

# Aplicação de *soft-start* e conversores de frequência no acionamento de motores assíncronos

João Batista de Oliveira, Luciano Antônio de Oliveira, Luiz Octávio Mattos dos Reis, Ronaldo Rossi

Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Elétrica, Rua Daniel Danelli, s/n – Jd. Morumbi – Taubaté – SP – 12060-440

Wendell de Queiróz Lamas

Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/n – Jd. Morumbi – Taubaté – SP – 12060-440, wendell@unitau.br

## RESUMO

*Este trabalho tem como objetivo mostrar a aplicação, funcionamento e operações de motores assíncronos. A maioria das empresas utilizam os motores assíncronos por serem robustos, simples e de baixo custo. Em toda atividade industrial ações são empregadas no acionamento dos mais diversos tipos de máquinas e equipamentos, o motor assíncrono deve atender o comportamento da carga, causando o menor transtorno para o sistema elétrico ao qual está conectado e também deverá estar preparado para redução de perdas aumentando assim a eficiência do conjunto. Serão apresentados ainda, os diversos tipos de acionamento dos motores assíncronos para partidas convencionais e partidas controladas, utilizando os conversores de frequência e os soft-starters, bem como as vantagens e desvantagens de cada sistema. Os conversores de frequência e soft-starters são equipamentos controlados automaticamente, através de microprocessadores / microcontroladores garantindo a obtenção de rampas de aceleração e desaceleração, mudanças de velocidades, redução da tensão e corrente na partida de motores assíncronos.*

Palavras-Chave: Inversores de frequência. Máquinas assíncronas. *Soft-starter*

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CARACTERÍSTICAS DOS *SOFT-STARTERS*

Os *soft-starters* são equipamentos eletrônicos destinados ao controle da partida de motores elétricos de corrente alternada.

Quando é dada a partida em um motor por meio da conexão direta da fonte de alimentação com valores nominais, inicialmente é drenada a corrente de rotor bloqueado ( $I_{RB}$ ) e é produzido um torque de rotor bloqueado ( $T_{RB}$ ). Assim que o motor acelera, a corrente cai e o torque aumenta, antes de cair para seus valores nominais, na velocidade nominal.

Ambos, a magnitude e o formato das curvas de torque e corrente, dependem do projeto do motor, conforme ilustrado na Figura 1.

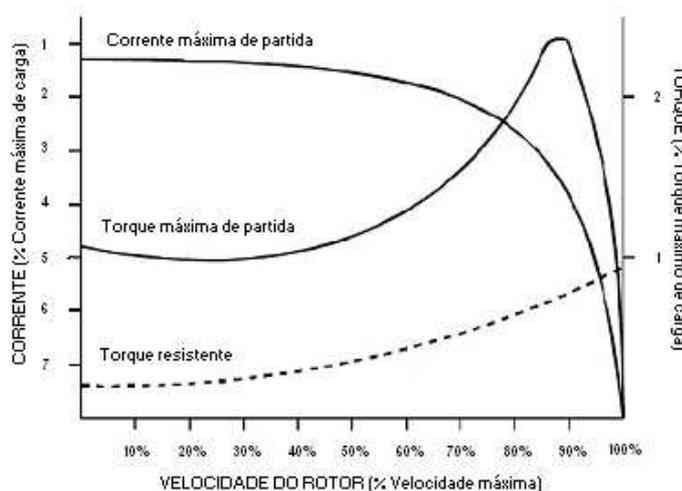


Figura 1. Características de torque de um motor.

Motores com características de velocidade máxima quase idênticas podem ter diferenças grandes na capacidade de partida. As correntes de partida variam de 5 a 9 vezes a corrente nominal. Torques de rotor bloqueado variam desde 0,7 a 2,3 do torque nominal. As características de tensão, corrente e torques máximos formam o conjunto de limites que uma partida com tensão reduzida pode administrar.

Quando uma tensão reduzida de partida é utilizada, o torque de partida do motor é reduzido de acordo com a Equação (1).

$$T_p = T_{RB} \times \left( \frac{I_p}{I_{RB}} \right)^2 \quad (1)$$

A corrente de partida pode ser reduzida até o ponto onde o torque de partida continue excedendo o torque resistente (carga). Abaixo desse ponto, o motor cessará a aceleração e o motor / carga não atingirá a velocidade nominal.

Os *soft-starters* são os equipamentos mais avançados para a redução de tensão na partida. Eles oferecem melhor controle sobre a corrente e o torque, assim como podem incorporar funções avançadas para proteção do motor e ferramentas de interface como: controle simples e flexível sobre a corrente e o torque de partida; controle suave da tensão e da corrente livre de passos ou transiente; capaz de partidas freqüentes; capaz de gerenciar partidas com características variáveis; controle *soft stop* (parada suave) para aumentar o tempo de parada dos motores; e controles para freio para reduzir o tempo de parada dos motores.

## 1.2. TIPOS DE CONTROLE DE *SOFT-STARTER*

O termo *soft-starter* é aplicado a uma gama de tecnologias. Essas tecnologias estão todas relacionadas com a partida suave de motores, mas existem diferenças significativas entre os métodos e os benefícios que os acompanham. Os *soft-starters* podem ser divididos da seguinte maneira: controladores de torque; controladores de tensão em malha aberta; controladores de tensão em malha fechada; e controladores de corrente em malha fechada.

Os **controladores de torque** promovem apenas a redução do torque de partida. Dependendo do tipo, eles podem controlar apenas uma ou duas fases. Como consequência não

existe controle sobre a corrente de partida como é conseguido com os tipos mais modernos de *soft-starter*.

Os controladores de torque com apenas uma fase devem ser utilizados com contator e relé de sobrecarga. Eles são apropriados para aplicações pequenas. O controle trifásico deve ser usado para partidas freqüentes ou com cargas de alta inércia, pois os controladores monofásicos causam um aquecimento extra na partida. Isso acontece porque as tensões nas bobinas, que não são controladas, ficam sob a tensão nominal. Essa corrente circula por um período maior do que durante uma partida direta resultando num sobre-aquecimento do motor.

Os controladores com duas fases devem ser usados com um relé de sobrecarga, mas podem parar e partir o motor sem um contator, entretanto a tensão continua presente no motor mesmo que ele não esteja rodando. Se instalado dessa maneira, é importante assegurar medidas de segurança.

Os controladores de tensão em malha aberta controlam todas as três fases e têm todos os benefícios fornecidos pelos *soft-starter*. Esses sistemas controlam a tensão aplicada no motor de maneira pré-configurada e não têm nenhuma re-alimentação de corrente. O desempenho da partida é conseguido configurando-se parâmetros como tensão inicial, tempo de rampa e tempo de rampa duplo. A parada suave também está disponível.

Os **controladores de tensão em malha aberta** também devem ser usados com relés de sobrecarga e com contadores, se requerido. Dessa forma, são componentes que devem estar agregados a outros componentes para formar um sistema de partida do motor.

Os **controladores de tensão em malha fechada** são uma variante do sistema de malha aberta. Eles recebem re-alimentação da corrente de partida do motor e usam essa informação para cessar a rampa de partida do motor quando a corrente de limite configurada pelo usuário é atingida. O usuário tem as mesmas configurações do sistema de malha aberta com a adição do limite de corrente.

A informação da corrente do motor também é normalmente utilizada para fornecer uma variedade de proteções baseadas na corrente. Essas funções incluem, sobrecarga, desbalanceamento de fases, subcorrente, etc. Esses são sistemas completos de partida fornecendo ambos, controle sobre a partida / parada e proteções para o motor.

Os **controladores de corrente em malha fechada** são os mais avançados de todos. Diferentemente do sistema de tensão em malha fechada, eles usam a corrente como referência principal. As vantagens dessa aproximação são controle preciso da corrente de partida e fácil ajuste. Muitos ajustes do usuário podem ser feitos automaticamente por sistemas baseados em corrente.

## 2. OBJETIVOS

A popularização da tecnologia, bem como a crescente necessidade de sistemas confiáveis, incrementam a utilização de *soft-starters*. Ar-condicionado, refrigeração industrial e compressores são exemplos que utilizam esse equipamento, principalmente quando ligados a fontes de alimentação não-confiáveis ou fracas.

Os *soft-starters* são utilizados basicamente para partidas de motores de indução CA (corrente alternada) tipo gaiola, em substituição aos métodos estrela-triângulo, chave compensadora ou partida direta. Tem a vantagem de não provocar trancos no sistema, limitar a corrente de partida, evitar picos de corrente e ainda incorporar parada suave e proteções.

Essas chaves contribuem para a redução dos esforços sobre acoplamentos e dispositivos de transmissão durante as partidas e para o aumento da vida útil do motor e

equipamentos mecânicos da máquina acionada, devido à eliminação de choques mecânicos. Também contribui para a economia de energia, sendo muito utilizada em sistemas de refrigeração e em bombeamento.

A aplicação de microprocessadores se expande largamente com o passar do tempo. Uma das causas da grande expansão do uso de microprocessadores é o seu custo reduzido. Com o passar dos dias descobrem-se novas aplicações. O seu manuseio já se encontra bastante facilitado, fazendo com que novos equipamentos sejam desenvolvidos sem grande esforço.

Os microprocessadores atuais são versáteis e consomem pouca energia. Dessa forma, pode-se desenvolver equipamentos de pequeno porte com baixo custo operacional. Esses equipamentos podem substituir a mão de obra humana muitas vezes utilizada em tarefas repetitivas. Por esses motivos, o circuito de controle de um *soft-starter* utiliza microcontroladores / microprocessadores.

Nos processos modernos de partida do motor de indução, são usados *soft-starters* que, por meio de comando microprocessado, controlam tiristores que ajustam a tensão enviada ao estator do motor. Desta forma, consegue-se, de um lado, aliviar o acionamento dos altos conjugados de aceleração do motor de indução e, de outro, proteger a rede elétrica das correntes de partida elevadas.

As chaves de partida estática são chaves microprocessadas, projetadas para acelerar (ou desacelerar) e proteger motores elétricos de indução trifásicos. Por meio do ajuste do ângulo de disparo de tiristores, controla-se a tensão aplicada ao motor. Com o ajuste correto das variáveis, o torque e a corrente são ajustados às necessidades da carga, ou seja, a corrente exigida será a mínima necessária para acelerar a carga, sem mudanças de frequência.

Algumas características e vantagens das chaves *soft-starters* são: ajuste da tensão de partida por um tempo pré-definido; pulso de tensão na partida para cargas com alto conjugado de partida; redução rápida de tensão a um nível ajustável (redução de choques hidráulicos em sistemas de bombeamento); proteção contra falta de fase, sobrecorrente e subcorrente; entre outras.

Os motores assíncronos trifásicos de rotor em gaiola apresentam picos de corrente e de conjugados indesejáveis quando em partida direta. Para facilitar a partida, são usados vários métodos, como chave estrela-triângulo, chave compensadora, entre outros.

Esses métodos conseguem uma redução na corrente de partida, porém a comutação é por degraus de tensão. Entretanto, nenhum se compara com o método de partida suave (que utiliza o *soft-starter*). A seguir é mostrado um comparativo de corrente entre os métodos mais usuais de partida, conforme ilustrado na Figura 2.

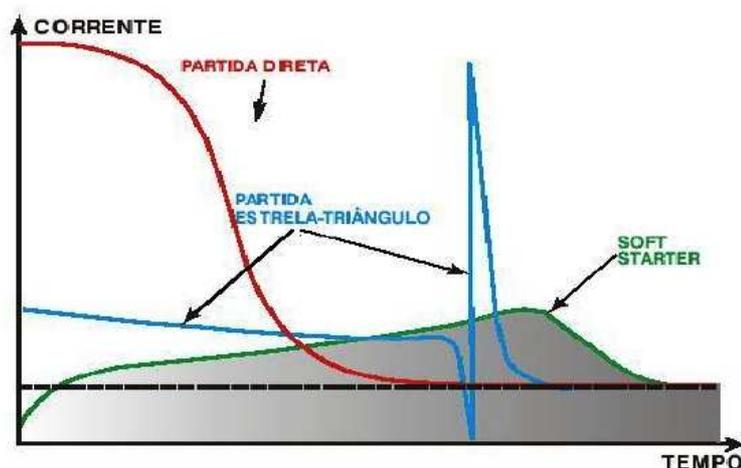


Figura 2. Comparativo entre métodos de partida.

### 3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O *soft-starter* é um equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem. Ao contrário dos sistemas elétricos convencionais utilizados para essa função (partida com autotransformador, chave estrela-triângulo, entre outras).

Seu princípio de funcionamento baseia-se em componentes estáticos, os tiristores. O esquema genérico de um *soft-starter* está ilustrado na Figura 3.

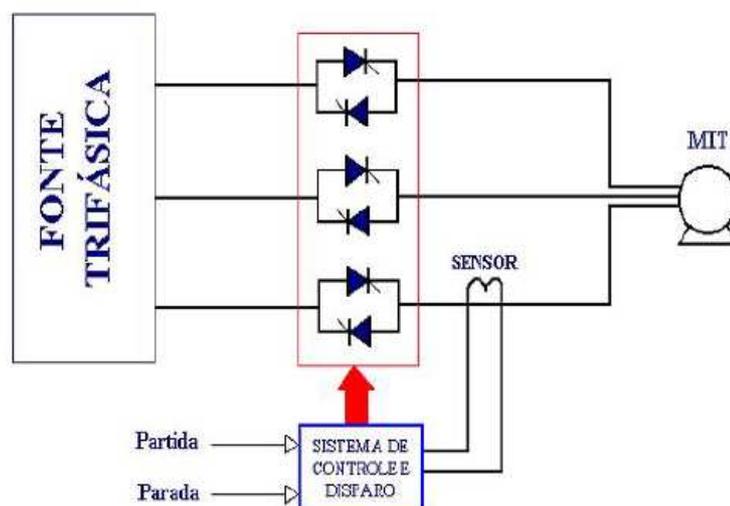


Figura 3. Esquema de um *soft-starter* implementado com seis tiristores para acionar um motor de indução trifásico (MIT).

Por meio do ângulo de condução dos tiristores, a tensão na partida é reduzida, diminuindo os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica.

Um dos requisitos do *soft-starter* é controlar a potência do motor sem, entretanto alterar sua frequência (velocidade de rotação). Para que isso ocorra, o controle de disparo dos SCR – *Silicon Controlled Rectifier* (tiristores) atua em dois pontos: controle por tensão zero e controle de corrente zero.

O circuito de controle deve temporizar os pulsos de disparo a partir do último valor de zero da forma de onda, tanto da tensão como da corrente. O sensor pode ser um transformador de corrente que pode ser instalado em uma única fase (nesse caso, o sistema mede somente o ponto de cruzamento de uma fase), ou um para cada fase.

O objetivo é mostrar uma chave *soft-starter*, conforme ilustrado na Figura 4. A Figura 4 ilustra o funcionamento interno de um *soft-starter*, dando detalhes de todos seus blocos e componentes.

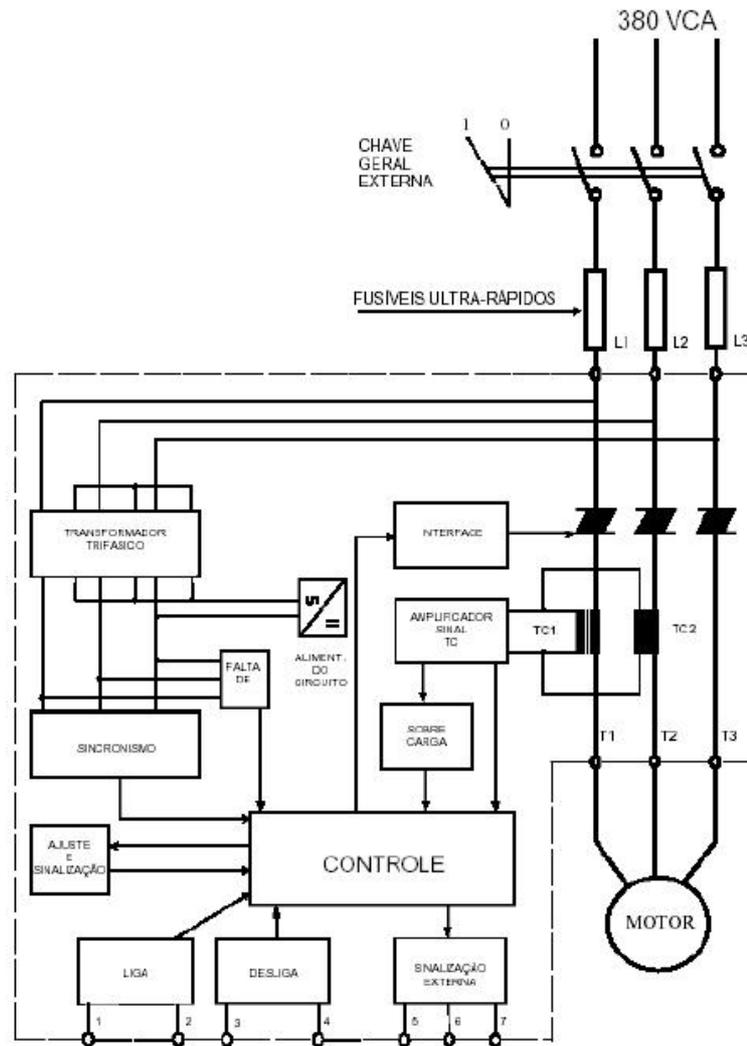


Figura 4. Diagrama de blocos de um *soft-start* (Cortesia: Danfoss).

No circuito de potência, a tensão da rede é controlada através de seis tiristores, que possibilitam a variação do ângulo de condução das tensões que alimentam o motor. Para alimentação eletrônica interna, utiliza-se uma fonte linear com várias tensões, alimentada independente da potência.

O cartão de controle contém os circuitos responsáveis pelo comando, monitoração e proteção dos componentes de potência. Esse cartão possui também circuitos de comando e sinalização a serem utilizados pelo usuário de acordo com sua aplicação, como saídas à relé.

Para que a partida do motor ocorra de modo suave, o usuário deve parametrizar a tensão inicial ( $V_p$ ) de modo que ela assumo o menor valor possível, suficiente para iniciar o

movimento da carga. A partir daí, a tensão subirá linearmente segundo um tempo também parametrizado ( $t_r$ ) até atingir o valor nominal, conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Curva de aceleração de um MIT usando *soft-starter*.

Na frenagem, a tensão deve ser reduzida instantaneamente a um valor ajustável ( $V_t$ ), que deve ser parametrizado no nível em que o motor inicia a redução da rotação. A partir desse ponto, a tensão diminui linearmente (rampa ajustável ( $t_r$ )) até a tensão final  $V_z$ , quando o motor parar de girar. Nesse instante, a tensão é desligada, conforme apresentado na Figura 6.

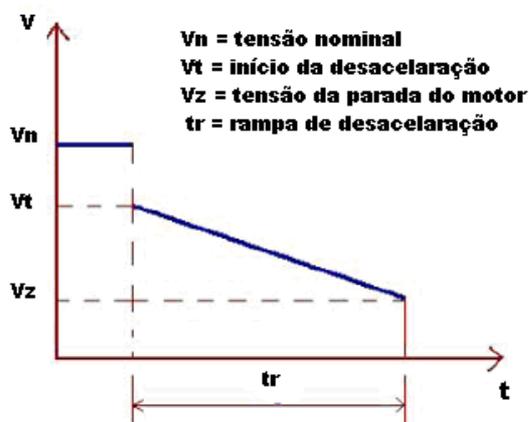


Figura 6. Curva de desaceleração de um MIT usando *soft-starter*.

Além da tensão, o *soft-starter* também tem circuitos de controle de corrente. Ela é conservada num valor ajustável por um determinado intervalo de tempo. Esse recurso permite que cargas de alta inércia sejam aceleradas com a menor corrente possível, além de limitar a corrente máxima para partidas de motores em fontes limitadas (barramento não-infinito).

Alguns fabricantes projetam seus *soft-starters* para controlar apenas duas fases (R e S, por exemplo), utilizando a terceira como referência. Essa técnica, simplifica o circuito de controle e, conseqüentemente, “barateia” o produto, conforme apresentado na Figura 7.

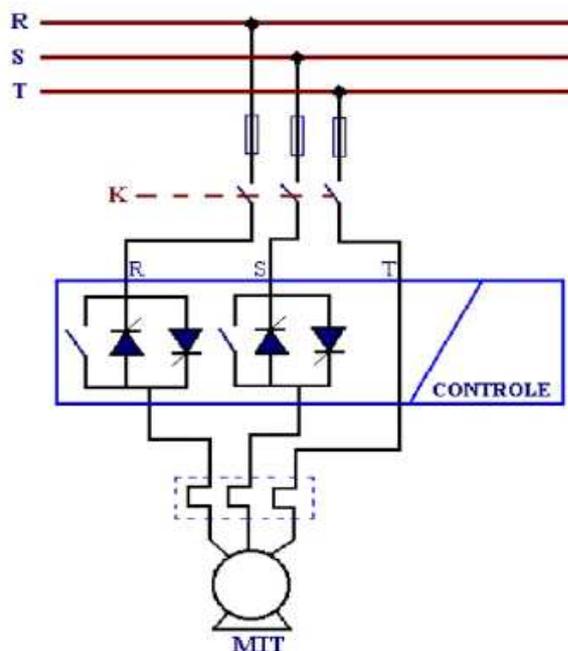


Figura 7. *Soft-starter* com apenas duas fases controladas.

### 3.1. RECURSOS DE UM *SOFT-STARTER*

Os *soft-starters* existentes no mercado (fabricados pela WEG, SIEMENS e outras) são equipados com interfaces homem-máquina ou painel de LED para informar o status do sistema.

Quanto aos recursos que um *soft-starter* deve ter, os mais importantes são: proteção do motor; sensibilidade à seqüência de fase; *plug-in*; circuitos de economia de energia.

### 3.2. PROTEÇÃO DO MOTOR

Pode-se notar que a figura 8 ilustra interrupções e bloqueios em caso de falta de fase ou falha do tiristor. Normalmente, esses equipamentos também possuem relés eletrônicos de sobrecarga. Durante o tempo de operação ( $t_r$ ), um relé eletrônico de carga entra em operação quando necessário.

O dispositivo pode ser configurado para dar proteção tanto para sobrecorrente ( $I_{oc}$ ) quanto para subcorrente ( $I_{uc}$ ). Quando possível, deve-se utilizar para partidas de motores, chaves *soft-starter* que possibilitem o ajuste do torque do motor às necessidades do torque da carga, de modo que a corrente absorvida será a mínima necessária para acelerar a carga. A Figura 8 ilustra essa condição.

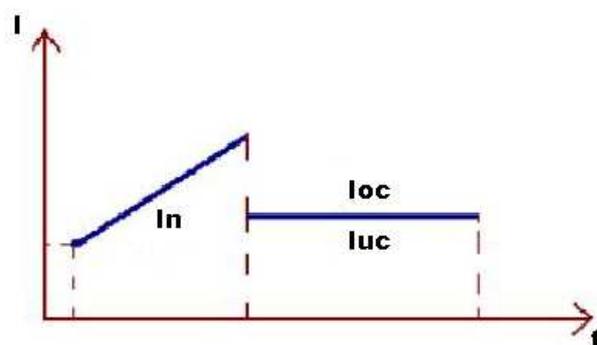


Figura 8. Curva típica de sobre-corrente de um *soft-starter*.

A seguir, a limitação de corrente quando é utilizado um *soft-starter*, conforme ilustrado na Figura 9.

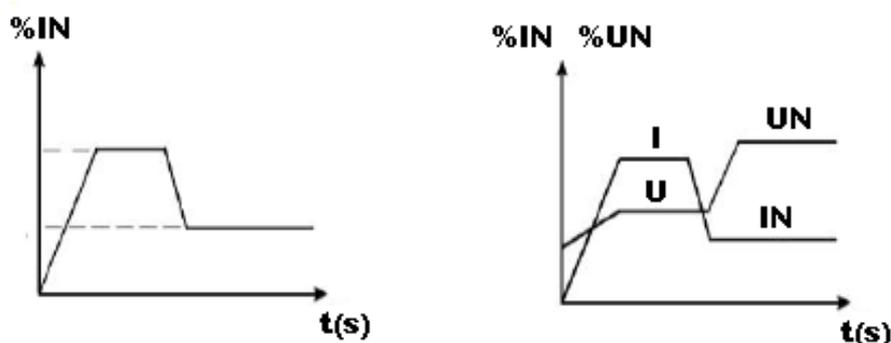


Figura 9. Limitação de corrente em um *soft-starter*.

### 3.3. SENSIBILIDADE À SEQÜÊNCIA DE FASE

Os *soft-starters* podem ser configurados para operarem somente se a seqüência de fase estiver correta. Esse recurso assegura a proteção, principalmente mecânica, para cargas que não podem girar em sentido contrário (bombas, por exemplo). Quando há a necessidade de reversão, podemos fazê-los com contadores externos ao *soft-starter*.

### 3.4. PLUG-IN

O *plug-in* é um conjunto de facilidades que podem ser disponibilizadas no *soft-starter* por meio de um módulo extra, ou de parâmetros, como relé eletrônico, frenagem CC ou CA, dupla rampa de aceleração para motores de duas velocidades e re-alimentação de velocidade para aceleração independente das flutuações de carga.

### 3.5. ECONOMIA DE ENERGIA

A maioria dos *soft-starters* modernos têm um circuito de economia de energia. Essa facilidade reduz a tensão aplicada para motores a vazio, diminuindo as perdas no entreferro, que são a maior parcela de perda nos motores com baixas cargas. Uma economia significativa pode ser experimentada para motores que operam com cargas de até 50% da potência do motor.

Entretanto, essa função gera corrente harmônica indesejável na rede, devido abertura do ângulo de condução para diminuição da tensão, conforme apresentado na Figura 10.

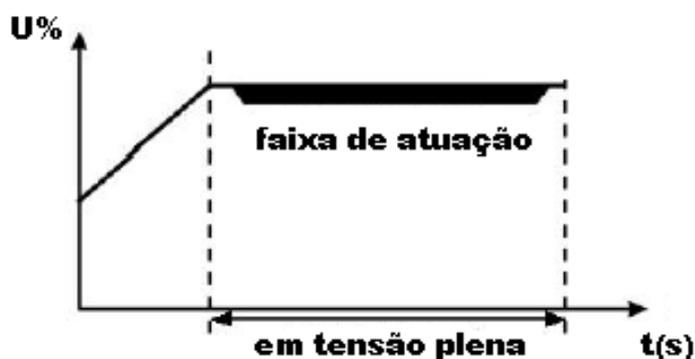


Figura 10. Economia de energia usando um *soft-starter*.

#### 4. APLICAÇÕES

Os *soft-starters* podem ser utilizados nas mais diversas aplicações, porém, três delas são clássicas: bombas; compressores; e ventiladores. Cabe lembrar, entretanto, que o *soft-starter* não melhora o fator de potência e também gera harmônicos, como qualquer outro dispositivo de acionamento estático.

A seguir, uma pequena descrição de cada uma dessas aplicações.

##### 4.1. BOMBAS

Nessa aplicação, a rampa de tensão iguala as curvas do motor e da carga. A rampa de saída do *soft-starter* adequa a curva de torque do motor sobre a da bomba. Nesse caso, a corrente de partida é reduzida para aproximadamente 2,5 vezes a corrente nominal, conforme ilustrado na Figura 11.

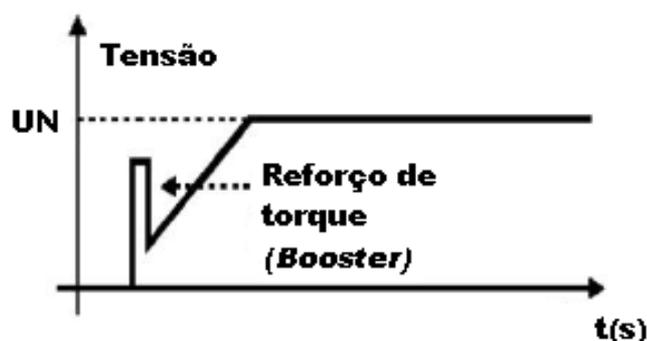


Figura 11. Pulso *kick-start* usado na partida de cargas com alto atrito inicial.

A rampa de desaceleração diminui sensivelmente o choque hidráulico. Essa é a razão, das empresas especificarem *soft-starter* com potências superiores a 10.000 W.

Uma das facilidades que torna ainda mais interessante a utilização desse equipamento no acionamento de bombas é o recurso *kick-start*. O *kick-start* é um pulso de tensão rápida e de grande amplitude aplicado no instante da partida. Isso ajuda a vencer a inércia de partida quando há a presença de sólidos na bomba (sujeira).

#### 4.2. COMPRESSORES

O *soft-starter* reduz a manutenção e permite que compressores “críticos” sejam desligados quando não forem necessários. Por outro lado, evita que eles sejam desligados no funcionamento normal devido a fontes de alimentação muito fracas.

#### 4.3. VENTILADORES

Os ventiladores, assim como as bombas, exigem um torque proporcional à velocidade, porém, também têm grande inércia. Geralmente, o limite de corrente é utilizado para estender o tempo de rampa, enquanto a inércia é vencida.

### 5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho pode-se verificar que, são vários os processos de se realizar a partida nos motores de indução trifásica. Cada um desses processos apresenta suas vantagens e desvantagens, dependendo do aspecto particular ou do parâmetro que se quer considerar.

São muitas as grandezas envolvidas, tais como corrente de partida, torque inicial, tempo de aceleração, números de operações consecutivas, etc, que o engenheiro projetista deve conhecer em detalhes cada processo, para o dimensionamento e parametrização dos vários componentes.

Durante muitos anos foram utilizados exclusivamente os dispositivos eletromecânicos, com uso de contatores e relés, para partida dos motores de indução. Somente em algumas pequenas aplicações, como no caso de bombas de recalque com vazão ajustável, é que se utilizavam equipamentos para a variação da velocidade do motor de indução trifásico. Nesse caso, a variação de velocidade era feita por meio de dispositivos com embreagens, com grande perda de energia.

O aparecimento de circuitos eletrônicos controlados por tiristores veio permitir, não só o controle de variação da velocidade do motor de indução trifásico em serviço, como também o controle de realizar partidas e paradas suaves da máquina. Esses dispositivos eletrônicos representam uma nova era no campo de aplicação do motor de indução trifásico, são os conversores de frequência e *soft-starters* que trazem grandes vantagens no controle de partida e parada nos motores de indução trifásicos.

A conciliação do aproveitamento das vantagens ocasionadas, com a necessidade de se eliminar alguns inconvenientes, é um apelo à capacidade dos engenheiros eletricitistas no sentido de se aperfeiçoar cada vez mais, os dispositivos de partida em motores de indução.

### BIBLIOGRAFIA

DANFOSS. **Manual de instalação e operação MCD 3000**. São Paulo: Danfoss A/S, 1999. 300 p.

KOSTENKO, L.; PIOTROVSKI, L. **Máquinas eléctricas**. Porto: Lopes da Silva, 1979. 1338 p.

LANDER, C. W. **Eletrônica industrial: teoria e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 320 p.

LEROY-SOMER. **DIGIDRIVE SK DID Variable speed drives for asynchronous motors**. Paris: LEROY-SOMER, 2004. 52 p.

MARTIGNONI, A. **Máquinas de corrente alternada**. Porto Alegre: Editora Globo, 1995. 250 p.

REIS, L. O. M. **Acionamentos de motores elétricos**. 2004. 60 f. Notas de aula. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Taubaté.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Catálogo de acionamento elétrico**. São Paulo: Schneider Electric, 2004. 30 p.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Catálogo de acionamento para motores assíncronos trifásicos**. São Paulo: Schneider Electric, 2004. 36 p.

SIEMENS. **Manual de motores elétricos**. São Paulo: Siemens do Brasil, 2004. 67 p. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br>>. Acesso em: 20 junho 2004.

WEG AUTOMAÇÃO. **Guia de aplicação de conversores de frequência**. Jaraguá do Sul: WEG Automação, 2004. 80 p. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 20 junho 2004.

WEG AUTOMAÇÃO. **Manual de motores elétricos**. Jaraguá do Sul: WEG Automação, 2004. 60 p. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 20 junho 2004.