

PROCEL INDÚSTRIA

EDIÇÃO S E R I A D A

8

ACIONAMENTO ELETRÔNICO

GUIA BÁSICO

2009



ACIONAMENTO ELETRÔNICO

GUIA BÁSICO

2009

© 2008. CNI – Confederação Nacional da Indústria

IEL – Núcleo Central

ELETOBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

ELETOBRÁS

Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Av. Presidente Vargas, 409, 13º andar, Centro

20071-003 Rio de Janeiro RJ

Caixa Postal 1639

Tel 21 2514-5151

www.eletobras.com

eletoabr@eletobras.com

INSTITUTO EUVALDO LODI

IEL/Núcleo Central

Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco B

Edifício CNC

70041-902 Brasília DF

Tel 61 3317-9080

Fax 61 3317-9360

www.iel.org.br

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Av. Rio Branco, 53, 14º, 15º, 19º e 20º andares

Centro, 20090-004 Rio de Janeiro RJ

www.eletobras.com/procel

procel@eletobras.com

Ligação Gratuita 0800 560 506

CNI

Confederação Nacional da Indústria

Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 Brasília DF

Tel 61 3317- 9001

Fax 61 3317- 9994

www.cni.org.br

Serviço de Atendimento ao Cliente – SAC

Tels 61 3317-9989 / 61 3317-9992

sac@cni.org.br

PROCEL INDÚSTRIA – Eficiência Energética Industrial

Av. Rio Branco, 53, 15º andar, Centro

20090-004 Rio de Janeiro RJ

Fax 21 2514-5767

www.eletobras.com/procel

procel@eletobras.com

Ligação Gratuita 0800 560 506

A532

Acionamento eletrônico: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília : IEL/NC, 2008.

98 p. : il.

ISBN 978-85-87257-31-4

1. Acionamento eletrônico 2. Conversor de energia I. Eletrobrás II. CNI – Confederação Nacional da Indústria III. IEL – Núcleo Central IV. Título.

CDU: 621.61

ELETROBRÁS / PROCEL

Presidência

José Antônio Muniz Lopes

Diretoria de Tecnologia

Ubirajara Rocha Meira

Departamento de Projetos de Eficiência Energética

Fernando Pinto Dias Perrone

Divisão de Eficiência Energética na Indústria e Comércio

Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Presidente

Armando de Queiroz Monteiro Neto

INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL

Presidente do Conselho Superior

Armando de Queiroz Monteiro Neto

Diretor-Geral

Paulo Afonso Ferreira

Superintendente

Carlos Roberto Rocha Cavalcante

Equipe Técnica

ELETROBRÁS / PROCEL

Equipe PROCEL INDÚSTRIA

Alvaro Braga Alves Pinto

Bráulio Romano Motta

Carlos Aparecido Ferreira

Carlos Henrique Moya

Humberto Luiz de Oliveira

Lucas Vivaqua Dias

Marília Ribeiro Spera

Roberto Piffer

Roberto Ricardo de Araujo Goes

Colaboradores

George Alves Soares

Vanda Alves dos Santos

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

DIRETORIA EXECUTIVA – DIREX

Diretor

José Augusto Coelho Fernandes

Diretor de Operações

Rafael Esmeraldo Lucchessi Ramacciotti

Diretor de Relações Institucionais

Marco Antonio Reis Guarita

Unidade de Competitividade Industrial – COMPI

Gerente-Executivo

Maurício Otávio Mendonça Jorge

Gerente de Infra-Estrutura

Wagner Ferreira Cardoso

Coordenação Técnica

Rodrigo Sarmiento Garcia

SUPERINTENDÊNCIA DE SERVIÇOS COMPARTILHADOS – SSC

Área Compartilhada de Informação e Documentação – ACIND

Normalização

Gabriela Leitão

INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL

Gerente-Executivo de Operações

Júlio Cezar de Andrade Miranda

Gerente de Desenvolvimento Empresarial – GDE

Diana de Mello Jungmann

Coordenação Técnica

Patrícia Barreto Jacobs

Gerente de Relações com o Mercado – GRM

Oto Morato Álvares

Responsável Técnico

Ana Amélia Ribeiro Barbosa

SENAI / DN

Gerente-Executivo da Unidade de Educação Profissional

– UNIEP

Alberto Borges de Araújo

Apoio Técnico

Diana Freitas Silva Néri

Gerente-Executiva da Unidade de Relações com o Mercado

– UNIREM

Mônica Côrtes de Domênico

SENAI / MG

Conteudistas

Carlos Roberto Pires e Roberto Veríssimo Reis

Pedagoga

Xênia Ferreira da Silva

Coordenação do projeto pelo SENAI / MG

Cristiano Ribeiro Ferreira Jácome

Supervisão Pedagógica

Regina Averbug

Editoração Eletrônica

Link Design

Revisão Gramatical

Marluce Moreira Salgado

SUMÁRIO

Apresentação

Capítulo 1 – Introdução ao acionamento eletrônico 13

Capítulo 2 – Conjugado e variação da velocidade em sistemas motrizes 19

Conjugado do motor 20

Velocidade em sistemas motrizes 21

Variação de velocidade em sistemas motrizes 24

 Variadores mecânicos 24

 Polias fixas 24

 Polias variadoras 25

 Motorreductor 26

Variador eletromagnético 27

Variador eletrônico 28

Capítulo 3 – Dispositivos semicondutores de potência 31

Dispositivos semicondutores de potência usado no acionamento eletrônico 33

Diodo retificador de potência 33

 Circuitos retificadores 36

 Retificação de meia-onda 36

 Retificação de onda completa 39

Tiristor 42

 Retificador controlado de silício - SCR 42

 GTO (*Gate turn off thyristor*) 43

Transistor bipolar de potência (TBP) 45

Transistor de efeito de campo – FET (*Field effect transistor*) 47

 Transistor de efeito de campo de junção (JFET) 47

 Transistor de efeito de campo de porta isolada – MOSFET 48

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) 51

MCT (*MOS-Controlled Thyristor*) 52

Capítulo 4 – Acionamento eletrônico de motor de corrente contínua 59

Métodos de variação da velocidade do motor CC 61

Variação da resistência de armadura 61

Sistema *Ward-Leonard* 62

Variador de tensão 62

Variador eletrônico – Conversor CA/CC 63

Conversor *Chopper* 65

Capítulo 5 – Acionamento eletrônico de motor de corrente alternada 69

Técnicas para acionamento eletrônico do motor CA 72

Cicloconversor 72

Soft-starter 72

 Funcionamento do *soft-starter* 74

 Principais aplicações para o *soft-starter* 75

 Exemplo de aplicação do *soft-starter* 76

Inversor de frequência 77

 Princípios básicos do inversor de frequência 78

 Aplicações práticas com o inversor de frequência 81

 Modos de operação dos inversores de frequência 83

 Tipos de controle de inversores de frequência 83

 Parametrização do inversor de frequência 86

Servoacionamento 89

 Fundamentos básicos de servoacionamento 89

 Escolha do motor 90

 Sensores de posicionamento e velocidade 90

Encoders 91

 Tacogeradores 92

Resolvers 92

 Servoconversor 93

Referências 97



APRESENTAÇÃO

O obter a eficiência energética significa utilizar processos e equipamentos que sejam mais eficientes, reduzindo o desperdício no consumo de energia elétrica, tanto na produção de bens como na prestação de serviços, sem que isso prejudique a sua qualidade.

É necessário conservar e estimular o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores socioeconômicos do Brasil, sendo de grande importância para o País a adoção efetiva de medidas de economia de energia e o consequente impacto destas ações. Neste cenário destaca-se a indústria, não só pelo elevado potencial de conservação de energia do seu parque, como também pela sua capacidade produtiva como fornecedora de produtos e serviços para o setor elétrico.

No âmbito das ações que visam criar programas de capacitação voltados para a obtenção de eficiência energética no setor industrial, inclui-se o *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Este curso tem como objetivo capacitar agentes industriais, tornando-os capazes de identificar, propor e implementar oportunidades de redução de perdas nas instalações industriais de sistemas motrizes.

O curso faz parte do conjunto de ações que vêm sendo desenvolvidas pelo governo federal para:

- Fomentar ações de eficiência energética em sistemas motrizes industriais;
- Facilitar a capacitação dos agentes industriais de nível médio dos diversos subsetores da indústria, para desenvolverem atividades de eficiência energética;
- Apresentar as oportunidades de ganhos de eficiência energética por meio de economia de energia em sistemas motrizes industriais;
- Facilitar a implantação de tecnologias eficientes sob o ponto de vista energético, além da conscientização e da difusão de melhores hábitos para a conservação de energia.

Como apoio pedagógico para este curso foram elaborados os seguintes guias técnicos:

- 1 – Correias Transportadoras
- 2 – Acoplamento Motor Carga
- 3 – Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético
- 4 – Compressores
- 5 – Ventiladores e Exaustores
- 6 – Motor Elétrico
- 7 – Energia Elétrica: Conceito, Qualidade e Tarifação
- 8 – Acionamento Eletrônico
- 9 – Bombas
- 10 – Análise Econômica de Investimento
- 11 – Instrumentação e Controle

Este material didático – Acionamento Eletrônico – faz parte do conjunto de guias técnicos do *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Ele é um complemento para o estudo, reforçando o que foi desenvolvido em sala de aula. É também uma fonte de consulta, onde você, participante do curso, pode rever e relembrar os temas abordados no curso.

Todos os capítulos têm a mesma estrutura. Conheça, a seguir, como são desenvolvidos os capítulos deste guia.

- **Iniciando nossa conversa** – texto de apresentação do assunto abordado no capítulo.
- **Objetivos** – informa os objetivos de aprendizagem a serem atingidos a partir do que foi desenvolvido em sala de aula e com o estudo realizado por meio do guia.
- **Um desafio para você** – apresenta um desafio: uma situação a ser resolvida por você.

- **Continuando nossa conversa** – onde o tema do capítulo é desenvolvido, trazendo informações para o seu estudo.
- **Voltando ao desafio** – depois de ler, analisar e refletir sobre os assuntos abordados no capítulo, você retornará ao desafio proposto, buscando a sua solução à luz do que foi estudado.
- **Resumindo** – texto que sintetiza os principais assuntos desenvolvidos no capítulo.
- **Aprenda mais** – sugestões para pesquisa e leitura, relacionadas com o tema do capítulo, visando ampliar o que você aprendeu.

Esperamos que este material didático contribua para torná-lo um cidadão cada vez mais consciente e comprometido em alcançar a eficiência energética, colaborando, assim, para que o país alcance as metas nesse setor e os consequentes benefícios para a sociedade brasileira e o seu meio ambiente.



Capítulo 1

INTRODUÇÃO AO ACIONAMENTO ELETRÔNICO

Iniciando nossa conversa

Nesse capítulo você vai estudar o que é acionamento eletrônico, onde ele é aplicado e suas vantagens sobre o acionamento tradicional.

O acionamento eletrônico utiliza algum tipo de conversor de energia. Você já deve ter utilizado um desses conversores; por exemplo, o controle de luminosidade de lâmpada incandescente conhecido como dimmer. Com ele você tem um controle total sobre a intensidade luminosa da lâmpada, podendo economizar energia. O nosso estudo, porém, será voltado para as aplicações industriais do acionamento eletrônico.

Objetivos

O estudo deste capítulo tem como objetivos:

- definir acionamento eletrônico;
- identificar onde e quando é empregado o acionamento eletrônico;
- descrever as vantagens do acionamento eletrônico.

Um desafio para você

Na indústria o acionamento tradicional vem sendo substituído pelo eletrônico. Porém, antes é necessário analisar alguns itens relativos à flexibilidade de operação, economia de energia e impacto na rede elétrica. Explique os procedimentos que devem ser realizados na análise de cada um destes itens.

Continuando nossa conversa

Os motores elétricos representam uma parcela expressiva do consumo de energia na indústria. A energia elétrica é distribuída aos consumidores em tensões e frequência fixas. Uma vez que a velocidade de rotação de uma máquina de corrente alternada é proporcional à frequência da tensão de alimentação, a máquina opera com velocidade fixa quando é ligada diretamente à rede de distribuição de energia.

Por outro lado, os processos modernos de manufatura requerem velocidades variáveis. Isto ocorre para um grande número de aplicações, dentre as quais citamos:

- tração elétrica;
- acionamento de bombas, ventiladores e compressores;
- sistemas flexíveis de manufatura;
- correias transportadoras, elevadores e escadas rolantes.



Fique ligado!

Uma aplicação com potencial significativo de conservação de energia é a utilização de acionamento eletrônico em processos que envolvem bombas, ventiladores ou compressores.

Na indústria, aproximadamente 50% das aplicações de motores são destinadas à movimentação de fluidos. Neste caso, o controle de velocidade de motores em substituição aos tradicionais métodos de controle de fluxo permite otimizar e adequar as condições de operação da bomba, ventilador ou compressor, para cada valor de vazão desejado, reduzindo perdas, ruídos e desgastes.

O rendimento global do sistema pode ser aumentado de 15% a 27% por meio da utilização de acionamento com velocidade variável em substituição aos sistemas de velocidade fixa. A utilização desse recurso, mediante pequenos e médios investimentos, pode trazer grandes benefícios e reduzir substancialmente os gastos com energia.

Para um sistema de bombeamento de grande capacidade, operando com velocidade variável, estima-se que o tempo de recuperação do capital investido seja da ordem de 3 a 5 anos, enquanto a vida do equipamento é de 20 anos. Isto corresponde a um período de 15 a 17 anos de operação lucrativa, com economia de energia.

O acionamento eletrônico é a conversão e o controle da energia elétrica para a alimentação de máquinas elétricas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA), utilizando dispositivos de eletrônica de potência.

O acionamento eletrônico é utilizado em aplicações industriais, como nas indústrias mineradoras, de cimento, de papel e têxtil. Também é utilizado no transporte público, no metrô e nos trens urbanos. Todas estas aplicações necessitam de alta eficiência. Isto é obtido com o uso de conversores eletrônicos que utilizam semicondutores de potência (diodos, tiristores, transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor – MOSFET e transistor bipolar de porta isolada – IGBT), operando em modo de chaveamento.



Fique ligado!

Eficiência energética é a medida do aproveitamento da energia elétrica para a realização de trabalho.

Mas, por que utilizar o acionamento eletrônico na operação das máquinas elétricas?

A utilização de acionamento eletrônico permite:

- **economia de energia:** a partida e operação de máquinas elétricas de forma direta consomem muito mais energia do que quando é utilizado um acionamento eletrônico. A utilização de um inversor de frequência ou de um *soft-starter* contribui para diminuir o consumo de energia e melhorar a eficiência na operação dessas máquinas;
- **controle de velocidade:** é fundamental a possibilidade de controlar a velocidade da máquina, a fim de obter maior flexibilidade de operação da mesma;

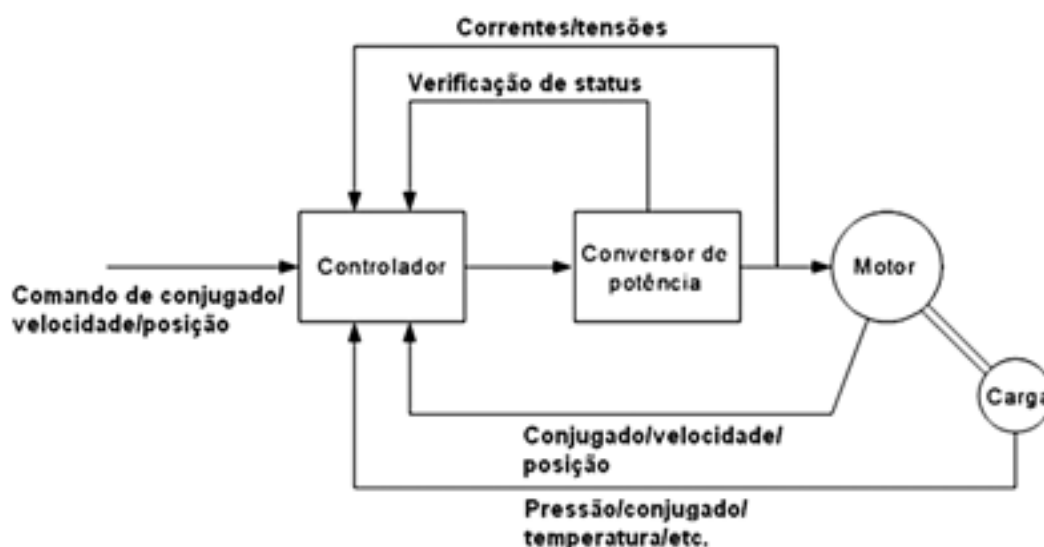
- **estabilidade da rede elétrica:** o processo de partida das máquinas fica menos crítico, pois utilizando dispositivo de partida como *soft-starter*, há maior controle da corrente de partida, provocando menos interferência na estabilidade da rede elétrica.

Em um sistema moderno de acionamento à velocidade variável, há quatro componentes:

- máquina elétrica: motor de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA);
- conversor estático de potência: retificador controlado, *chopper* e inversor de frequência;
- controlador: para ajustar o motor e o conversor de potência, atendendo às exigências da carga acionada;
- carga mecânica

Estes componentes são apresentados esquematicamente na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de um acionamento eletrônico



Voltando ao desafio

Foi proposto, no desafio deste capítulo, que fosse explicado os procedimentos necessários na análise dos itens relativos à flexibilidade de operação, economia de energia e impacto na rede elétrica, para definir a substituição ou não do acionamento tradicional pelo eletrônico.

Para isso, é necessário verificar:

- se o sistema permite a operação da máquina em diversas velocidades;
- se a economia de energia resultante paga o investimento que será realizado no acionamento eletrônico;
- se a substituição resultará em menos interferência na rede elétrica toda vez que algum dispositivo for acionado e o grau de importância que isto representa.

Resumindo

Você aprendeu neste capítulo o que é um acionamento eletrônico, a importância dele para a economia de energia e quais são os componentes de um sistema de acionamento à velocidade variável.

Aprenda mais

O acionamento eletrônico consiste de um conversor de energia acionando um motor elétrico. Se você quer ampliar seus conhecimentos sobre motores elétricos de corrente contínua e de corrente alternada, pegue um livro de máquinas elétricas e leia sobre o princípio de funcionamento desses motores. Duas boas indicações de livros são:

- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JÚNIOR, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas**. São Paulo: Bookman, 2006.
- KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. Rio de Janeiro: Globo, 2006.
- Se preferir, pesquise no site:
- <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node60.html>, acessado em 21/11/2007



Capítulo 2

CONJUGADO E VARIAÇÃO DA VELOCIDADE EM SISTEMAS MOTRIZES

Iniciando nossa conversa

Com certeza você já utilizou uma escada rolante em um shopping center. Você deve ter observado que ela gira com velocidade constante: vazia, com poucas pessoas ou lotada de pessoas. E o consumo de energia dela será constante? Se for, não haverá eficiência energética, pois se consumir a mesma energia quando estiver lotada ou vazia, haverá uma enorme perda de energia.

Para entender como fazer um acionamento com eficiência energética, estudaremos as grandezas que estão envolvidas e as técnicas utilizadas para variar a rotação de um motor.

Objetivos

Ao estudar este capítulo temos como objetivos:

- descrever a importância da variação da velocidade em sistemas motrizes;
- citar as grandezas elétricas envolvidas em um sistema de acionamento;
- descrever os sistemas de variação de velocidade utilizados em um motor elétrico.

Um desafio para você

Em diversas aplicações industriais a variação da velocidade de um motor é essencial, por exemplo:

- em moinhos, utilizados na indústria do cimento;
- no controle de vazão de líquidos, utilizados na indústria de bebidas;

- em pontes rolantes, utilizadas pelas companhias de mineração.

Os variadores utilizados no controle da velocidade do motor podem ser mecânico, eletromagnético ou eletrônico.

Após estudar este capítulo, explique por que, sempre que for possível, a melhor escolha é o variador eletrônico.

No final deste capítulo você encontrará a resposta a este desafio.

Continuando nossa conversa

Conjugado do motor

Quando um motor está acelerando ou desacelerando ele precisa vencer o efeito de inércia de todas as partes girantes do acionamento que incluem:

- o próprio rotor;
- a carga acionada;
- o sistema de redução (reductor).



Fique ligado!

O esforço necessário para vencer o efeito de inércia das partes girantes do acionamento é chamado de *conjugado* ou *torque* (T) do motor.

O *conjugado* é expresso em Newton x metro (N.m), podendo também ser utilizada a unidade kilogramaforça x metro (kgfm). A relação entre as duas unidades é dada por:

$$1 \text{ kgfm} = 9,8 \text{ N.m}$$

Velocidade em sistemas motrizes

Outra grandeza importante em um acionamento é a *velocidade angular* (N), que é medida por meio de um tacômetro e expressa em rotações por minuto (rpm). Para efeito de cálculo, a *velocidade angular* (ω) deverá ser expressa em radianos por segundo (rad/s). Para transformar a velocidade angular de rpm para rad/s, usamos a seguinte fórmula:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

A potência (P) que o motor vai consumir é igual ao produto do torque (T) pela velocidade angular (ω).

Então:

$$P = T \cdot \omega$$

A unidade de medida da potência é o Watt (W), e:

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ (N.m)} \times 1 \text{ (rad/s)}$$



Atenção!

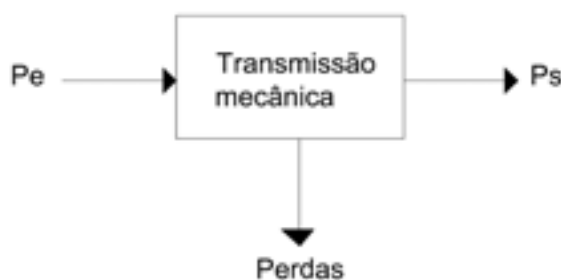
Observando a fórmula da potência (P), é possível verificar que, para um mesmo torque (T) quanto maior for a *velocidade angular* (ω) maior será a potência necessária. Daí a necessidade de ajustar a potência à velocidade do sistema motriz, para não haver desperdício de energia.

Parte da potência que o motor fornece à transmissão mecânica é consumida pelas perdas internas devido essencialmente ao atrito (calor, ruído), geometria da transmissão, desgaste e folgas entre as partes móveis.

A perda de potência é expressa em termos de eficiência ou rendimento mecânico (η_T). O rendimento mecânico é sempre menor que 1 ($\eta_T < 1$).

A Figura 2 ilustra a relação entre a potência de entrada (P_e), a potência de saída (P_s) e as perdas em um sistema de transmissão mecânica.

Figura 2 – Diagrama em bloco das potências e da perda em um acionamento com transmissão mecânica



A fórmula para o cálculo do rendimento é:

$$\eta_T = \frac{P_s}{P_e}$$

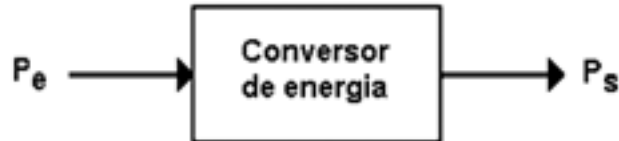


Fique ligado!

Sempre que houver um redutor de velocidade (transmissão mecânica) em um sistema de acionamento, haverá um potencial para economizar energia utilizando o acionamento eletrônico com o conversor de energia.

A Figura 3 ilustra as potências envolvidas em um acionamento eletrônico.

Figura 3 – Diagrama em bloco das potências envolvidas em um acionamento com conversor de energia



O motor aciona cargas de diferentes tipos de conjugados resistentes. Em geral, o torque ou conjugado resistente da carga é uma função da velocidade e pode ser escrito como:

$$T = \alpha \cdot \omega^x$$

A expressão anterior indica que a variação do torque é proporcional à variação da velocidade, onde o expoente x pode ser um inteiro ou uma fração. Por exemplo, no acionamento de esteiras transportadoras, pontes rolantes e guinchos, o conjugado resistente (torque) é constante e a potência do motor é proporcional à velocidade. No caso do acionamento de ventiladores e bombas centrífugas, o conjugado resistente da carga varia com o quadrado da velocidade e a potência requerida do motor varia com o cubo da velocidade. Já no caso do acionamento de máquina operatriz (furadeira, retífica, bobinadeira), o conjugado resistente varia inversamente proporcional à velocidade e a potência solicitada do motor é constante, independente da variação da velocidade.



Fique ligado!

É necessário observar o tipo de acionamento para identificar como é a variação da potência em função da variação da velocidade.

Você já percebeu que conjugado e velocidade estão interligados. Vamos, então, ver como é possível variar a velocidade de um motor.

Variação de velocidade em sistemas motrizes

A seguir serão estudados os diversos tipos de variadores de velocidade que podem ser utilizados em um motor.

Variadores mecânicos

O primeiro variador utilizado para se conseguir variar a velocidade de um motor foi o variador mecânico. Este tipo de variador traz como principal característica a simplicidade de construção, baixo custo, pequena variação de velocidade condicionada a limites mecânicos e elétricos.

Existem diversos tipos de variadores, a questão é escolher aquele que apresenta as melhores características para um acionamento eficiente. Para tornar mais fácil essa escolha, apresentaremos, a seguir, os diversos tipos de variadores mecânicos.

Polias fixas

Permitem a variação discreta da velocidade. São utilizadas onde existe necessidade de redução ou aumento de velocidade, porém sempre fixa, sem a possibilidade de uma variação contínua de rotação.

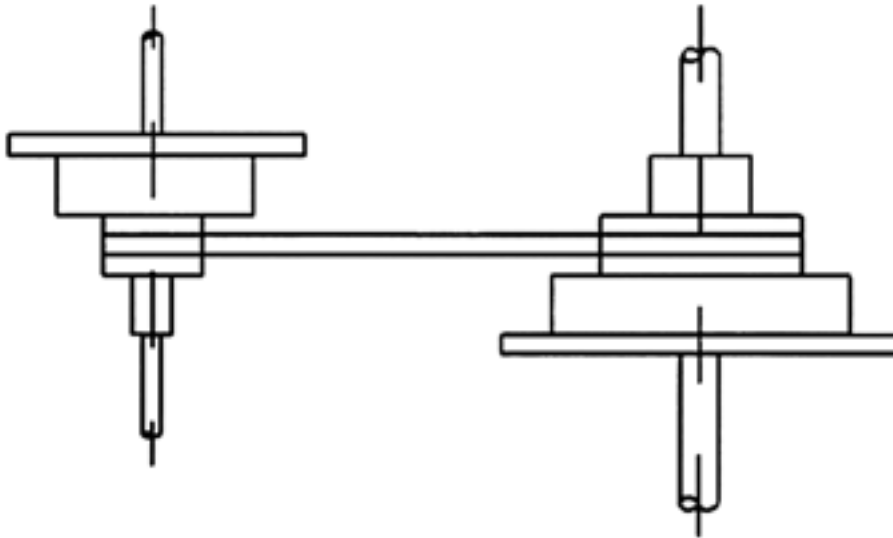


Fique ligado!

Uma das aplicações das polias fixas é em furadeiras elétricas.

A Figura 4 mostra o esquema de um acionamento com polias fixas.

Figura 4 – Sistema de transmissão com polias fixas



Fonte: SENAI-SP, 1988.

Polias variadoras

Permitem a variação contínua da velocidade. Utilizam um dispositivo mecânico constituído de dois flanges cônicos (que formam uma polia) que se movimentam sobre o eixo acionado.

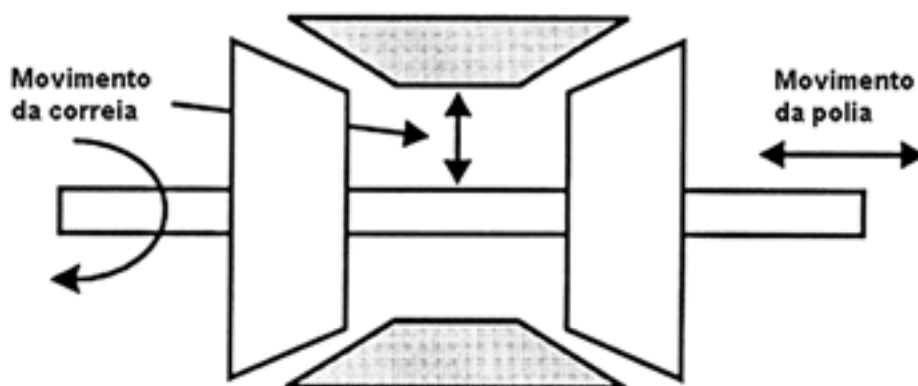


Fique ligado!

Uma das aplicações das polias variadoras é em máquinas colheitadeiras.

A Figura 5 apresenta um acionamento com polias variadoras.

Figura 5 – Sistema de transmissão com polias variadoras



Fonte: SENAI-SP, 1988.

Motorreductor

Trata-se de um sistema de acoplamento mecânico avançado em relação aos citados anteriormente. Permite a variação discreta e contínua da velocidade, por meio de um jogo de polias e engrenagens variáveis.

Os modelos mais utilizados são os de engrenagens helicoidais, de engrenagens cônicas, de eixos paralelos e de rosca sem fim.

A Figura 6 mostra a foto de um conjunto formado por um motor elétrico e um reductor mecânico.

Figura 6 – Motorreductor de engrenagens cônicas



Fonte: SEW-EURODRIVE. Disponível em: <<http://www.sew.com.br/Modulos/Produtos/>>. Acesso em: 26 nov. 2007.



Fique ligado!

Uma das aplicações dos motorredutores é em pontes rolantes.

Independente da variação de velocidade na saída, o motor que aciona o motorreductor funciona com tensão e velocidade nominal, o que implica desperdício de energia elétrica devido às perdas pelo atrito e o acoplamento do motorreductor.



Fique ligado!

Embora o variador mecânico seja uma solução simples e robusta, utilizada para a redução da velocidade, fatores como a manutenção constante exigida, ruídos sonoros gerados e o baixo rendimento do reductor são itens importantes que justificam a substituição desse dispositivo pelos modernos dispositivos eletrônicos de controle de velocidade, que aumentam de forma substancial a eficiência do sistema motriz.

Variador eletromagnético

Com o variador eletromagnético mudou-se o conceito de variação exclusivamente mecânica para variação eletromecânica. A técnica envolvida está baseada nas correntes de *Foucault*, que utiliza um sistema de disco acoplado a bobinas que podem ter seu campo magnético modificado, variando assim o torque e a velocidade na saída do variador.



Fique ligado!

Em relação aos dispositivos mecânicos, os variadores eletromagnéticos são mais eficientes, pois permitem um ajuste mais preciso e uma variação mais linear da velocidade de saída.

As principais desvantagens dos variadores eletromagnéticos são:

- a rotação de entrada é sempre a nominal do motor e, portanto, existe desperdício de energia toda a vez que operar abaixo da rotação nominal;
- o rendimento é muito baixo, pois apresenta perdas por aquecimento.



Atenção!

O variador eletromagnético possui partes girantes que necessitam de constantes ajustes e substituições periódicas, por isto, as manutenções preventivas devem acontecer com maior frequência.



Fique ligado!

Uma das aplicações dos variadores eletromagnéticos é em moinhos.

Variador eletrônico

O sistema de acionamento eletrônico é caracterizado pelo uso de chaves eletrônicas no controle do fluxo da energia da rede de energia elétrica para o motor. Essas chaves provocam pouca perda de energia, o que aumenta a eficiência energética do acionamento.



Fique ligado!

Uma das aplicações dos variadores eletrônicos é no controle da velocidade de rotação e torque de motores CC e CA, de modo a manter o acionamento da carga no seu melhor ponto de eficiência e rendimento.

Há dois tipos de acionamento eletrônico: em corrente contínua e em corrente alternada, que serão estudados nos próximos capítulos.

Voltando ao desafio

Foi proposto no desafio deste capítulo que você explicasse por que o controle de velocidade de um motor com variador eletrônico é a melhor escolha entre as opções disponíveis: mecânico, eletromagnético e eletrônico.

A grande vantagem do variador eletrônico é que ele utiliza chaves eletrônicas, que são componentes semicondutores que controlam o fluxo de energia para o motor com uma perda de energia bem menor que a causada pelos outros sistemas variadores de velocidade. Assim, obtém-se uma alta eficiência energética nesse processo.

Resumindo

Neste capítulo você aprendeu sobre:

- a importância da variação da velocidade nos sistemas motrizes;
- a relação entre o conjugado da carga e a velocidade de rotação do motor;
- as grandezas elétricas envolvidas no controle da velocidade de um sistema motriz;
- as diversas maneiras de ajustar a velocidade do motor;
- a baixa eficiência energética apresentada pelos dispositivos mecânicos;
- a elevada eficiência energética apresentada pelo acionamento eletrônico.

Aprenda mais

Se você deseja saber mais sobre o tema variador mecânico de velocidade abordado neste capítulo, você pode ler o manual de um no site: <http://corporate.sew-eurodrive.com/download/pdf/10506845.pdf>, acessado no dia 21/11/2007.



Capítulo 3

DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTÊNCIA

Iniciando nossa conversa

Novos dispositivos semicondutores tornam os acionamentos eletrônicos mais simples, além de apresentarem maior rendimento, o que leva a menor consumo de energia e menor necessidade de ventilação. Muitos destes dispositivos ainda são pouco conhecidos, sendo assim, é necessário mostrar suas características e aplicações no acionamento eletrônico. É isso o que será estudado neste capítulo.

Objetivo

Ao estudar este capítulo, temos como objetivo:

- identificar o aspecto construtivo, símbolo, curva característica e forma de operação de diversos dispositivos semicondutores empregados em acionamento eletrônico.

Um desafio para você

Para construir um inversor de frequência, você deve escolher um dispositivo semicondutor de potência entre os diversos tipos disponíveis no mercado. A sua escolha deve levar em conta diversas características do dispositivo, tais como: facilidade de comutação, velocidade de operação, potência máxima.

E, então, qual será a sua escolha? Leia com atenção este capítulo e depois faça uma explanação sobre as possibilidades de escolha, de acordo com a característica mais relevante para o inversor.

Continuando nossa conversa

É no acionamento eletrônico que os componentes eletrônicos operam com potência elevada. Na maioria dos casos operam no modo chaveado (comutado), exigindo destes dispositivos semicondutores características especiais.

Estes dispositivos devem ser capazes de operar com correntes elevadas quando em condução, suportar tensões elevadas quando em corte e ainda ter tempos de comutação suficientemente pequenos para não levar o dispositivo à região ativa por um tempo longo o suficiente para causar perda de energia pela geração de calor.



Fique ligado!

Os dispositivos semicondutores são os elementos mais importantes em um acionamento eletrônico. Eles funcionam como chave liga-desliga, sendo, porém, um pouco mais complexos e dedicados.

Historicamente a evolução dos acionamentos eletrônicos acompanhou a evolução dos dispositivos semicondutores de potência que, por sua vez, segue a evolução da eletrônica de estado sólido. O desenvolvimento destes componentes está baseado na melhoria da eficiência, confiabilidade e custos dos dispositivos semicondutores.

A seguir vamos estudar diversos dispositivos semicondutores de potência que são utilizados na construção dos conversores de energia, empregados no acionamento eletrônico.

Dispositivos semicondutores de potência usado no acionamento eletrônico

Os dispositivos semicondutores de potência usados na construção de conversores de energia, que são empregados no acionamento eletrônico, são:

- diodo retificador de potência;
- retificador controlado de silício (SCR);
- GTO;
- transistor bipolar de potência;
- transistor de efeito de campo (FET);
- transistor bipolar de porta isolada (IGBT);
- MCT (*MOS-Controlled Thyristor*).

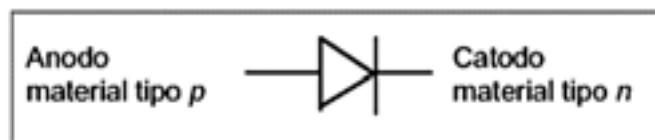
Vamos agora conhecer as características de cada um deles.

Diodo retificador de potência

A união de um semicondutor tipo p e um semicondutor tipo n origina uma junção pn , que é um dispositivo de estado sólido simples, conhecido como diodo semicondutor de junção. É um componente de dois terminais, denominados de anodo e catodo.

A Figura 7 ilustra o símbolo e os terminais do diodo.

Figura 7 – Símbolo e identificação dos terminais de um diodo



O diodo possui a característica de permitir o fluxo da corrente elétrica em uma direção e o bloqueio dela no sentido oposto. A corrente vai circular no diodo quando a tensão no terminal anodo estiver mais positiva em relação a do terminal catodo. Quando o diodo entra em condução, há uma pequena queda de tensão, de 0,7V a 1,0V, entre os seus terminais, devido a um efeito conhecido como *barreira de potencial*.

Por outro lado, quando a tensão do terminal anodo for mais negativa em relação a do terminal catodo, não haverá circulação de corrente elétrica no diodo. Esta situação é denominada *estado de bloqueio*.

A condução e o estado de bloqueio do diodo podem ser vistos em um gráfico conhecido como *curva característica do diodo*, onde cada valor da tensão aplicada ao diodo está relacionado com a respectiva corrente elétrica que vai percorrê-lo. De acordo com a polaridade da tensão aplicada aos terminais do diodo, haverá duas possibilidades: a polarização direta e a polarização reversa.

No circuito elétrico da Figura 8, o diodo está polarizado diretamente. Ao lado do circuito é mostrado o gráfico da corrente em função da tensão. Observe que na polarização direta o diodo não conduz até que a tensão entre seus terminais ultrapasse o valor da barreira de potencial. A região do gráfico onde o diodo começa a conduzir é conhecida como *tensão de joelho*. Quando o valor da tensão entre os terminais do diodo aproxima-se do valor da barreira de potencial, os elétrons livres e as lacunas começam a atravessar a junção em grandes quantidades, gerando uma corrente elétrica. A tensão, para a qual a corrente começa a aumentar rapidamente, é chamada de *tensão de joelho*, que está mostrada no Gráfico 1. Para os diodos fabricados com o cristal de silício, essa tensão é de aproximadamente 0,7V.

Figura 8 – Polarização direta do diodo

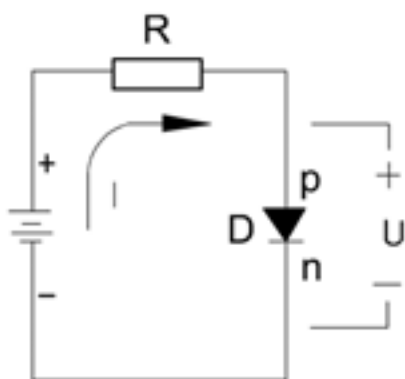
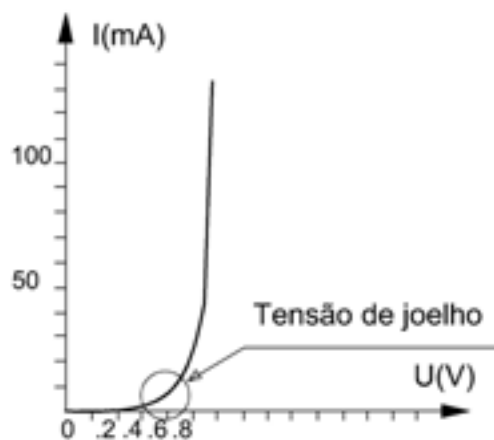


Gráfico 1 – Curva característica do diodo com polarização direta



A seguir são mostrados a figura do circuito e o gráfico da curva característica do diodo com polarização reversa.

Figura 9 – Polarização reversa do diodo

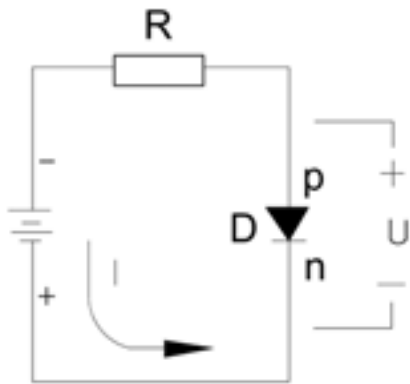
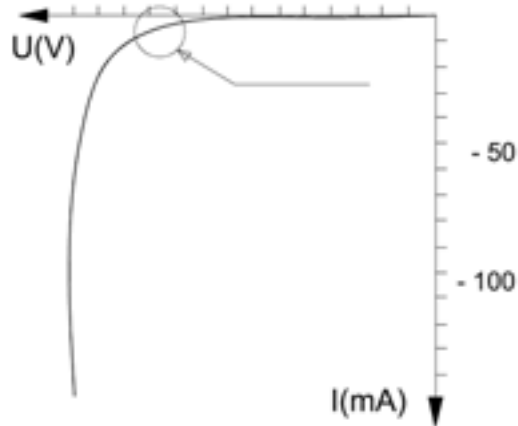


Gráfico 2 – Curva característica da polarização reversa do diodo



No diodo com polarização reversa, existe a circulação de uma corrente elétrica extremamente pequena entre seus terminais, chamada de *corrente de fuga*. Se o valor da tensão reversa aplicada sobre o diodo for aumentado gradativamente, haverá um determinado valor de tensão a partir do qual o valor da corrente de fuga aumenta bruscamente. Esse valor de tensão é denominado *tensão de ruptura* e varia de diodo para diodo.

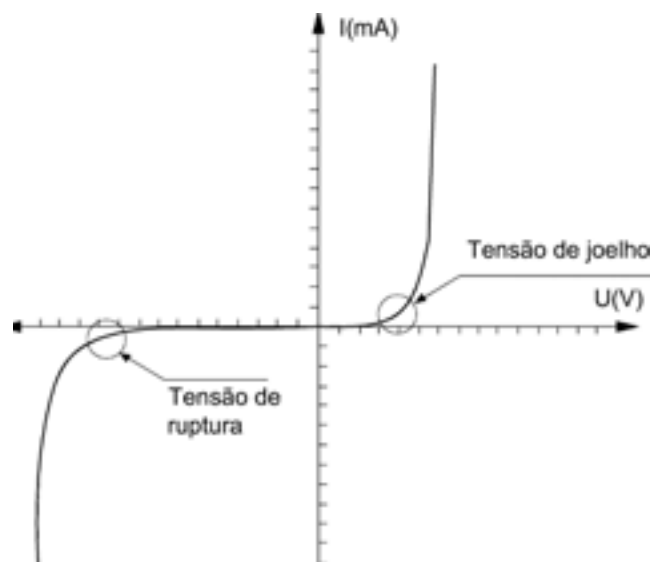


Atenção!

O diodo não pode trabalhar com valor de tensão reversa maior que a tensão de ruptura, pois a partir desse valor o diodo corre o risco de sofrer danos irreversíveis.

O Gráfico 3 mostra a curva de polarização direta e a curva de polarização reversa do diodo.

Gráfico 3 – Curva característica da polarização direta e reversa de um diodo



A principal aplicação prática do diodo é em circuitos retificadores, que serão estudados a seguir.

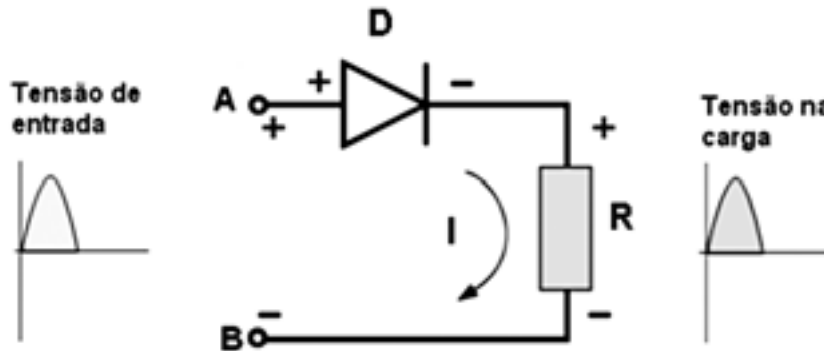
Circuitos retificadores

Retificação é o nome dado ao processo de transformação da corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). Esse processo é utilizado com a finalidade de permitir que equipamentos de corrente contínua sejam alimentados a partir da rede elétrica, que é disponível comercialmente apenas na forma de corrente alternada. A retificação pode ser feita em meia-onda ou em onda completa.

Retificação de meia-onda

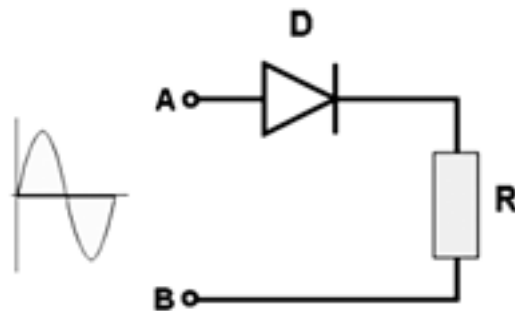
A retificação de meia-onda é o processo de transformação de tensão alternada em tensão contínua, que aproveita apenas um semiciclo da tensão alternada, conforme está ilustrada na Figura 10; onde A e B são os terminais nos quais é aplicada a tensão de entrada, I é a corrente elétrica e R é a resistência de carga.

Figura 10 – Diagrama ilustrando o princípio de operação do circuito retificador de meia onda



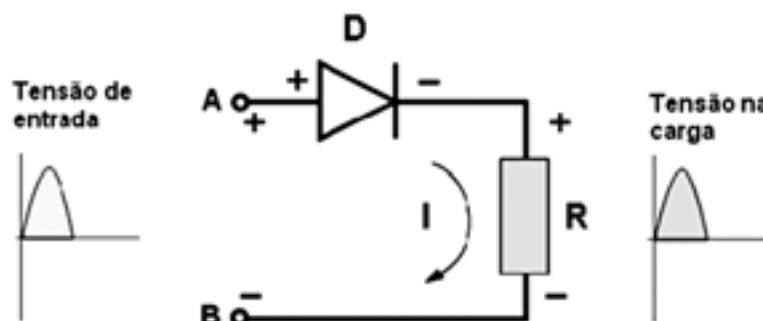
As características de condução (polarização direta) e o bloqueio (polarização reversa) do diodo semicondutor podem ser utilizados para obter uma retificação de meia-onda a partir da corrente alternada da rede elétrica domiciliar. A configuração desse circuito está ilustrada na Figura 11 e o funcionamento dele em cada semiciclo da tensão de alimentação é descrito a seguir.

Figura 11 – Circuito retificador de meia onda com diodo semicondutor



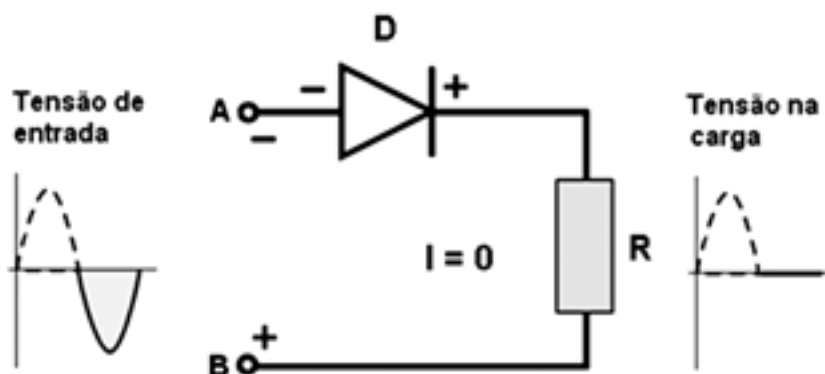
No semiciclo positivo da tensão de entrada, o potencial do ponto A é mais positivo em relação ao do ponto B. Assim, a polaridade do anodo será mais positiva que a do catodo e o diodo entra de condução, permitindo a circulação de corrente elétrica. Nessa condição, a tensão na carga assume uma forma de onda próxima da tensão de entrada, conforme pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Forma de onda da tensão na carga durante o semiciclo positivo tensão de entrada



Durante o semiciclo negativo, o potencial do ponto A se torna mais negativo em relação ao do ponto B. Com essa polaridade na entrada, o diodo entra em bloqueio comportando-se como uma chave aberta, impedindo a circulação de corrente, conforme ilustrado na Figura 13.

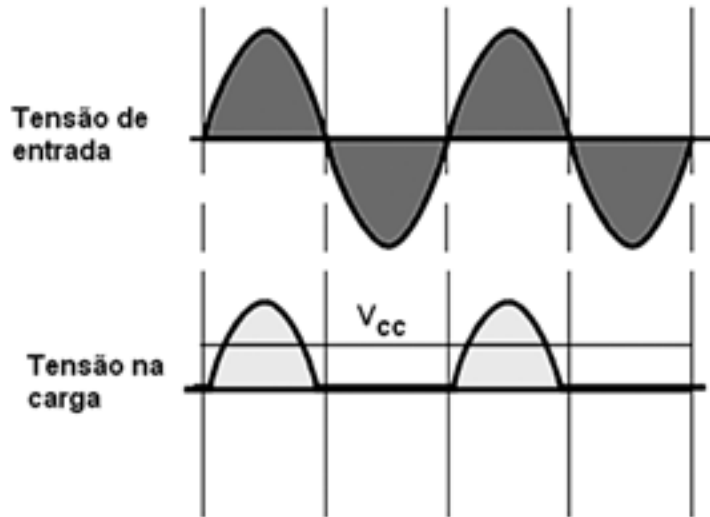
Figura 13 – Forma de onda da tensão na carga durante o semiciclo negativo da tensão de entrada



A forma de onda da tensão resultante sobre a carga é denominada de *tensão contínua pulsante*. Esta denominação advém do fato de o fluxo de corrente no circuito dar-se em um único sentido e na forma de pulsos separados por intervalos de tempo, nos quais a corrente no circuito é nula.

O Gráfico 4 mostra as formas de onda das tensões de entrada e na carga R, para dois ciclos da tensão de entrada. A tensão contínua média (V_{cc}) aplicada à carga é igual a 0,45 vezes o valor eficaz da tensão de entrada, desconsiderando a queda de tensão no diodo.

Gráfico 4 – Formas de onda da tensão de entrada e na carga no retificador de meia-onda



Retificação de onda completa

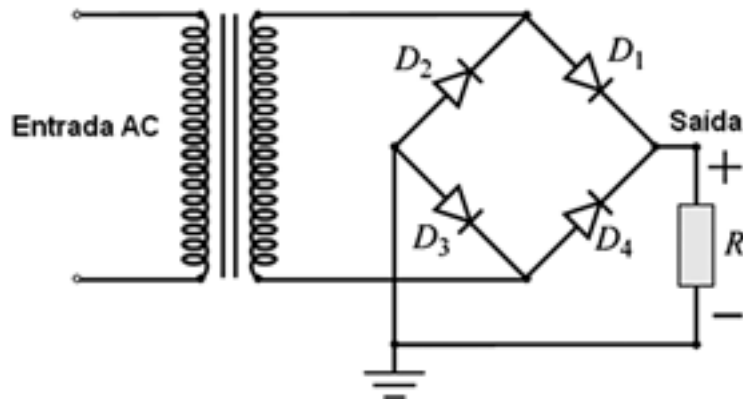
A retificação de onda completa é um processo de transformação da tensão alternada em tensão contínua, que permite o aproveitamento dos dois semiciclos da tensão de alimentação, conforme é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama ilustrando o princípio de operação do circuito retificador de onda completa



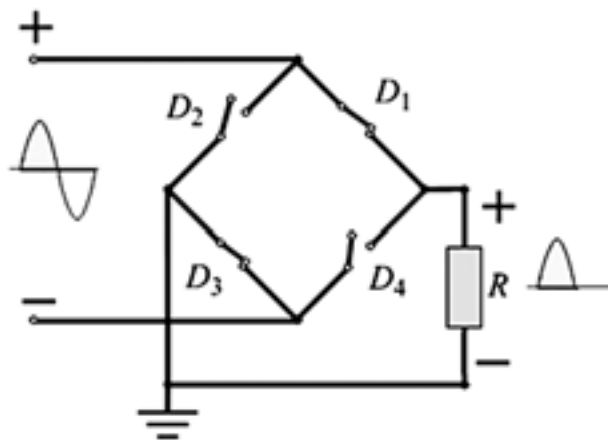
A retificação de onda completa em ponte utiliza quatro diodos semicondutores. Esse circuito também é conhecido como *Ponte de Graëtz* e é mostrado na próxima figura. A seguir será descrito o princípio de funcionamento dessa ponte.

Figura 15 – Retificador de onda completa com ponte retificadora



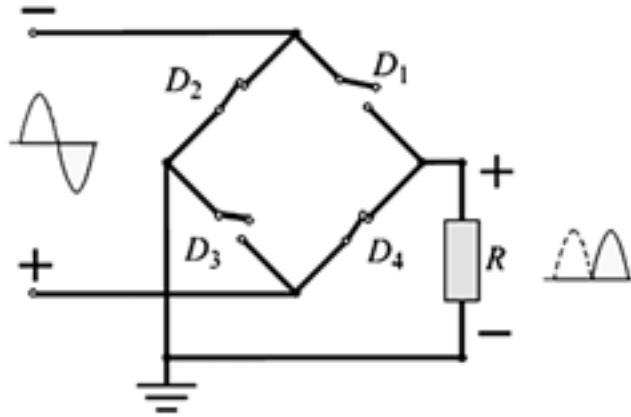
Durante o semiciclo positivo os diodos D_1 e D_3 estão polarizados diretamente, enquanto os diodos D_2 e D_4 estão polarizados reversamente. A corrente circula do transformador para a carga R passando pelos diodos D_1 e D_3 , conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Circuito equivalente do retificador em ponte durante o semiciclo positivo



Durante o semiciclo negativo, os diodos D_2 e D_4 estão com polarização direta e passam a conduzir a corrente enquanto os diodos D_1 e D_3 , que agora estão com polarização reversa, ficam bloqueados, conforme ilustra a Figura 17.

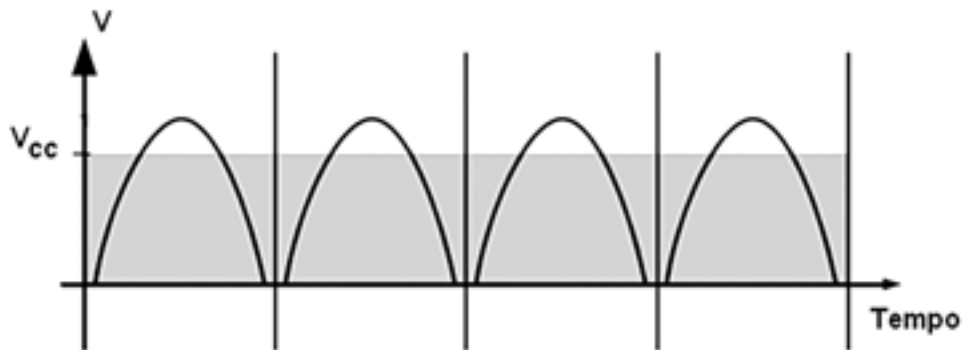
Figura 17 – Circuito equivalente do retificador em ponte durante o semiciclo negativo



É importante notar que a polaridade da tensão e o sentido da corrente na carga permanecem sempre os mesmos, independente da polaridade da tensão de alimentação.

O Gráfico 5 ilustra a forma de onda da tensão na carga.

Gráfico 5 – Forma de onda da tensão na carga no retificador em ponte



A tensão contínua média na carga (V_{cc}) é igual a 0,90 vezes o valor eficaz (RMS) da tensão de alimentação na entrada da ponte retificadora.

Tiristor

Segundo definição do IEC (*International Electrotechnical Commission*), tiristor é qualquer dispositivo semicondutor que contém três junções *pn*, com capacidade de conduzir e bloquear a corrente elétrica em um sentido (dispositivo unidirecional) ou nos dois sentidos (dispositivo bidirecional).

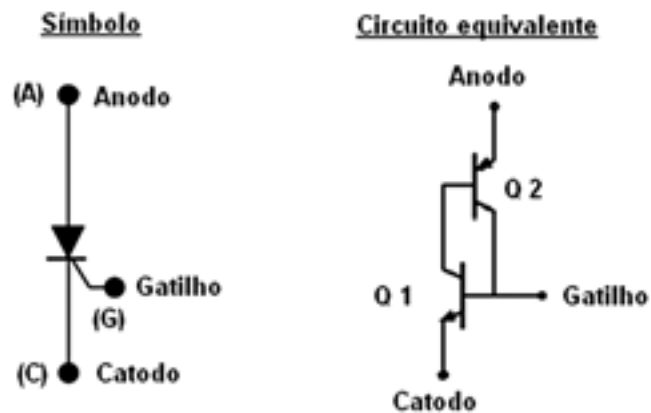
A seguir estudaremos o SCR e GTO, que são componentes da família dos tiristores.

Retificador controlado de silício – SCR

O SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), foi desenvolvido em 1965 pelo *Bell Telephone Laboratory* (EUA) e ainda hoje é um dos principais dispositivos de chaveamento para tensões e potências elevadas. A diferença em relação ao diodo é a presença do terminal de gatilho (*gate*), com a finalidade de controlar o instante no qual o SCR entra em condução. A passagem do estado de bloqueio para o estado de condução é denominado *disparo*.

A Figura 18 mostra o símbolo e o circuito equivalente utilizado para o tiristor.

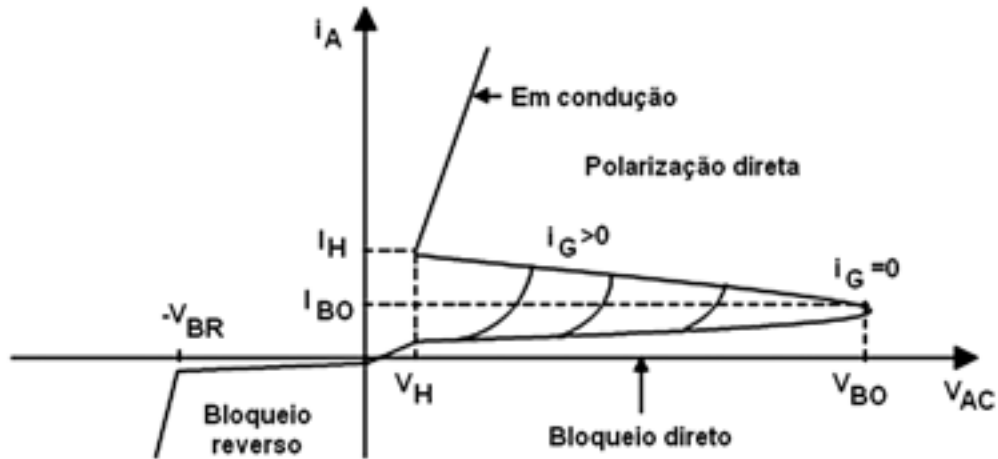
Figura 18 – Símbolo e o circuito equivalente do tiristor



De acordo com o circuito equivalente da figura anterior, quando houver polarização direta entre os terminais anodo e catodo, basta polarizar o transistor Q1 para que ele sature. Isso é possível por intermédio da aplicação de um pulso de corrente no gatilho. Por realimentação, a saturação do transistor Q1 provoca a saturação do transistor Q2, resultando no disparo do dispositivo. Devido à realimentação, o SCR se mantém neste estado mesmo depois de retirado o sinal de disparo.

O Gráfico 6 mostra a curva característica Volt – Ampère para o SCR.

Gráfico 6 – Curva característica Volt – Ampère do tiristor



No gráfico anterior podemos observar as seguintes características do SCR:

- com o aumento da corrente de gatilho, diminui a tensão direta de disparo;
- em condução, a curva característica é similar à do diodo retificador;
- não existe capacidade de bloqueio pelo terminal do gatilho após a entrada em condução;
- o bloqueio é realizado com a redução da corrente de condução para valores inferiores a I_H (corrente de manutenção);
- mesmo sendo construído com capacidade de comutar correntes elevadas, sua velocidade de comutação é baixa, e isso limita sua aplicação em frequências elevadas.

GTO (*Gate turn off thyristor*)

É um tiristor no qual a estrutura física foi dimensionada para permitir maior velocidade de comutação. Possui um recurso que permite reduzir o ganho de um dos transistores de realimentação (veja a figura anterior do circuito equivalente do SCR) por meio externo. Aplicando-se uma tensão negativa na base do transistor Q1, é possível interromper a corrente de realimentação e assim desligar o dispositivo.

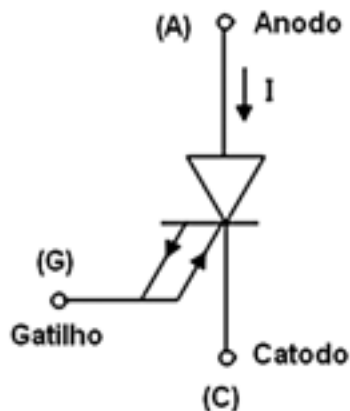


Fique ligado!

O GTO é uma variação do SCR que pode ser ligado e desligado por um sinal elétrico aplicado no terminal de gatilho.

Na Figura 19 é mostrado o símbolo do GTO.

Figura 19 – Símbolo do GTO



As características do GTO podem ser resumidas em:

- a entrada em condução é igual ao SCR, onde a corrente de gatilho positiva controla a condução;
- corrente de gatilho negativa controla o bloqueio;
- quando em condução, a corrente de gatilho pode ser suprimida, pois o dispositivo continua em condução;
- o ganho de corrente de gatilho para o bloqueio é tipicamente baixo (entre 2 a 5 vezes), implicando elevadas correntes de gatilho para o bloqueio;
- a queda de tensão entre os terminais anodo e catodo em condução é de 2 a 3V, portanto, maior que o SCR;
- operação em freqüências maiores que as permitidas para o SCR (tipicamente inferiores a 10 kHz).

Transistor bipolar de potência (TBP)

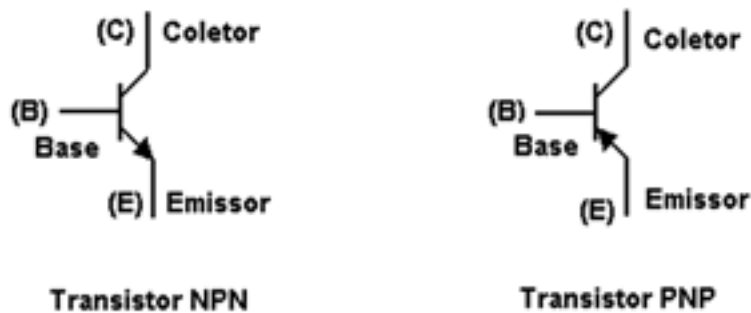
Esse componente possui três terminais, denominados de coletor, emissor e base. O sinal de controle é aplicado entre a base e o emissor. Quando a corrente de base é zero, o transistor permanece bloqueado (região de corte) e não existe circulação de corrente. Quando é aplicada uma corrente suficientemente elevada no terminal base, o transistor entra em condução (região de saturação) e oferece uma pequena resistência entre coletor e emissor, o que equivale a uma chave fechada.

O transistor é controlado pela corrente de base. Ele é bloqueado simplesmente com a retirada dessa corrente. Para conduzir (saturar), é necessária a aplicação de uma corrente de base permanente, ao contrário do que acontece com o SCR e o GTO, onde é preciso apenas um pulso de corrente para haver condução.

Existem dois tipos de transistor bipolar, um denominado de NPN e outro de PNP. Na prática, o transistor NPN é muito mais utilizado que o PNP.

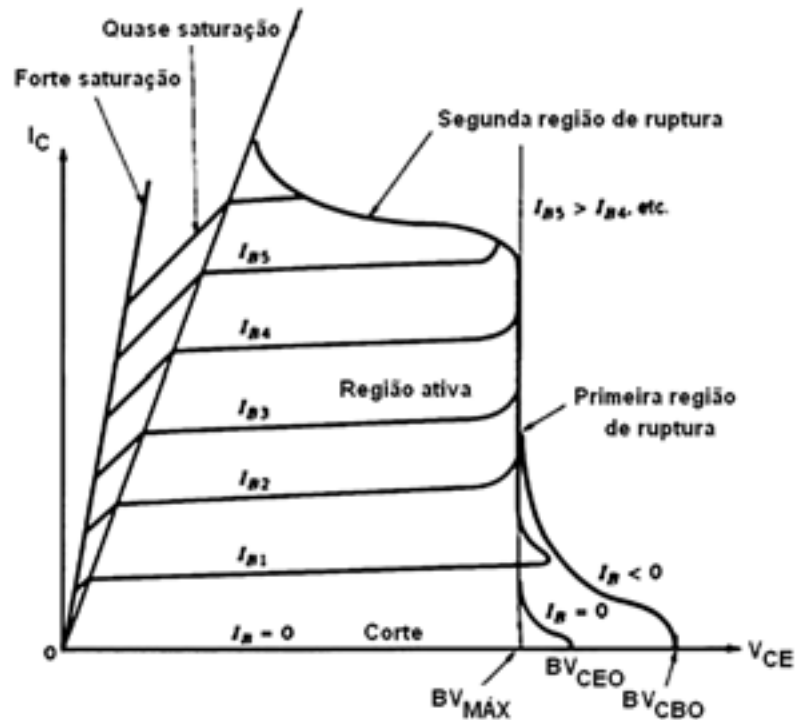
Os símbolos dos transistores bipolares são mostrados na Figura 20.

Figura 20 – Símbolos dos transistores bipolar NPN e PNP



O Gráfico 7 apresenta a curva característica Volt – Ampère do transistor.

Gráfico 7 – Característica Volt – Ampère do transistor



No gráfico anterior é possível identificar as seguintes regiões de funcionamento do transistor:

- região ativa: boa regulação de corrente e elevadas perdas em condução;
- região de corte: $I_B = 0$;
- região de condução: $I_B > I_C / \beta$, β = ganho de corrente I_C / I_B ;
- região de quase – saturação: $V_{CE} \leq V_{CE \text{ saturação}}$;
- região de forte saturação: transistor totalmente saturado.

Algumas observações a respeito do transistor bipolar de potência:

- tem sido substituído nos últimos anos por dispositivos interruptores mais eficientes;

- para baixas tensões (< 500 V), tem sido substituído pelo MOSFET (transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor);
- para tensões acima de 500 Volts tem sido substituído pelo IGBT (transistor bipolar de porta isolada);
- comparando com o MOSFET, o TBP apresenta maiores tempos durante as comutações, mas em compensação apresenta menores perdas em condução;
- comparando com o IGBT, o TBP apresenta maiores tempos envolvidos nas comutações e menor capacidade de corrente.

Transistor de efeito de campo – FET (*Field effect transistor*)

O transistor de efeito de campo tem capacidade de exercer o controle de corrente por meio da tensão aplicada em um de seus terminais. Ele é geralmente designado pela abreviação FET, cujas letras correspondem às iniciais do nome do componente em inglês – *field effect transistor*.

Existem duas categorias de dispositivos de efeito de campo:

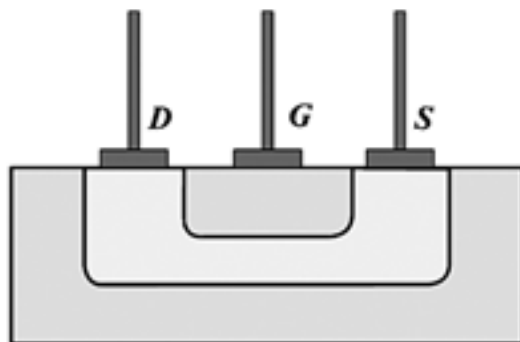
- de junção, designado pela sigla JFET;
- de porta isolada, designado pela sigla MOSFET.

Vamos, então, conhecer estes dois tipos de FET.

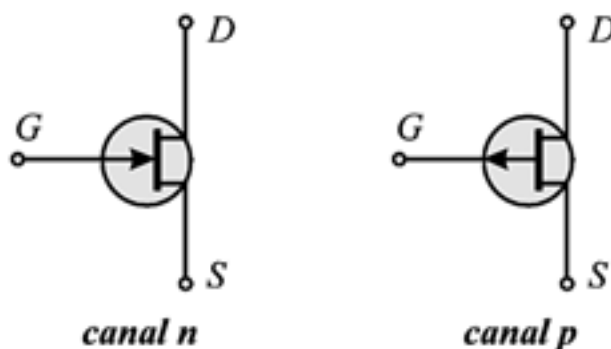
Transistor de efeito de campo de junção (JFET)

Os JFETs possuem 3 terminais. Dois terminais estão ligados às extremidades de um canal, que pode ser fabricado com semicondutor do tipo p ou n, dando origem ao JFET canal p ou JFET canal n. Esses terminais são denominados de *fonte* e *dreno*, como é mostrado na Figura 21. O terminal fonte é identificado pela letra S (do inglês *source*) e o terminal dreno pela letra D (do inglês *drain*). O terceiro terminal, denominado de porta, é identificado pela letra G (do inglês *gate*), sendo conectado diretamente ao substrato. Esse terminal é o responsável pelo controle da corrente que circula entre dreno e fonte.

Figura 21 – Aspecto construtivo do JFET



Na Figura 22 estão representados os símbolos dos JFETs canal *n* e canal *p*. Observe que a diferença entre eles é só no sentido da seta do terminal da porta (G).

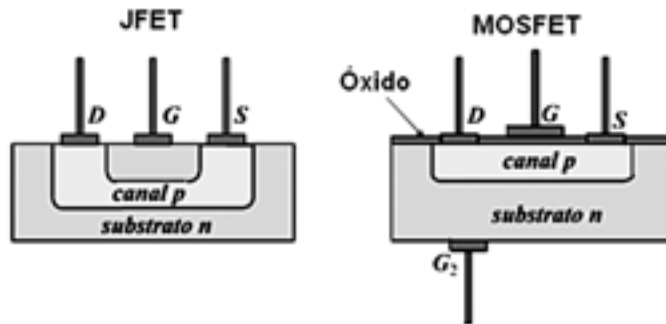
Figura 22 – Símbolos dos JFETs canal *n* e canal *p*

Transistor de efeito de campo de porta isolada – MOSFET

O transistor de efeito de campo de porta isolada (IGFET – *Isolated Gate Field Effect Transistor*), assim como o JFET, é um dispositivo unipolar, cujo controle de corrente é realizado por intermédio de um campo eletrostático. O IGFET é mais conhecido como MOSFET, que é uma sigla originada do termo inglês *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*.

Na Figura 23 você pode ver a diferença estrutural entre o JFET e o MOSFET.

Figura 23 – Estrutura construtiva de um JFET e de um MOSFET

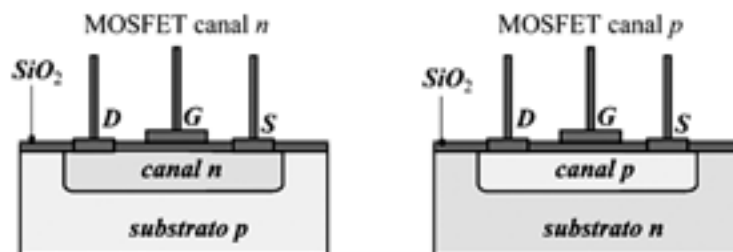


Como você pode ver na figura anterior, no JFET o canal está localizado inteiramente no interior do substrato, existindo uma junção *pn* entre o substrato e o canal. Por outro lado, no MOSFET o eletrodo metálico do terminal porta é separado do canal por uma fina camada isolante de óxido. Assim é formada uma estrutura entre porta e canal do tipo metal-óxido-semicondutor (MOS). A vantagem do MOSFET sobre o JFET é que a presença da camada isolante entre a porta e o canal cria uma impedância de entrada extremamente alta (da ordem de $10^{15} \Omega$).

Existem dois tipos de MOSFET: depleção e enriquecimento.

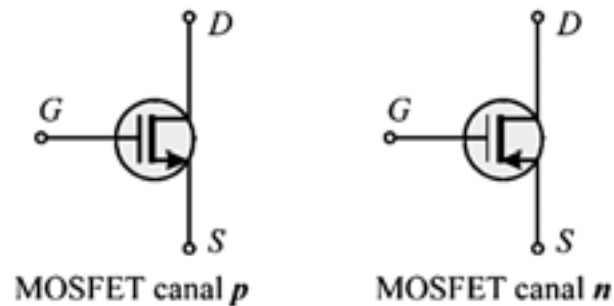
O MOSFET tipo depleção possui um canal que interliga os terminais de fonte (S) e dreno (D) e um eletrodo metálico isolado do canal forma o terminal porta (G). A Figura 24 mostra o aspecto estrutural dos MOSFETs depleção canal *p* e canal *n*.

Figura 24 – Estrutura do MOSFET tipo depleção de canal *n* e de canal *p*



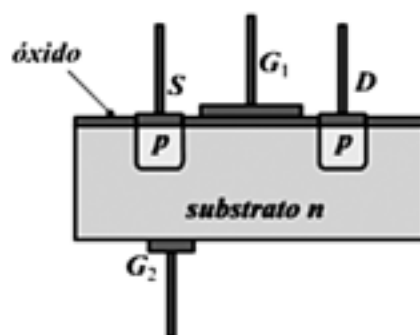
Os símbolos dos MOSFETs depleção estão ilustrados na próxima figura. Observe que eles diferem apenas no sentido da seta no terminal fonte.

Figura 25 – Símbolos dos MOSFET do tipo depleção



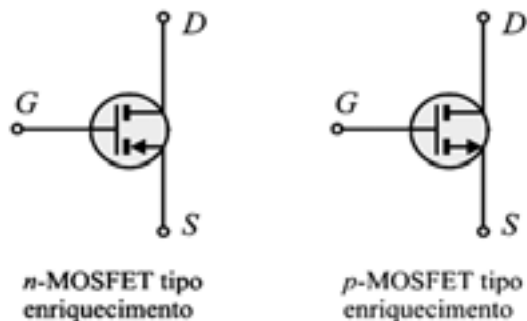
O MOSFET tipo enriquecimento é composto por duas regiões semicondutoras isoladas entre si pelo material semicondutor do substrato. Sobre esse conjunto está depositada uma camada de óxido isolante e uma camada metálica formadora da porta de controle, conforme ilustrado na Figura 26. Deve-se observar que, diferentemente do MOSFET tipo depleção, não há um canal permanente ligando os terminais de fonte e dreno.

Figura 26 – Estrutura de um MOSFET tipo enriquecimento canal p



Os símbolos dos MOSFETs tipo enriquecimento canal p e canal n são mostrados na Figura 27 e também diferem apenas no sentido da seta do terminal fonte.

Figura 27 – Símbolos do MOSFET tipo enriquecimento canal n e canal p

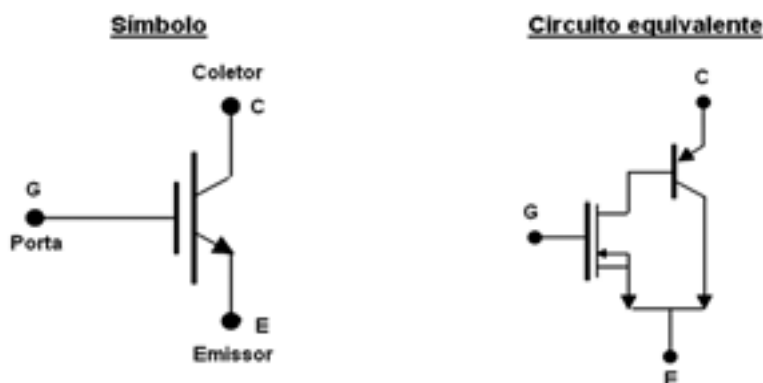


As características de velocidade e elevada capacidade de corrente têm tornado estes dispositivos preferidos nos projetos atuais de circuitos conversores de energia. Além disso, deve-se considerar a disponibilidade destes dispositivos a custo acessível e uma grande variedade de tipos.

IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IGBT significa transistor *bipolar de porta isolada*. Seu símbolo e circuito equivalente são mostrados na Figura 28. Conforme podemos ver, consiste em uma mistura de transistor bipolar com FET, daí ser um componente que possui terminais emissor (E) e coletor (C). O terminal de controle é uma porta (G).

Figura 28 – Símbolo e circuito equivalente do IGBT



Na operação normal, uma tensão positiva é aplicada do coletor (C) em relação ao emissor (E). Quando a porta (G) se encontra com tensão nula, não circula corrente pelo emissor, desde que a tensão aplicada esteja abaixo de um determinado valor. Quando a tensão da porta atinge um valor mínimo, os elétrons passam pela região *n* da base do transistor PNP fazendo com que o transistor seja polarizado no sentido de conduzir.

Considerações sobre o transistor IGBT:

- As aplicações para o IGBT normalmente encontram-se para elevados níveis de tensão VCE (500 a 1700 V) e potências (1 a 1000 kW);
- O controle do IGBT é feito por tensão como no MOSFET;
- O IGBT é mais lento que o MOSFET, mas é mais rápido que o TBP, GTO e SCR.

O IGBT reúne duas importantes características: alta velocidade de comutação, como os transistores bipolares; e alta impedância de entrada, como os transistores MOSFET's.

O transistor bipolar possui a vantagem de dissipar pouca energia quando usado no chaveamento de elevadas correntes, porém sua desvantagem é a elevada corrente necessária na base para provocar este chaveamento.

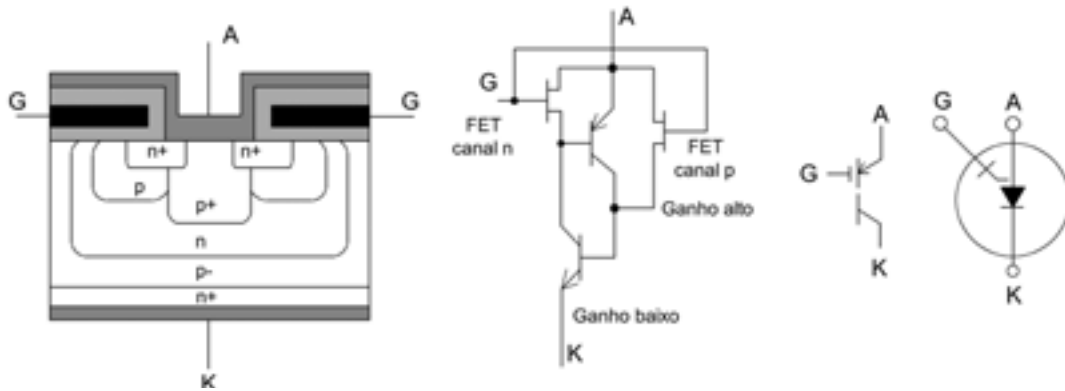
Já os transistores MOSFET de potência, por serem controlados por tensão, têm a vantagem de uma alta impedância de entrada, exigem desprezíveis valores de corrente de porta para o seu funcionamento, porém possuem baixa velocidade de chaveamento devido à capacitância parasita na porta.

O IGBT é um componente híbrido que reúne a facilidade de acionamento dos MOSFET's e as pequenas perdas quando em condução dos transistores bipolares de potência. Os IGBT's vêm evoluindo, permitindo sua operação na faixa de dezenas de kHz e centenas de ampères. Com essas duas qualidades, este componente se torna cada vez mais utilizado nos conversores de energia de uso industrial.

MCT (MOS-Controlled Thyristor)

O MCT é um dispositivo semicondutor de potência que associa as capacidades de densidade de corrente e de bloqueio de tensão típicas dos tiristores, com um controle de entrada e de saída de condução baseado em dispositivos MOS, isto é, enquanto um tiristor tem o gatilho controlado em corrente, o MCT é controlado por tensão.

Figura 29 – Aspecto construtivo, circuito equivalente e simbologia do MCT canal p



Em um MCT de canal p (P-MCT) o MOSFET responsável pela entrada em condução do tiristor (*on-FET*) é também de canal *p*, sendo levado à condução pela aplicação de uma tensão negativa no terminal de *gate*. Estando o anodo positivo, a condução do *on-FET* realiza uma injeção de portadores na base do transistor NPN, levando o componente à condução. O MCT permanecerá em condução até que a corrente de anodo caia abaixo do valor da corrente de manutenção (como qualquer tiristor), ou então até que seja ativado o *off-FET*, o que se faz pela aplicação de uma tensão positiva no gate. A condução do *off-FET* provoca um curto-circuito na junção base-emissor do transistor PNP, reduzindo seu ganho de corrente e levando ao bloqueio do MCT.

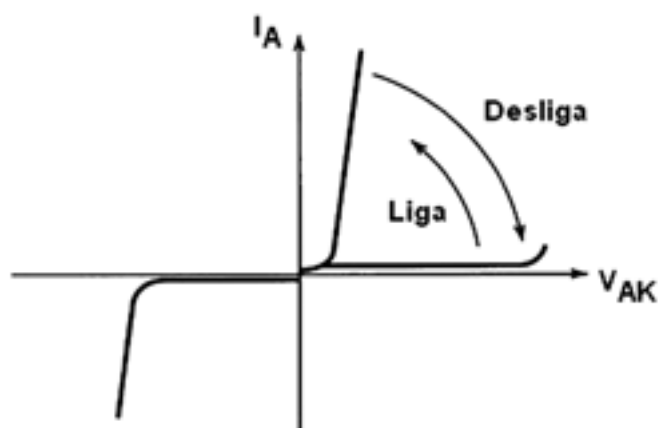


Fique ligado!

O MCT apresenta queda de tensões muito menores do que os transistores, devido à sua característica de tiristor. Ou seja, as perdas em condução deste dispositivo são consideravelmente menores, representando uma de suas principais características no confronto com outros componentes.

O Gráfico 8 apresenta a curva característica do MCT canal p .

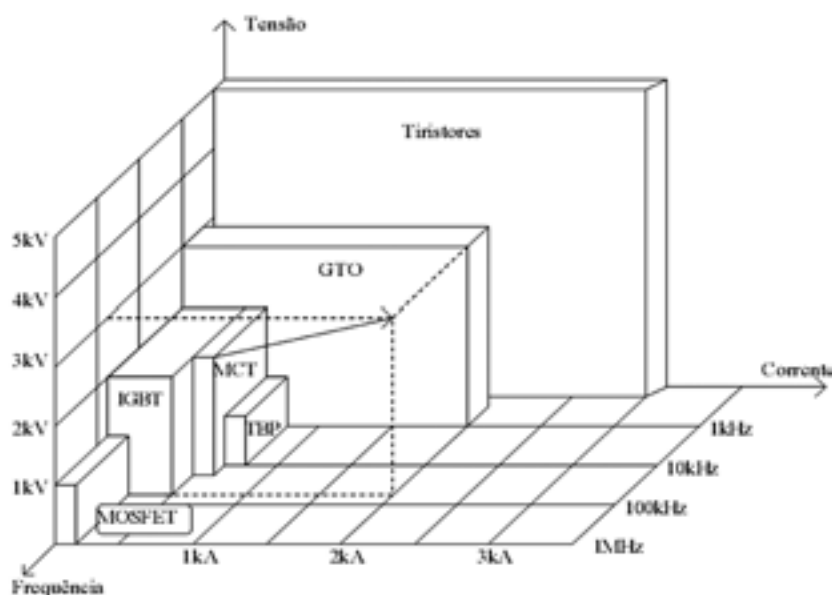
Gráfico 8 – Curva característica do MCT canal p



Apresentamos, a seguir, um gráfico que mostra uma distribuição dos componentes semicondutores, indicando limites para valores de tensão de bloqueio, corrente de condução e frequência de comutação.

Estes limites evoluem com o desenvolvimento tecnológico e servem como uma ilustração para a verificação, numa primeira aproximação, das faixas de corrente, tensão e frequência em que cada componente pode ser utilizado.

Gráfico 9 – Limites de operação de componentes semicondutores de potência



Voltando ao desafio

E, então, já fez a escolha do dispositivo para o inversor levando em conta as características de facilidade de comutação, velocidade e potência máxima? Para resolver esse desafio você leu este capítulo com atenção e analisou o gráfico que mostra os limites de operação de componentes semicondutores de potência.

Pelo critério de facilidade de comutação, a primeira escolha é sempre pelos transistores. O transistor liga com a presença de sinal de controle na base ou na porta e desliga na ausência desse sinal. Os transistores disponíveis são o IGBT e o MOSFET, sendo que o IGBT é melhor porque tem menor resistência em condução que o MOSFET. O GTO necessita de um pulso negativo no gatilho, porém com corrente elevada. E o SCR necessita de comutação forçada para desligar, o que traz maior complexidade e custo para o circuito.

Fazendo a escolha pelo critério de velocidade de operação, a seqüência seria: MOSFET, IGBT, MCT, GTO e SCR. Lembre-se que a velocidade de operação está relacionada com a frequência máxima de trabalho.

Resta fazer a escolha do dispositivo pelo critério da potência. Nesse caso, o SCR continua imbatível. Ele sempre é a primeira escolha quando a potência for muito elevada. Depois as opções seriam o GTO, MCT, IGBT e MOSFET.

Resumindo

Neste capítulo você estudou os seguintes componentes utilizados nos acionamentos eletrônicos:

- Diodo retificador de potência;
- *Tiristor*;
- GTO (*Gate Turn Off Thyristor*);
- Transistor bipolar de potência;
- Transistor de efeito de campo - FET (*Field Effect Transistor*);
- Transistor de efeito de campo de junção (JFET);
- Transistor de efeito de campo de porta isolada – MOSFET;
- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*);
- MCT (*MOS-Controlled Thyristor*).

Apreendeu as características construtivas e elétricas, simbologia e o funcionamento de cada componente e pode verificar, no gráfico, limites de operação de componentes semicondutores de potência, as faixas de tensão, frequência e corrente que cada componente pode operar.

Aprenda mais

Você poderá obter mais informações sobre componentes de eletrônica de potência acessando o *site* da *Semikron* na internet: www.semikron.com , acessado no dia 23/04/2007, ou qualquer outro *site* oficial de fabricantes de semicondutores de potências, como: *Texas Instruments* (www.ti.com), *National* (www.national.com), *Toshiba* (www.toshiba.com), *International Rectifier* (www.irf.com), etc.

Outras informações sobre IGBT's podem ser encontradas no *site* da *Siemens (Infineon)* e da *International Rectifier* (Aplicação-Note NA-983), e podem complementar o conteúdo deste material.



Capítulo 4

ACIONAMENTO ELETRÔNICO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Iniciando nossa conversa

A indústria procura constantemente racionalizar seus métodos de produção, especialmente por meio do emprego de processos automáticos. Nesses processos, o motor de corrente contínua (CC) é constantemente empregado por sua versatilidade, pois permite fácil variação de velocidade.

A seguir estudaremos os conversores utilizados no acionamento do motor CC.

Objetivos

- Com o estudo deste capítulo temos como objetivos:
- enunciar as vantagens do uso do motor CC em um acionamento;
- descrever os métodos de variação de velocidade do motor CC;
- listar os componentes do controle de um motor CC com conversor CA/CC;
- descrever o princípio de funcionamento do *chopper*.

Um desafio para você

Nas locomotivas e ônibus elétricos o sistema de tração deve oferecer elevado torque e baixa velocidade. O tipo de motor normalmente empregado é o de corrente contínua com o enrolamento do campo em série com o circuito da armadura. Processos antigos utilizavam chaves e reostatos para o controle de velocidade. Esses processos eram ineficientes, pois dissipavam elevados valores de energia nos dispositivos de controle.

O desafio a ser resolvido é de substituir os antigos métodos de controle de velocidade por modernos sistemas que permitem o emprego de dispositivos eletrônicos de controle. Como isso pode ser feito?

Continuando nossa conversa

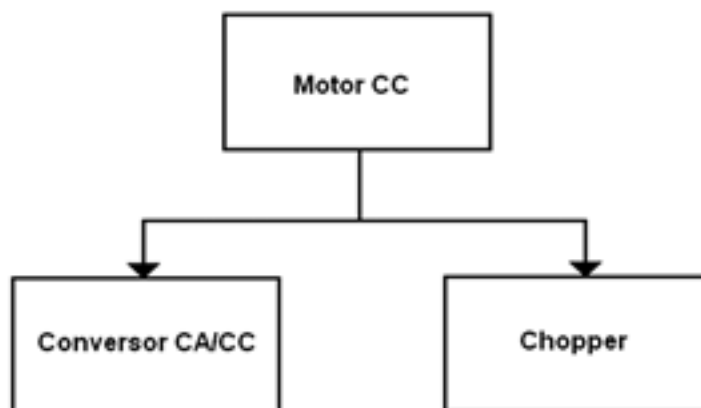
Os motores de corrente contínua possuem terminais que devem ser ligados a uma ou mais fontes de alimentação, sendo que a polaridade da fonte determina o sentido de rotação do eixo do motor. Seu movimento geralmente é suave e contínuo e, com uma redução mecânica apropriada, podem desenvolver torques elevados em volumes reduzidos.

Para o acionamento dos motores CC, são utilizados os conversores:

- Conversor CA/CC; e
- *Chopper*.

A Figura 30 mostra as possíveis formas de acionar um motor CC.

Figura 30 – Tipos de acionamento eletrônico para motor CC



O motor de corrente contínua foi muito utilizado na indústria para solucionar problemas de acionamento, tais como:

- regulação de velocidade;
- velocidade constante sob qualquer condição de carga;
- aceleração e desaceleração controlada;
- conjugado constante em ampla faixa de velocidade.

Essas características do motor CC possibilitam a sua utilização em diversos tipos de aplicação, como máquinas operatrizes, laminadores, veículos de tração, entre outras.

Métodos de variação da velocidade do motor CC

Analisando as variáveis que influenciam o funcionamento do motor de CC, percebe-se que o controle de velocidade pode ser feito de duas maneiras:

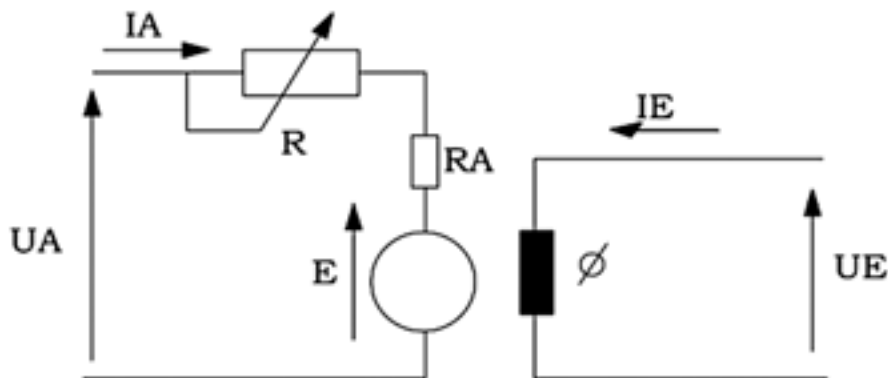
- variando a tensão de armadura, pois ela é diretamente proporcional à velocidade;
- variando a intensidade do fluxo magnético de campo, pois ele é inversamente proporcional à velocidade do motor.

A seguir são apresentadas algumas formas básicas para variar a velocidade do motor de CC.

Variação da resistência de armadura

Para variar a resistência do circuito da armadura, podemos colocar um reostato em série com ela. Neste caso, é preciso observar que ocorre uma perda de energia, que é dissipada no reostato sob forma de calor.

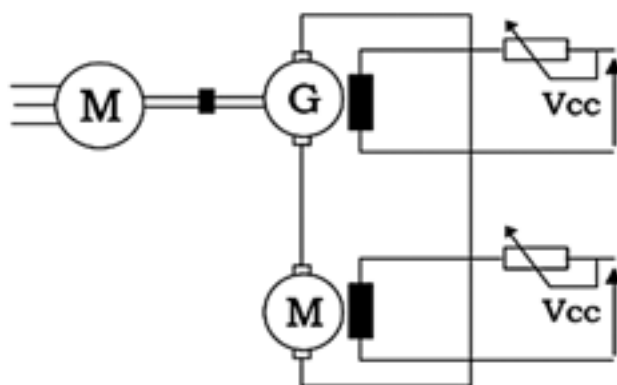
Figura 31 – Controle de velocidade de um motor CC utilizando um reostato



Sistema Ward-Leonard

O sistema varia a tensão de alimentação da armadura do motor CC utilizando um gerador CC, que é acionado por um motor de indução, conforme está mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Sistema Ward-Leonard



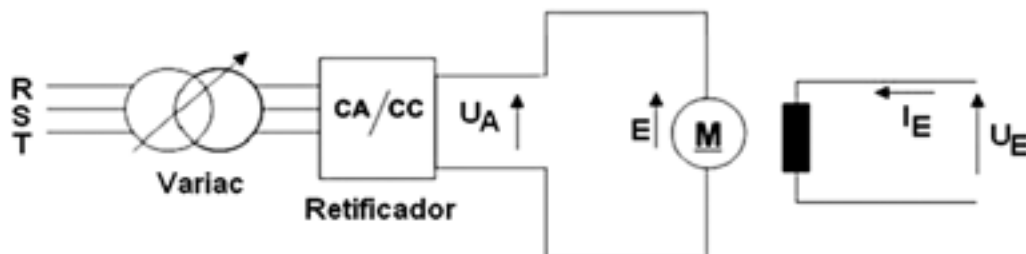
Fonte: SENAI-SP, 1988.

A principal desvantagem desse método é a necessidade de se utilizar três máquinas elétricas de mesma potência onde seria necessário apenas uma.

Variador de tensão

Este sistema é constituído por um retificador de tensão e um VARIAC (transformador variador de tensão, também conhecido como *varivolt*). A tensão de armadura é alterada com a modificação do ajuste VARIAC, alterando, então, a velocidade do motor, conforme pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 – Sistema de variação de velocidade de um Motor CC utilizando um VARIAC



Fonte: SENAI-SP, 1988.

Em todos os métodos de controle de velocidade citados anteriormente há desperdício de energia e, portanto, têm baixa eficiência energética.



Fique ligado!

Atualmente são utilizados os conversores estáticos, que utilizam semicondutores de potência controlados por microcontroladores. Essa técnica permite maior flexibilidade de operação e desempenho mais eficiente dos motores de corrente contínua.

Apresentamos, a seguir, informações a respeito dos conversores estáticos de energia.

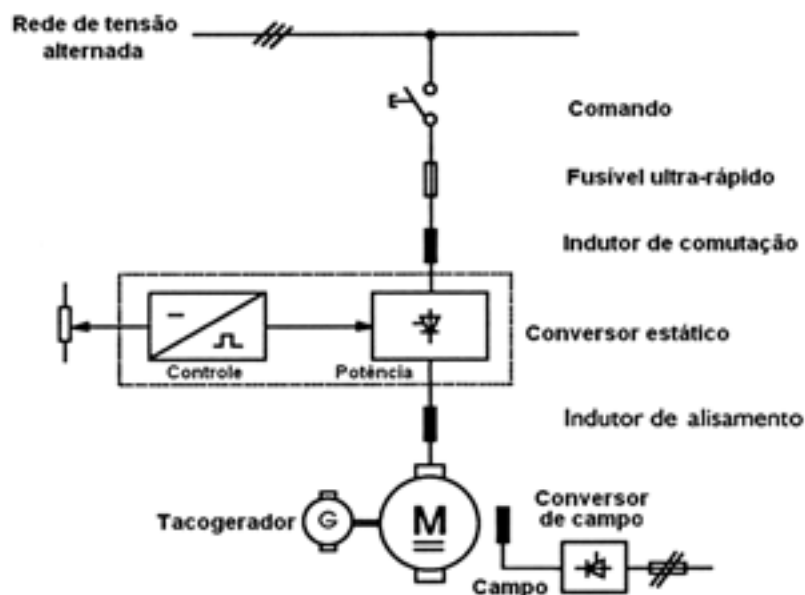
Variador eletrônico – Conversor CA/CC

A crescente necessidade de aliar maior precisão no controle da velocidade, redução de custos e diminuição do espaço físico trouxe o desenvolvimento dos conversores estáticos CA/CC com o uso de semicondutores.

Com o uso do conversor CA/CC consegue-se realizar a variação da velocidade do motor, variando a tensão de armadura. O conversor é composto por uma ponte retificadora tiristorizada que fornece corrente contínua com tensão variável a partir de uma tensão alternada, e de um circuito eletrônico que determina o chaveamento dos *tiristores*, controlando a tensão para que a velocidade se mantenha constante.

A Figura 34 ilustra um sistema de acionamento de um motor CC, com controle em malha fechada. Este sistema permite maior precisão no controle da velocidade, pois o tacogerador fornece um valor de tensão proporcional à velocidade de giro do eixo do motor, que é realimentado para o circuito de controle.

Figura 34 – Esquema de controle de motor CC com conversor CA/CC em malha fechada

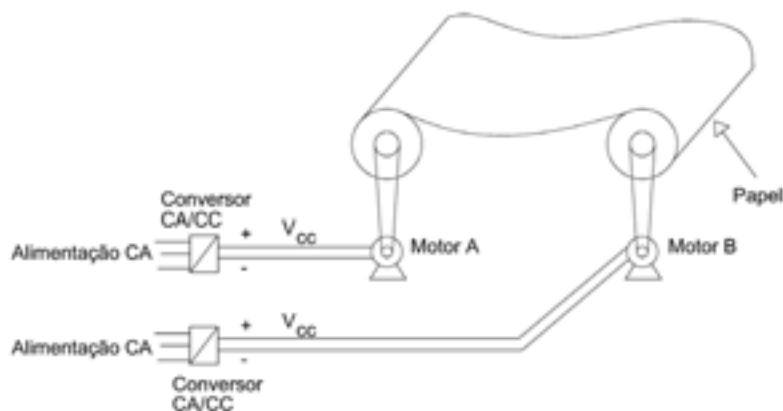


Fonte: SENAI-SP, 1988.

Exemplo de aplicação do controle de velocidade de motores CC

Em uma fábrica de papel, o papel é bobinado nas diversas etapas do processo de fabricação. As bobinas são acionadas pelos motores de corrente contínua que, controlados pelos conversores CA/CC, devem manter o papel sempre esticado, conforme podemos observar no esquema apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Processo de bobinagem de papel



Fonte: OTTOBONI, 2002, p. 7-14.

Caso o motor A gire mais rápido que o motor B, o papel ficará com folga, criando uma *barriga*. Por outro lado, se o motor B girar mais rápido que o motor A, o papel ficará esticado, podendo rasgar. O acionamento, nesse caso, é utilizado para controlar a velocidade de rotação e torque dos motores, de modo a manter o processo de bobinagem do papel correto e mais eficiente.

O conversor CA/CC tem como principal objetivo regular a velocidade do motor CC, independente da variação da carga. Esse ajuste normalmente é realizado pelo IHM (interface homem máquina) do conversor (modo local) ou utilizando as entradas analógicas (modo remoto), por meio de um sinal de tensão (0 a 10 V) ou de corrente (4 a 20 mA).

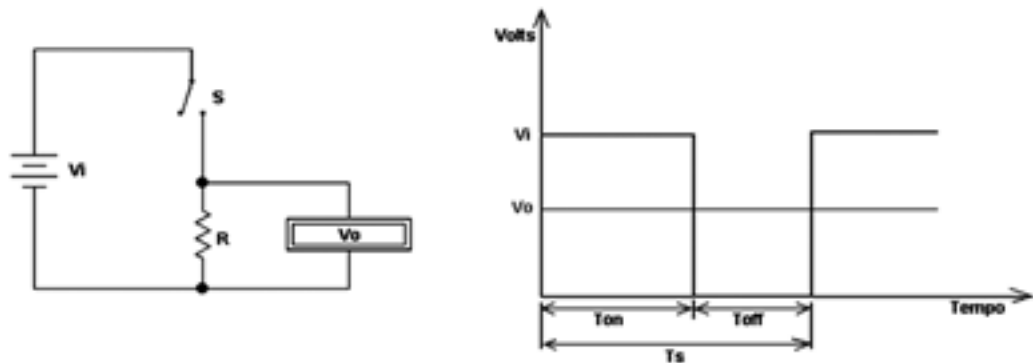
Para garantir a precisão do ajuste da velocidade, utiliza-se um transdutor de velocidade (tacogerador), que é acoplado ao eixo do motor para fins de realimentação de velocidade. O tacogerador gera em seus terminais uma tensão que é proporcional à velocidade do eixo do motor. Para aplicações menos críticas, pode-se utilizar a própria FCEM (força contra-eletromotriz) do motor para realimentação da velocidade.

Conversor *Chopper*

O conversor CC-CC ou *chopper* permite a obtenção de tensão CC variável (V_o) diretamente de uma fonte CC (V_i). Essa tensão variável é aplicada na armadura do motor CC, obtendo-se assim o controle da velocidade.

Além de controlar a velocidade do motor CC, o *chopper* permite também a *frenagem regenerativa* do motor. No processo de frenagem regenerativa, a energia cinética (movimento) do metrô, ônibus elétrico ou trem é utilizada para girar o eixo do motor que passa a funcionar como gerador, entregando energia elétrica para a rede de alimentação, o que vai aumentar a eficiência energética do acionamento.

O princípio de funcionamento do circuito *chopper* baseia-se na abertura e no fechamento de uma chave colocada entre a fonte de alimentação CC e a carga. Com isso, consegue-se variar a tensão média na carga, o que é feito por meio da variação do tempo de abertura (TOFF) e fechamento (TON) da chave S. Veja ilustração a seguir:

Figura 36 – Esquema simplificado do circuito *chopper*

A tensão média de saída (V_O) é calculada da seguinte forma:

$$V_o = \frac{V_i \cdot T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{V_i \cdot T_{on}}{T_s} = D \cdot V_i$$

Onde:

V_o é o valor da tensão contínua média de saída;

V_i é o valor da tensão da fonte de alimentação CC;

T_{ON} é o tempo de fechamento da chave;

T_{OFF} é o tempo de abertura da chave;

T_s é o período do sinal de chaveamento;

D é o ciclo de trabalho.

O tempo T_s geralmente é menor que 1ms, conseqüentemente, a freqüência de chaveamento do *chopper* é maior que 1 kHz.

O controle de velocidade é realizado por equipamentos eletrônicos à base de *tiristores* de potência que variam a tensão aplicada aos motores, variando o tempo de condução e bloqueio dos tiristores. Esse ajuste é obtido pela lógica de controle do *chopper* para manter a média de corrente do motor e, portanto, o torque desejado.



Fique ligado!

Sempre que o valor da potência a ser chaveada não for muito elevada, é preferível utilizar transistores ao invés de tiristores no *chopper*. Em CC o tiristor necessita de um circuito para desligá-lo, que é denominado de *circuito de comutação forçada*. Para desligar um transistor, basta retirar o sinal de controle, o que é bem simples e não implica custo.

Voltando ao desafio

O desafio deste capítulo é substituir os antigos métodos de controle de velocidade do motor CC por um método mais moderno que faça o controle com maior eficiência energética. A solução encontrada é o emprego do *chopper* para o controle de velocidade dos motores de metrô, ônibus elétricos e trens. Além de controlar a velocidade do motor, o *chopper* permite fazer frenagem regenerativa.

Resumindo

Você estudou as duas formas mais utilizadas para acionar um motor CC, que é utilizando um conversor CA/CC ou um *chopper*.

Aprenda mais

Para obter mais informações sobre conversor CA/CC, acesse o *site*: http://catalogo.weg.com.br/PES_CAT/detailProduto.asp?ID_MENU=1&cd_produto=238&CD_CATEGORIA_PRODUTO=20&CD_EMPRESA=140, acessado dia 23/11/2007, e consulte o catálogo eletrônico dos conversores de corrente contínua.

Operando desde 1974, o metrô de São Paulo é um bom exemplo de sistema de tração moderno empregando motores de corrente contínua (CC) com controles eletrônicos de velocidade. Uma pesquisa sobre esse sistema de tração provavelmente complementarará seus conhecimentos sobre circuito *chopper*.



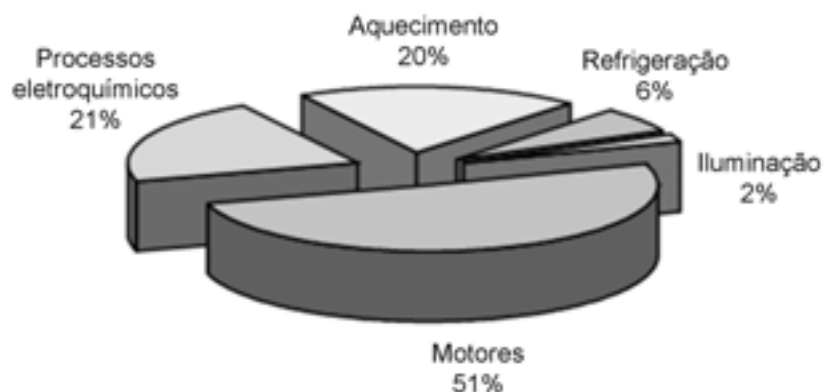
Capítulo 5

ACIONAMENTO ELETRÔNICO DE MOTOR DE CORRENTE ALTERNADA

Iniciando nossa conversa

A Figura 37 ilustra como é constituído o consumo de energia no Brasil. Nele podemos notar que os motores elétricos representam 51% do total de energia consumida, sendo assim a maior carga do sistema elétrico industrial.

Figura 37 – Divisão do consumo de energia no Brasil



Fonte: ELETROBRÁS/PROCEL, 2001.

Os motores de corrente alternada representam 90% (Eletrobrás) do total dos motores instalados nas indústrias. Por isto é importante realizar o acionamento do motor CA com eficiência energética.

Neste capítulo estudaremos os conversores que permitem esse tipo de acionamento.

Objetivos

O estudo deste capítulo tem como objetivos:

- enunciar as formas de acionamento de um motor CA;
- descrever o princípio de funcionamento de um *soft-starter*, suas vantagens e em quais tipos de acionamento é empregado;
- descrever o princípio de funcionamento de um inversor de frequência;
- diferenciar inversor VSI de inversor CSI;
- explicar a diferença entre o controle escalar e o controle vetorial em um inversor;
- enunciar os cuidados a serem observados na instalação de um inversor;
- citar as aplicações do servoacionamento;
- descrever as diferenças entre o *encoder*, *tacogerador* e *resolver*.

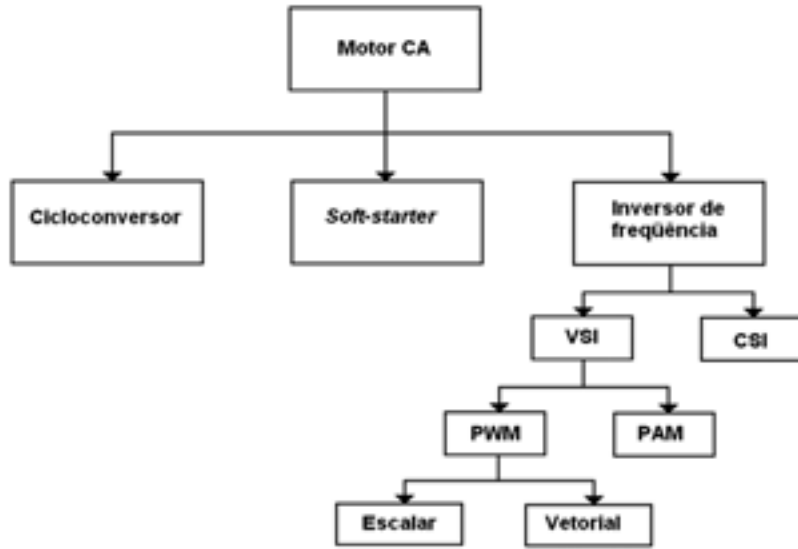
Um desafio para você

Um motor CA é empregado em um processo de acionamento com velocidade constante. A forma de partida do motor é direta, onde há uma elevada corrente de partida provocando uma queda de tensão na rede. Que solução você propõe para reduzir a corrente de partida do motor?

Continuando nossa conversa

A Figura 38 apresenta as diversas subdivisões do acionamento eletrônico para motor CA.

Figura 38 – Tipos de acionamentos eletrônicos para motor CA

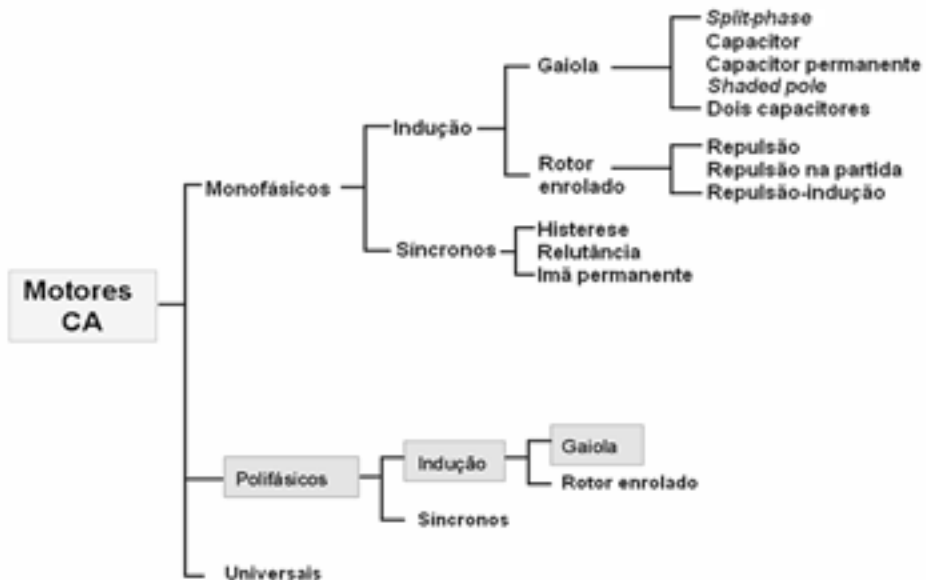


Para o acionamento de motor CA é utilizado:

- cicloconversor;
- *soft-starter* ;
- inversor de frequência.

Observando a Figura 39 podemos ver como são classificados os motores de corrente alternada.

Figura 39 – Tipos de motores de corrente alternada



Fonte: SIEMENS, [s.n.t.].

Os motores polifásicos de indução do tipo gaiola são os mais utilizados nas aplicações industriais, por serem robustos e de menor custo. Apesar disto, o motor polifásico de indução do tipo gaiola apresenta a desvantagem de ter a rotação fixa e também necessita de elevado valor de corrente durante o processo de partida.

Em um processo de acionamento, a fim de minimizar o impacto na rede elétrica durante o processo de partida, pode-se utilizar o processo de partida *estrela-triângulo*. No entanto, o baixo valor da tensão aplicada nas bobinas do motor no instante da partida pode não ser suficiente para o motor acelerar até atingir a velocidade nominal. Também não há como variar a rotação do motor utilizando esse processo.

A solução desse problema passa pela atualização do processo de acionamento do motor. As novas técnicas utilizadas no acionamento eletrônico do motor CA serão estudadas a seguir.

Técnicas para acionamento eletrônico do motor CA

Cicloconversor

O cicloconversor é um conversor empregado no acionamento de motores CA de elevada potência e baixa rotação. Entretanto, na maioria das aplicações de acionamento, a faixa de variação da frequência necessária é ampla para variar a velocidade de rotação do motor em uma faixa ampla. Como a faixa de variação de frequência do cicloconversor é pequena, ele é pouco empregado em acionamento CA.

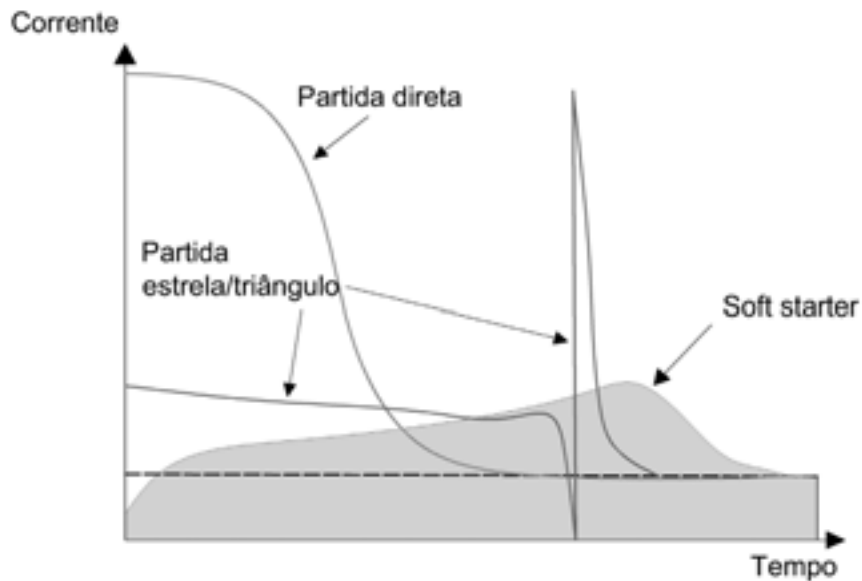
Soft-starter

O *soft-starter* é um equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem. Seu funcionamento baseia-se em componentes eletrônicos, como os *tiristores*, por exemplo, ao contrário dos sistemas elétricos convencionais utilizados para essa função, como partida *estrela-triângulo* e partida compensada.

O controle da tensão aplicada ao motor, mediante o ajuste do ângulo de disparo dos *tiristores*, permite obter partidas e paradas suaves.

Com o ajuste adequado das variáveis, o torque produzido é ajustado à necessidade da carga, garantindo, desta forma, que a corrente solicitada seja a mínima necessária para a partida, conforme ilustra o gráfico a seguir, que compara a corrente de partida do *soft-starter* com outros métodos de partida.

Gráfico 10 – Comparativo da corrente de partida do motor CA para diversos métodos



Fonte: Manual soft-starter SSW 04 WEG.

A necessidade de acionamento mais eficiente e confiável fez do *soft-starter* um equipamento de fundamental importância no acionamento de sistemas motrizes. Ar-condicionado, refrigeração industrial, compressor e ventilador são exemplos de equipamentos que utilizam o *soft-starter*, principalmente quando não é permitida a partida direta desses equipamentos na rede elétrica.

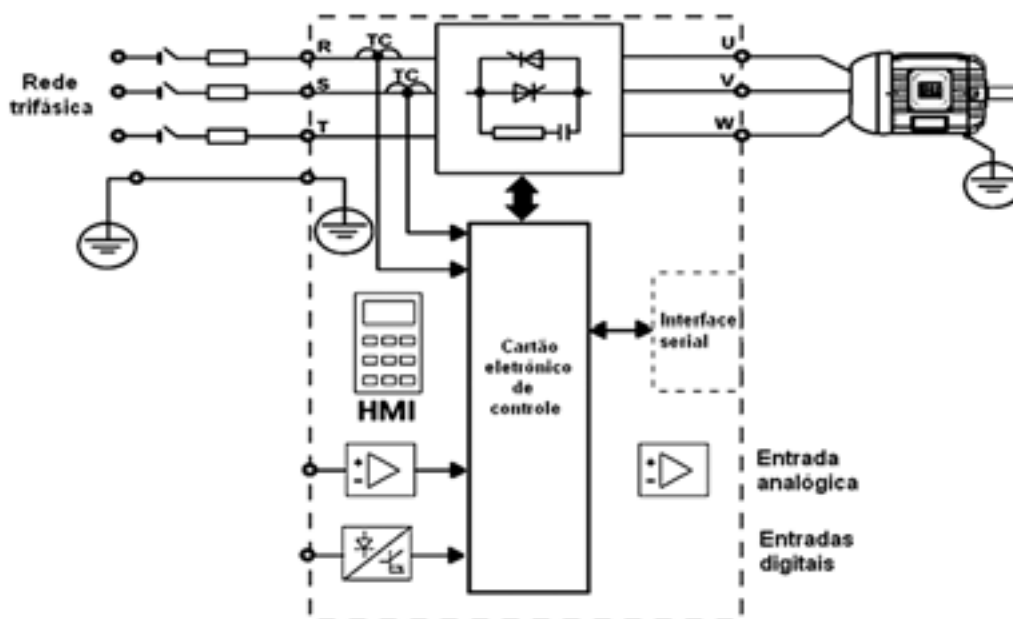
É importante lembrar que o *soft-starter*, como qualquer dispositivo de acionamento eletrônico, gera harmônicas (ruído elétrico com frequência que é múltipla inteira da frequência da rede de alimentação) e que podem interferir na qualidade da energia elétrica. Para reduzir a interferência que as harmônicas provocam na rede elétrica, deve-se utilizar um filtro passivo entre a rede de alimentação e o *soft-starter*.

Funcionamento do *soft-starter*

O funcionamento do *soft-starter* está baseado na utilização de uma ponte *tiristorizada* (SCR's) na configuração antiparalelo, que é comandada por um circuito eletrônico que ajusta a tensão de saída, conforme programação feita previamente pelo usuário.

A Figura 40 mostra o diagrama em blocos do acionamento de um motor de indução trifásico por meio de um *soft-starter*, onde podemos verificar a tensão de alimentação trifásica fornecida pela rede, as entradas digitais e analógicas, o circuito de controle e comunicação, bem como a saída para o motor de indução.

Figura 40 – Acionamento de um motor de indução trifásico com *soft-starter*



Fonte: SENAI-SP. 1988. 266p.

A utilização do *soft-starter* no acionamento de um motor apresenta as seguintes vantagens:

- simplificação da instalação elétrica;
- proteção eletrônica integral do motor;

- redução de choques mecânicos;
- redução acentuada dos esforços sobre os acoplamentos e dispositivos de transmissão (redutores, polias, engrenagens, correias, etc.);
- redução dos picos de corrente na rede elétrica durante as partidas;
- redução das quedas de tensão na linha;
- desacelerações suaves e eliminação de golpes de aríete em bombas;
- otimização automática do consumo de energia quando funcionando com carga reduzida ou a vazio;
- pré-aquecimento do motor nas paradas longas, sem necessidade de outro artifício específico;
- manter o conjugado de frenagem na parada;
- supervisão do motor e da instalação;
- possibilitar a partida em cascata de vários motores.



Fique ligado!

Os modernos *soft-starters* têm um circuito de economia de energia, que reduz a tensão aplicada no motor, quando funcionam com carga abaixo da nominal ou mesmo sem carga (em vazio). A redução da tensão de alimentação diminui as perdas no circuito magnético do motor, que é a maior causa de perdas nos motores que operam com baixas cargas. Uma economia significativa pode ser observada quando o motor funciona com carga até 50% da potência nominal do motor.

Principais aplicações para o *soft-starter*

As principais aplicações do *soft-starter* são apresentadas a seguir.

Bombas centrífugas

Com a utilização do *soft-starter* a corrente de partida pode ser reduzida até para 2,5 vezes a corrente nominal do motor, pois o *soft-starter* ajusta o torque do motor ao conjugado da bomba.

A rampa de desaceleração diminui sensivelmente o choque hidráulico (golpe de aríete). Essa é uma das razões para a indicação do *soft-starter* para acionamento de bombas com potência acima de 10 KW.

Outro recurso que torna o acionamento de bombas com *soft-starter* bastante eficiente é o *kick-start*, que é um pulso de tensão rápido e de grande amplitude aplicado no motor no instante da partida. Isso ajuda a vencer a inércia de partida quando existe a presença de sujeira que impede a partida normal da bomba.

Ventiladores, exaustores, sopradores

Assim como as bombas, os ventiladores, exaustores e sopradores exigem um torque que é proporcional à velocidade, porém também têm grande inércia. A limitação da corrente de partida é utilizada juntamente com o aumento do tempo da rampa de aceleração para permitir que a inércia seja vencida sem causar impacto na rede elétrica.

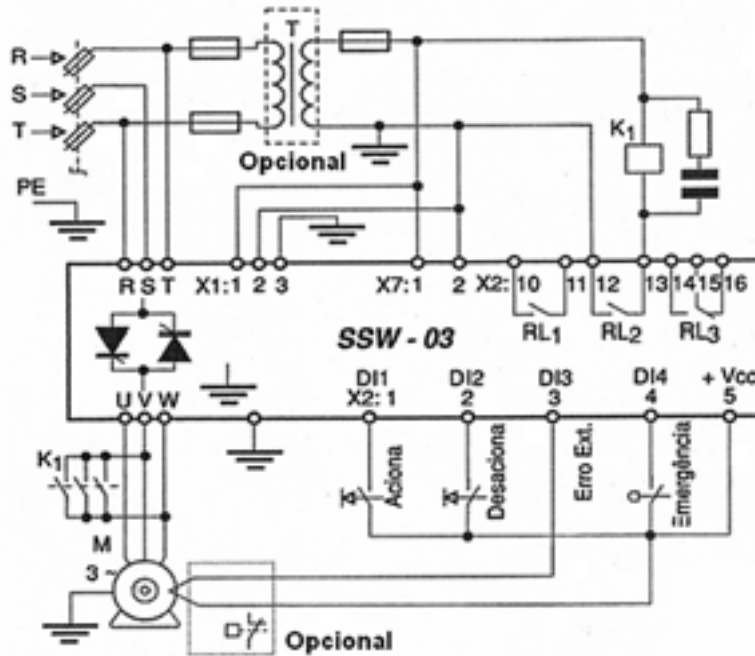
Compressores de ar

O *soft-starter* reduz a manutenção dos compressores, pois permite um acionamento mais suave. Também permite o intertravamento, ou seja, que os compressores de reserva só sejam ligados quando forem necessários.

Exemplo de aplicação do *soft-starter*

Na Figura 41 é apresentado um exemplo de aplicação sugerido pela empresa WEG, para o modelo SSW-03. Trata-se de um clássico exemplo de acionamento comandado por três entradas digitais e frenagem do motor por meio da aplicação de uma tensão contínua.

Figura 41 – Acionamento de motor com frenagem por CC



Fonte: WEG. Disponível em: www.weg.com.br,



Fique ligado!

É necessária a parametrização do equipamento, de acordo com o manual do fabricante; caso contrário poderá ocorrer dano tanto no equipamento quanto na instalação.

O acionamento por meio de *soft-starter* resolve o problema do impacto causado na rede elétrica devido à corrente de partida do motor. Porém, não é possível variar a rotação do motor. Para variar a velocidade do motor, é necessário utilizar um inversor de frequência no acionamento, que será estudado a seguir.

Inversor de frequência

A função do inversor de frequência é a de regular a velocidade do motor de corrente alternada mantendo o torque necessário para o acionamento da carga.

Antes de comprar e instalar um inversor, é preciso conhecer os diversos tipos de inversores, bem como suas características de funcionamento e parametrização, para que a escolha seja a de melhor relação custo/benefício.

A seguir são apresentadas uma série de informações a respeito dos inversores, para que você tenha o conhecimento técnico necessário para escolher e instalar o melhor inversor.

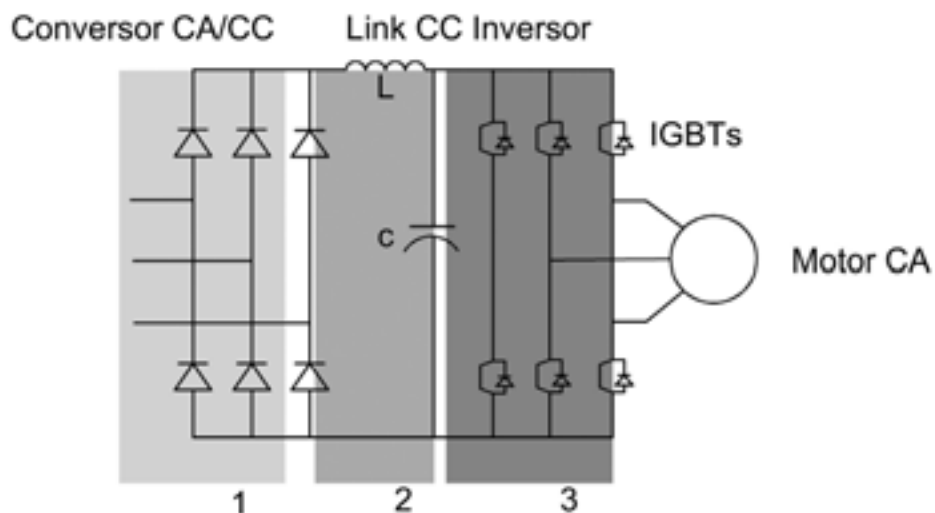
Princípios básicos do inversor de freqüência

O avanço da Eletrônica de Potência permitiu o desenvolvimento do inversor de freqüência com dispositivos de estado sólido, inicialmente com tiristores e atualmente com transistores IGBTs.

Um inversor possui três estágios. No primeiro, a tensão alternada da rede de alimentação é retificada em um conversor CA-CC. Depois ela é filtrada em um *link* CC. Por fim, ela é convertida em tensão alternada, mas com a possibilidade de ajustar o valor da freqüência e da tensão de saída, no estágio inversor.

Na Figura 42 é apresentado o diagrama em blocos de um inversor com a topologia tipo PWM, que é a mais utilizada nos inversores de freqüência atuais.

Figura 42 – Diagrama em blocos de um inversor



Na Figura 42 pode-se observar que a tensão no circuito intermediário (*link CC*) é fixa. Deve-se, então, chavear os transistores de saída utilizando a modulação de largura de pulso para obter uma forma de tensão CA sintetizada e com frequência ajustável. Assim é possível variar a velocidade do motor.

A velocidade do motor de indução em operação normal ocorre muito próxima da velocidade síncrona. Portanto, variando a velocidade síncrona, resulta em variação da velocidade rotórica. A variação da velocidade síncrona é obtida variando-se a frequência da fonte de alimentação.

A relação entre a velocidade síncrona e a frequência é dada por:

$$n_s = \frac{120 f_s}{P}$$

Onde:

- n_s é a velocidade síncrona em rotações por minuto;
- f_s é a frequência da fonte de alimentação; e
- P é o número de pólos do motor.

Os inversores de frequência são classificados de acordo com sua fonte de alimentação em:

- fonte de tensão (VSI – *Voltage source inverter*); e
- fonte de corrente (CSI – *Current Source Inverter*).

Cada uma dessas topologias será estudada a seguir.

Acionamento com malha intermediária fonte de tensão (VSI)

Na malha intermediária (*link CC*) existe um capacitor que, quando carregado pelo retificador, funciona como uma fonte de tensão para o inversor. A tensão CA na saída do inversor precisa ter a amplitude e a frequência variáveis.

Esta variação pode ser obtida por meio de dois tipos de controle:

- VSI – PAM (*Pulse amplitude modulation*) ou modulação por amplitude de pulso. Utiliza um retificador controlado na entrada, que faz o controle da amplitude da tensão, enquanto o circuito do inversor faz o controle da freqüência;
- VSI – PWM (*Pulse width modulation*) ou modulação por largura de pulso. O estágio de retificação é constituído por uma ponte de diodos; portanto, a retificação é não-controlada. O controle da amplitude e freqüência da tensão de saída é realizado no circuito do inversor.

Acionamento com malha intermediária fonte de corrente (CSI)

Neste acionamento, a malha intermediária faz o papel de uma fonte de corrente. A tensão da rede de alimentação é retificada para se obter uma fonte de corrente com auxílio de um indutor (L_f).

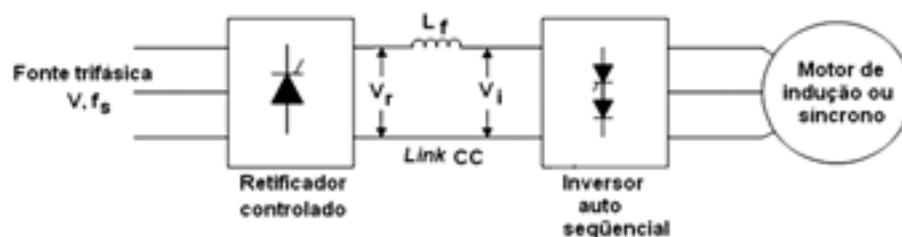
O acionamento CSI opera normalmente com uma ponte retificadora a tiristores na entrada que controla a amplitude da corrente. A variação da freqüência é realizada pelo circuito inversor.

As desvantagens desse tipo de acionamento são:

- necessidade de um indutor de valor elevado na malha intermediária (*link CC*); e
- necessidade de um conjunto de capacitores para a comutação dos tiristores.

Na Figura 43 está representado o diagrama esquemático do acionamento com inversor CSI.

Figura 43 – Acionamento com inversor CSI



Agora que você já conhece os princípios básicos de funcionamento do inversor, é necessário obter mais informações a respeito de como instalá-lo e parametrizá-lo (programá-lo), para que o acionamento esteja de acordo com as necessidades do processo.

A seguir, são descritos os detalhes da instalação, modo de operação e parametrização do inversor.

Aplicações práticas com o inversor de frequência

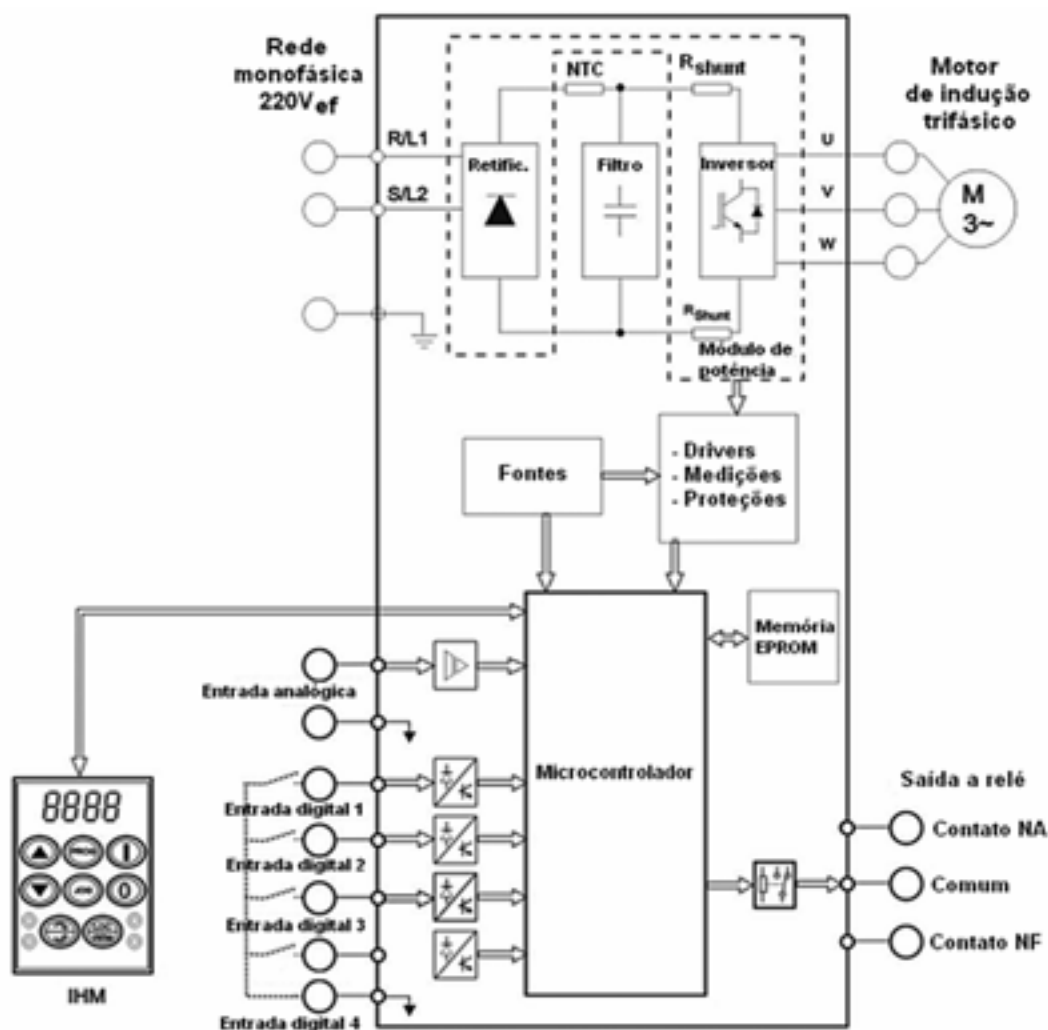
A utilização do inversor de frequência será segura e eficiente se forem seguidas as instruções contidas no manual do fabricante.

A otimização do funcionamento poderá ser feita por meio dos parâmetros de configuração que, na maioria dos inversores de frequência, são pré-ajustados de fábrica. Normalmente são ajustes com valores médios, para atender a uma gama de motores.

Caso haja a necessidade de alteração de alguns desses parâmetros, ela poderá ser feita utilizando um *software* de programação e comunicação ou por meio de um controle manual local ou remoto. Nesse caso utiliza-se uma interface homem máquina (IHM).

Observe, a seguir, o diagrama em blocos de um inversor utilizado para o controle de um motor de indução trifásico.

Figura 44 – Diagrama em blocos de um inversor de freqüência



Fonte: SENAI-SP. 1988. 266p.

Podemos observar na figura anterior que a alimentação é fornecida por rede monofásica de 220V e que a saída é uma tensão trifásica, com amplitude e freqüência variável.

Conectado ao inversor, existe uma IHM (interface homem máquina), na qual podem ser programados os parâmetros do inversor. Quando o inversor estiver habilitado para operar em modo local, os comandos de avanço, parada, inversão de rotação serão dados por meio da IHM.

Se o inversor estiver habilitado para operar em modo remoto, os comandos serão dados por meio das entradas analógicas e digitais de controle do inversor.

Existe também uma saída a relé que pode ser utilizada para alarme e sinalização.

Modos de operação dos inversores de frequência

Como foi visto anteriormente, se a frequência de saída no inversor variar, a velocidade de rotação do motor será alterada na mesma proporção. Normalmente, a faixa de variação de frequência dos inversores fica entre 5 e 300 Hz.

A função do inversor de frequência, entretanto, não é apenas controlar a velocidade de um motor CA. Ele precisa manter o torque (conjugado) constante para não provocar alterações na rotação, quando o motor estiver com carga.

O valor da relação tensão/frequência (V/F) pode ser programado (parametrizado) em um inversor e depende da aplicação. Quando o motor necessita de um grande torque, e não atinge velocidade muito alta, o valor de V/F deve ser programado para o maior valor que o equipamento pode fornecer. Assim, ele terá um melhor rendimento, em baixas velocidades e alto torque. Já no caso em que o motor deva operar com altas rotações e com torques não tão altos, V/F é programado com valor menor, encontrando assim o melhor rendimento para essa outra situação.

Tipos de controle de inversores de frequência

Quanto ao tipo de controle, os inversores podem ser do tipo escalar ou vetorial. Alguns possuem os dois tipos de funcionamento no mesmo produto.

Você vai estudá-los a seguir.

Controle escalar (V/F)

No modo de controle escalar, também conhecido por V/F, a tensão e a frequência são as variáveis utilizadas e são aplicadas diretamente no motor, de maneira a manter um relação V/F correspondente à programada no inversor.

O controle escalar pode ser dividido em dois tipos: linear e quadrático.

- Controle V/F linear: é baseado na curva V/F constante e o seu desempenho em baixas frequências de saída é limitado, em função da queda de tensão na resistência do estator, que provoca uma redução significativa de fluxo no entreferro do motor e, conseqüentemente, na sua capacidade de torque. Podemos citar, como exemplo de aplicação do controle V/F linear, o acionamento de calandras, esteiras, extrusoras, etc.
- Controle V/F quadrático: é ideal para acionamento de cargas como bombas centrífugas e ventiladores (cargas com característica torque x velocidade quadrática), pois possibilita uma redução nas perdas no motor, resultando em uma economia adicional de energia no acionamento com inversor.

Controle vetorial

No funcionamento dos inversores de frequência escalares (V/F), utiliza-se a tensão de saída (V) e a frequência de saída (F) para controle e variação da velocidade.

Apesar de eficiente, o modo de controle escalar (V/F) possui limitações como a de ignorar as características do motor e de não possuir um controle de torque.

Para melhorar as condições de funcionamento dos inversores, foi desenvolvido um novo modo de controle chamado de *controle vetorial*. Com o uso da técnica VFC (*Voltage flux control*), efetua-se a leitura da corrente do estator e, por meio do modelo matemático do motor, já gravado internamente no microprocessador, é definido qual deve ser o escorregamento do motor, que é corrigido com o controle da tensão do estator.

Também são introduzidos os dados referentes ao sistema e ao motor, de modo a otimizar o acionamento e, assim, obter um controle eficiente e preciso, necessário nos acionamentos críticos como, por exemplo, o de ponte rolante.



Fique ligado!

Cuidados na instalação do inversor de frequência

Essas regras visam evitar que o inversor seja instalado de forma inadequada, o que pode comprometer o funcionamento do equipamento e da rede elétrica.

- Nunca inverter a ligação da entrada da rede elétrica com a saída para o motor, pois isso seria fatal para o inversor.
- O aterramento elétrico deve estar bem conectado, tanto no inversor como no motor.
- Segundo a norma IEC 536, o valor da resistência de aterramento não pode ser maior que 5Ω . Em caso de dúvida, medir essa resistência com um terrômetro antes de fazer a instalação.
- Caso o inversor possua uma interface de comunicação com protocolo de comunicação do tipo RS 232 ou RS 485, que se comunica com um microcomputador PC, o cabo de comunicação deve ter o menor comprimento possível.
- Deve-se evitar colocar em um mesmo eletroduto, ou canaleta, cabos de força, de saída para o motor, cabos de comando e de comunicação.
- O inversor deve ser instalado em local ventilado e, no caso de o inversor ser de grande potência, deverá ser instalado um equipamento de exaustão do ar.
- A rede elétrica deve ser confiável e nunca ter variações de tensão acima de $\pm 10\%$.
- Os equipamentos de controle que funcionam em conjunto com o inversor devem possuir um condutor de proteção em comum (condutor na cor verde ou verde-amarela).
- Utilizar sempre supressores de ruído elétricos (filtros), para evitar que o inversor interfira em outros equipamentos.

Se forem seguidas essas regras, provavelmente o inversor funcionará de maneira eficiente e sem causar nenhum tipo de transtorno.

Parametrização do inversor de frequência

Para o perfeito funcionamento do sistema de acionamento, além de instalar o inversor seguindo os cuidados citados anteriormente, é preciso programá-lo de acordo com as condições de trabalho que ele irá realizar. Essa operação é chamada de *parametrização do inversor*.



Fique ligado!

Quanto maior o número de recursos, maior será o número de parâmetros do inversor.

A seguir são apresentados alguns comentários sobre os principais parâmetros utilizados, sem referenciá-los com modelos de qualquer fabricante. A codificação desses parâmetros mudam de acordo com o fabricante.

- Parâmetro 000 – Desbloqueia o inversor para que possa ser feita a parametrização

P000 = 0 -> parâmetros bloqueados

P000 = 5 -> parametrização liberada;

- Parâmetro 001 – Tensão nominal do motor: serve para informar ao inversor qual é a tensão nominal na qual irá operar;
- Parâmetro 002 – Frequência máxima de saída: parâmetro que determina a velocidade máxima do motor;
- Parâmetro 003 – Frequência mínima de saída: parâmetro que determina a velocidade mínima do motor;
- Parâmetro 004 – Frequência de JOG: a tecla JOG é um recurso que faz o motor girar com velocidade bem baixa. Isso facilita o posicionamento e ajuste da máquina, antes de ser colocada no regime normal de funcionamento;

Parâmetro 005 – Tempo de partida: também chamado de *rampa de subida*. Este parâmetro determina o tempo para o motor atingir a velocidade programada. Este parâmetro deve respeitar a inércia da carga e, também, o limite de corrente do inversor;

- Parâmetro 006 – Tempo de parada: também chamado de *tempo de desaceleração*. Este parâmetro determina o tempo para o inversor provocar uma parada gradativa no motor;
- Parâmetro 007 – Tipo de frenagem: este parâmetro determina qual será o tipo de freio utilizado pelo inversor para parar o motor.

P007 = 1 -> Parada por rampa de desaceleração

P007 = 0 -> Parada por injeção de corrente contínua nos enrolamentos do motor;

- Parâmetro 009 – Tipo de entrada: este parâmetro informa ao inversor como será controlada a velocidade do motor.

P009 = 1 -> entrada analógica de 0 a 10 Volts ou de 4 a 20 mA.

P009 = 0 -> a entrada é digital por meio de chaves;

- Freqüência de PWM: este parâmetro determina a freqüência de chaveamento do circuito de PWM do inversor.

P010 = 1 -> Freq. PWM = 2 kHz

P010 = 2 -> Freq. PWM = 4 kHz

P010 = 3 -> Freq. PWM = 8 kHz

P010 = 4 -> Freq. PWM = 16 kHz

Para evitar perdas no motor e interferência eletromagnéticas, quanto menor a freqüência de PWM, melhor. Baixas freqüências, porém, (2 ou 4 KHz) podem causar ruídos sonoros na máquina. Portanto, deverá ser feita uma análise para que a escolha da freqüência seja a mais eficiente.



Atenção!

Para evitar perdas no motor e interferência eletromagnéticas, quanto menor a frequência de PWM, melhor. Baixas frequências, porém, (2 ou 4 KHz) podem causar ruídos sonoros na máquina. Portanto, deverá ser feita uma análise para que a escolha da frequência seja a mais eficiente.



Fique ligado!

Os parâmetros apresentados como exemplo são suficientes para permitir o funcionamento básico do motor.

Para uma parametrização real, deve ser consultado o manual do fabricante.

Exemplo de dimensionamento de um inversor de frequência

A seguir, é apresentado um exemplo prático de como dimensionar um inversor para as seguintes condições:

- tensão da rede elétrica: 380 Volts (monofásica);
- potência do motor: 1 HP;
- tipo de aplicação: exaustor industrial.

Os cálculos para este dimensionamento são mostrados a seguir.

- Cálculo da corrente nominal do motor:

Dados: 1 HP = 746 W

$\cos \varphi = 0,80$

$\eta = 0,78$

$$\text{Corrente nominal} = \frac{\text{Potência (W)}}{(\text{Tensão da rede}) \times (\cos\phi) \times (\eta)}$$

$$\text{Corrente nominal} = \frac{746}{380 \times 0,8 \times 0,78} = 3,15\text{A}$$

- Parâmetros para a escolha do tipo de inversor

A maioria dos inversores é do tipo escalar. O do tipo vetorial é indicado para duas situações: precisão no ajuste da velocidade ou elevado torque para baixa velocidade, como, por exemplo, para o acionamento de guindaste, ponte rolante e elevador. Como, no caso do exemplo anterior, o acionamento é de um exaustor industrial, a escolha será por um inversor do tipo escalar.

- Modelo e fabricante:

Para a escolha do modelo, será preciso consultar os catálogos dos fabricantes.

Servoacionamento

Para agilizar o processo produtivo de uma empresa, é necessário renovar as máquinas. Uma alternativa é utilizar a técnica de *retrofitting* (que consiste na adaptação e renovação de equipamentos, geralmente com a inclusão de circuitos eletrônicos) nas máquinas que, além de mais barata, permite utilizar modernas técnicas de acionamento para aumentar a produção.

O servoacionamento é uma tecnologia bastante empregada nestes *retrofitting*. Para utilizar esta técnica com eficiência, são apresentados, a seguir, os fundamentos básicos necessários.

Fundamentos básicos de servoacionamento

Servoacionamento é um sistema eletromecânico de controle de precisão. Ele encontra aplicações em diferentes campos da indústria como, por exemplo:

- máquinas-ferramenta a comando numérico;
- sistemas de posicionamento;

- linhas de transporte;
- robôs industriais; e
- sistemas flexíveis de manufatura.

Servomotores são os motores utilizados nos servoacionamentos. O circuito de alimentação dos servomotores encontra-se em uma unidade chamada *servoconversor*.



Fique ligado!

Servoacionamento = servomotor + servoconversor

Escolha do motor

Uma primeira característica necessária para a escolha de um motor relaciona-se com a facilidade e simplicidade de atuação no torque da máquina.

Há algum tempo, os motores de corrente contínua (CC) ocupavam o maior espaço das aplicações em servoacionamentos, pois eram os motores que permitiam mais facilidade e precisão no controle do torque. Atualmente, os motores síncronos de ímã permanente (MSIP), acionados por circuitos de eletrônica de potência e controlados por microprocessadores digitais, representam o estágio mais avançado dos servoacionamentos.

Sensores de posicionamento e velocidade

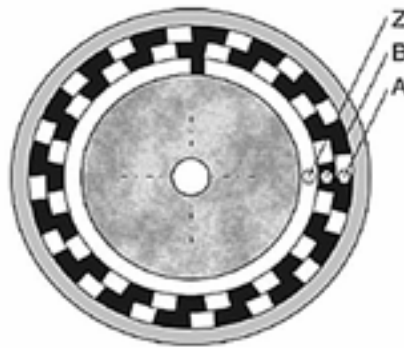
Os servoconversores necessitam de informações de posição e/ou velocidade para o controle dos servomotores. Estas informações podem ser estimadas ou medidas. Nas aplicações de maior precisão, é necessário realizar a medição por meio de sensores.

Os principais tipos de sensores utilizados são os *encoders* (incremental e absoluto), tacogeradores e *resolvers*.

Encoders

Os *encoders* podem ser incrementais ou absolutos. O *encoder* incremental apresenta construção mais simples. O seu funcionamento é baseado nos pulsos gerados em duas marcações radiais, igualmente espaçadas. A contagem dos pulsos permite a detecção da posição e a defasagem das faixas A e B dá o sentido de rotação. Uma marca de zero (Z), localizada em uma terceira circunferência, fornece a indicação do término de uma volta e do início da contagem. A Figura 45 mostra um *encoder* incremental.

Figura 45 – *Encoder* incremental

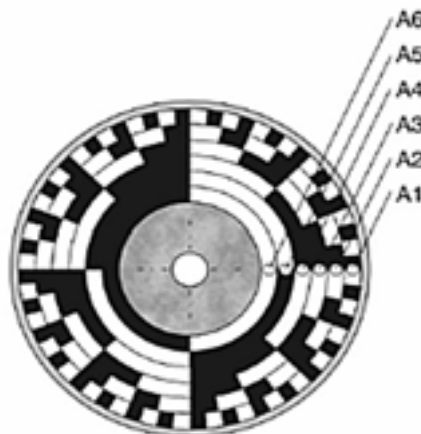


Fonte: SENAI-SP. 1988. 266p.

No *encoder* absoluto, cada posição do disco corresponde a uma combinação de sinais (A1, A2,... A6), em geral fornecidos por sensores óticos ou magnéticos, que percebem a passagem pelas marcas do disco.

A Figura 46 mostra a representação de um *encoder* absoluto.

Figura 46 – *Encoder* absoluto



Fonte: SENAI-SP, 1988. 266p.



Fique ligado!

Por ocasião de uma perda de energia ou desligamento, o sensor incremental necessita da passagem pela marca de zero para reiniciar sua contagem após o religamento. Já o sensor absoluto pode disponibilizar a informação da posição logo que energizado.

Tacogeradores

Os tacogeradores são geradores CC de ímã permanente ou geradores síncronos CA, também com campo produzido por ímãs e conhecidos como *alternadores*.

Os tacogeradores CC apresentam uma tensão proporcional à velocidade, positiva ou negativa, dependendo do sentido de rotação, e trabalham com escovas, como toda máquina CC.

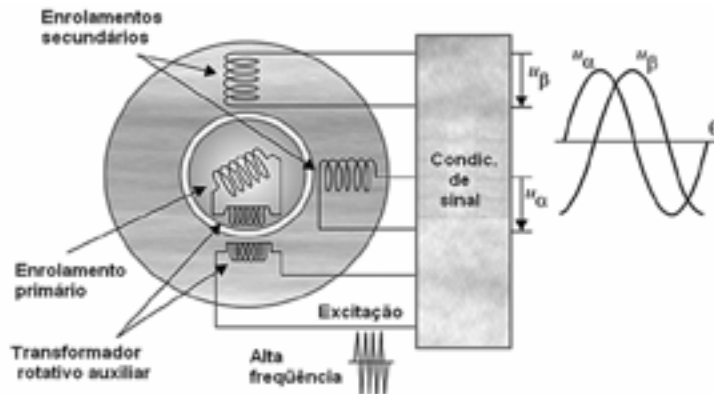
Os alternadores não necessitam de escovas, o que representa uma vantagem. Em geral, a tensão de saída é retificada por uma ponte de diodos, o que faz com que a tensão retificada tenha sempre o mesmo sinal, independentemente do sentido de rotação.

Resolvers

Os *resolvers* são transformadores de alta frequência (5 a 10kHz) onde o primário está situado no rotor e existem dois secundários, em quadratura, no estator.

As amplitudes e fases das tensões induzidas nos secundários são em função da posição do rotor. Um circuito condicionador processa as tensões induzidas nos secundários fornecendo uma tensão proporcional à posição. Veja o diagrama esquemático de um *resolver*:

Figura 47 – Diagrama funcional de um *resolver*



Fonte: Fonte: SENAI-SP, 1988. 266p.

Servoconversor

O servoconversor é a unidade eletrônica do sistema de servoacionamento e sua principal função é realizar o posicionamento por meio de um sistema de controle, mantendo uma alta *performance* de força e velocidade nos MSIP (motores síncronos de ímã permanente).



Fique ligado!

O funcionamento e a tecnologia empregados no sistema eletrônico do servoconversor são os mesmos dos inversores de frequência. A diferença é que foi adicionada aos inversores uma realimentação que permite o trabalho em malha fechada.

Diversos benefícios são obtidos quando utilizamos este tipo de equipamento, dentre eles destacamos:

- menor consumo de energia;
- menor tempo gasto para a realização da tarefa;
- movimento mais suave de cargas;
- melhor relação entre carga movida e rigidez da transmissão.

Para obtermos o melhor desempenho possível do conjunto acionamento e carga movida, é preciso, porém, que as aplicações do equipamento sejam bem definidas, bem como os seus parâmetros de operação.

Voltando ao desafio

O desafio proposto neste capítulo foi o de reduzir a corrente de partida de um motor CA, que é empregado em um acionamento com velocidade constante.

Para reduzir a corrente de partida de um motor CA pode-se utilizar um *soft-starter* ou um inversor de frequência. O inversor tem um custo mais elevado e só deve ser utilizado em acionamento que necessite também de controle de velocidade, o que não é o caso. Assim, a solução que atende ao problema apresentado com menor custo é o emprego do *soft-starter*.

Resumindo

Você aprendeu as diversas formas de acionamento eletrônico de um motor CA.

Aprendeu sobre o funcionamento do *soft-starter*, suas vantagens e aplicações. Em seguida, conheceu o inversor de frequência, suas diversas topologias de construção e de controle. Também estudou como parametrizá-lo. Por fim, conheceu os dispositivos de servoacionamento.

Aprenda mais

No site www.weg.com.br, acessado no dia 27/4/2007, você poderá encontrar vários exemplos de aplicação para os modelos de *soft-starters* produzidos pela empresa.

Você pode conhecer mais sobre inversores acionamentos de bombas consultando o site: <http://www.siemens.com.br/templates/produto.aspx?channel=6454&produto=14324>; acessado em 24/11/2007.

Consulte o *site* <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/>, acessado em 26/11/2007, para conhecer um exemplo prático de acionamento de bomba centrífuga. Você verá o cálculo do acionamento em três situações: sem restrição de vazão, com válvula de estrangulamento e com inversor de frequência. Para cada situação há o cálculo do consumo de energia. E, então, você poderá verificar em qual situação haverá maior eficiência energética.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10131**: bombas hidráulicas de fluxo. Rio de Janeiro, 1987.

ANDRADE, D. A. **Acionamento de máquinas elétricas**. Uberlândia: UFU, 2003.

BORTONI, E. C. Conservação de Energia em motores elétricos. **Revista Ipesi-Eletrônica e Informática**, São Paulo, p. 36-41, jul./ago. 1993.

BRAGA, N. C. Conheça o IGBT. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 326, p. 34-38, mar. 2000.

CAPELLI, A. Soft-starter. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 356, p. 2-7, set. 2002.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Conservação de energia**: eficiência energética de instalações e equipamentos. Itajubá: EFEI, 2001.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. Rio de Janeiro: Técnica Ltda, 1989. 473 p.

OTTOBONI, A. Servo-acionamentos. **Revista Mecatrônica Atual**, São Paulo, n. 6, p. 7-14, out./nov. 2002.

SENAI-PE. **Eletrônica básica I**. Recife: SENAI-PE/DITEC/DET, 2005.

SENAI-SP. **Eletricista de manutenção**: acionamento: teoria. São Paulo: SENAI-SP, 1988. 266p.

SEW EURODRIVE. **Manual de Conversores de Frequência modelo Movidrive®**. Disponível em: <<http://www.sew.com.br>>. Acesso em: 26 nov. 2007.

SIEMENS. **Análise de dispositivos de manobra e de proteção de baixa tensão**. São Paulo: [s.n.: 200-?].

WEG Acionamentos. **Manual do conversor CA/CC modelo CTW-04**. Disponível em: <<http://www.catalogo.weg.com.br/FILES/Artigos/1-373.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2007.

WEG Acionamentos. **Manual do inversor de frequência modelo CFW 09**. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/artigos/1-157.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2007.

WEG Acionamentos. **Manual do Soft-starter modelo SSW 04**. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/FILES/Artigos/1-63>>. Acesso em: 26 nov. 2007.



Ministério de
Minas e Energia

