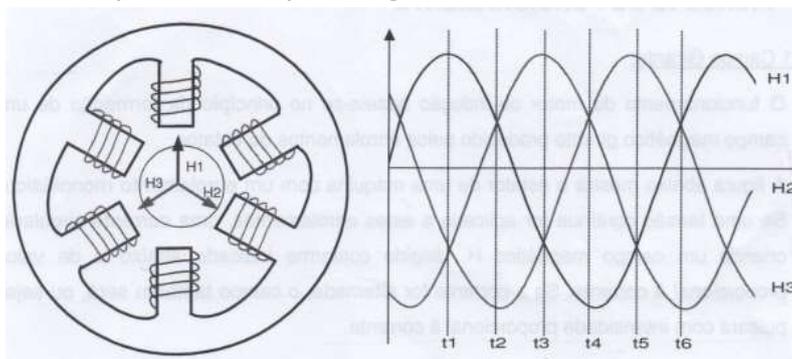
##### 4.1 Campo Girante:

O funcionamento do motor de indução baseia-se no princípio da formação de um campo magnético girante produzido pelos enrolamentos do estator.

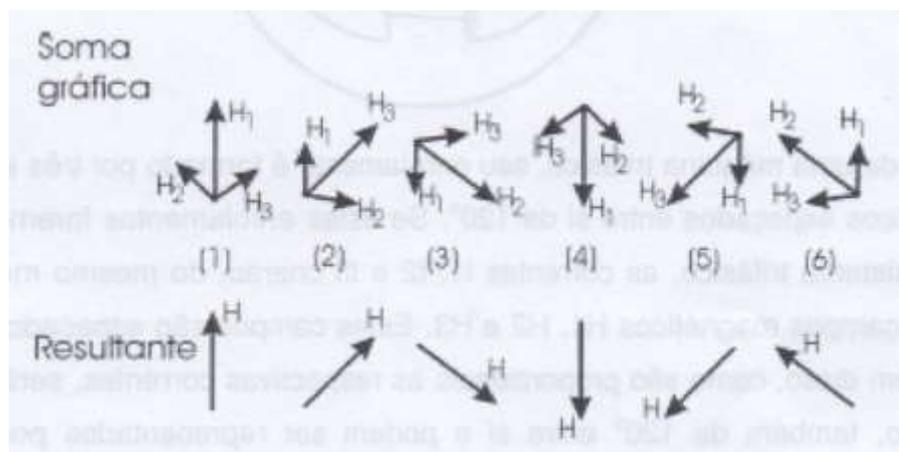
A figura abaixo mostra o estator de uma máquina com um enrolamento monofásico. Se uma tensão contínua for aplicada a estes enrolamentos, uma corrente circulará, criando um campo magnético  $H$ , dirigido conforme indicado abaixo e de valor proporcional à corrente. Se a corrente for alternada, o campo também será, ou seja, pulsará com intensidade proporcional à corrente.



No caso de uma máquina trifásica, seu enrolamento é formado por três enrolamentos monofásicos espaçados entre si de  $120^\circ$ . Se estes enrolamentos forem alimentados por um sistema trifásico, as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ . Estes campos são espaçados entre si de  $120^\circ$ . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de  $120^\circ$  entre si e podem ser representados por um gráfico abaixo.



O campo magnético total é obtido a partir da soma destes três campos, que resulta em um campo magnético de intensidade constante que muda de direção a cada instante, girando no estator, produzindo o efeito de rotação de um ímã permanente em torno do eixo da máquina, com pode ser visto nos diagramas abaixo.



Este fluxo magnético girante do estator se desloca em relação ao rotor, cortando as barras do rotor induzindo tensões (Lei de Faraday) que farão circular correntes também alternadas no rotor.

Como as correntes do rotor tem polaridades contrárias do estator ( Lei de Lenz), cria-se no rotor um campo magnético oposto. Como campos opostos se atraem e como o campo do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor, um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga.

A velocidade do rotor ( $n_r$ ) é sempre menor que a velocidade do campo girante do estator ( $n_s$ ), também chamada velocidade síncrona. Se o rotor fosse levado até a velocidade síncrona ( $n_r = n_s$ ), não haveria mais velocidade relativa entre os campos girantes do estator e do rotor e conseqüentemente a tensão induzida cessaria, não haveria mais corrente no rotor, o conjugado mecânico diminuiria e o rotor automaticamente perderia velocidade ( $n_r < n_s$ ), então, novamente o rotor iria adquirir o conjugado.

A operação do motor girando sem carga denomina-se operação em vazio. A medida que se coloca carga no eixo a tendência da velocidade é diminuir para compensar o conjugado resistente da carga.

A operação do motor com carga é denominada operação em regime permanente.

#### 4.2 - Velocidade síncrona, velocidade mecânica e escorregamento:

A velocidade síncrona ( $n_s$ ) é a velocidade do campo girante. O motor apresentado no item anterior era constituído por dois polos por fase. Neste caso o campo girante dava uma volta completa em torno do estator em um ciclo da rede de alimentação, ou seja, com velocidade de:

$$n_s = f \text{ rotações por segundo (RPS), ou}$$

$$n_s = 60 \cdot f \text{ rotações por minuto (RPM)}$$

Supondo uma máquina com 4 polos (dois pares de polos por fase), neste caso para o mesmo período da rede de alimentação o campo girante teria percorrido apenas a metade do comprimento angular do estator. Ou seja, a velocidade seria:

$$n_s = 60 \cdot f / 2$$

Generalizando para uma máquina de  $p$  polos, a velocidade síncrona é dada por:

$$n_s = 120 \cdot f / p$$

onde  $p$  é o número de polos e  $f$  a frequência da rede de alimentação.

Podemos variar a velocidade  $n_s$  e, conseqüentemente,  $n_r$  variando-se o número de polos  $p$  (alterando-se construtivamente as bobinas do estator) ou variando-se a frequência (eletronicamente por inversores).

Para  $f = 60\text{Hz}$

$p$	2	4	6	8
$n_s$ (RPM)	3600	1800	1200	900

OBS.: O motor de indução normalmente é empregado onde se deseja uma velocidade constante próxima da velocidade síncrona.

Quando se deseja um motor de grande porte com velocidade amplamente variável, podemos aplicar as seguintes soluções:

- motor de corrente contínua (metros, trens, veículos elétricos);
- motor de rotor bobinado;
- motor de gaiola acionado através de conversores de frequência (inversores que controlam eletronicamente a tensão e a frequência aplicada ao motor).

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor "corta" as linhas de força magnética do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele corrente induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o conjugado, terá que ser maior a diferença de velocidade para que as correntes induzidas e os campos produzidos seriam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta cai a rotação do motor. Quando a carga é zero (motor em vazio) o rotor girará praticamente com a rotação síncrona. A diferença entre a velocidade do motor  $n$  e a velocidade síncrona  $n_s$  chama-se escorregamento  $s$ , que pode ser expresso em como fração da velocidade síncrona, ou como percentagem desta:

$$s (\%) = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

Para motores de indução de gaiola o escorregamento é da ordem de 2 a 5%.

**Exercício 5:** Um motor de indução de gaiola opera com uma velocidade nominal de 1720 rpm numa rede trifásica. 220V/60 Hz. Pede-se:

- A velocidade síncrona  $n_s$  e o número de polos; {1800 RPM, 4polos}
- O escorregamento em percentual  $s$  (%). {4,4%}

### 4.3 - Conjugado eletromagnético

A máquina de indução pode ser considerada como dois grupos de enrolamentos produzindo campo magnético no entreferro, o grupo do estator e o grupo do rotor. O campo magnético do estator é o campo girante, e tem velocidade  $n_s$ . O campo produzido pelo rotor gira na velocidade  $s \cdot n_s$  em relação ao rotor (que é a frequência na qual as correntes do rotor são induzidas), mas a velocidade deste campo em relação ao estator é dada por:

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

Portanto no entreferro existem dois campos girando com a mesma velocidade, produzindo desta forma um conjugado estável.

## 5- TIPOS DE LIGAÇÃO

Dependendo da maneira com que são conectados os terminais das bobinas do estator, os motores de indução trifásicos podem ser ligados a rede de alimentação que possuem diferentes níveis de tensão.

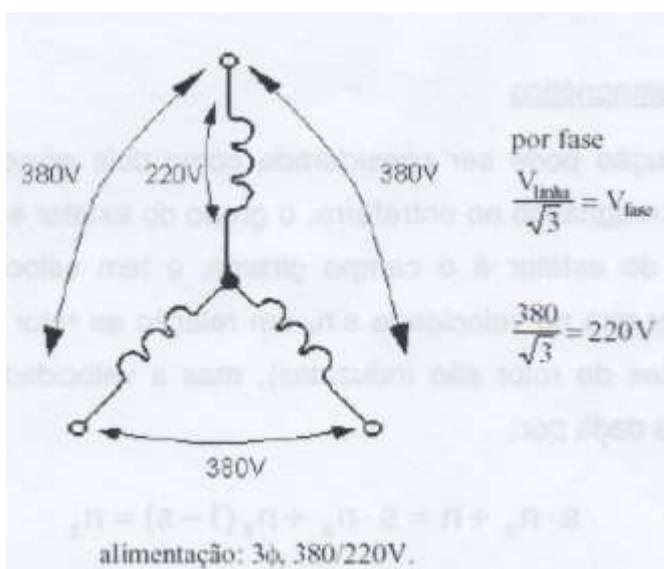
A maioria dos motores opera em circuitos trifásicos de tensões de 220V, 380V e 440V. Normalmente cada bobina é construída para operar em 220V.

### 5.1 - Motor com um enrolamento por fase

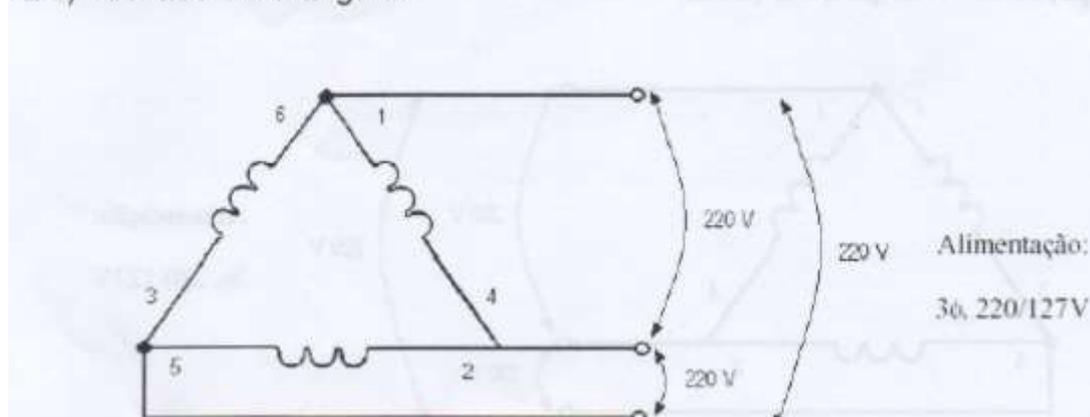
#### a) de 3 terminais e tensão normal única:

Normalmente os motores com 3 terminais são de pequena potência (menores que 5cv) e com partida direta. Já possuem uma conexão e podem ser ligados em redes trifásicas de 220V e 380V.

##### a-1) Fechados com Ligação em Estrela



##### a-2) Fechado em triângulos

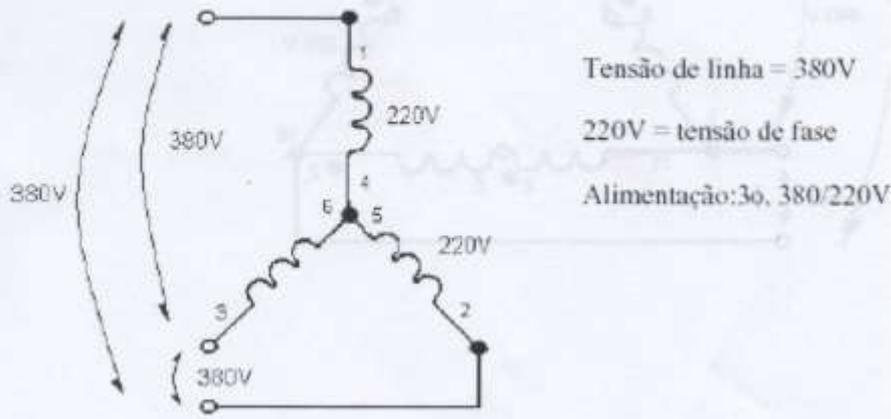


#### b) De 6 terminais e Dupla Tensão Nominal

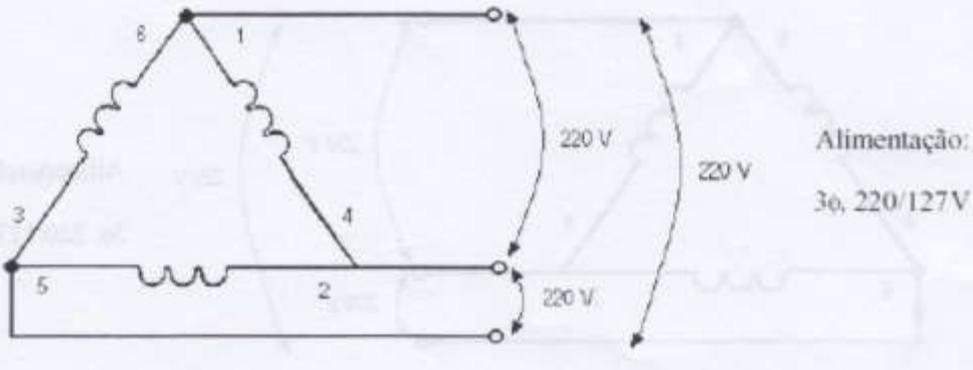
São os mais comuns e fabricados em potência pequenas, médias e grandes.

Estes motores possuem o recurso de permitir a redução da corrente de partida, através de dispositivos estrela-triângulo (chaves manuais ou contadores eletromagnéticos). Podem ser conectados com:

b-1) Ligação Estrela – Y



b-2) Ligação em Triângulo - D (delta)

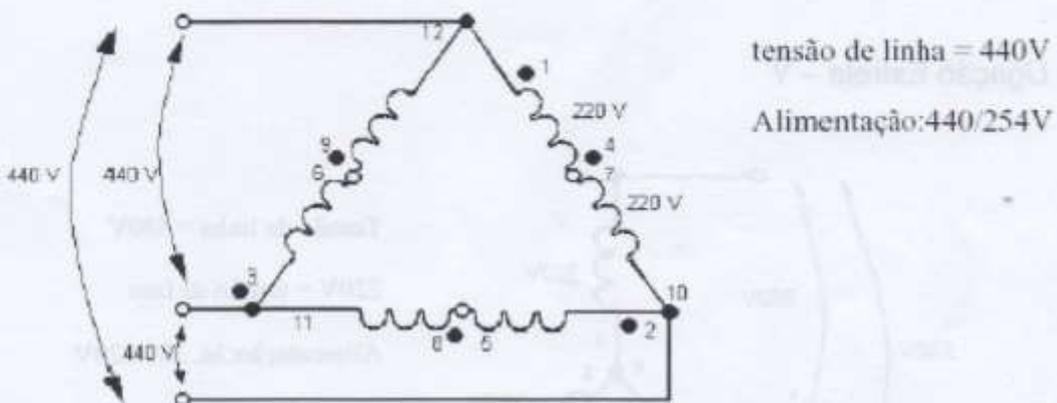


5.2 - Motor com 2 enrolamentos por fase:

São motores que possuem 12 terminais acessíveis e tensão nominal múltipla.

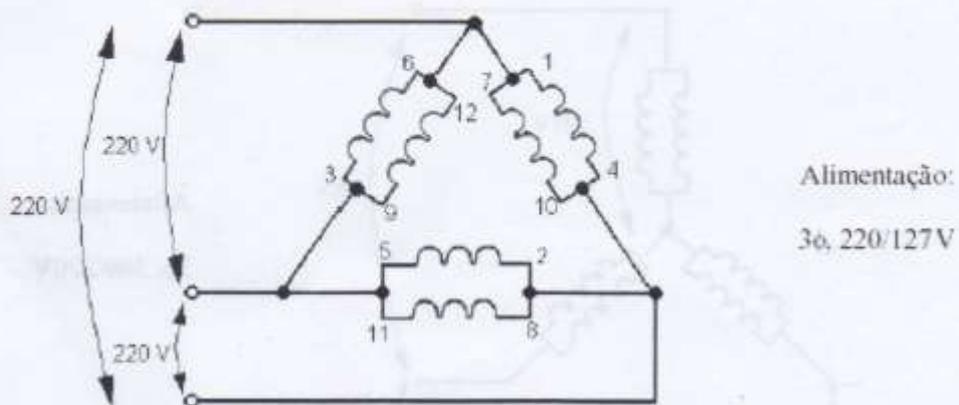
a) Ligação em triângulo - D (delta)

As duas bobinas de cada fase são ligadas em série e o conjunto em  $\Delta$ .



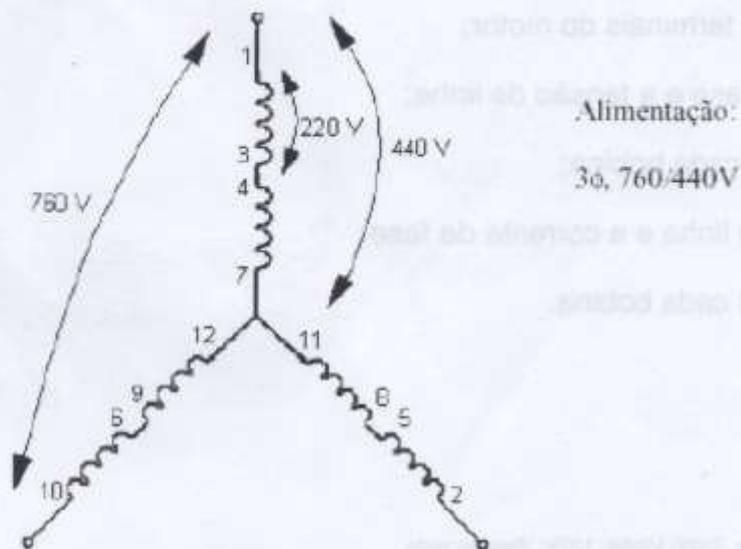
b) Ligação em Duplo-Delta (DD)

As duas bobinas são ligadas em paralelo e o conjunto em  $\Delta$ .



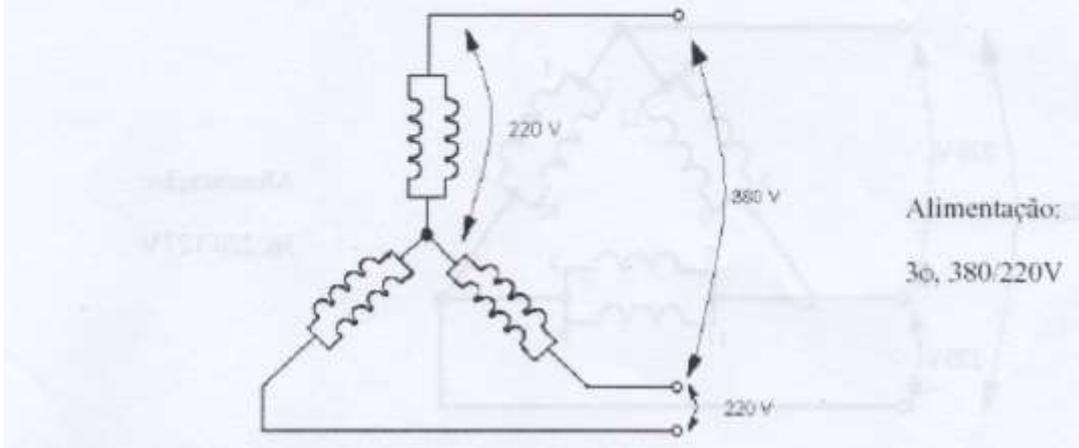
c) Ligação em Y

As duas bobinas de cada fase são ligadas em série e o conjunto em Y.



d) Ligação em Dupla Estrela -YY

As duas bobinas de cada fase são ligadas em paralelo e o conjunto em Y.



exercício 6. Um motor de indução trifásico, 10 cv, com  $FP=0,80$  e rendimento de 85%, está conectado em duplo delta. Pede-se:

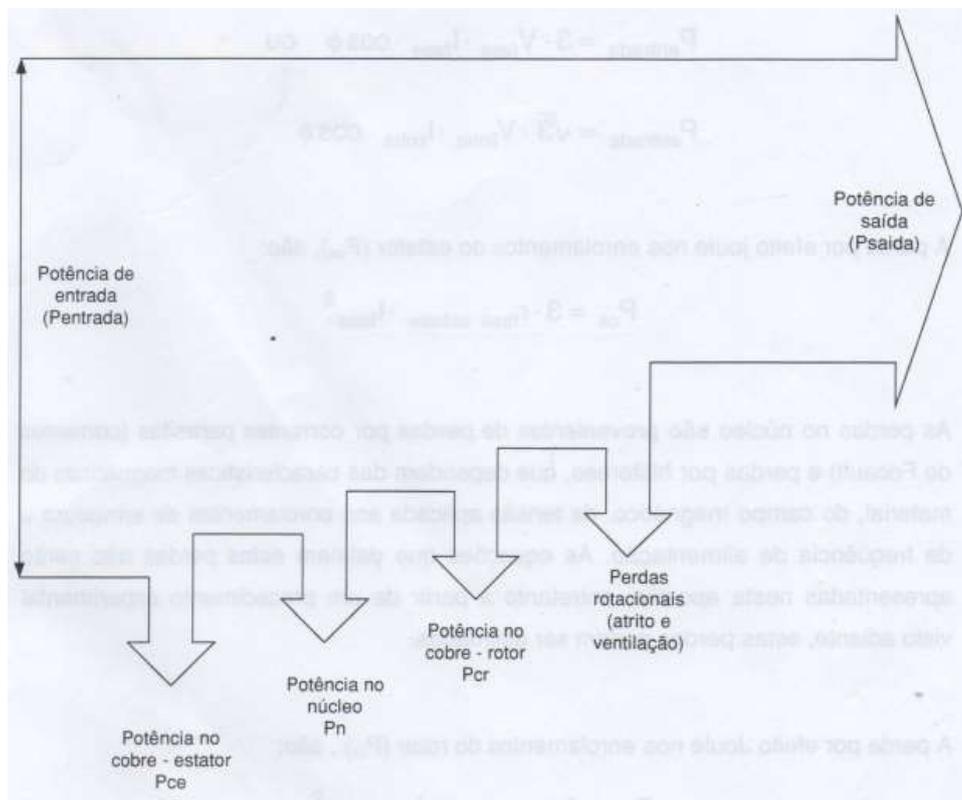
- Qual a tensão da rede de alimentação trifásica;
- O número de terminais do motor;
- A tensão de fase e a tensão de linha;
- A tensão em cada bobina;
- A corrente de linha e a corrente de fase;
- A corrente em cada bobina.

Respostas:

- Alimentação trifásica, 220V:  $V_{\text{linha}}: 127V$ :  $V_{\text{fase p rede}}$
- 12 terminais
- Para o motor a tensão na fase = tensão na linha = 220V
- 1 bobina . 220V (SEMPRE)
- 28,4 A e 16,4 A
- 8,2 A

## 6. DIAGRAMA DE FLUXO DE POTENCIA:

O diagrama abaixo mostra o fluxo da potência no motor de indução trifásico. A esquerda, tem-se a potência elétrica de entrada, à direita a potência mecânica de saída, e apontando para baixo as diversas perdas de potência existentes.



$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{saida}} + P_{\text{ce}} + P_{\text{n}} + P_{\text{cr}} + P_{\text{rot}}$$

O rendimento de um motor de indução é dado pela relação entre a potência de saída pela potência de entrada.

$$\eta = \frac{P_{\text{saida}}}{P_{\text{entrada}}} \cdot 100\%$$

A potência de entrada pode ser dada por:

$$P_{\text{entrada}} = 3 \cdot V_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \cos \phi \quad \text{OU}$$
$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{linha}} \cdot I_{\text{linha}} \cdot \cos \phi$$

A perda por efeito joule nos enrolamentos do estator ( $P_{\text{ce}}$ ), são:

$$P_{\text{ce}} = 3 \cdot r_{\text{fase estator}} \cdot I_{\text{fase}}^2$$

As perdas no núcleo são provenientes de perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault) e perdas por histerese, que dependem das características magnéticas do material, do campo magnético, da tensão aplicada aos enrolamentos de armadura e da frequência de alimentação. As equações que definem estas perdas não serão apresentadas nesta apostila, entretanto a partir de um procedimento experimental visto adiante, estas perdas podem ser estimadas.

A perda por efeito Joule nos enrolamentos do rotor ( $P_{cr}$ ), são:

$$P_{ce} = 3 \cdot r_{\text{fase rotor}} \cdot I_{\text{fase rotor}}^2$$

As perdas devido ao atrito nos mancais e ao ventilador acoplado ao eixo da máquina, são denominadas perdas rotacionais, que também serão estimadas em procedimento experimental.