

1. INTRODUÇÃO	2
2. CONCEITOS BÁSICOS	2
2.1- Conjugado:	2
2.2 - Energia ou Trabalho realizado ou Potência Mecânica	2
2.3 - Energia e Potência Elétrica:.....	4
2.4 - Rendimento :	5
2.5 - Relação entre conjugado e potência:	6
3. Características Construtivas	6
4 - Princípio de Funcionamento	10
4.1 Campo Girante:.....	10
4.2 - Velocidade síncrona, velocidade mecânica e escorregamento:.....	12
4.3 - Conjugado eletromagnético	14
5- Tipos de Ligação.....	15
5.1- Motor com um enrolamento por fase	15
5.2 - Motor com 2 enrolamentos por fase:	17
6. Diagrama de fluxo de potência:.....	20
7. Ensaio para a determinação dOS PARÂMETROS de um motor de indução:	22
7.1 - Medição da resistência dos enrolamentos do estator:.....	22
7.2 - Ensaio a vazio:	22
7.3 - Ensaio de rotor travado:.....	24
7.4 – Roteiro para procedimento experimental:	25
8. Conjugado x Velocidade ou T x n	27
8.1 Curva característica	27
8.2- Categorias	28
9. Partida dos Motores de INDUÇÃO.....	30
9.1 Partida Direta	30
9.2 - Chave Estrela – Triângulo	31
9.3 - Chave Compensadora (auto-transformador).....	33
9.4 - Chave Eletrônica (Soft-Starter) :.....	36
10. Controle de Velocidade de Motores de Indução:	42
10.1 - Variação da velocidade pelo controle do escorregamento:.....	42
10.1.1 Variação da resistência do rotor:	42
11. PLACA DE IDENTIFICAÇÃO	51

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 :

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

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.

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

Definição de C.V.(cavalo-vapor)

1 CV = 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 :

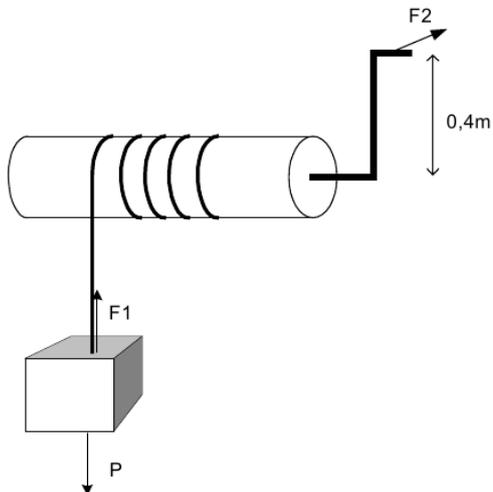
$$\text{peso da massa de 75Kg} \rightarrow P = m \cdot g = 75 \cdot 9,81 \rightarrow 736\text{N}$$

$$\text{trabalho realizado} \rightarrow \tau = F \cdot d = 736 \cdot 1 = 736\text{N}\cdot\text{m} \rightarrow 736\text{J}.$$

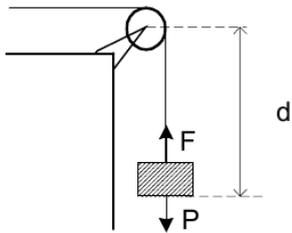
Potências normalizadas em C.V. de motores de indução:

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 20cm. Se o comprimento R_2 da manivela for de 40cm, qual deve ser a força aplicada na manivela para equilibrar a carga. (5N)



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



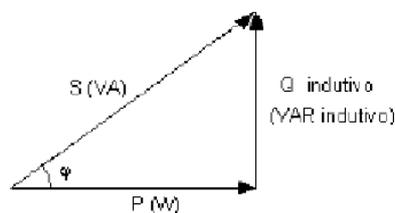
2.3 - Energia e Potência Elétrica:

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.



Em um sistema monofásico :

$$S = P_{\text{aparente}} = V \cdot I \text{ (VA), potência aparente.}$$

Em um sistema trifásico :

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

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

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

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.

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

exercício 3: Um motor elétrico trifásico (ligação Δ) 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, indicando os valores de tensão e corrente.

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 = conjugado(N.m) , n=velocidade (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)

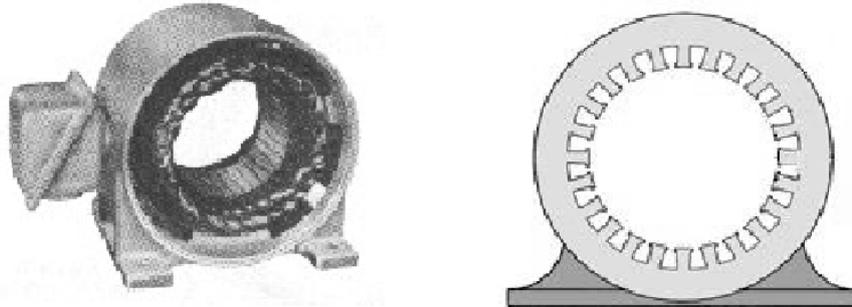
3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

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

- o estator que é a parte fixa;
- o rotor que é a parte móvel.

a.) O Estator :

Consiste de um núcleo cilíndrico, laminado e ranhurado, que é colocado em uma carcaça em forma de bobinas e estão interligadas de forma a obter a tensão desejada.



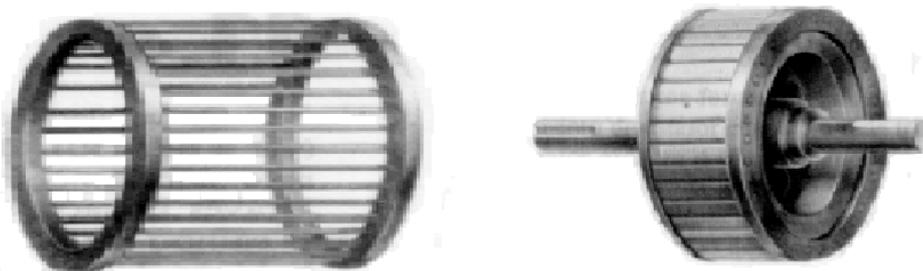
b.) O Rotor

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

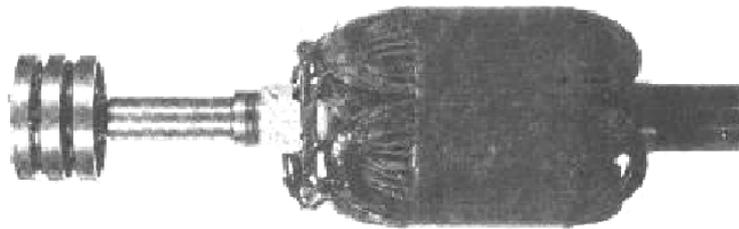
- Rotor em gaiola de esquilo ou rotor em curto.
- Rotor bobinado ou rotor de anéis.

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.

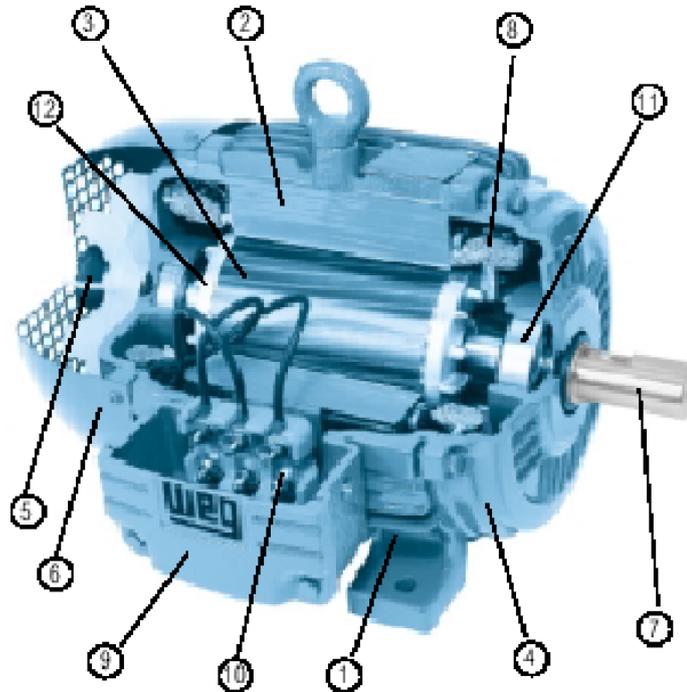
É o tipo de rotor mais empregado (mais barato e não requer manutenção elétrica).



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).



Estatore:

(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

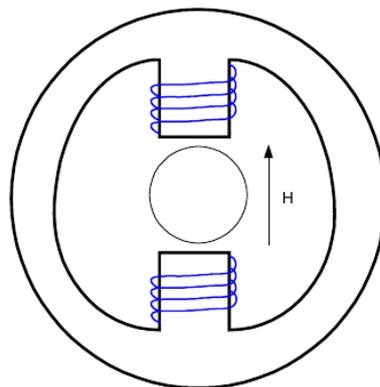
(10) Terminais, (11) Rolamentos

4 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

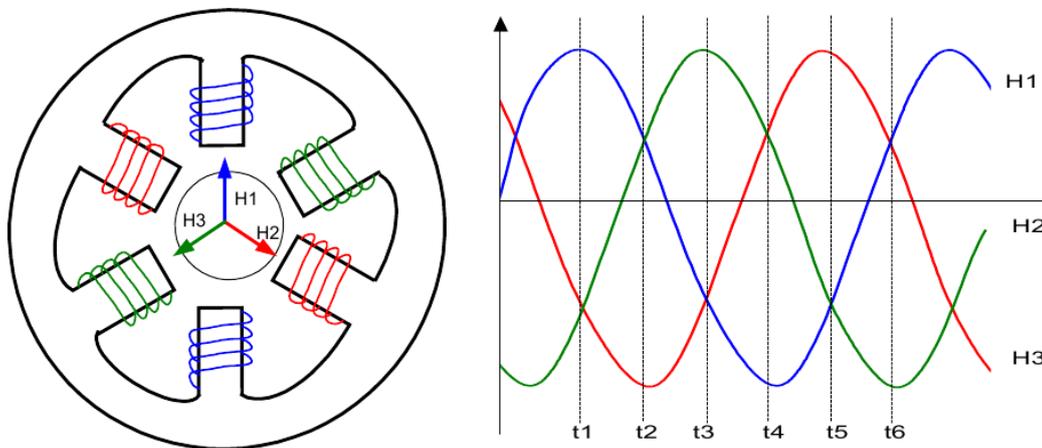
4.1 Campo Girante:

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

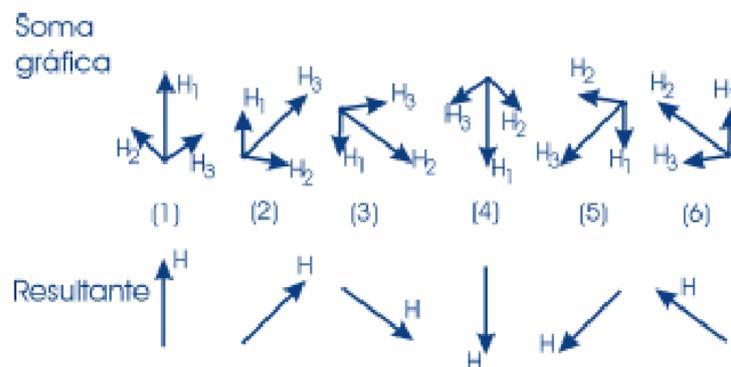
A figura abaixo mostra o estator de uma máquina com um enrolamento monofásico. Se uma tensão contínua for aplicada a estes enrolamentos, uma corrente circulará, criando um campo magnético H , dirigido conforme indicado abaixo e de valor proporcional à corrente. Se a corrente for alternada, o campo também 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° . 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° . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° 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 pólos 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:

$$\begin{aligned} n_s &= f \text{ rotações por segundo (RPS), ou} \\ n_s &= 60 \cdot f \text{ rotações por minuto (RPM)} \end{aligned}$$

Supondo uma máquina com 4 polos (dois pares de pólos 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:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{2}$$

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

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

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

Podemos variar a velocidade n_s e, conseqüentemente, n_r variando-se o número de pólos 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:

- a) motor de corrente contínua (metrô, trem, veículos elétricos);
- b) motor de rotor bobinado;
- c) 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 sejam 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 porcentagem 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) A velocidade síncrona n_s e o número de pólos; (1800 RPM, 4polos)
- b) 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.

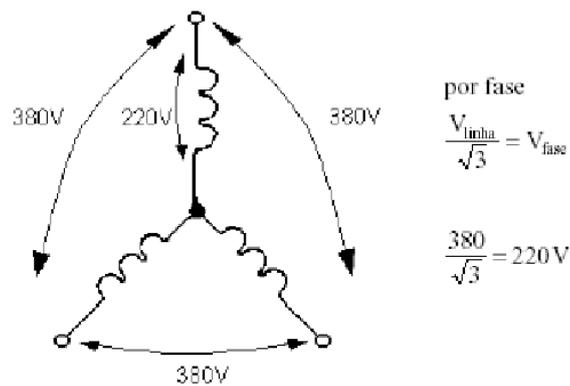
5.1- Motor com um enrolamento por fase

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.

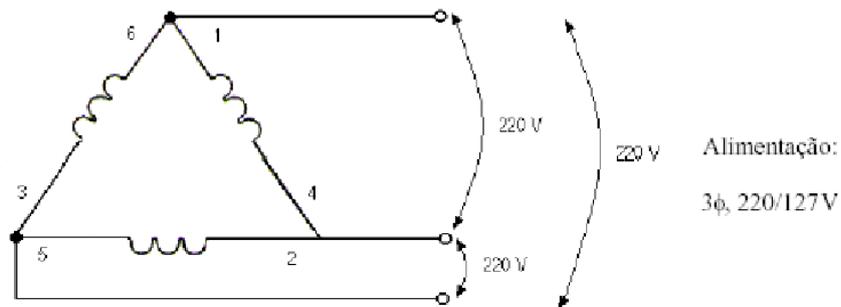
Já possuem uma conexão e podem ser ligados em redes trifásicas de 220V e 380V.

a-1) Fechados com Ligação em Estrela



alimentação: 3 ϕ , 380/220V.

a-2) Fechado em triângulos

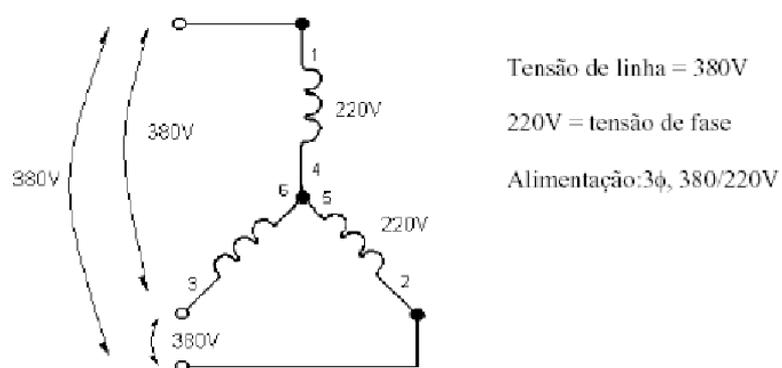


b) De 6 terminais e Dupla Tensão Nominal

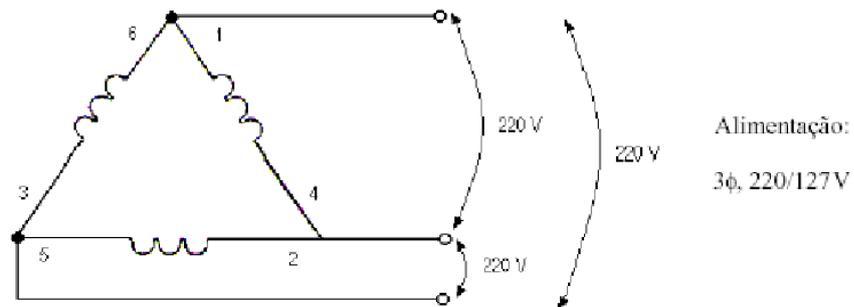
São os mais comuns e fabricados em potência pequenas, médias e grandes.

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)

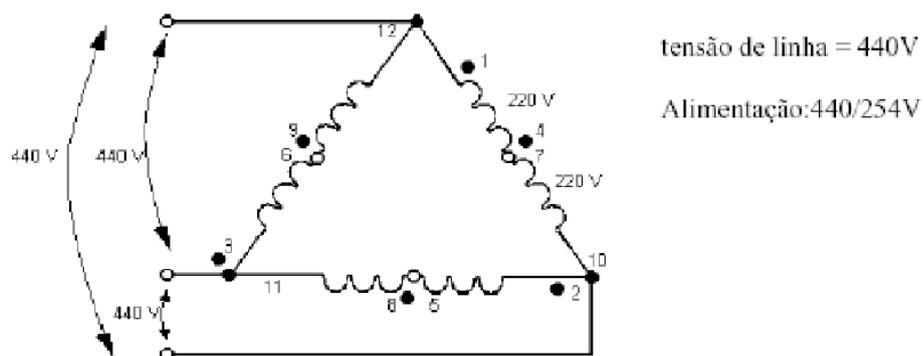


5.2 - Motor com 2 enrolamentos por fase:

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

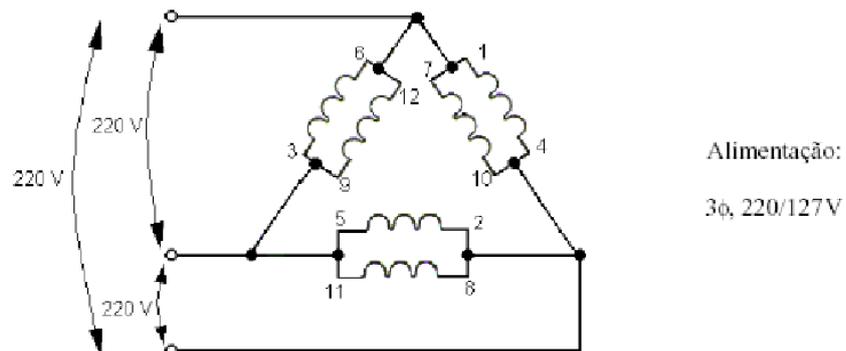
a) Ligação em triângulo - D (delta)

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



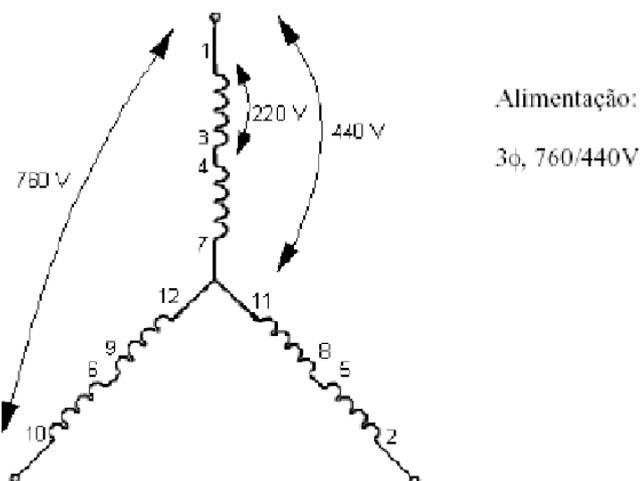
b) Ligação em Duplo-Delta (DD)

As duas bobinas são ligadas em paralelo e o conjunto em Δ .



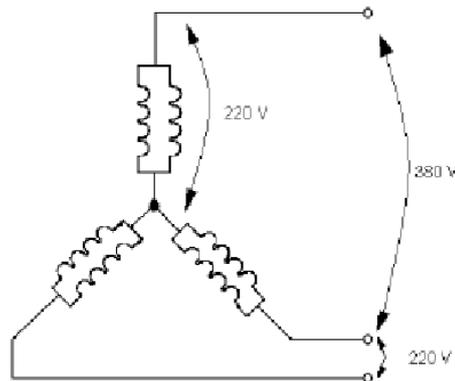
c) Ligação em Y

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.



Alimentação:

3 ϕ , 380/220V

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

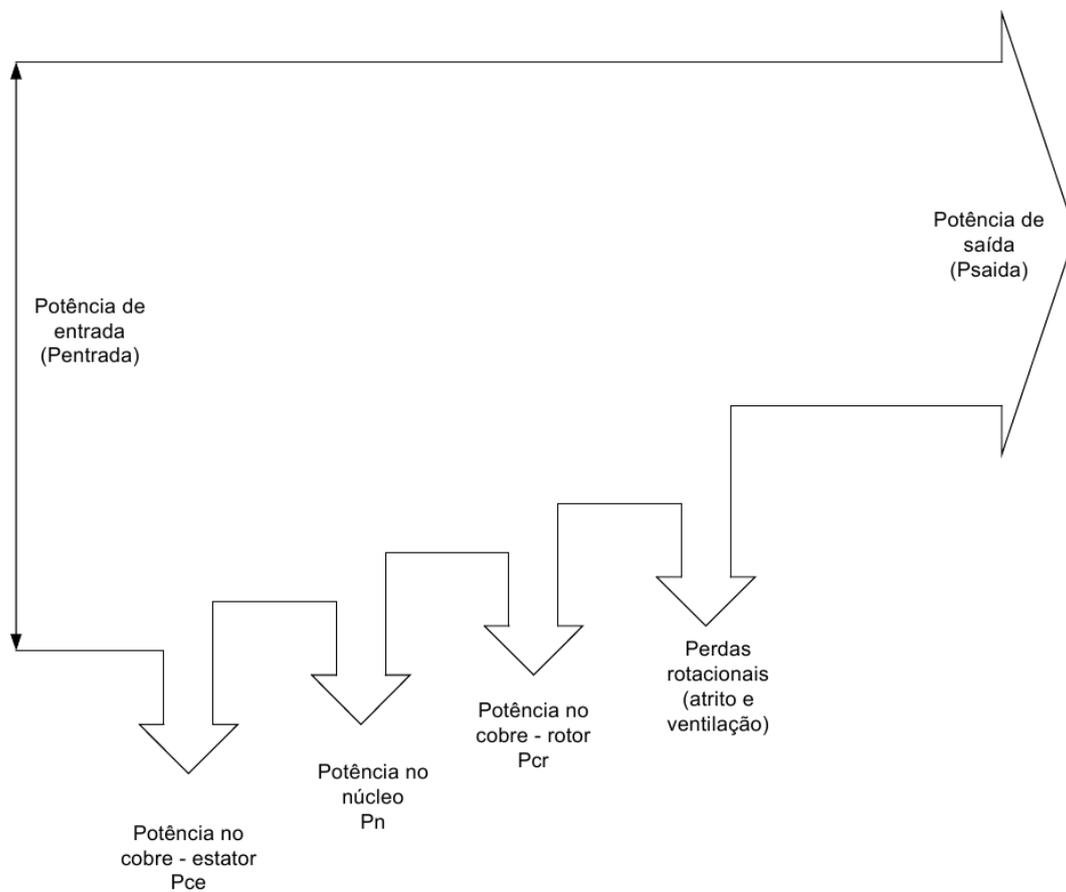
- Qual a tensão da rede de alimentação trifásica;
- O número de terminais do motor;
- A tensão de fase e a tensão de linha;
- A tensão em cada bobina;
- A corrente de linha e a corrente de fase;
- A corrente em cada bobina.

Respostas:

- Alimentação trifásica, 220V: V_{linha}; 127V: V_{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 POTÊNCIA:

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.



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

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

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

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_{ce}), são:

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

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.

7. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO:

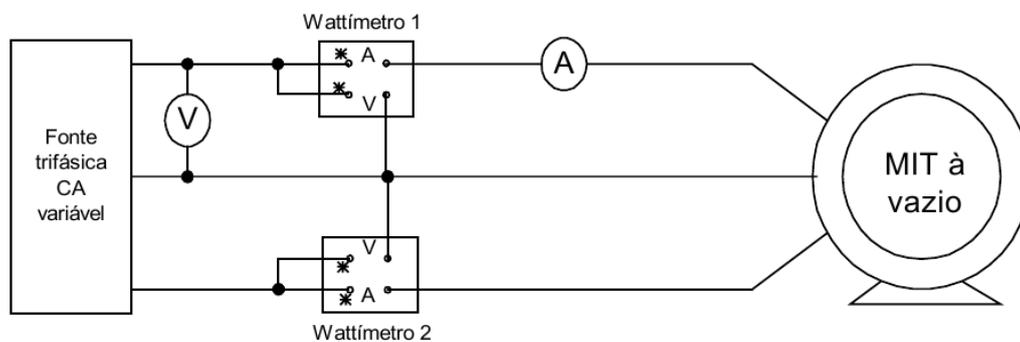
7.1 - Medição da resistência dos enrolamentos do estator:

Este procedimento pode ser realizado através de um equipamento apropriado, como por exemplo uma ponte de Wheatstone, ou através da aplicação de uma de uma tensão e medindo-se a corrente, em seguida aplicando-se a lei de Ohm,

Este parâmetro é importante para o cálculo das perdas joulicas nestes enrolamentos.

7.2 - Ensaio a vazio:

Neste ensaio aplica-se a tensão nominal nos enrolamentos do estator, deixando a máquina girar sem carga. Após um tempo suficiente para a lubrificação dos mancais é feita a medida de potência e corrente no motor. O esquema de ligação deste ensaio é mostrado na figura abaixo.



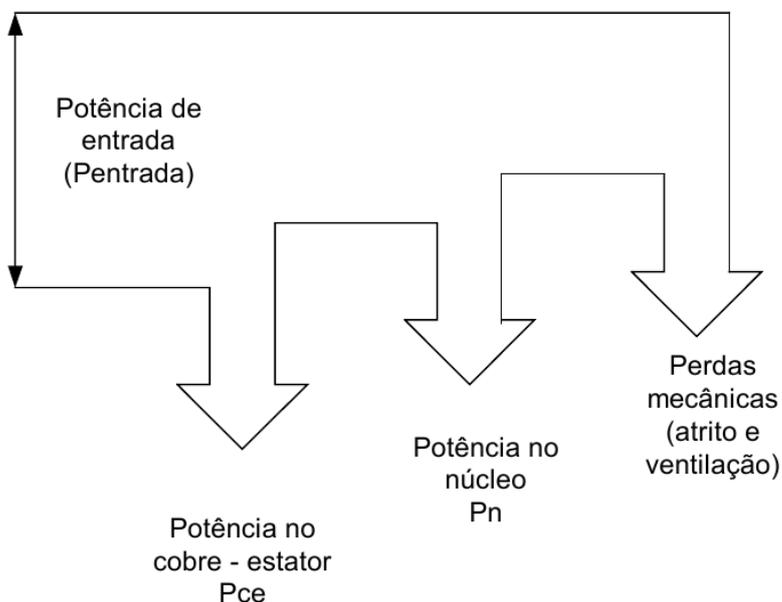
$$P_{03\phi} = W_1 + W_2$$

$$V_0 = \text{nominal}$$

$$I_0 = \text{corrente de linha do motor à vazio}$$

Estando a máquina a vazio, a velocidade do rotor é muito próxima da velocidade síncrona, o que nos permite afirmar que as correntes do rotor são muito pequenas, com isso neste ensaio podemos desprezar as perdas no cobre do rotor (P_{cr}).

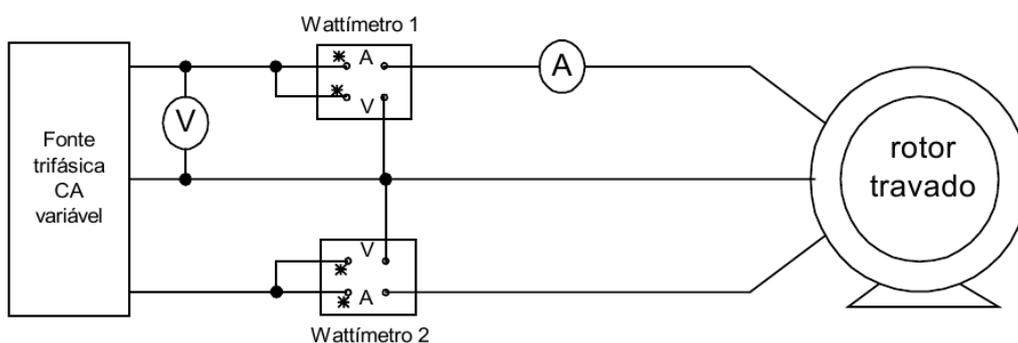
Não havendo carga acoplada ao motor, toda a potência ativa entregue à máquina é utilizada para vencer o atrito dos mancais e acionar o ventilador acoplado ao eixo (P_{rot}), e ainda uma parte é dissipada nos enrolamentos do estator (P_{ce}) e outra com o aquecimento do núcleo ferromagnético (P_n). O diagrama de fluxo de potência para este ensaio pode ser visto abaixo:



Sabendo a priori o valor da resistência do estator, é possível calcular P_{ce} . Devido a corrente a vazio. Subtraindo-se a potência medida no ensaio desta perda, chega-se então à soma das perdas rotacionais com as perdas no núcleo, na condição da máquina operando com tensão nominal é velocidade próxima da velocidade síncrona.

7.3 - Ensaio de rotor travado:

Bloqueia-se o rotor da máquina e aplica-se uma tensão reduzida até que a corrente atinja o valor nominal. É feita então a medição de tensão (V_{rt}), corrente (I_{rt}) e potência (P_{rt}). O esquema de ligação deste ensaio é mostrado na figura abaixo.



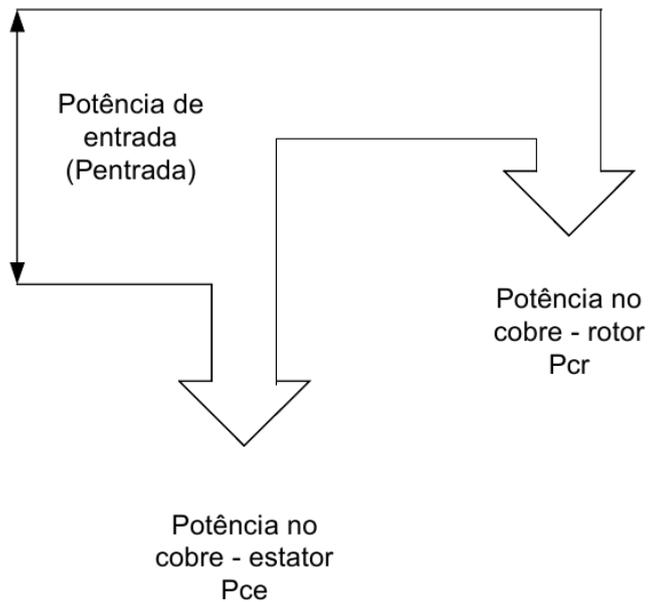
$$P_{rt3\phi} = W_1 + W_2$$

V_{rt} = tensão de rotor travado

I_{rt} = corrente nominal de linha do motor

Como pode-se constatar, a tensão aplicada ao motor neste ensaio (V_{rt}) tem um valor muito menor que a tensão nominal, o que nos permite concluir que as perdas no núcleo podem ser desprezadas, já que as mesmas dependem do quadrado da tensão.

Por outro lado, estando o rotor bloqueado, não existem as perdas rotacionais, logo toda potência entregue à máquina é dissipada por efeito joule nos enrolamentos do rotor e do estator, pois os mesmos operam com seus valores nominais de corrente. O diagrama de fluxo de potência deste ensaio pode ser visto abaixo:



Sabendo a priori o valor da resistência do estator, é possível calcular P_{ce} , devido a corrente nominal. Subtraindo-se a potência medida no ensaio desta perda calculada, chega-se então à perda nos enrolamentos do rotor quando circula corrente nominal.

7.4 – Roteiro para procedimento experimental:

Após conhecido o motor sob teste, realizar os seguintes procedimentos:

1. Anotar os dados de placa do motor, verificado o tipo e como as bobinas estão conectadas.

2. Medir a resistência dos enrolamentos do estator utilizando a ponte de Wheatstone. Observe que a forma de ligação do motor e seus terminais disponíveis para medição e realize as adequações necessárias porá se obter a resistência de cada bobina.

3. Realizar o ensaio a vazio, conforme descrito no item 7.2:

$$P_{03\phi} = W_1 + W_2 =$$

$$V_0 =$$

$$I_0 =$$

4. Realizar o ensaio de rotor travado, conforme descrito no item 7.3:

$$P_{rt3\phi} = W_1 + W_2 =$$

$$V_{rt} =$$

$$I_{rt} =$$

Determine:

- a) Fator de potência do motor no ensaio a vazio;
- b) Fator de potência do motor no ensaio de rotor travado;
- c) O que Você conclui a partir dos valores de fator de potência obtido no dois ensaios?
- d) Perdas nos enrolamentos do estator no ensaio a vazio;
- e) Perdas no núcleo + Perdas rotacionais no ensaio a vazio;

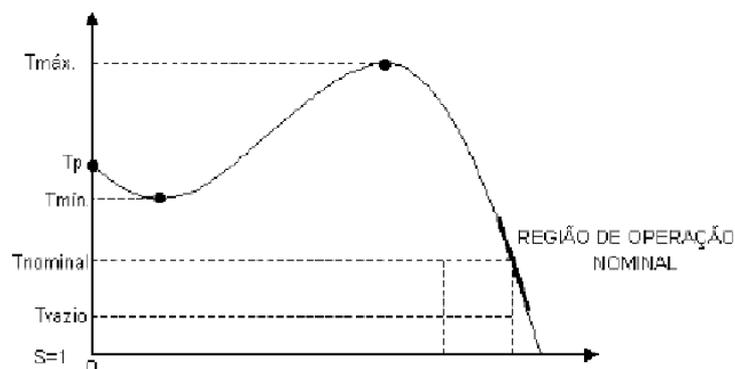
- f) Perdas nos enrolamentos do estator no ensaio de rotor travado;
- g) Perdas nos enrolamentos do rotor no ensaio de rotor travado;
- h) Rendimento deste motor caso o mesmo operasse com tensão nominal e:
 - h.1- carga nominal;
 - h.2 – ½ carga;
 - h.3 – sobrecarga de 25%
- i) Corrente de partida deste motor caso fosse realizada uma partida direta (com tensão nominal).

8. CONJUGADO X VELOCIDADE OU T X N

8.1 Curva característica

O motor de indução tem um conjugado nulo à velocidade síncrona ($n_r = n_s$) $\rightarrow s = 0$ e $T = 0$. À medida que é aumentada a carga no eixo do motor, a sua velocidade diminui até um ponto onde o conjugado desenvolvido é máximo.

Qualquer acréscimo de carga além desse ponto ($T_{m\acute{a}x} \rightarrow$ Região de operação instável) faz com a velocidade caia bruscamente, podendo algumas situações travar o rotor.



sendo:

T_p = conjugado de partida: é o conjugado com o motor travado, ou torque desenvolvido na partida do motor.

$T_{mín}$ = conjugado mínimo: é o menor valor de conjugado obtido desde velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

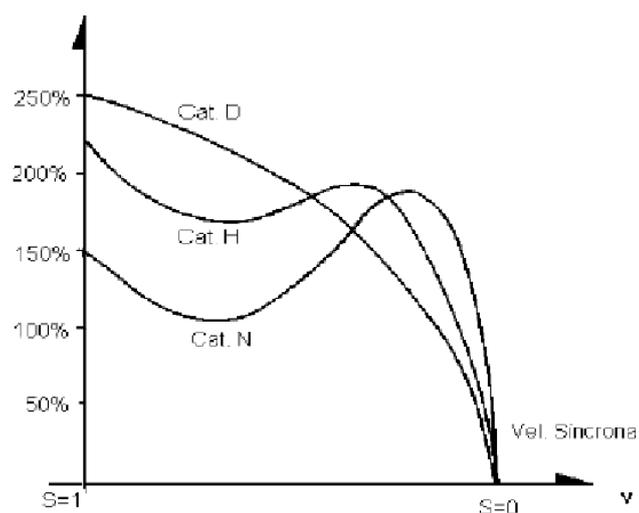
$T_{máximo}$ = conjugado máximo: é o máximo valor de conjugado que o rotor pode desenvolver *sem travar o eixo*.

$T_{nominal}$ = conjugado nominal: é o conjugado que o motor fornece com carga nominal no eixo. Normalmente $T_{nominal}$ ocorre com S entre 2 e 5%.

T_{vazio} = conjugado para o motor operando sem carga. Representa o conjugado sem carga no eixo.

8.2- Categorias

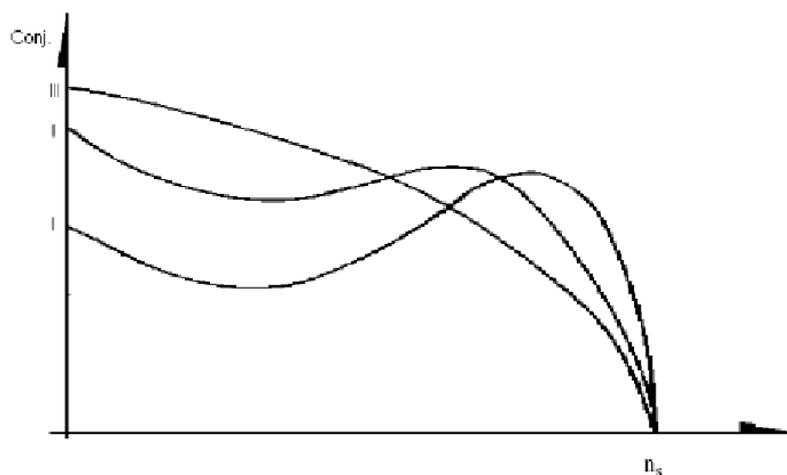
De acordo com as formas construtivas do rotor de motores de indução de gaiola podem apresentar diferentes características de conjugado e corrente de partida conforme o gráfico:



- a) Categoria N: conjugado de partida T_p normal; corrente de partida I_p normal (6 a 7 vezes $I_{nominal}$); Escorregamento baixo ($2\% \leq S \leq 5\%$). Nesta categoria se enquadram a maioria dos motores que acionam cargas normais tais como: bombas centrífugas, máquinas operatrizes. O rotor possui uma única gaiola.
- b) Categoria H: conjugado de partida T_p alto; corrente de partida I_p normal; escorregamento baixo. São motores adequados para cargas com elevada inércia, como: peneiras e transportadoras - carregadoras. O rotor é de Dupla Gaiola.
- c) Categoria D: T_p alto; I_p normal; Salto (maior que 5%), motores para cargas que apresentam picos intermitentes, tais como: prensas excêntricas, tesouras e elevadores.

OBS.: O motor de rotor bobinado pode apresentar diferentes curvas conjugado x velocidade, de acordo com o valor da resistência externa acrescentada ao rotor.

- I. Sem resistência externa no rotor (os anéis estão em curto-circuito, sendo o rotor bobinado, então, equivalente ao rotor de gaiola).
- II. Com resistência externa no rotor.
- III. Com resistência externa no rotor de maior valor.



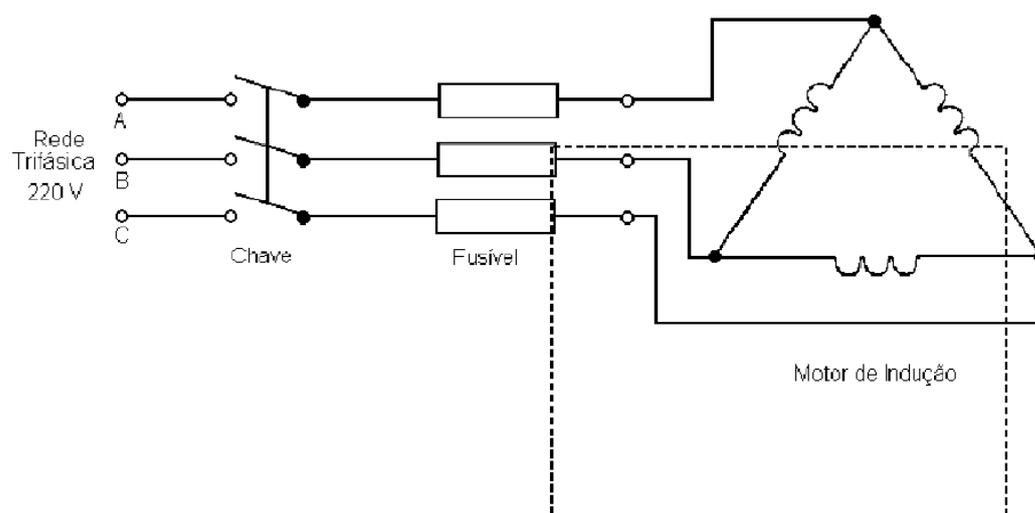
9. PARTIDA DOS MOTORES DE INDUÇÃO

A forma mais simples de partida de um motor de indução é conhecida como partida direta, ou seja, ligar o motor à rede elétrica diretamente. Nesses casos as correntes de partida assumem valores elevados.

O tempo do processo de partida depende diretamente das características do conjugado do motor e da carga, o ideal seria partir um motor sem carga, pois reduziríamos o tempo de aceleração (tempo de permanência de correntes elevadas), entretanto na prática dificilmente esta condição existe, o que leva a necessidade de estabelecer métodos de partida que reduzam os valores de corrente.

Portanto os métodos de partida podem ser divididos em dois grandes grupos: a partida direta e a partida indireta.

9.1 Partida Direta



Do ponto de vista do motor, esta é a forma mais adequada de se partir o motor de indução, desde que as condições locais permitam.

A máquina é ligada diretamente à rede de alimentação. A simplicidade e economia fazem desta partida a mais atraente, entretanto os seguintes requisitos devem ser satisfeitos:

Os dispositivos de partida mais comuns são: chaves interruptoras, disjuntores e contadores eletromagnéticos.

A rede deve suportar a corrente de partida sem afetar outras cargas, esta corrente de partida está em torno de seis vezes a corrente nominal do motor.

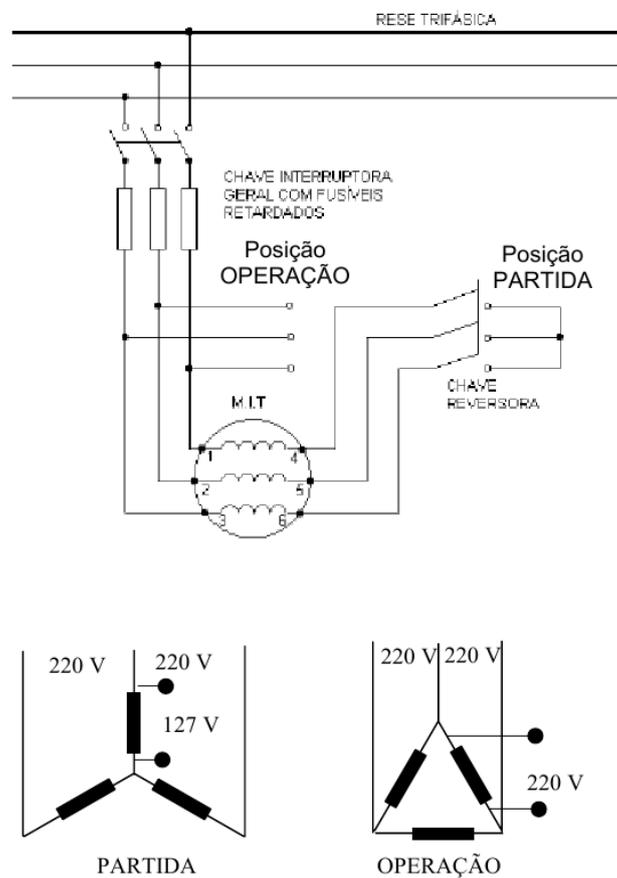
O acoplamento entre o motor e a carga deve suportar o “tranco” provocado pela grande diferença entre o torque do motor e da carga. Este é o grande problema em muitas aplicações industriais.

Este tipo de partida é usado em motor de potência pequena (< 5CV), especialmente para redes alimentadas diretamente por transformador de distribuição da concessionária. E ainda motor que parte em vazio.

9.2 - Chave Estrela – Triângulo

Consiste em ligar os enrolamentos do motor inicialmente em estrela e após a máquina atingir no mínimo 90% da velocidade trocar para ligação triângulo. As seguintes condições devem ser satisfeitas:

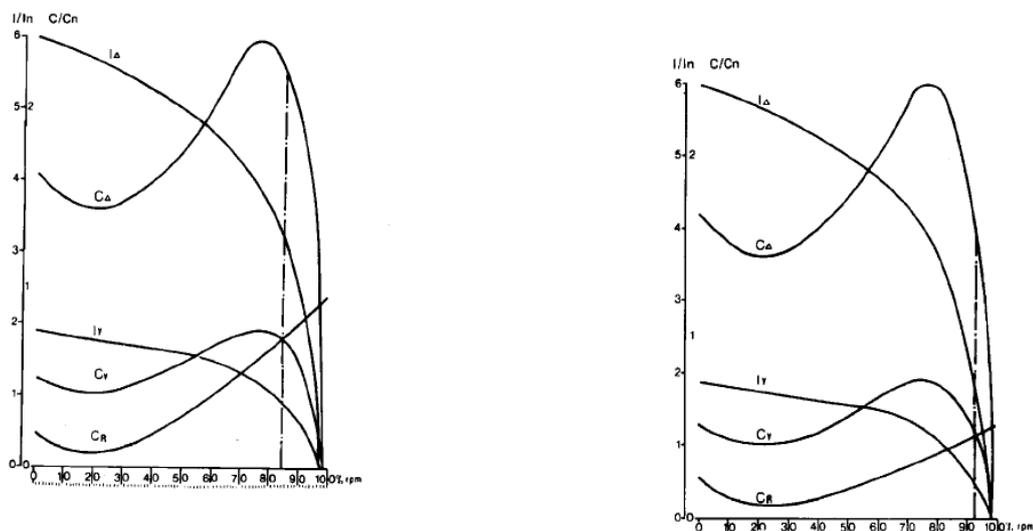
- O motor deve ter seis terminais;
- A ligação dos enrolamentos do estator em triângulo deve ser compatível com a tensão da rede;
- A característica de conjugado de carga deve ser adequado a esta condição de partida, pois a tensão na partida é reduzida de raiz de 3 o torque é reduzido a 1/3.



A partida com chave estrela-triângulo de uma carga com alto conjugado resistente pode levar a uma corrente de comutação elevada, tornando este método inútil. As figuras abaixo mostram as comutações da chave estrela triângulo para dois tipos de carga distintos.

No primeiro caso temos um alto conjugado resistente, o motor acelera até 85% da rotação nominal, quando é feita a comutação, e a corrente atinge aproximadamente 320% do valor nominal neste instante, o que não é nenhuma vantagem, uma vez que a corrente na partida era de somente 190%.

No segundo caso temos o mesmo motor acionando uma carga com conjugado resistente menor, o motor acelera até 95% da rotação nominal, quando é feita a comutação, e a corrente atinge aproximadamente 170% do valor nominal neste instante, o que torna este método vantajoso para este tipo de carga.

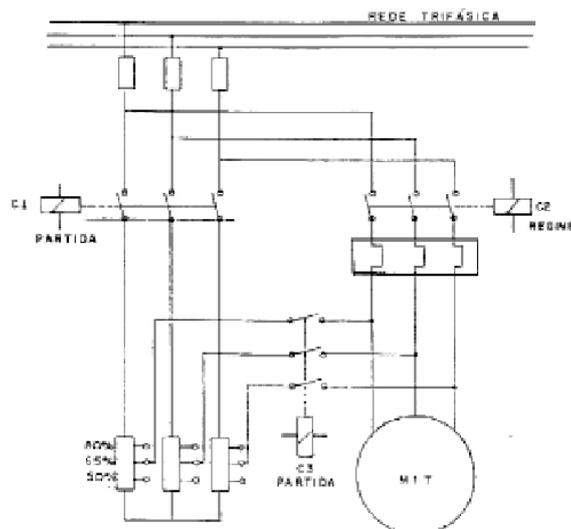


Partida com chave estrela-triângulo – Dois casos com cargas distintas

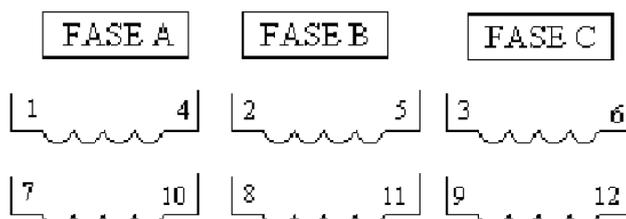
9.3 - Chave Compensadora (auto-transformador)

Consiste em utilizar um autotransformador com diferentes tensões secundárias alimentando o motor com tensões crescentes após sua partida. Normalmente este método é usado quando uma chave estrela – triângulo não produz torque suficientemente alto para uma carga. Geralmente este método é utilizado para partida de motores com potências maiores, acionando cargas com grande conjugado de partida, tais como britadores, grandes compressores e máquinas acionadas por correia.

Normalmente os transformadores possuem taps de 50%,65% e 80% da tensão. Na partida, com a chave compensadora, a corrente de linha e o conjugado, sofrem uma redução que varia com o quadrado da relação de transformação.



Exercício 7: Dado um motor de indução trifásico de 12 terminais, conforme figura abaixo, pede-se :



a.) Quais as conexões para o motor operando nas seguintes redes de alimentação :

a-1.) 220/127 V;

a-3.) 440/254 V;

a-2.) 380/220 V;

a-4.) 760/440 V.

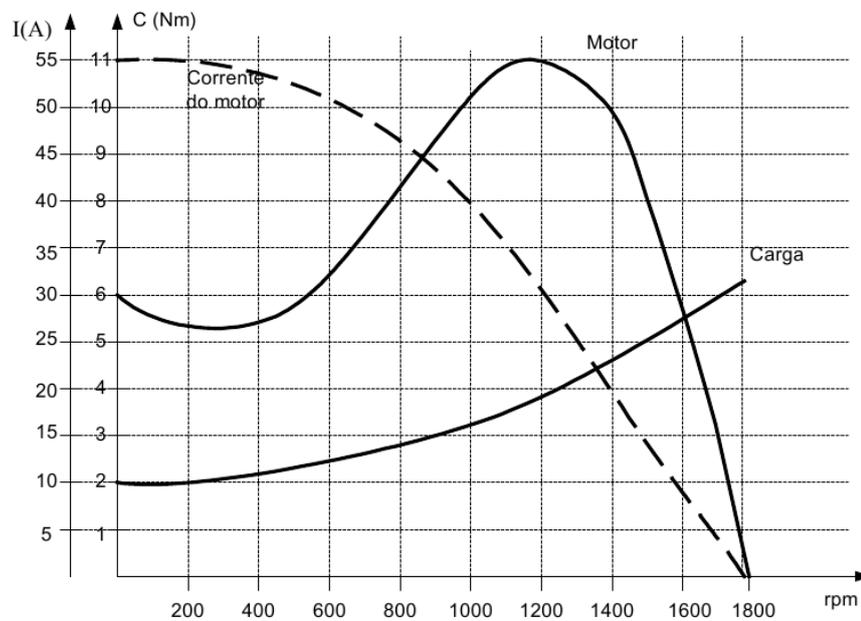
b.) Em quais redes o motor pode ser acionado por chave Y- Δ ?

Exercício 8: Um motor 3 ϕ , 220V, 5CV, 1715 rpm, $\cos\phi=0,87$; consome da rede de energia, quando em condições nominais, uma potência aparente 5715,77 VA.

- Determine a corrente e o rendimento nas condições nominais. (15A, 74%)
- Determine as perdas internas no motor. (1292,72W)

Exercício 9: Responda as questões relativas à figura abaixo:

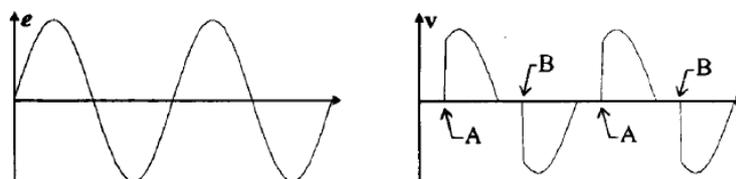
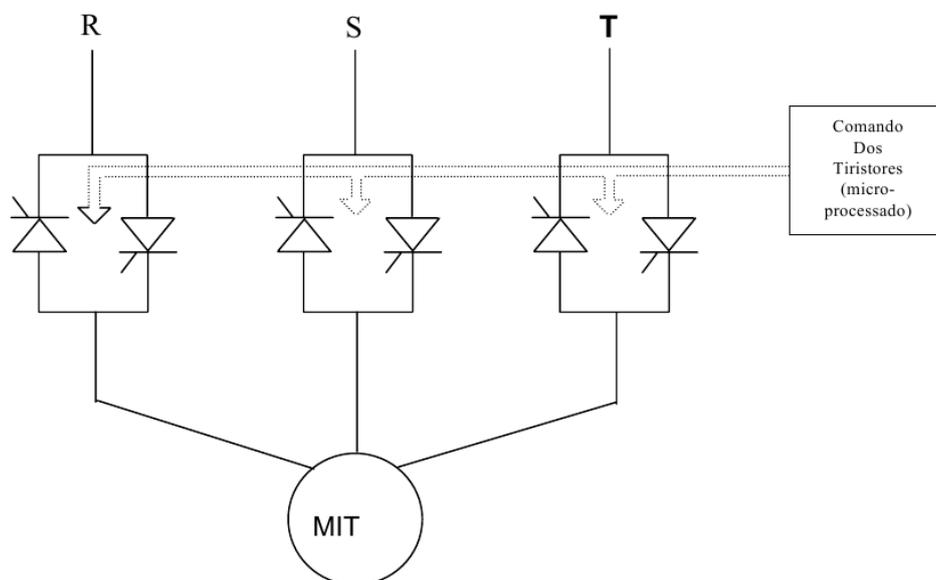
- Aponte na curva do motor: Conjugado de partida, Conjugado mínimo, Conjugado Máximo, Ponto de operação.
- Qual a velocidade e o escorregamento do motor acionando a carga em questão.
- Qual o número de pólos do motor
- Este motor pode ser indicado para partir esta carga utilizando uma chave estrela-triângulo? Porque?
- Qual a relação entre a corrente de partida e a corrente nominal (I_p/I_n)?



9.4 - Chave Eletrônica (Soft-Starter) :

É um método moderno, efetivo e de baixo custo, baseado em dispositivos eletrônicos controlados por microprocessador.

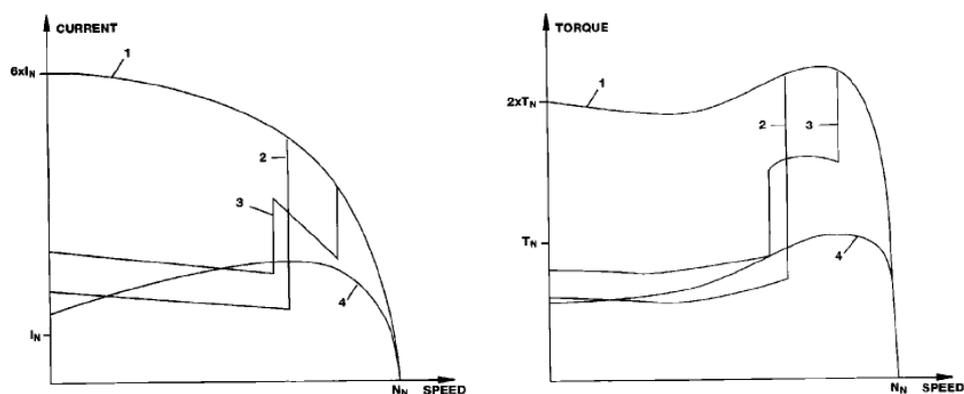
Possibilita variar continuamente a tensão aplicada sobre a máquina, desde um pequeno valor até a tensão nominal sem envolver partes mecânicas móveis. Esta variação é feita através do controle do ângulo de disparo de semicondutores (tiristores).



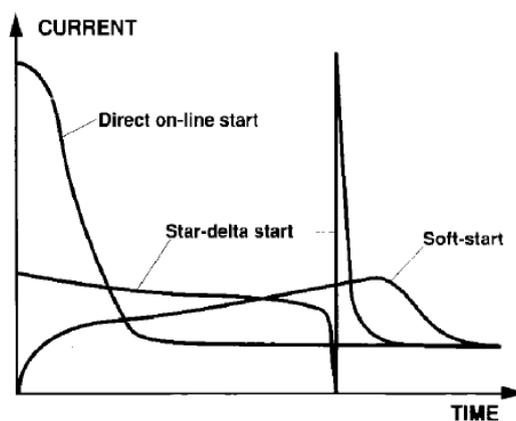
Esquema típico de um soft-starter e formas de onda de tensão na entrada e saída.

Este equipamento possui programação flexível, permitindo controlar torque, corrente e tempos de partida, evita *stresses* mecânicos nos motores e nas cargas, podendo ainda Ter uma parada suave, especialmente importante no acionamento de bombas pois evita choques hidráulicos nas tubulações.

As figuras abaixo mostram as curvas típicas de torque e corrente dos motores para os quatro tipos de partida mencionados acima.



Formas de onda típicas de corrente e torque em função da velocidade dos esquemas de partida: 1- partida direta, 2- chave estrela triângulo, 3- chave compensadora, 4-Soft-starter.

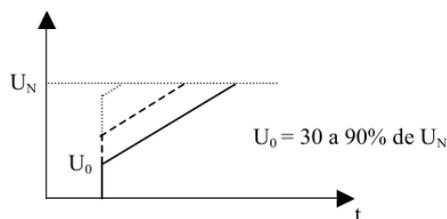


Os soft-starters microprocessados permitem que sejam programadas suas diversas funções, dependendo do tipo de aplicação, comportamento da carga e etc.

As funções básicas são:

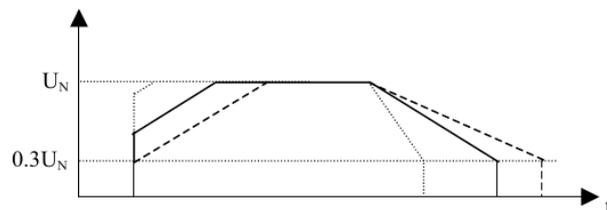
1. Controle da Tensão Inicial (U_0):

A tensão inicial (U_0) pode ser programada de 30 a 90% do valor nominal, o que dá uma variação de torque de 10 a 80%.



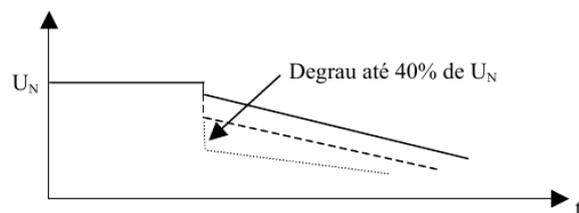
2. Rampa de Partida e Parada

Podem ser controlados individualmente os tempos das rampas de partida e parada. Esses tempos vão depender das necessidades da carga.



3. Degrau de Desligamento de Tensão:

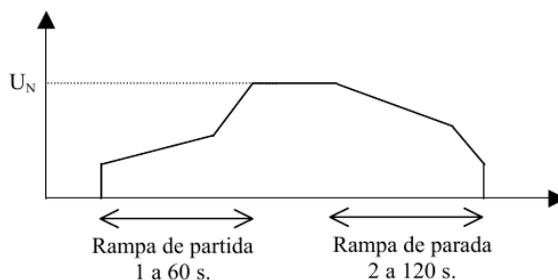
Quando se requer uma parada mais rápida, pode-se programar um degraú de tensão entre 100 a 40% da tensão nominal antes do início da rampa de parada.



Funções Especiais:

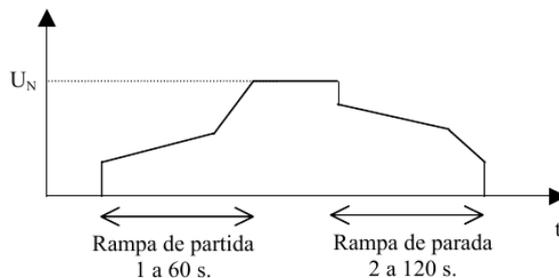
4. Dupla Rampa de Partida e Parada:

Permite programar dupla rampa de partida ou parada. Esta função se aplica quando se necessita aceleração e desaceleração mais linear.



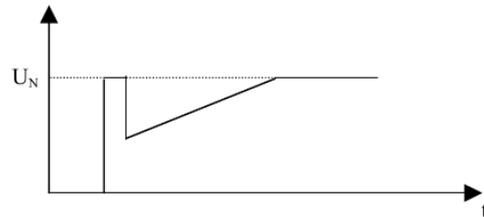
5. Aplicação para Bombas:

Esta função é usada para minimizar os choques nas lihas hidráulicas, O microprocessador ajusta os parâmetros do gráfico abaixo a partir dos tempos de rampa de partida e parada.



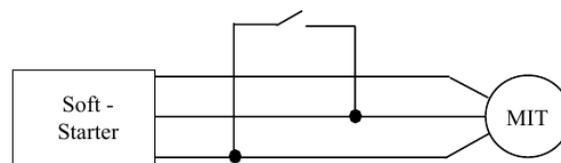
6. Elevação de Torque na Partida (Torque Booster):

Permite aplicar torque máximo, aplicando tensão nominal, durante um pequeno intervalo de tempo programável de 0,1 a 2 segundos. É aplicável por exemplo em trituradores. Terminado o sobretorque, a partida continua de acordo com a rampa programada.



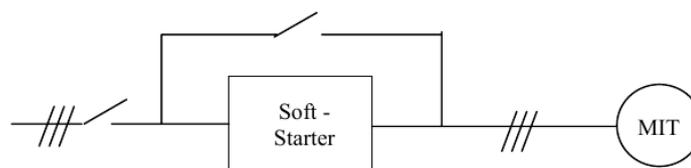
7. Frenagem CC:

Quando se necessita de paradas rápidas em cargas de grande inércia, pode-se aplicar uma tensão contínua no estator da máquina. Nestes casos um contator externo deve curto-circuitar uma das bobinas do motor.



8. Contator de *By-pass*:

Utilizando-se um contator externo pode-se *by-passar* o soft-starter. Normalmente isto não é necessário, exceto em casos de ambientes com temperaturas elevadas ou outras situações em que seja necessário minimizar as perdas joulicas no equipamento.



9. Controle Analógico Remoto:

Para aplicações especiais o soft-starter possui entradas analógicas de tensão ou corrente (0 a 10V ou 4 a 20 mA) que pode ser usado para controlar a tensão de saída do equipamento.

10. Partida com Tensão Plena:

Em casos de emergência ou outro motivo como alto atrito ou mecanismo emperrado pode-se partir o motor através do soft-starter como sendo uma partida direta, sem a necessidade de um contator de *by-pass*.

11. Controle do Fator de Potência

Em casos de motores operando em baixa carga (carga parcial) por longos períodos, pode-se programar a função controle de fator de potência para ajustar a tensão de saída do soft-starter automaticamente para melhorar o fator de potência. Com tensão reduzida são menores as demandas de potência reativa.

12. Relés Programáveis:

O soft – starter pode possuir internamente relés programáveis que podem acionar alarmes, indicar máxima tensão ou algum outro sinal para programável durante sua operação.

13. Conjunto de Parâmetros:

Quando se usa um único soft-starter para acionar mais de um motor ou um único motor com diferentes condições de carga, utiliza-se esta função. Onde quatro conjuntos de parâmetros são armazenados e são selecionados para operar através de programação por entradas digitais.

14. Limitação de Corrente:

Em casos especiais, onde a carga requer máximo torque, mas a corrente não pode ultrapassar um limite pré estabelecido deve ser usado o limite de corrente. Este limite pode ser ajustado entre 150 a 500% da corrente nominal. Após um tempo de aproximadamente 6 segundos após a partida, se a corrente não diminuir abaixo do valor ajustado, um regulador PI assume o controle, mantendo o valor ajustado. Se o tempo de partida tiver decorrido e a corrente não tiver diminuído abaixo do limite, o alarme de excesso de tempo em limite de corrente é acionado. Um relé K pode ser utilizado para o comando de parada.

15. Proteção dos Motores

Os soft-starter podem ser fornecidos com proteção eletrônica térmica opcional. Neste caso uma proteção externa pode ser excluída. O microprocessador continuamente calcula a temperatura do motor baseado sobre um modelo térmico do motor. A atuação da proteção pode ocorrer tanto para pequenas sobrecargas com longa duração tanto para grandes sobrecargas de curta duração. Atuação da proteção é indicada no display.

10. CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO:

O controle de velocidade dos motores de indução podem ser obtidos por:

- Controle do escorregamento
- Controle da velocidade do campo girante

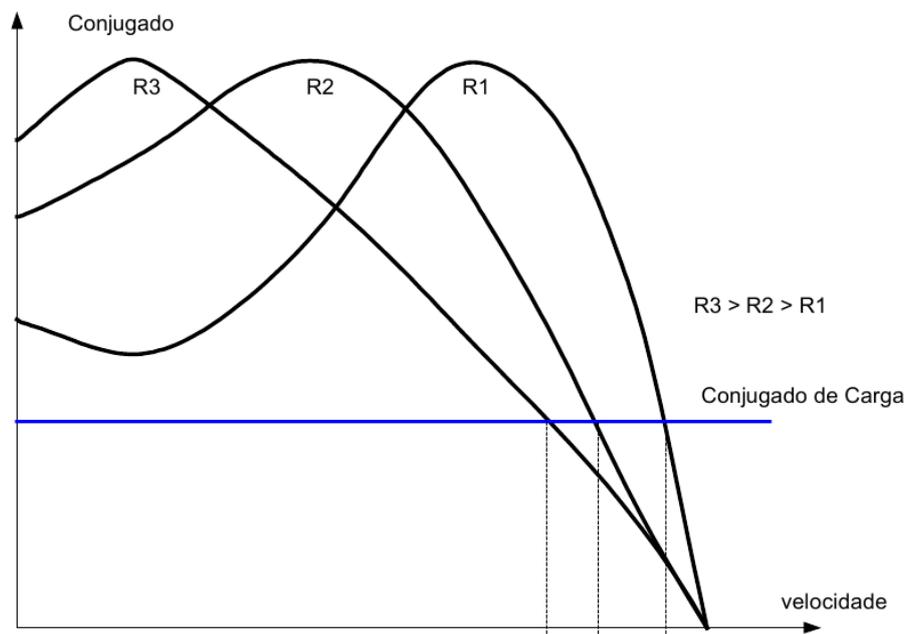
10.1 - Variação da velocidade pelo controle do escorregamento:

Neste caso, a velocidade do campo girante é mantida constante, e a velocidade do rotor é alterada da seguinte forma:

10.1.1 Variação da resistência do rotor:

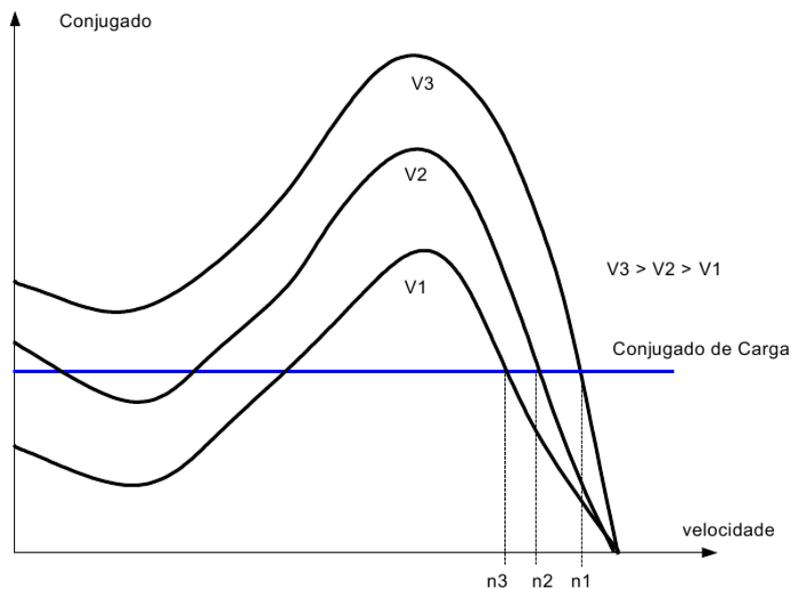
Pode ser utilizada em motores de rotor bobinado. A inserção de resistências altera a característica torque x velocidade do motor alterando a velocidade de operação, conforme mostra a Figura abaixo.

Este método possui uso restrito e apresenta pobre regulação de velocidade e baixo rendimento.



10.1.2 Variação da tensão do estator:

O torque desenvolvido por um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada a seus terminais. A característica torque x velocidade de um motor para tensões de alimentação diferentes pode ser vista na figura abaixo, ou seja é possível alterar a velocidade de operação do motor. Este método de controle é comum em motores pequenos que acionam ventiladores, e apresenta baixo rendimento e pobre regulação de velocidade.

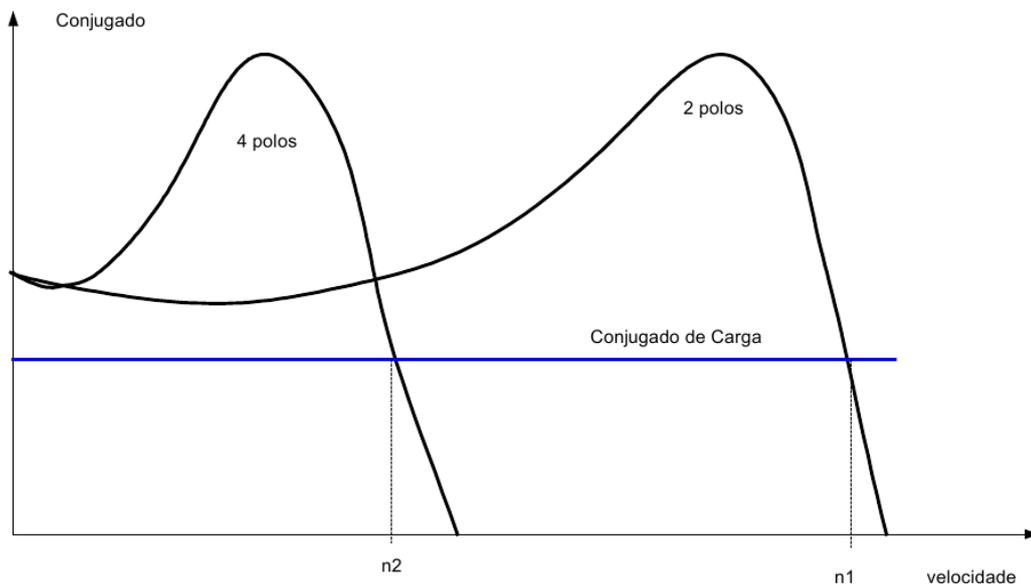


10.2 Variação da velocidade pelo controle do campo girante

10.2.1 Variação do número de pólos:

Ao se variar o número de pólos do motor de indução, varia-se sua velocidade síncrona. O comportamento do conjugado assume a característica mostrada abaixo. A desvantagem deste método é que a regulação de velocidade somente pode ser realizada de forma discreta (n , $2n$, $4n$) e ainda o motor deve ser preparado para para isto.

O sistema mais comum é denominado Ligação Dahlander, onde a relação do numero de pólos é de 1:2.



2.2.2 Variação da frequência de alimentação:

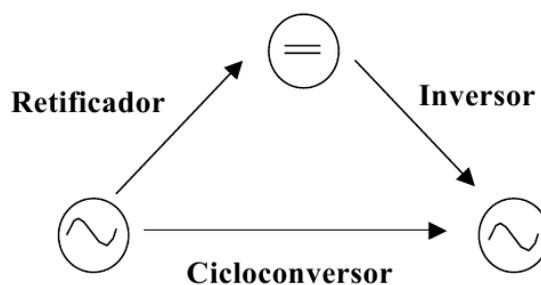
A variação da frequência de alimentação da máquina pode ser obtida por meio de um conversor de frequência, popularmente conhecido no mercado por inversor. Com este dispositivo é possível controlar continuamente a frequência e portanto a velocidade dos motores de indução.

A seguir serão detalhados os conversores de frequência.

CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

A utilização de conversores de frequência permitem que uma rede de tensão e frequências fixas se transforme numa rede de tensão e frequências variáveis. Em outras palavras, acionar uma máquina com este equipamento possibilita controlar a velocidade e / ou o torque através da variação da tensão e / ou frequência de alimentação do motor.

Os conversores de frequência podem ser constituídos de duas formas: conversão direta ou conversão em duplo estágio, conforme mostra o esquema abaixo.



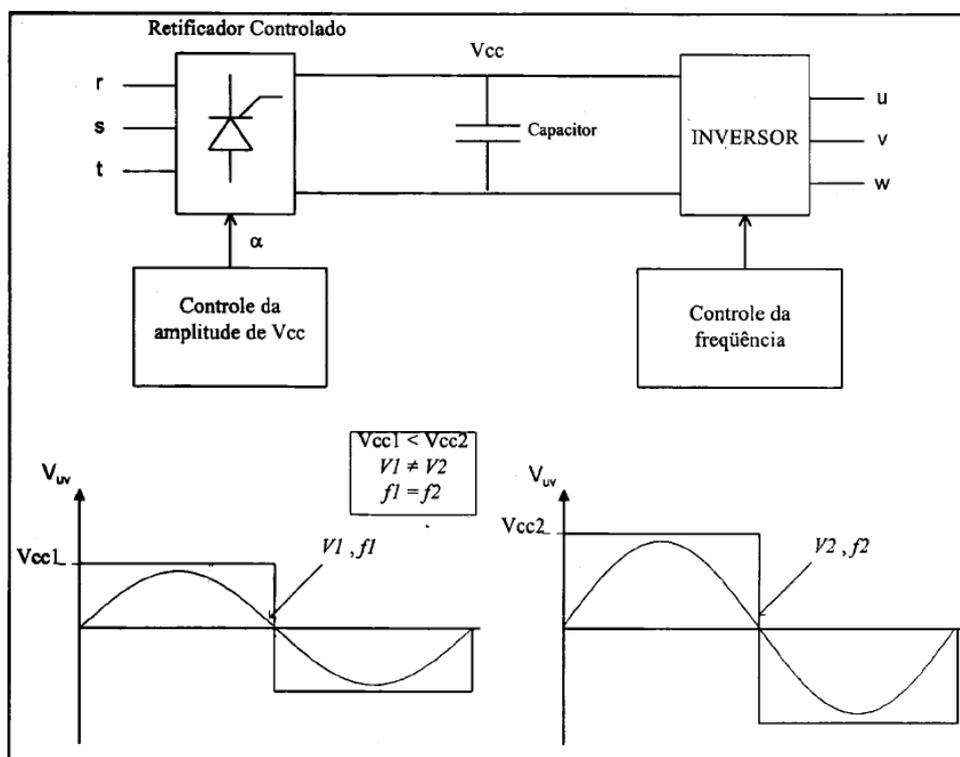
Conversores de Frequência

No primeiro caso o equipamento é conhecido como **cicloconversor**, a tensão CA e a frequência de saída são obtidos diretamente da tensão CA de entrada, sem necessidade da etapa de corrente contínua. A desvantagem deste tipo de acionamento é a limitação da frequência de saída, cujos valores ficam abaixo dos 20 Hz.

A conversão em duplo estágio pode ser de dois tipos:

Modulação por Amplitude de Pulso (PAM):

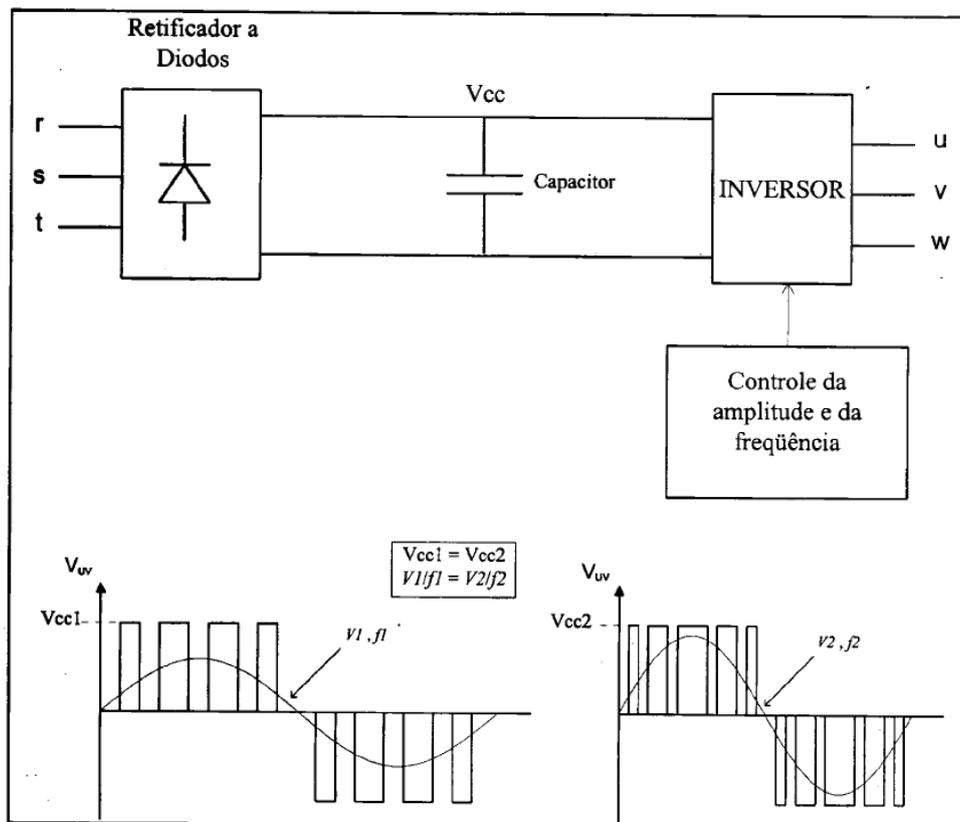
Nesta configuração, o retificador, normalmente constituído por tiristores, faz o controle da amplitude da tensão, enquanto o inversor faz o controle da frequência. A figura abaixo mostra em diagrama de blocos esta configuração, bem como as formas de onda típicas.



Esquema básico e principais formas de onda de um conversor de frequência PAM

Modulação por Largura de Pulso (PWM)

Trata-se do tipo mais comum comercialmente, e neste caso o retificador a diodo fornece uma tensão CC de amplitude constante. O inversor fica responsável pelo controle da amplitude e da frequência da tensão CA de saída. A figura abaixo mostra em diagrama de blocos esta configuração, bem como as formas de onda típicas.

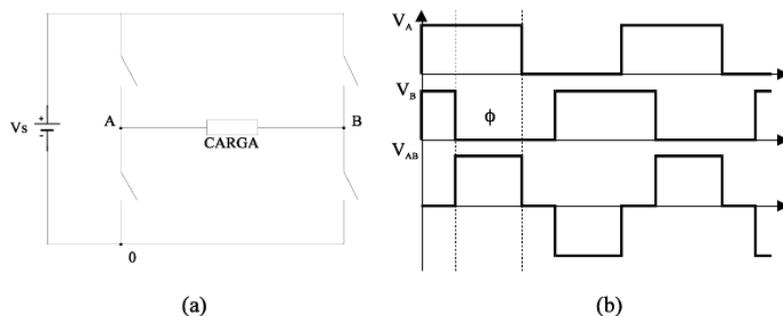


Esquema básico e principais formas de onda de um conversor de frequência PWM

Modulação PWM:

A modulação PWM nos permite controlar o valor RMS da tensão de saída do inversor, regulando a largura dos pulsos de comando dos interruptores de potência.

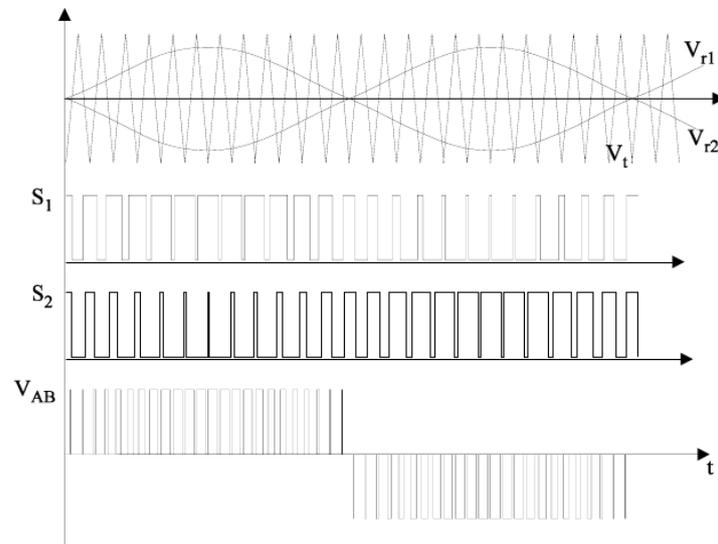
A maneira mais simples de se efetuar este controle é com **pulso único**. Neste caso a regulação da tensão de saída é obtida pela variação do ângulo ϕ , conforme mostrado a seguir, aplicado a um inversor monofásico em ponte completa.



a) Inversor monofásico em ponte completa, b) modulação por único pulso

Esta implementação é bastante simples, entretanto neste modo de operar o conteúdo harmônico da tensão de saída do inversor é elevado, causando pulsação de torque, queda do rendimento e interferências eletromagnéticas.

Para contornar estes problemas existem outras técnicas de modulação PWM, para reduzir o conteúdo harmônico da tensão de saída, sendo a mais usual a **PWM senoidal**. Neste caso a largura dos pulsos são moduladas por uma senoide, através da comparação da mesma com uma onda triangular, conforme mostrado a seguir.

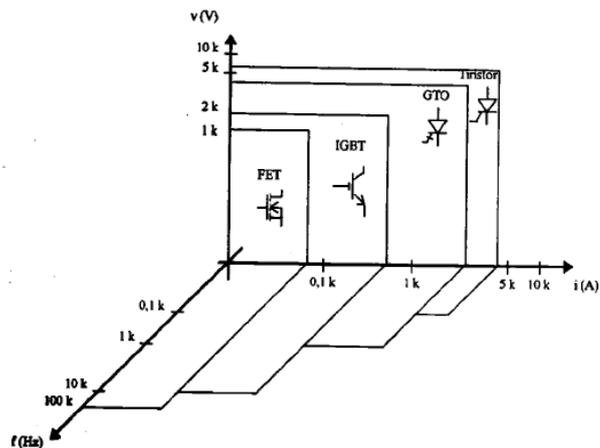


Modulação PWM senoidal a três níveis

O valor RMS e a frequência da tensão de saída, são definidos a partir da senóide de referência. O número de pulsos da modulação define a ordem dos harmônicos mais significativos e é controlada pela frequência da onda triangular.

Quanto maior o numero de pulsos, maior será a frequência do harmônico mais significativo, portanto serão filtrados através de filtros passivos (indutores e capacitores) com reduzido peso e volume. A limitação deste número de pulsos está na velocidade de comutação das chaves semicondutoras de potência utilizadas.

A aplicação dos semicondutores operando como chaves em eletrônica de potência depende das freqüências e potências envolvidas. A figura abaixo resume a aplicação destes elementos, segundo esta classificação.



Aplicação das chaves semicondutoras de potência

11. PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

FABRICANTE (WEG)		
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO		
MOD.	60 Hz	
15 cv	1750 rpm	
Δ 220V / Y 380 V	Δ 41A / Y 24A	
FS 1,15	ISOL B	I_p/I_n 8,0
REG.S. continuo	CAT N	I_p 54
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Δ</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Y</p> </div> </div>		