

# Atuadores

## Aula 05 - Métodos de Partida de Motores Elétricos

# Apresentação

Esta aula tem como objetivo ampliar os conhecimentos de pessoas envolvidas nas áreas de aplicações, projetos e afins, familiarizando-as com técnicas e recursos existentes, visando fornecer as informações necessárias à correta seleção e aplicação de acionamentos de motores, segundo as suas necessidades.

## Objetivos

- Conhecer os métodos de partida de motores elétricos.
- Conhecer os comandos eletromecânicos de partida dos motores.

# Preâmbulo

Os motores elétricos constituem parte dos equipamentos mais amplamente utilizados na indústria e, no Brasil, a fabricação de motores é um segmento importantíssimo da atividade econômica. Considerando-se um rendimento médio da ordem de 85% no universo de motores elétricos em aplicações industriais, cerca de 15% da energia elétrica industrial será transformada em perdas nos motores. Portanto, o acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extraordinária importância econômica.

Os fundamentos técnicos e econômicos para a aplicação de acionamentos de controle de velocidade de motores elétricos trifásicos foram ampliados consideravelmente pelos avanços feitos no desenvolvimento de componentes eletrônicos e de potência. O acionamento elétrico é um sistema capaz de converter energia elétrica em mecânica, produzindo trabalho e mantendo controle sobre tal processo de conversão. Um sistema de acionamento compreende o motor elétrico e seu equipamento de comando e/ou controle, os meios de transmissão (mecânicos) de energia do motor à máquina acionada para que esta realize a função desejada.

Atualmente existem disponíveis vários tipos de conversores para acionamento e controle de velocidade de motores, cada um adaptado aos diferentes tipos de motores. Embora os acionamentos CA estejam sendo mais largamente utilizados, muitos sistemas podem ser acionados com motores CC sob controle de um conversor realimentado para melhor operação, ou então utilizar conversores de frequência com controle vetorial. Uma consideração importante é o fato de que em um motor CC o torque e a velocidade podem ser ajustados independentemente pela corrente e pelo fluxo de magnetização, e em motores CA, atualmente com o avanço das tecnologias de acionamento por conversores de frequência com controle vetorial, o torque e o fluxo de magnetização são controlados pela decomposição da corrente estatórica, conseguindo-se desta forma obter as mesmas características do acionamento por motor CC.

# Métodos de Partida dos Motores Elétricos

Os rotores de motores elétricos são massas girantes, portanto armazenam energia na forma cinética. Sendo  $J$  o momento de inércia e  $n$  a velocidade de rotação do rotor, a energia cinética vale:

$$E_c = \frac{1}{2} J n^2$$

(1)

Assim, as variações de velocidade, como ocorre na partida de um motor elétrico, são acompanhadas de variações de energia cinética. Quanto mais rápida a variação de energia cinética, tanto maior será a potência necessária para a mudança. Assim sendo, os tempos de partida dos motores elétricos precisam, em geral, ser controlados para evitar valores elevados de corrente para uma determinada alimentação de tensão.

Seguem os casos típicos de partida de motores elétricos.

## Partida de Motores CC

O comportamento elétrico de um motor cc encontra-se regido pela equação [2] a seguir:

$$V_a = R_a I_a + L_a (dI_a/dt) + e_a$$

(2)

**Onde:**

$V_a$  é a tensão de armadura;

$R_a$  é a resistência de armadura;

$L_a$  é a indutância de armadura;

$e_a$  é a força contraeletromotriz.

Inicialmente, é necessária a existência de um campo de excitação, caso contrário, a força contraeletromotriz será nula e a corrente de armadura do motor fica limitada somente aos valores de resistência e indutância de armadura. Mesmo com a aplicação de uma tensão de campo, para baixos valores de velocidade, a corrente de armadura pode assumir valores muito elevados. Os procedimentos de partida dos motores cc são:

- a. Garantir a existência do campo de excitação e, em seguida, aplicar a tensão nominal através da inserção de resistências em série com a armadura, que são retiradas à medida que a velocidade se eleva;
- b. Garantir a existência do campo de excitação e, em seguida, aplicar uma tensão reduzida através de um *chopper* ou retificador controlado para gradativamente aumentar a tensão de alimentação até o seu valor nominal.

## Partida de Motores de Indução

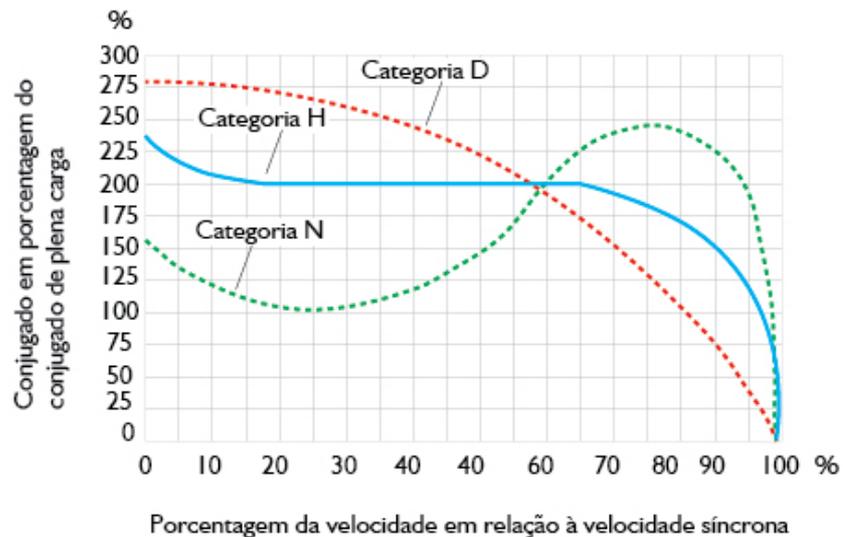
**Método 1:** Aplicação direta da tensão de alimentação. A desvantagem deste método é a elevada corrente de partida que pode chegar a valores superiores a sete vezes a corrente nominal.

Dependendo da característica torque x velocidade e da corrente de partida, os motores trifásicos de rotor gaiola são classificados pela NBR7094 nas seguintes categorias:

- **N** – conjugado de partida normal, corrente de partida normal, baixo escorregamento na velocidade nominal; são os motores mais usuais no mercado;
- **H** – conjugado de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento;
- **D** – conjugado de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento;
- **NY** – motores semelhantes aos da categoria N com previsão para partida estrela-triângulo;

- **HY** – motores semelhantes aos da categoria H com previsão para partida estrela-triângulo.

As curvas de torque x velocidade segundo a categoria do motor são analisadas na Figura 1.



**Figura 1** - Curvas torque x velocidade das categorias de motores de indução.  
**Fonte:** Stephan (2013).

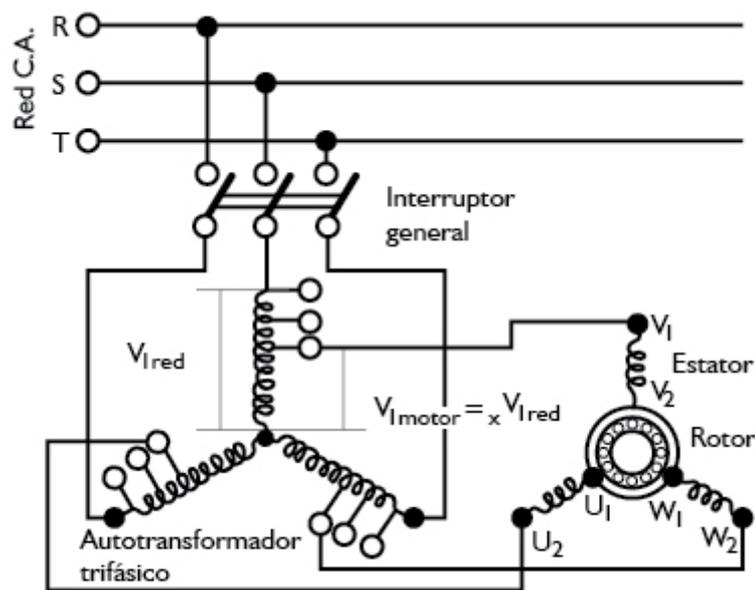
O torque médio de partida pode ser obtido aproximadamente pela diferença gráfica entre o torque médio do motor e o torque da carga.

**Método 2:** Partidas com tensão reduzida. A aplicação de uma tensão reduzida implicará em uma menor corrente de partida, no entanto, deve-se levar em conta que o torque elétrico produzido também irá diminuir. As formas mais usuais são:

- Chave estrela-triângulo. Se os terminais das bobinas de alimentação do motor estiverem disponíveis, elas poderão ser inicialmente conectadas e estrela (Y), com tensão  $\sqrt{3}$  vezes menor que a tensão nominal e, em seguida, após o motor ter desenvolvido alguma velocidade, conectadas em triângulo ( $\Delta$ ). As chamadas chaves estrela-triângulo permitem que essas modificações sejam facilmente realizadas. O momento de mudança de conexão deve ser escolhido de forma a minimizar os picos de corrente e depende de cada aplicação. A corrente e o torque de

partida ficam reduzidos à terça parte do valor da partida direta. Na seção **Partida Estrela triângulo** é ilustrado, o circuito, **Figura 17**.

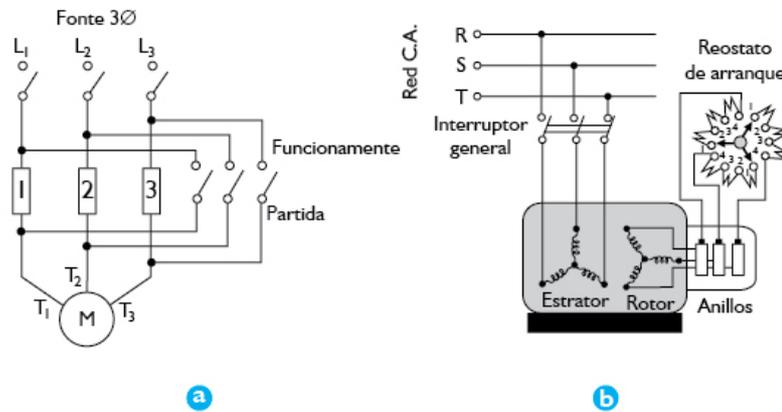
**Autotransformador:** Um autotransformador também pode ser empregado para uma elevação suave da tensão de alimentação dos motores de indução, como exibe a Figura 2. Essa solução é mais cara que a anterior, porém pode ser empregada mesmo no caso e que não seja possível alterar a conexão interna das bobinas do motor de estrela para triângulo.



**Figura 2** - Partida com autotransformador.

Fonte: WEG Indústrias Ltda.

- Resistência ou reatância em série. A introdução de uma impedância em série pode ser uma solução para evitar altas correntes de partida. Naturalmente, isto vem acompanhado de uma redução no torque motriz. O método é apresentado na Figura 3.



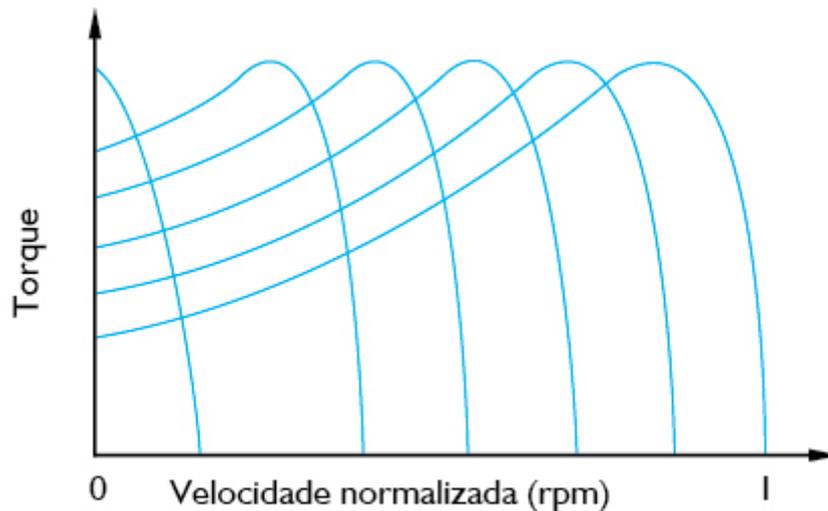
**Figura 3** - Partida com resistência em série. (a) Motor sem rotor bobinado; (b) Motor com rotor bobinado.

**Fonte:** Silva (2006).

- Soft-starter. Atualmente, conversores eletrônicos, baseados em tiristores também podem ser empregados para reduzir a tensão de alimentação na hora da partida. Comparativamente aos autotransformadores, essa solução ocupa menor espaço, apresenta menor peso e não depende de contatos mecânicos, no entanto, introduz harmônicos na rede elétrica durante a partida.

## Partida de Motores de Indução

**Método 3:** Partida com Inversor Eletrônico. Os inversores permitem o controle do nível e da frequência de alimentação do motor. A vantagem desta solução que é mantida a razão entre a tensão e a frequência de alimentação, conforme visto através da Figura 4, o torque elétrico produzido não sofre redução, como ocorre com as técnicas apresentadas no procedimento anterior.



**Figura 4** - Curvas torque x velocidade em função da frequência.  
**Fonte:** Stephan (2013).

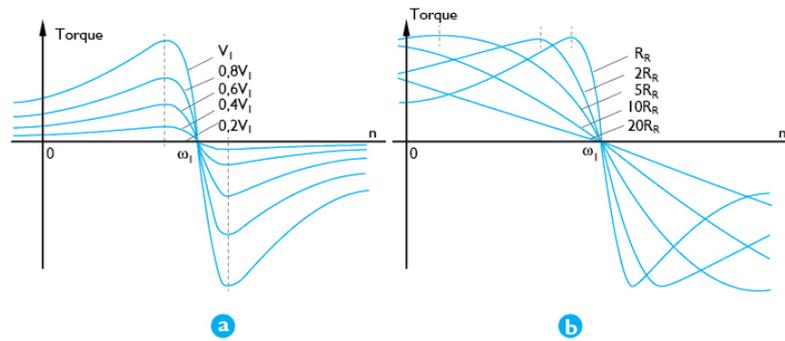
**Método 4:** Motores com quatro níveis de tensão. Nestes motores, cada fase é constituída por dois enrolamentos que podem ser conectados em série ou paralelo. Uma vez disponível o acesso aos terminais destas bobinas, pode-se organizar uma sequência de alimentação similar, porém mais completa, que na partida estrela-triângulo:

Y em série →  $\Delta$  em série → Y em paralelo →  $\Delta$  em paralelo.

O torque de partida, função do quadrado da tensão aplicada sobre cada bobina, assume aproximadamente os valores:

$M/12 \rightarrow M/4 \rightarrow M/3 \rightarrow M$ .

**Método 5:** Motor de Indução de Rotor Bobinado. Como apresentado através da Figura 5, as curvas de torque deste tipo de motor podem ser ajustadas pela variação da resistência rotórica. Este fato pode ser aproveitado na partida, iniciando com resistências adicionais que permitem um maior torque em baixas velocidades e gradativamente, reduzindo o valor dessas resistências na medida em que a velocidade aumenta.



**Figura 5** - Principais curvas torque x velocidade dos motores de indução. (a) variação da tensão de alimentação; (b) variação da resistência no rotor.

**Fonte:** Stephan (2013).

## Partida de Motores Síncronos

Os motores síncronos não apresentam torque de partida. Para contornar este fato, são propostas três alternativas.

**Procedimento 1:** Partida com motor auxiliar. Como o próprio nome sugere, um motor auxiliar é empregado para atingir a velocidade síncrona e, a partir daí, pode ser feita a conexão com a rede elétrica.

**Procedimento 2:** Partida como motor de indução. Os motores síncronos com gaiola de amortecimento podem partir como motores de indução. O enrolamento de campo deve ser curto-circuitado para facilitar a operação da partida.

**Procedimento 3:** Conversor eletrônico. Este procedimento é similar ao método 3 para os motores de indução.

## Comandos de Motores Elétricos

O comando é a operação sem a necessidade de realimentação. Os sistemas que empregam realimentação são chamados de sistema de controle.

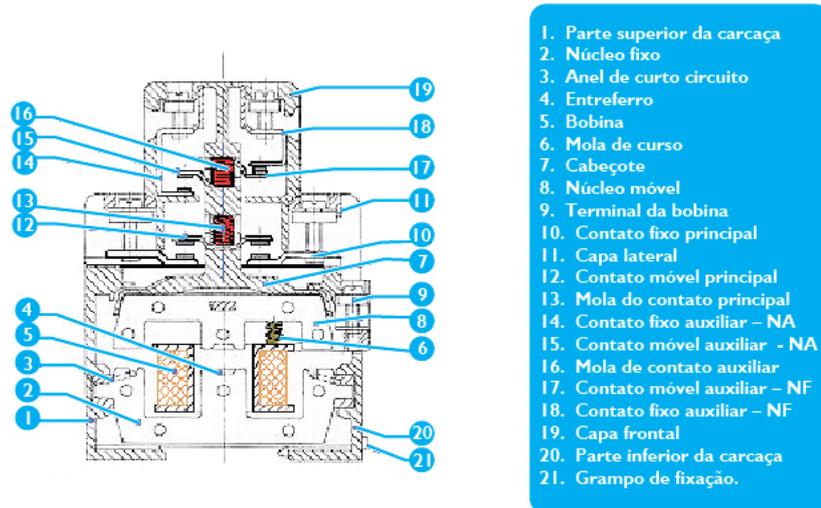
# Contator

O elemento básico nos circuitos de comando é o contator. O contator é uma chave de operação não manual, eletromagnética, que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, inclusive sobrecargas no funcionamento.

Os principais elementos construtivos de um contator são:

- Contatos;
- Núcleo;
- Bobina;
- Molas;
- Carcaça.

A Figura 6 mostra um corte transversal de um contator.



**Figura 6** - Representação em corte de um contator tripolar.

**Fonte:** WEG Indústrias Ltda.

## Contato Principal

É aquele componente de ligação que, em estado fechado, conduz a corrente do circuito principal.

Os contatos principais de um contator são dimensionados com o objetivo principal de estabelecer e interromper correntes de motores, podendo ainda, acionar cargas resistivas, capacitivas e outras.

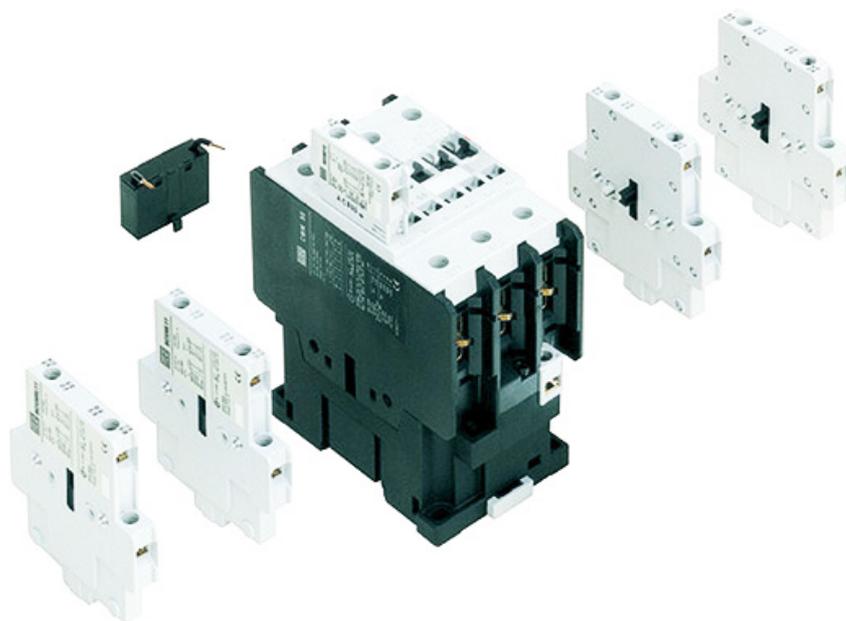
### Observação

Os contatos principais nos contadores serão em número de três, quatro eventualmente dois e até um.

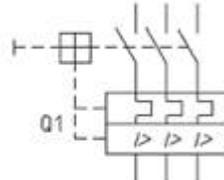
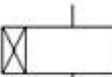
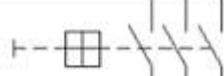
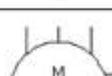
## Contatos Auxiliares

São dimensionados para a comutação de circuitos auxiliares para comando, sinalização e intertravamento elétrico, entre outras aplicações.

O formato dos contatos auxiliares está de acordo com a função: normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF), podendo ser ainda adiantados ou retardados, dependendo da linha e modelo do contator utilizado. A Figura 7 mostra uma foto de um contator.



**Figura 7** - Montagem dos blocos de contatos auxiliares.  
**Fonte:** WEG Indústrias Ltda.

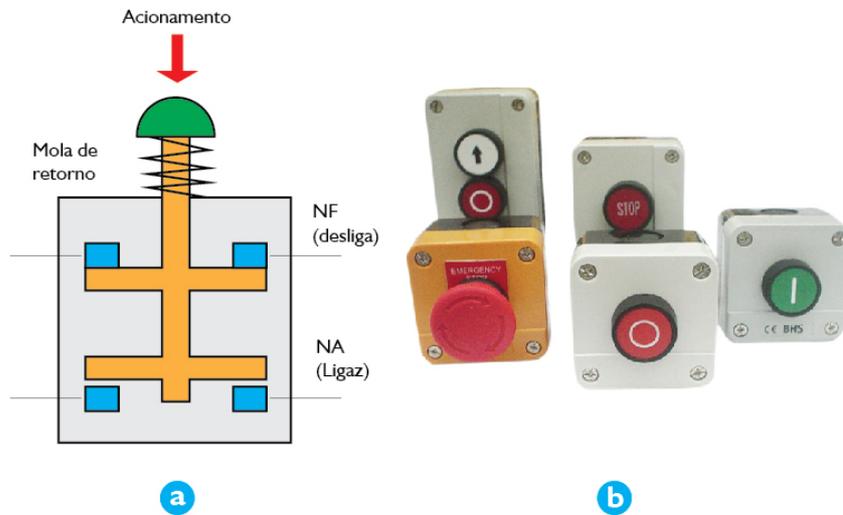
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	Botoeira NA		Botoeira NF
	Botoeira NA com retorno por mola		Botoeira NF com retorno por mola
	Contatos tripolares NA, ex: contator de potência		Fusível
	Acionamento eletromagnético, ex: bobina do contator		Contato normalmente aberto (NA)
	Relé térmico		Contato normalmente fechado (NF)
	Disjuntor com elementos térmicos e magnéticos, proteção contra correntes de curto e sobrecarga		Acionamento temporizado na ligação
	Disjuntor com elemento magnético, proteção contra corrente de curto-circuito		Lâmpada / Sinalização
	Transformador trifásico		Motor Trifásico

**Quadro 1** - Simbologias em comandos elétricos.

Fonte: WEG Indústrias Ltda.

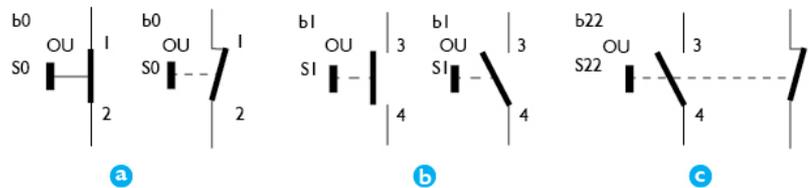
## Botoeira

Quando se fala em ligar um motor, o primeiro elemento que vem à mente é o de uma chave para ligá-lo. Só que no caso de comandos elétricos a "chave" que liga os motores é diferente de uma chave usual, destas que se tem em casa para ligar a luz por exemplo. A diferença principal está no fato de que ao movimentar a "chave residencial" ela vai para uma posição e permanece nela, mesmo quando se retira a pressão do dedo. Na "chave industrial" ou botoeira, há o retorno para a posição de repouso através de uma mola, como pode ser observado na Figura 8. O entendimento deste conceito é fundamental para compreender o porquê da existência de um selo no circuito de comando.



**Figura 8** - (a) Esquema de uma botoeira; (b) Exemplos de botoeiras comerciais.  
**Fonte:** Silva (2006).

A Figura 9 mostra as simbologias padrões para botoeiras.



**Figura 9** - Simbologia para botoeiras. (a) NA; (b) NF; (c) NA e NF conjugados.  
**Fonte:** WEG Indústrias Ltda.

A botoeira faz parte da classe de componentes denominada "elementos de sinais". Estes são dispositivos pilotos e nunca são aplicados no acionamento direto de motores.

A Figura 9c mostra o caso de uma botoeira para comutação de 4 polos. O contato NA (Normalmente Aberto) pode ser utilizado como botão LIGA e o NF (Normalmente Fechado) como botão DESLIGA. Esta é uma forma elementar de intertravamento. Note que o retorno é feito de forma automática através de mola. Existem botoeiras com apenas um contato. Estas últimas podem ser do tipo NA ou NF.

Ao substituir o botão manual por um rolete, tem-se a chave fim de curso, muito utilizada em circuitos pneumáticos e hidráulicos. Este é muito utilizado na movimentação de cargas, acionado no esbarro de um caixote,

engradado, ou qualquer outra carga. Outros tipos de elementos de sinais são os Termostatos, Pressostatos, as Chaves de Nível e as Chaves de fim de curso (que podem ser roletes).

Todos estes elementos exercem uma ação de controle discreta, ou seja, liga / desliga. Como por exemplo, se a pressão de um sistema atingir um valor máximo, a ação do Pressostato será o de mover os contatos desligando o sistema. Caso a pressão atinja novamente um valor mínimo, atua-se religando o mesmo.

O comando com botoeiras e contatores (chaves magnéticas) apresenta as seguintes vantagens sobre o comando com chaves mecânicas:

- Após uma falta de energia, a reenergização não é automática, exigindo a presença de um operador;
- O comando pode ser remoto;
- Um comando pode fechar vários contatos.

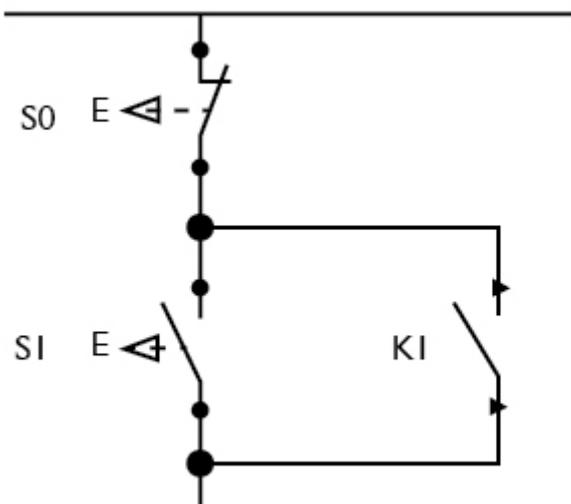
Deve-se ressaltar que a característica da necessidade de interferência do operador para reenergizar pode ser desvantajosa, como alguns casos de refrigeradores, ventiladores e bombas.

Por definição, os comandos elétricos têm por finalidade a manobra de motores elétricos que são os elementos finais de potência em um circuito automatizado. Entende-se por manobra o estabelecimento e condução, ou a interrupção de corrente elétrica em condições normais e de sobrecarga.

Para ler e compreender a representação gráfica de um circuito elétrico, é imprescindível conhecer os componentes básicos dos comandos e também sua finalidade. Alguns destes elementos são descritos a seguir:

**a. Selo**

O contato de selo é sempre ligado em paralelo com o contato de fechamento da botoeira. Sua finalidade é de manter a corrente circulando pelo contator, mesmo após o operador ter retirado o dedo da botoeira. A Figura 10 ilustra o selo.



**Figura 10** - Contato de selo.  
Fonte: Autoria Própria

#### **b.** Selo com dois contatos

Para obter segurança no sistema, podem-se utilizar dois contatos de selo, conforme Figura 11.

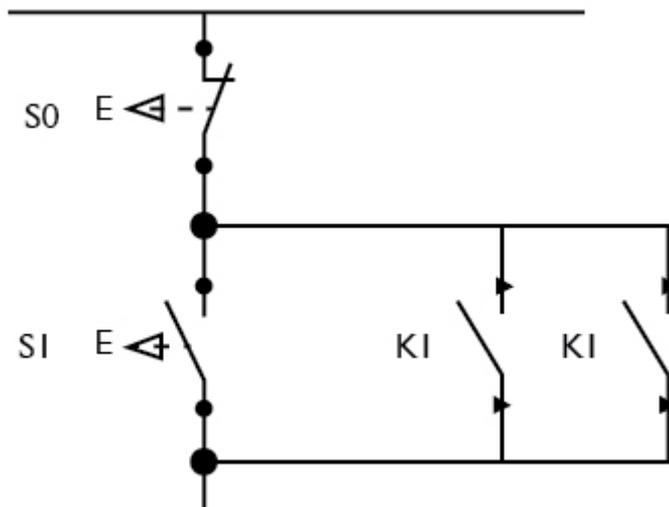


Figura 11 - Selo com dois contatos.  
 Fonte: Autoria Própria

### c. Intertravamento

Em algumas manobras, onde existem dois ou mais contatores, para evitar curtos é indesejável o funcionamento simultâneo de dois contatores. Utiliza-se assim o intertravamento. Neste caso, os contatos devem ficar antes da alimentação da bobina dos contatores como mostra a Figura 12.

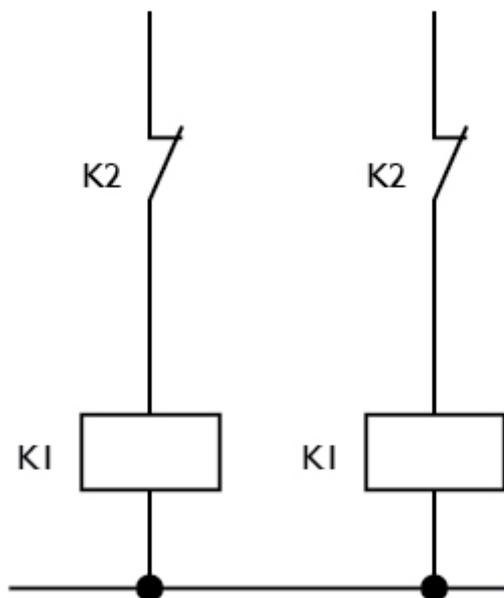
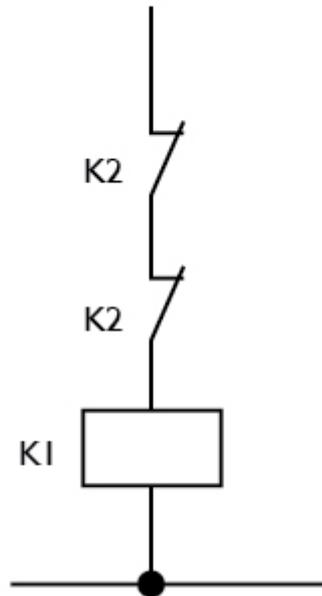


Figura 12 - Intertravamento.  
 Fonte: Autoria Própria

**d. Intertravamento com dois contatos**

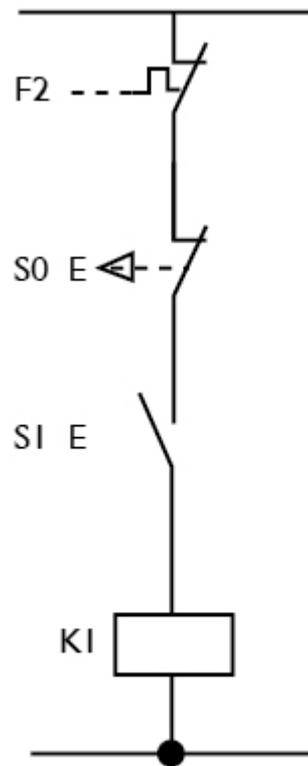
Dois contatos de intertravamento, ligados em série, elevam a segurança do sistema. Estes devem ser usados quando acionando altas cargas com altas correntes. A Figura 13 mostra esse tipo de procedimento.



**Figura 13** - Intertravamento com dois contatos.  
**Fonte:** Autoria Própria

**e. Proteção do sistema**

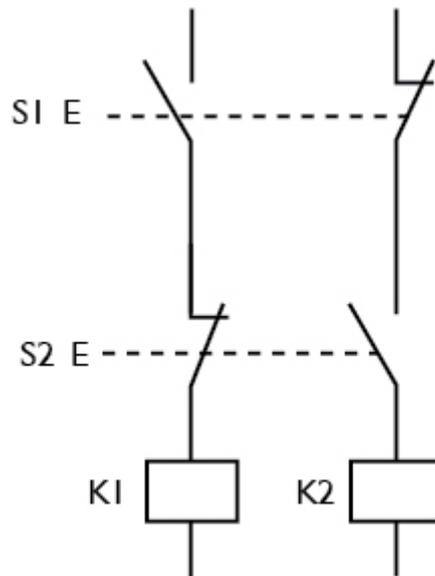
Os relés de proteção contra sobrecarga e as botoeiras de desligamento devem estar sempre em série, conforme Figura 14.



**Figura 14** - Proteção do sistema.  
**Fonte:** Autoria Própria

**f. Intertravamento com botoeiras**

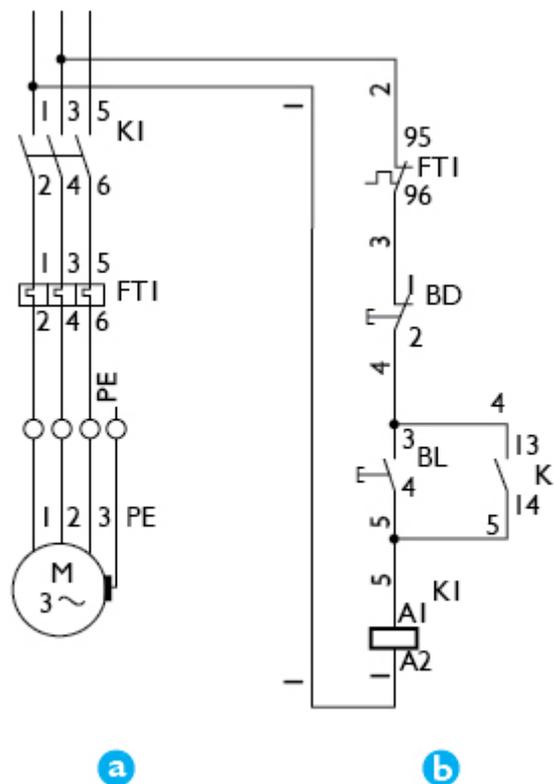
O intertravamento também pode ser feito através de botoeiras. Neste caso, para facilidade de representação, recomenda-se que uma das botoeiras venha indicada com seus contatos invertidos. Não se recomenda este tipo de ação em motores com cargas pesadas. A Figura 15 exibe o intertravamento com botoeiras.



**Figura 15** - Intertravamento com botoeiras.  
**Fonte:** Autoria Própria

## Partida Direta de Motores

A primeira combinação entre os elementos de comando estudados é a partida direta de um motor. Esse método tem como grande desvantagem a elevada corrente de partida. A Figura 16 apresenta o método onde, no circuito de potência, FT1 corresponde a um relé térmico responsável pela proteção do motor contra sobrecorrente e K1 os contatos mecânicos do contator K1. Do lado do circuito de comando, BL representa uma botoeira NA capaz de iniciar o processo de ligamento do motor (*start*), BD é a botoeira que permite o desligamento do motor (*stop*), contato K1 é o contato de selo e a bobina K1, quando energizada, aciona os contatos trifásicos K1 do circuito de potência.



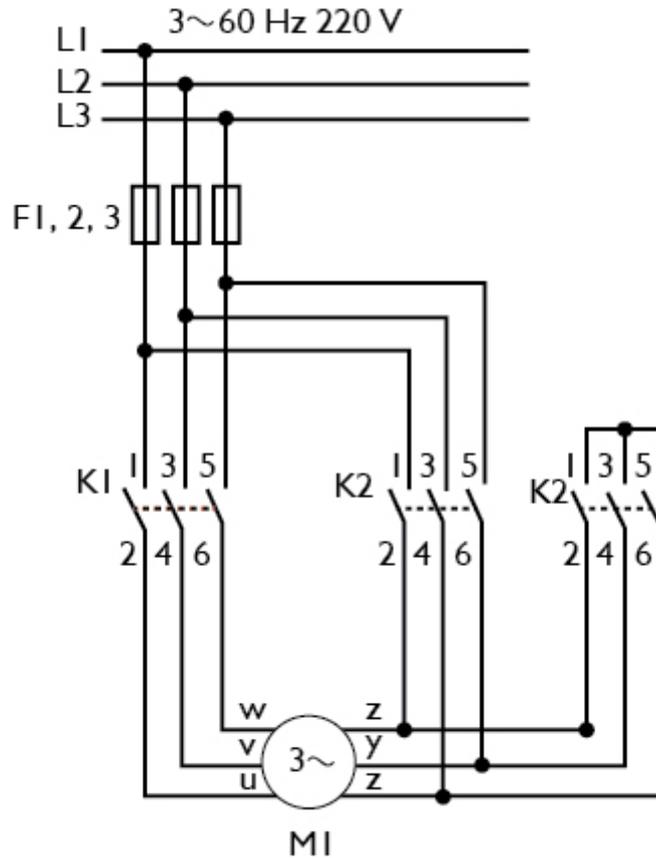
**Figura 16** - Partida direta de motor. (a) circuito de potência; (b) circuito de comando ou controle.

**Fonte:** Stephan (2013).

Para que haja o acionamento do motor é necessário que seja acionada a botoeira BL, energizando desta forma a bobina do contator K1 (circuito de comando) e, conseqüentemente, no circuito de potência, os contatos trifásicos do contator K1 serão fechados e, promovendo a alimentação do motor e seu acionamento. O selo K1 em paralelo com BL garante a energização da bobina mesmo após a retirada do dedo. No processo de desligamento do motor, a botoeira BD deverá ser acionada, desabilitando a bobina K1 e, por conseguinte, desenergizando o motor.

## Partida estrela-triângulo

Método para redução da corrente de partida. A Figura 17 mostra esse método.



**Figura 17** - Partida Estrela-triângulo.  
**Fonte:** Stephan (2013).

A grande vantagem deste método é a minimização da corrente de partida através que uma conexão inicial em estrela ou "Y", onde a tensão submetida a cada bobina do motor fica restrita à tensão de linha da rede dividida por  $\sqrt{3}$ , com acionamento dos contatores K1 e K3 simultaneamente, permanecendo K2 desligado. Após o motor desenvolver uma velocidade próxima da nominal, há uma conversão da conexão estrela para delta ou triângulo, submetendo desta vez as bobinas do motor à tensão total de linha. Este procedimento requer o acionamento de K2 e desativação de K3, permanecendo K1 acionado.

# Leitura Complementar

Como leitura complementar, recomendamos a leitura das apostilas “Comando e proteção” (módulo 1), “Variação de velocidade” (módulo 2) da WEG e da apostila “Curso de comandos elétricos”, esta última disponível no endereço

<[http://pessoal.utfpr.edu.br/mariano/arquivos/Apostila\\_Maquinas.pdf](http://pessoal.utfpr.edu.br/mariano/arquivos/Apostila_Maquinas.pdf)>.

Outra dica de leitura é o livro “Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas” do autor Richard M. Stephan, editora Ciência Moderna.

Alternativamente, você poderá assistir alguns vídeos bastante interessantes pela Internet. Uma dica é o link

<<http://www.youtube.com/watch?v=cvYNHDOrUdc>>.

## Resumo

Nesta aula, você estudou os conceitos relacionados aos métodos de partida de motores elétricos de acordo com o tipo e as exigências necessárias. Em seguida, foram identificados os métodos e estratégias eletromecânicas para o acionamento de controle na partida de motores.

## Autoavaliação

1. Qual a necessidade de se utilizar a chave estrela-triângulo na partida de motores de indução?
2. Quais as diferenças básicas do uso de botoeiras e contatores?
3. Que métodos de proteção podem ser adotados no comando eletromecânico de um motor? Desenhe os circuitos.
4. Esboce os circuitos de comando e o de potência para reversão de velocidade de um motor de indução monofásico.

# Referências

SILVA, Marcelo E. da. **Curso de Comandos Elétricos**. Piracicaba: FUMEP; EEP; COTIP, 2006.

STEPHAN, Richard M. **Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013.

WEG Indústrias Ltda. **Módulo 1 - Comando e proteção**. Centro de Treinamento de Clientes: [2010].

WEG Indústrias Ltda. **Módulo 2 – Variação de velocidade**. Centro de Treinamento de Clientes: [2010].