



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO TÉCNICO INDUSTRIAL DE SANTA MARIA
Curso de Eletrotécnica



Apostila de Automação Industrial

Elaborada pelo Professor M.Eng. Rodrigo Cardozo Fuentes

Prof. Rodrigo C. Fuentes

Campus- UFSM – Prédio 5

Email: fuentes@smail.ufsm.br

Web-site: w3.ufsm.br/fuentes

SANTA MARIA – RS

2005

ÍNDICE

7.	DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS PARA A PARTIDA E OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	
7.1	Partida e Parada de Motores Trifásicos de Indução através do Soft-Starter	7.1
7.1.1.	<i>Introdução:</i>	7.1
7.1.2.	<i>Princípio de Funcionamento:</i>	7.2
7.1.3.	<i>Áreas de aplicação do SOFT-STARTER:</i>	7.2
7.1.4.	<i>Outras características especiais:</i>	7.3
7.1.5.	<i>Esquema elétrico simplificado:</i>	7.3
7.1.5.1	<i>Variação de Tensão no Motor</i>	7.4
7.1.6.	<i>Instalação:</i>	7.5
7.1.7.	<i>Tipos de parametrizações para Partidas e Paradas</i>	7.5
7.1.8.	<i>Exemplos de Aplicações</i>	7.8
7.2.	Conversores de Frequência para Motores de Indução Trifásicos	7.13
7.2.1.	<i>Introdução:</i>	7.13
7.2.2.	<i>Princípio de Funcionamento:</i>	7.13
7.2.2.1	<i>Etapa de entrada ou Retificador</i>	7.13
7.2.2.2	<i>Etapa intermediária ou Filtro</i>	7.14
7.2.2.3	<i>Etapa de saída ou Inversor</i>	7.15
7.2.3.	<i>Curvas Características:</i>	7.16
7.2.4.	<i>Instalação:</i>	7.19
7.2.4.1	<i>Cuidados na instalação:</i>	7.19
7.2.4.2	<i>Ligação padrão para rede trifásica:</i>	7.20
7.2.5.	<i>Modo de Monitoração:</i>	7.21
7.3.	Conclusão	7.21

7. Dispositivos Eletrônicos para a Partida e Operação do Motor de Indução Trifásico

7.1 Partida e Parada de Motores Trifásicos de Indução através do Soft-Starter

7.1.1. Introdução:

Os motores de indução trifásicos, devido a sua construção robusta, baixo custo e pouca manutenção, são cada vez mais utilizados como força motriz no meio industrial. No entanto apresentam picos de corrente e de conjugado indesejáveis quando em partida direta. Para amenizar estes problemas durante a partida são utilizados vários métodos, como partidas estrela-triângulo ou compensadoras. Estes métodos conseguem uma redução na corrente de partida e no conjugado, porém a comutação é por degraus de tensão e suas características não satisfazem a todos os tipos característicos de cargas.

Agora surge um novo conceito de partida e parada de motores, de forma controlada: as chaves estáticas de partida e parada de motores **soft-starters**.



Modelos de Soft-Starter fabricados pela WEG S/A

7.1.2. Princípio de Funcionamento:

O princípio de funcionamento baseia-se na redução da tensão nos bornes do motor durante a partida. Através de um comando eletrônico microprocessado são acionados dispositivos semicondutores de potência que ajustam a tensão enviada ao estator do motor. Desta forma, consegue-se aliviar o acionamento dos altos conjugados de aceleração do motor de indução e proteger a rede elétrica das elevadas correntes de partida. Com a limitação do conjugado de aceleração praticamente elimina-se os trancos mecânicos, suavizando o movimento da carga a ser deslocada, e assim um desgaste menor de todas as partes mecânicas do conjunto motor/carga. Consequentemente, maiores intervalos entre manutenções, maior segurança operacional e menos tempo fora de operação.

São fabricados modelos com interface RS 232, que permite a conexão em rede, com isso, a parametrização é feita com maior precisão através de um microcomputador. O software permite a inserção de até três conjuntos de parâmetros, isto é, três partidas diferentes. Estes parâmetros são gravados, sendo possível monitorar a partida via microcomputador, ou desconectá-lo, operando o aparelho diretamente.

7.1.3. Áreas de aplicação do SOFT-STARTER:

- acionamentos elétricos que processam materiais sensíveis a trancos mecânicos e trações.
- acionamentos de bombas.
- acionamentos com longos períodos com carga parcial (ou em vazio).
- máquinas com transmissão por engrenagem, correia e corrente.
- acionamentos com momento de inércia elevado.

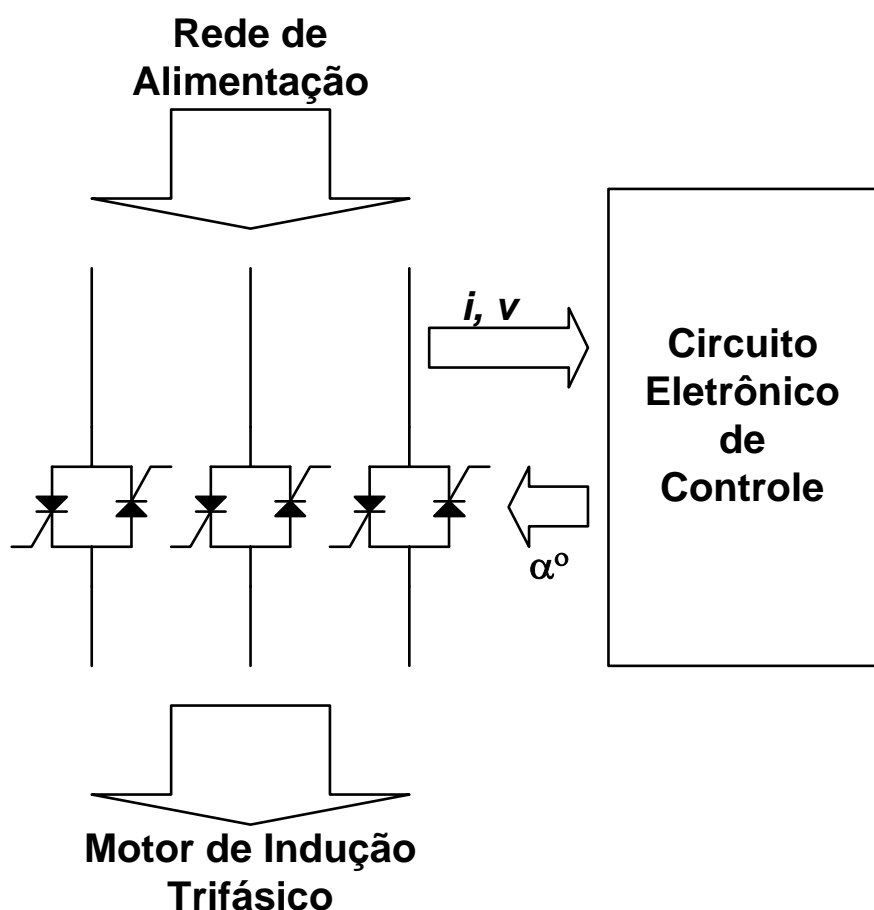
Como por exemplo:

- exaustores, compressores, bombas.
- esteiras transportadoras, guindastes, escadas rolantes.
- máquinas - ferramenta, retificas, máquinas de corte, trefiladoras, máquinas têxteis e de injeção de plástico.
- prensas, calandras, britadeiras, misturadoras.

7.1.4. Outras características especiais:

- a concepção é compacta com economia de espaço, com isso, fácil de integrar no ramal do motor.
- as múltiplas possibilidades de programação na partida, na operação em regime e na parada.
- facilidade de montagem e colocação em serviço. - funções de proteção e monitoração.
- comunicação com PC para simplicidade de colocação em serviço, monitoração e comando do acionamento.

7.1.5. Esquema elétrico simplificado:



Esquema Elétrico Interno Simplificado da Soft-Starter

Os tiristores são acionados através de um controle microprocessado, que determina os ângulos de disparo. Alterando desta forma o valor de tensão aplicada ao motor.

7.1.5.1 Variação de Tensão no Motor



Rampa de Tensão na Partida

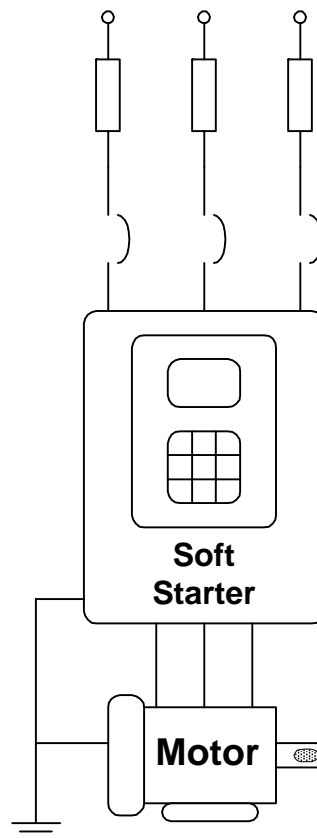


Rampa de Tensão na Parada



Otimização na Operação com Carga Abaixo da Nominal

7.1.6. Instalação:

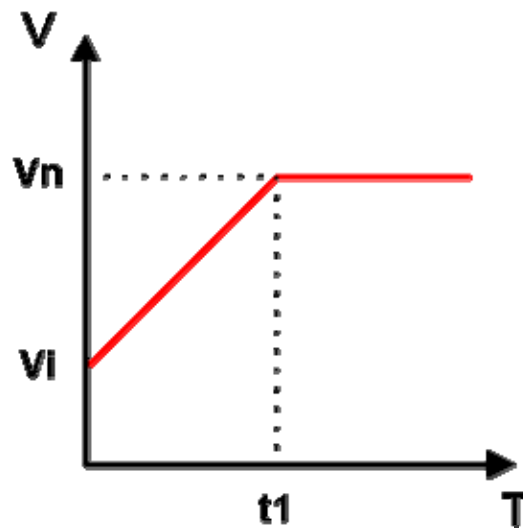


Circuito básico para instalação da Soft-Starter

7.1.7. Tipos de parametrizações para Partidas e Paradas

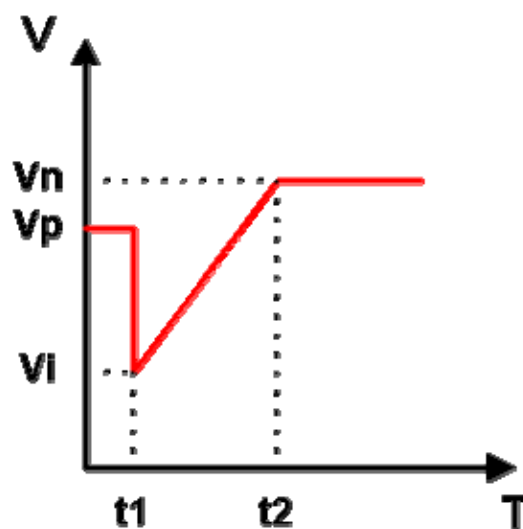
Várias programações são possíveis tanto na partida como na parada:

Partida em rampa de tensão: Inicialmente é aplicada uma tensão V_i inferior a tensão da rede de alimentação. Esta tensão apresenta um limite mínimo inferior conforme o modelo do soft-starter e seu valor deve ser estabelecido conforme a característica de conjugado da carga. Inicia-se então uma rampa de tensão até que se atinja a tensão da rede de alimentação. O tempo de subida desta rampa é parametrizado no soft-starter de acordo com as características de conjugado da carga.



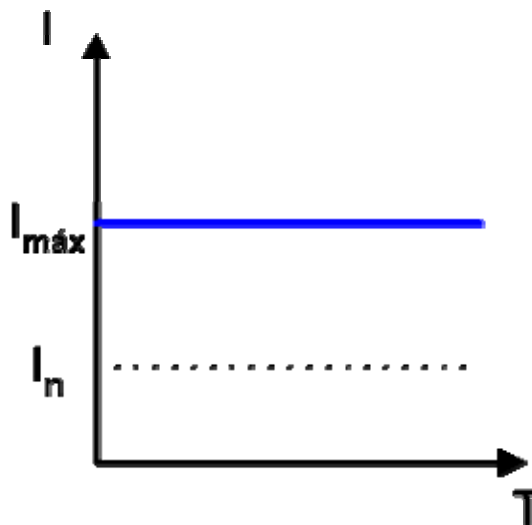
Partida em rampa de tensão

Partida com Impulso de tensão: Aplica-se um impulso de tensão cujo nível e duração são parametrizáveis de acordo com a inércia de partida da carga. Quanto maior a inércia de partida mais amplo e duradouro deverá ser o impulso de tensão. Na seqüência de operação do soft-starter é então aplicada a rampa de tensão, conforme os parâmetros estabelecidos na partida em rampa.



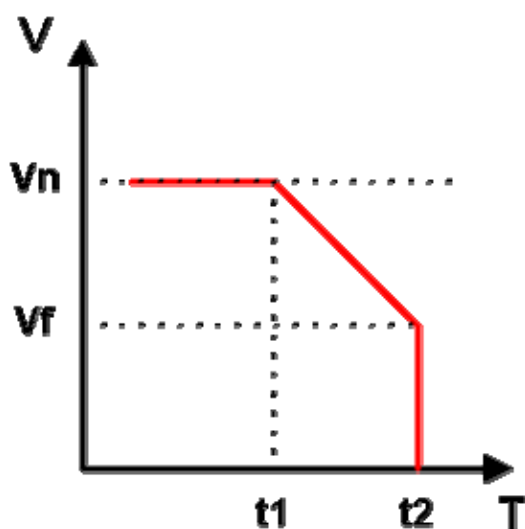
Partida com impulso de tensão

Partida com Limite de corrente: Nesta modalidade de partida limita-se apenas a corrente que circulará através do soft-starter e motor. Confere-se portanto um grau de liberdade para a variação de tensão sobre o motor. O valor limite de corrente varia de acordo com as características da carga. O valor mínimo de corrente deverá ser superior a corrente nominal do motor.



Partida com limitação de corrente

Parada com rampa de tensão: A parada em rampa de tensão proporcionará ao motor uma desaceleração gradual graças a redução linear da tensão aplicada. Deve-se parametrizar o tempo de rampa e a tensão mínima de rampa. Adicionalmente pode-se parametrizar, em alguns modelos de soft-starter, uma frenagem por injeção de corrente contínua ao final do processo de desaceleração, garantindo assim uma parada completa e instantânea do eixo do motor.



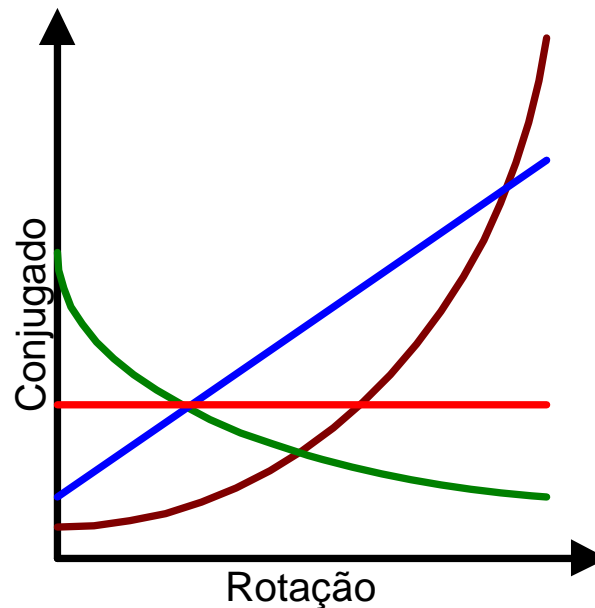
Parada com rampa de tensão

Função "economia de energia": o motor operando com carga reduzida apresenta baixo fator de potência e redução no rendimento. Ativando-se a função economia de energia, o soft-starter otimiza o ponto de trabalho do motor, através da redução da tensão, minimizando as perdas por reativos, e fornecendo somente a potência ativa necessária para a manutenção da rotação nominal com carga parcial, ou seja, reduzindo perdas e elevando o fator de potência e rendimento.

7.1.8. Exemplos de Aplicações

Para a correta escolha do tipo de partida a ser empregado com o soft-starter deve-se considerar a característica de conjugado de carga do elemento que o motor elétrico está acionando. Cada carga apresenta um comportamento característico em função da rotação. Entretanto de um modo simplificado pode-se caracterizar a grande maioria dos conjugados de carga com relação a rotação como sendo funções:

- Lineares $C(n)=a \cdot n+b$;
- Quadráticas $C(n)= a \cdot n^2+b \cdot n+c$;
- Exponenciais $C(n)= a \cdot b^{-n}$;
- Constantes $C(n)=a$



Representação dos vários tipos de conjugados de carga em função da rotação

Conjugados de carga com comportamento linear:

- Calandras;
- Laminadoras de tecidos e papel;
- Roscas de injeção (com câmara vazia).

O conjugado resistente da carga aumenta linearmente com a rotação.

Uma calandra consiste de dois cilindros, dispostos um sobre o outro e girando em sentido contrário entre si. A calandra aplaina e compacta papel e tecido entre suas superfícies de contato. O elevado momento de inércia dos cilindros resulta, mesmo com partida direta, em longos tempos de partida, durante os quais flui a corrente de partida plena.

O conjugado de aceleração elevado envolveria o risco de rompimento do papel ou do tecido, o que causaria paralisação da produção e máquina parada. Através das funções "Partida suave" e "Parada suave", o SOFT-STARTER evita eficazmente conjugados de aceleração elevados e limita a corrente de partida.

A partida mais adequada a estas cargas é a **partida em rampa de tensão**. A tensão inicial selecionada não deve ser muito alta para manter tanto a corrente de

partida como o conjugado de aceleração baixo. O tempo de rampa selecionado não deve ser muito longo, senão o motor ficaria em baixa rotação havendo sobre-aquecimento, ativando a proteção eletrônica do aparelho (bloqueio da operação). Em toda a faixa de rotação, o conjugado do motor deveria ficar acima do conjugado resistente da carga o equivalente a aproximadamente 15% do conjugado nominal (isto é, 15% de conjugado de aceleração).

Conjugados de carga com comportamento quadrático:

- Bombas centrífugas;
- Exaustores;
- Ventiladores.

O conjugado resistente da carga aumenta ao quadrado com a rotação. No caso especial das bombas, deve-se evitar o golpe de aríete (onda de pressão da coluna d'água quando da aceleração e frenagem do fluxo d'água). Esse golpe de aríete pode danificar tanto a bomba como também as tubulações e as válvulas de retorno. Além disso, ele pode gerar incomodo aos moradores próximos a uma estação de bombeamento com um forte estrondo.

Exaustores possuem normalmente, um momento de inércia muito alto (possibilidade de 10 até 200 vezes o momento de inércia do motor). No caso de ligação direta, isso condiciona a corrente de partida plena durante um período longo, o que conduz, primeiramente, A queda de tensão na rede.

Através das funções partida suave e parada suave da bomba, o SOFT-STARTER evita com eficácia o golpe de aríete. Com isso, prolongam-se os intervalos de manutenção, e as interrupções de operação em decorrência de sobrecargas mecânicas.

A partida mais adequada a estas cargas é a **partida em rampa de tensão** A tensão de partida selecionada não pode ser muito alta, senão o golpe de aríete não pode ser evitado. Também não pode ser muito baixa, para que o motor tenha arranque firme. Em toda a faixa de rotação, o conjugado do motor deveria ser aproximadamente 15% superior ao conjugado de carga.

Conjugados de carga com comportamento exponencial decrescente:

- Bobinadeiras;

- Descascadeiras circulantes;
- Tornos.

O conjugado resistente da carga diminui com o aumento da rotação. A carga apresenta uma elevada inércia inicial e a sua aceleração exige um conjugado de partida elevado, mas a necessidade de conjugado decresce com o aumento da rotação.

Uma partida estrela-triângulo não é ideal pois apenas 1/3 do conjugado do motor estaria disponível, e o motor só partiria após a comutação para a ligação triângulo, o que equivale a uma partida direta.

Através da **partida com impulso de tensão**, ajustável em sua amplitude e duração, coloca-se a disposição exatamente o conjugado motor necessário para o arranque. Em seguida, a tensão é reduzida, aplicado-se uma **rampa de tensão** para ajustar o conjugado do motor à curva característica da carga.

O impulso de tensão para partida selecionado não pode ser muito alto, uma vez que isto significaria uma partida direta, com isso, fluiria a corrente de partida plena e o conjugado de aceleração seria máximo; a duração do impulso de tensão não deve ser muito longa pois o impulso de tensão para partida só deve estar um pouco acima do conjugado de arranque da carga e, após o arranque, o conjugado do motor precisa ser reduzido o mais rapidamente possível.

Conjugados de carga com comportamento constante:

- Bombas de pistão;
- Compressores contra pressão constante;
- Escada Rolante;
- Esteira transportadora;
- Guindastes;
- Máquinas ferramenta com corte constante.

O conjugado resistente da carga é constante em toda a faixa de rotação mas também podem ocorrer conjugados de arranque levemente superiores.

Outros exemplos:

Em uma partida e parada diretas, os materiais a serem transportados tombariam ou ficariam danificados, (no caso de pessoas sendo transportadas: quedas, ferimentos, falta de segurança).

Se a tensão de partida for muito baixa, o motor permanecerá bloqueado até que a tensão atinja um nível em que o conjugado do motor seja superior ao conjugado resistente.

Em um dispositivo de partida estrela-triângulo o acionamento só arrancaria após a comutação para triângulo, o que equivaleria a uma partida direta.

Com as funções partida suave e parada suave, bem como, eventualmente, um impulso de partida ajustável no nível de tensão e na duração, o SOFT-STARTER é excepcionalmente adequado para dar partida e parar suavemente esteiras transportadoras, elevadores e escadas rolantes.

O impulso de tensão para partida selecionado não pode ser muito alto, porque significaria uma partida direta e, com isso, fluiria a corrente de partida plena e o conjugado de aceleração máximo (tranco mecânico na carga). A tensão de partida não pode ser muito baixa, para que o motor não deixe de partir.

Uma outra opção de partida adequada a este tipo de carga é a **partida com limitação de corrente**, onde é parametrizado o limite máximo de corrente permitido para a partida. O Soft-starter se encarregará de proporcionar a tensão suficiente ao motor desde que não ultrapasse o limite de corrente estabelecido.

7.2. Conversores de Frequência para Motores de Indução Trifásicos

7.2.1. Introdução:

O motor de indução trifásico é o motor mais utilizado nos processos industriais em geral. Isto deve-se ao baixo custo, baixa manutenção, boa eficiência e boa relação potência x peso x dimensões. Entretanto muitos processos necessitam de velocidade de rotação variável onde pode-se empregar caixas de redução, polias com correias, sistemas de fricção, motores de corrente contínua, etc. Os processos mecânicos citados apresentam baixo rendimento e a seleção de rotação muitas vezes é discreto. Com o desenvolvimento da eletrônica de Potência e da microeletrônica tornou-se fácil desenvolver um conversor eletrônico que produza uma tensão alternada de frequência variável.



Conversores de Frequência

7.2.2. Princípio de Funcionamento:

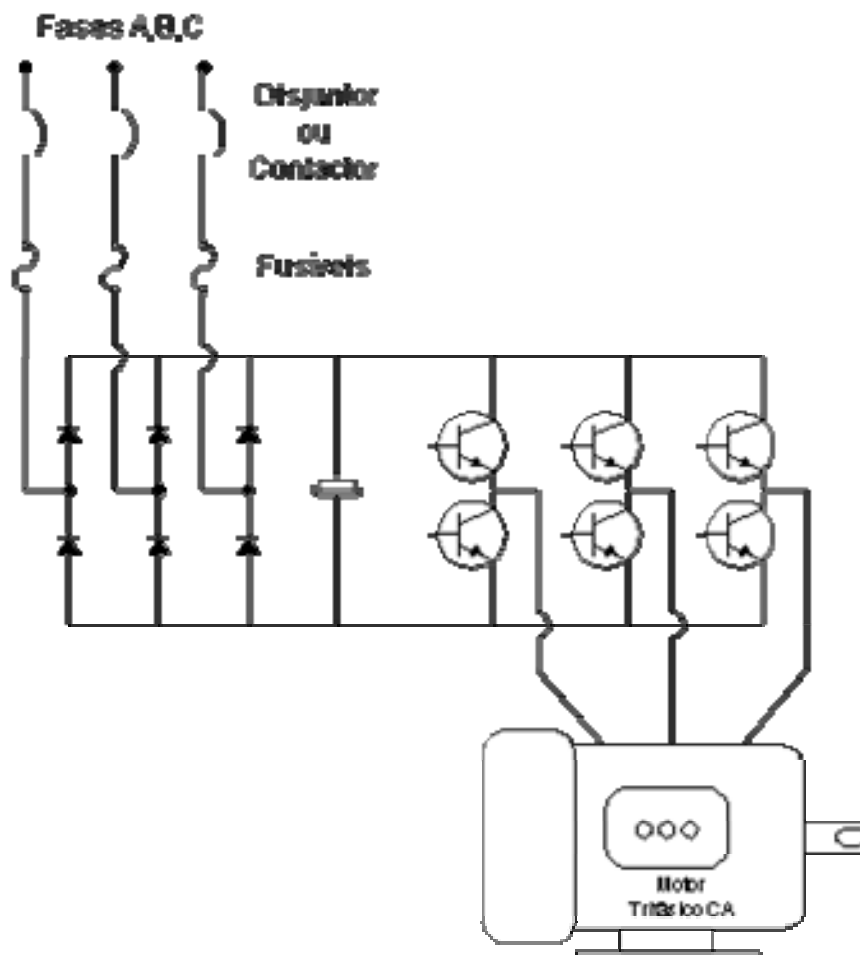
O conversor de frequência é um equipamento eletrônico destinado a *Varição de Velocidade de Motores de Indução Trifásicos*, composto de três etapas distintas, a saber: Retificador, Filtro e Inversor.

7.2.2.1 Etapa de entrada ou Retificador

Composta por pontes trifásicas (ou em alguns casos monofásicas) de diodos, que fazem o papel de retificação da tensão e frequência alternada da rede com valor fixo (p.ex. 220 V, 60 Hz), transformando-a em Corrente Contínua.

7.2.2.2 Etapa intermediária ou Filtro

Esta etapa é composta por capacitores eletrolíticos que tem como função principal de diminuir as ondulações na tensão que foi retificada pela etapa de entrada (retificadora) e de garantir o fornecimento de tensão CC a etapa seguinte (inversor). Além desta função, estes componentes também têm como objetivo a troca de potência reativa com o motor, ou seja, nos momentos em que o motor opera como “motor” ou como “gerador”, são os capacitores que fazem estas trocas de energia com o conversor.

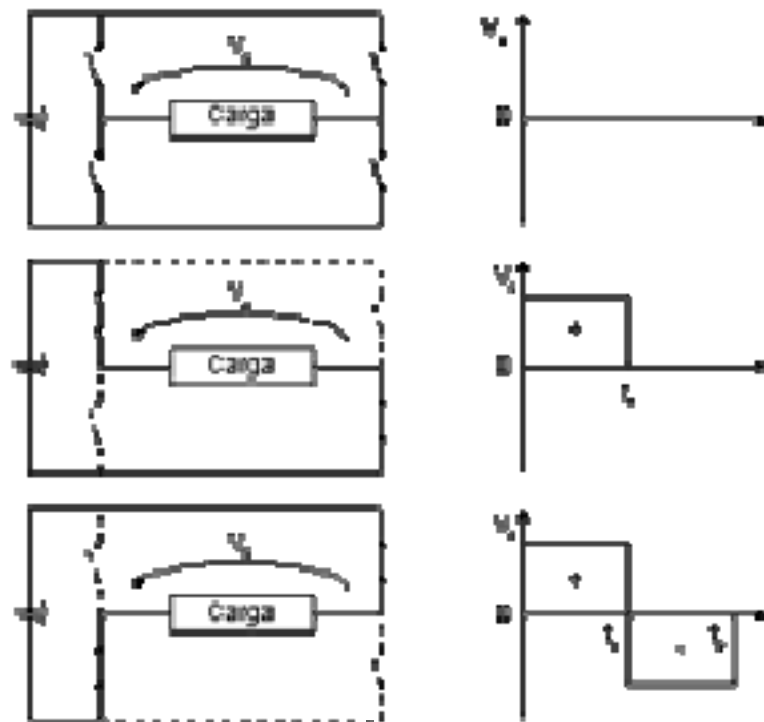


Circuito de Potência Simplificado

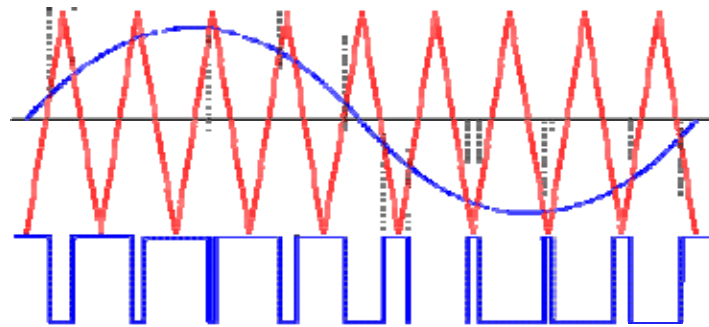
7.2.2.3 Etapa de saída ou Inversor

Nesta etapa a tensão contínua do barramento (tensão CC) é transformada em corrente alternada de frequência variável. A partir de um nível de tensão contínuo (barramento CC), os semicondutores que compõe o inversor, através de técnicas digitais (*PMW - modulação por largura de pulso*) conseguem chavear este sinal e através do controle do tempo de "ligamento e desligamento" dos semicondutores, fazer o valor médio deste variar, conseguindo assim, sintetizar (fabricar) a onda senoidal que será aplicada ao motor.

Todo este processo é supervisionado e gerenciado por microcontroladores que juntamente com memórias conseguem fazer com que o processo se desenvolva dentro das características desejadas



Funcionamento do Inversor



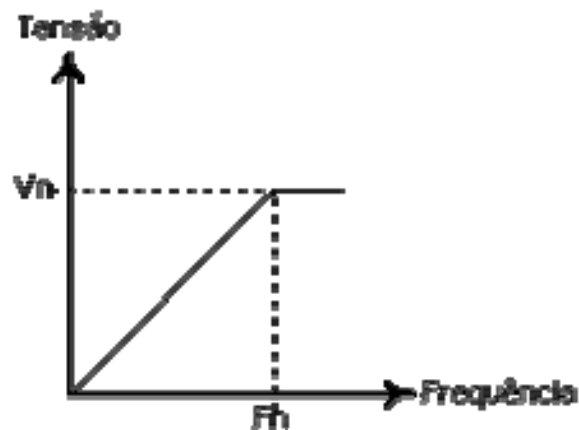
Modulação PWM

7.2.3. Curvas Características:

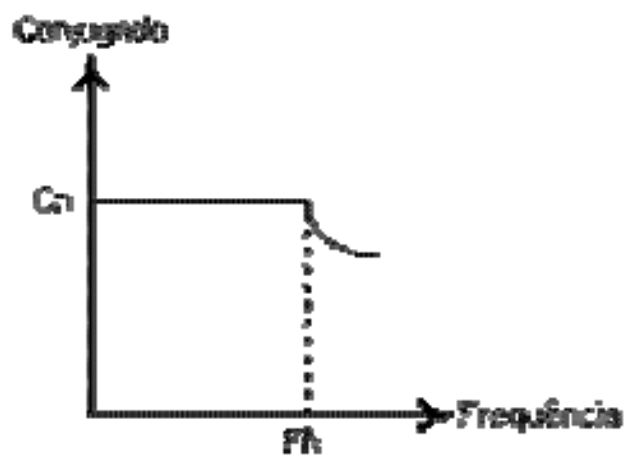
Com a utilização do conversor de frequência as curvas características de torque, potência e corrente, do motor se alteram. Isto porque passamos a controlar a frequência e a tensão aplicada no motor de indução.

Como o torque precisa ser mantido adequado e este só se mantém praticamente constante se o fluxo permanecer também constante, teremos que variar então a tensão (V) juntamente com frequência (f). Assim mantém-se o fluxo constante, conseqüentemente o torque (C) será constante e por sua vez teremos a desejada variação de velocidade com torque constante dentro de certos limites.

A variação V/f é feita linearmente até a frequência nominal do motor (p.ex. 60 Hz), acima desta a tensão que já é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator.

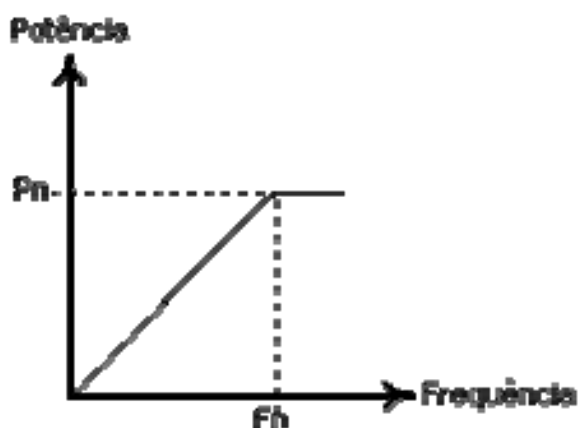


Com isto determinamos uma área acima da freqüência nominal que chamamos “região de enfraquecimento de campo” ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e portanto, o torque também começa a diminuir. Assim a curva característica Torque x Rotação do motor acionado com conversor de freqüência pode ser colocada da seguinte maneira:



Pode-se notar então que o torque permanece constante até a freqüência nominal e acima desta começa a decrescer (conforme explicado anteriormente: “região de enfraquecimento de campo”).

A potência de saída do conversor de freqüência segue a variação V/f , ou seja, cresce linearmente até a freqüência nominal e permanece constante acima desta.



Assim como precisamos saber como se comportam as características de torque e de potência ao longo das rotações do motor, quando este é acionado com conversor de frequência, precisamos também estudar os tipos de torque resistentes e potências consumidas nas mais diversas aplicações pelas respectivas cargas. Cada máquina tem uma característica específica de torque e potência.

Como o motor de indução é uma máquina assíncrona auto-ventilada, com a redução de rotação, a ventilação já não é mais a mesma do que seria se estivesse nas suas condições nominais. Ensaio em laboratórios nos mostram que de 30 a 60Hz, ou seja de 50 a 100% da rotação nominal do motor a refrigeração ainda é eficiente (o motor suporta a pequena elevação de temperatura). Abaixo de 30Hz deve-se então ser feita uma análise do tipo de carga acionada para que se possa tirar conclusões a respeito do aquecimento do motor.

Em uma carga cujo conjugado resistivo seja CONSTANTE, a redução de rotação não influenciará no conjugado requerido no motor e nos níveis de correntes de trabalho deste. Portanto o aquecimento em baixas rotações será inevitável com motor de indução normal (ex. esteira transportadora). Por outro lado, se a carga tiver características quadráticas de conjugado, em baixas rotações a exigência da carga também será baixa e as correntes do motor diminuirão também. Consequentemente o motor não aquecerá mesmo com ventilação reduzida (ex. bomba centrífuga, ventiladores).

Lembramos ainda as limitações dos conversores usuais no que diz respeito a limites máximos de torque e corrente. Ao invés de obtermos com o motor em

partida direta cerca de 2 a 3 vezes o torque nominal e de 5 a 8 vezes a corrente nominal, quando utilizamos conversores de frequência, a corrente máxima no motor gira em torno de 1,5 vezes a corrente nominal (durante 60 segundos) e o conjugado máximo por sua vez também é limitado em 1,5 vezes o conjugado nominal (durante 60 s).

Estas são características que como outras do conversor de frequência (rampas de aceleração, limites de sobrecarga, etc), juntamente com características da carga (momento de inércia, tempos de aceleração, tempos de frenagem, etc) fazem do conversor de frequência um equipamento que exige uma melhor análise da sua utilização para que seja totalmente adaptado as aplicações onde há a necessidade da variação de velocidade.

7.2.4. Instalação:

7.2.4.1 Cuidados na instalação:

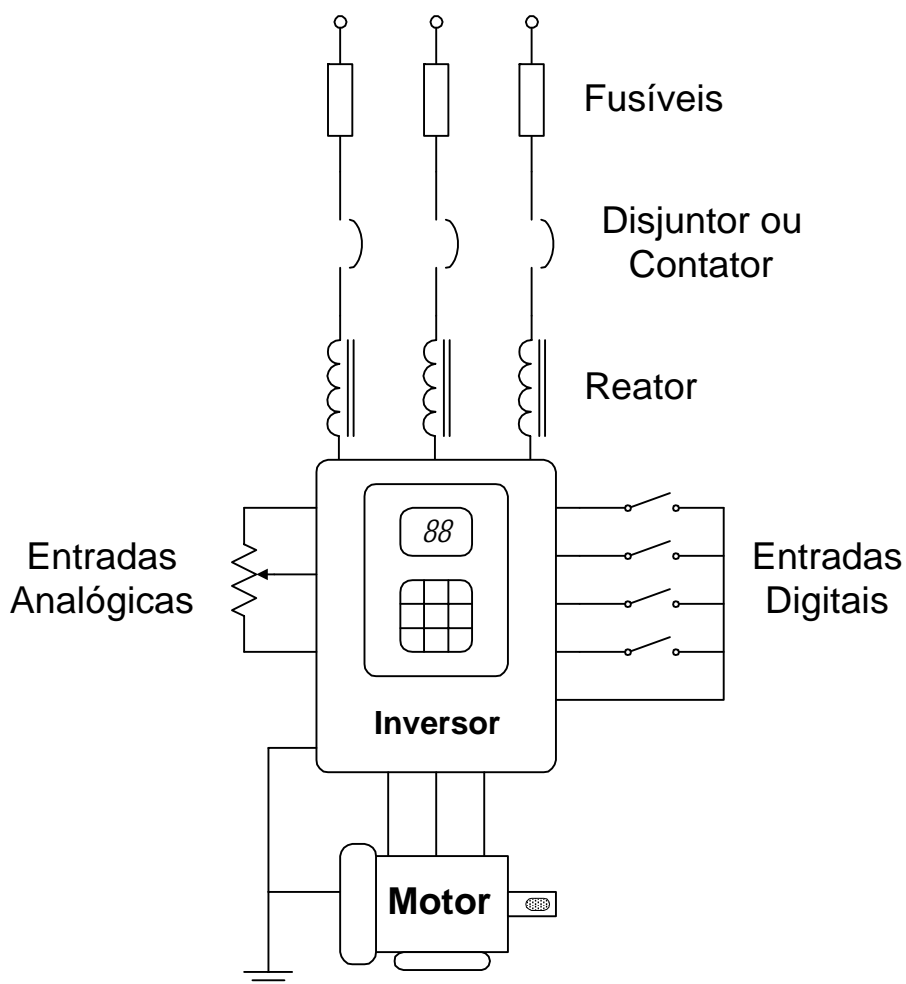
- ✎ O conversor de frequência é um equipamento eletrônico, portanto deve-se tomar cuidado às condições de instalação.
- ✎ Verifique se a tensão de entrada está dentro de $\pm 10\%$ do valor nominal. Se a tensão de entrada exceder a faixa permissível ativar-se-á o circuito de proteção, ou pior, poderá danificar o conversor;
- ✎ Evite instalar o equipamento em locais de altos níveis de temperatura, umidade, partículas de pó metálico, etc...;
- ✎ Instale o conversor numa área livre de óleos, gases corrosivos e afins;
- ✎ Não instale em locais com elevado nível de vibração;
- ✎ O conversor é uma fonte geradora de calor, logo, quando instalar num painel tenha certeza que haja ventilação e espaço no painel;
- ✎ Sempre aterre a unidade para prevenir eletro-condução e mau funcionamento devido a ruídos. (classe 200V chassis/terra - resistência máxima de 100 Ohms)
- ✎ Não instale capacitores para a correção do fator de potência junto ao motor.
- ✎ Instale o conversor num painel de material não combustível, tal como chapa de metal. Para manter a ventilação, assegure-se de um espaço adequado e instale-o na posição vertical, no sentido do comprimento. Quando instalar inversores em fila, deixe um espaço de 100mm entre cada unidade, este

espaço pode ser diminuído de acordo com as condições do ambiente ou com ventiladores adicionais.

⚡ O inversor poderá funcionar fora das especificações quando os seguintes equipamentos são instalados próximos dele:

- Contactor magnético - instale com supressor na bobina de excitação;
- Lâmpadas fluorescentes;
- Resistores - devem ser instalados distantes do conversor.

7.2.4.2 Ligação padrão para rede trifásica:



Circuito de Instalação do Inversor de frequência

7.2.5. Modo de Monitoração:

Esta função monitora cada estado (frequência de ajuste, tensão de saída , corrente, estado das entradas/saídas digitais, etc.) Este modo é ativado quando a tecla “MON” é pressionada no modo operação. Com a utilização das setas podem-se alternar vários parâmetros. Para deixar este modo pressione novamente a tecla “MON”.

7.3. Conclusão

As técnicas apresentadas neste capítulo foram desenvolvidas nas últimas décadas graças ao desenvolvimento da eletrônica de potência e da microeletrônica. Estas técnicas proporcionaram um incremento significativo ao motor de indução. Foram adicionadas características de controle em regime e partida que aliadas as características de eficiência, baixo custo, baixa manutenção e boa relação potência x volume x peso, do motor de indução, tornaram a utilização destes equipamentos muito populares na indústria.

Para Saber Mais:

www.weg.com.br

www.siemens.com.br

www.sew.com.br

Leia o Artigo: **Inversores de Frequência**, de Alexandre Capelli, Revista Mecatrônica Atual N.2 de fevereiro de 2002.