



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



Apostila de Automação Industrial

Elaborada pelo Professor M.Eng. Rodrigo Cardozo Fuentes

Prof. Rodrigo C. Fuentes
Campus- UFSM – Prédio 5
Email: fuentes@smail.ufsm.br
Web-site: w3.ufsm.br/fuentes

**SANTA MARIA – RS
2005**

ÍNDICE

5. CONTROLE DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA.....	5.1
5.1. Introdução:.....	5.1
5.2. Características Construtivas do Motor de Corrente Contínua	5.1
5.3. Princípio de Funcionamento do Motor de Corrente Contínua.....	5.2
5.3.1. <i>As equações básicas da maquina CC são:.....</i>	5.3
5.4. Classificação dos Motores de Corrente Contínua.....	5.4
5.5. O controle de velocidade e torque em motores CC com excitação independente	5.5
5.5.1. <i>Controle pela tensão aplicada na armadura (V):.....</i>	5.5
5.5.2. <i>Controle pela tensão aplicada no campo (Φ):.....</i>	5.6
5.5.3. <i>Controle por adição de resistência na armadura (R_a):</i>	5.6
5.5.4. <i>Controle pela tensão aplicada na armadura (V) e no Campo (Φ):.....</i>	5.7
5.6. Métodos Práticos Para o Controle de Velocidade e Torque:.....	5.7
5.6.1. <i>Resistores chaveados:.....</i>	5.7
5.6.2. <i>Variador de Tensão (Variac):.....</i>	5.8
5.6.3. <i>Pontes Retificadoras Controladas.....</i>	5.8
5.6.4. <i>Circuito Chopper.....</i>	5.10
5.7. Conversores Estáticos:.....	5.11
5.7.1. <i>Diagrama de Blocos de um Conversor CA-CC.....</i>	5.12
5.7.2. <i>Controle de Conversores estáticos:</i>	5.13
5.8. Conclusão	5.15

5. CONTROLE DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

5.1. Introdução:

Muitos processos industriais necessitam operar com velocidade de rotação variável. Como solução pode-se adotar a troca de relação de polias, caixas mecânicas de redução ou sistemas de fricção. Entretanto estas soluções implicam na parada do processo para se realizar a alteração além de uma operação de baixo rendimento. Dentre os tipos de motores, o motor de corrente contínua foi o primeiro a ser utilizado na indústria e destaca-se pela simplicidade em se controlar a velocidade de rotação e o torque.



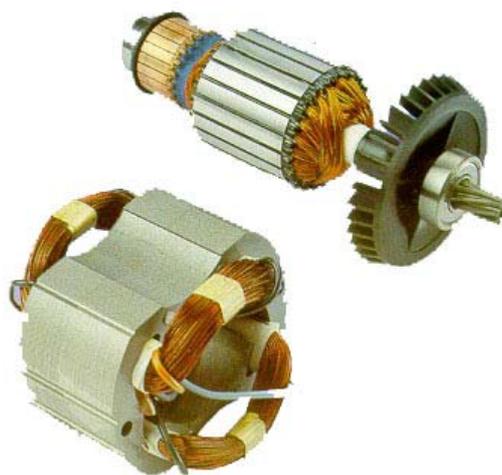
Motor CC de pequena potência



Motor CC industrial

5.2. Características Construtivas do Motor de Corrente Contínua

Para uma melhor análise das características construtivas pode-se dividir o motor de corrente contínua em duas partes distintas sendo uma fixa (estator ou campo) e outra móvel (rotor ou armadura).



Rotor e Estator

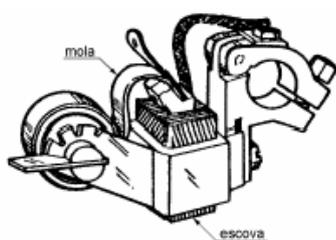
- Estator ou Campo – É a parte fixa, possui sapatas polares formadas por pacotes de lâminas de aço silício justapostas. Em torno das sapatas polares se enrolam fios condutores, formando bobinas.

- Rotor ou Armadura – O rotor é a parte móvel do motor, ligada ao eixo de transmissão de movimento. O rotor possui um pacote de lâminas de aço silício apresentando ranhuras onde são instaladas as bobinas do rotor. Os terminais destas bobinas são conectados eletricamente ao coletor.
- Coletor ou Comutador – O coletor conecta eletricamente as bobinas do rotor através de escovas de carvão à fonte de energia elétrica, de modo a permitir a movimentação do rotor sem causar curto-circuitos.



Coletor

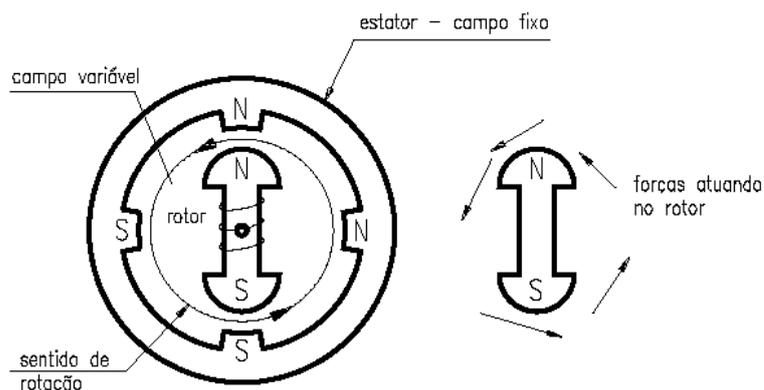
- Escovas – são constituídas de carvão grafite ou carbono. As escovas conduzem a energia da fonte externa para os contatos do comutador e as bobinas do rotor. Devido ao permanente atrito das escovas com o anel coletor do rotor, torna-se necessária a manutenção periódica com a substituição do par de escovas.



Conjunto porta-escovas e as escovas de carvão

5.3. Princípio de Funcionamento do Motor de Corrente Contínua

- A condição inicial para a operação do motor CC é a produção do fluxo magnético estático. Este fluxo magnético é obtido aplicando-se corrente contínua nas bobinas estáticas. Surgem então pólos magnéticos ao redor das peças polares, que passam a ser eletroímãs com polaridades fixas.
- Uma corrente contínua de uma fonte externa deve circular através das escovas, comutador e bobinas do rotor, produzindo assim pólos magnéticos no rotor. Os pólos do rotor são atraídos pelos pólos do estator, assim, como resultado tem-se uma força magnética.
- O rotor é uma peça móvel montada sobre mancais permitindo o seu giro. Devido a ação das forças magnéticas entre estator e rotor o rotor busca uma nova condição de equilíbrio deslocando-se angularmente.
- Como as bobinas do rotor são alimentadas eletricamente através do coletor e escovas apesar do deslocamento inicial, novas bobinas são alimentadas produzindo novamente forças magnéticas.
- O resultante destas forças magnéticas atuando sobre o rotor e o seu movimento rotacional é chamado de conjugado motor.



Ação dos campos magnéticos

☞ A máquina de corrente contínua de forma simplificada é formada por um campo (estático) e uma armadura (girante). O campo é formado pelos enrolamentos do estator sendo o responsável pela geração do fluxo magnético principal Φ . A armadura é formada pelo rotor, seus enrolamentos e o conjunto de escovas e coletor. Durante a operação o motor é percorrido por duas correntes I_f e I_a respectivamente no campo e na armadura. A corrente elétrica é fornecida para a armadura através das escovas e do coletor. Enquanto a corrente de excitação I_f é aplicada diretamente ao campo, corrente esta responsável pela produção do fluxo magnético principal Φ .

5.3.1. As equações básicas da máquina CC são:

Tensão nos terminais da armadura	$V = E + I_a \cdot R_a$
Força contra-eletromotriz	$E = K_1 \cdot N \cdot \Phi$
Torque ou Conjugado	$T = K_2 \cdot I_a \cdot \Phi$
Fluxo Magnético Principal	$\Phi = K_3 \cdot I_f$
Potência Mecânica	$P = T \cdot N = E \cdot I_a$
Velocidade de rotação da armadura	$N = \frac{V - I_a \cdot R_a}{K_1 \cdot \Phi}$

Onde:

- I_a e I_f são respectivamente correntes da armadura e campo;
- R_a resistência da armadura;
- N velocidade (rad/s);
- $K_{1,2,3}$ constantes de proporcionalidade.

5.4. Classificação dos Motores de Corrente Contínua

Nos motores de CC, as bobinas utilizadas para produzir o campo magnético estático têm aspectos diversos, de acordo com o tipo de excitação, permitindo a divisão das máquinas de CC em categorias que são:

- Motores auto-excitados:

- - Motor com excitação em série;

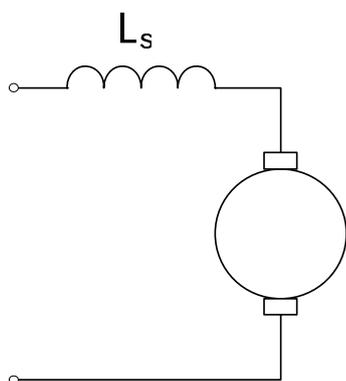
No motor com excitação em série as bobinas de campo, que constituem os eletroímãs, ficam em série com o enrolamento da armadura e ambos constam de poucas espiras de fio grosso, o que garante ao motor um alto conjugado de partida e sua aplicação em bondes, ônibus e trens elétricos.

- - Motor com excitação em paralelo;

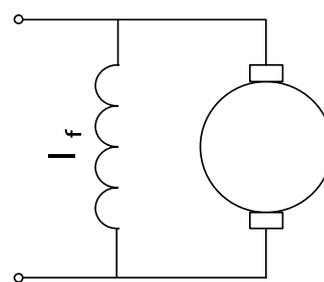
No motor com excitação em paralelo ou shunt ou derivação o conjunto das bobinas de campo fica em paralelo com o enrolamento da armadura e são feitas com um grande número de espiras de fio fino porque a corrente elevada necessária na condição de plena carga circula através do enrolamento de armadura. Este motor tem uma velocidade praticamente constante, mesmo com ampla variação de carga.

- - Motor com excitação composta.

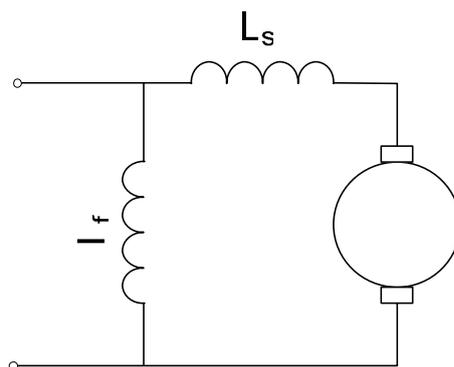
O motor com excitação composta ou série-paralela é uma combinação do motor série com o paralelo. A parte em série do enrolamento de campo auxilia (composto cumulativo) ou se opõe (composto diferencial) à parte paralela do enrolamento de campo, sendo a composição diferencial pouco usada. O motor composto cumulativo tem a velocidade e a característica de partida entre os motores série e shunt, tendo mais conjugado de partida que o motor shunt por causa da parte série do campo.



Motor com excitação em série



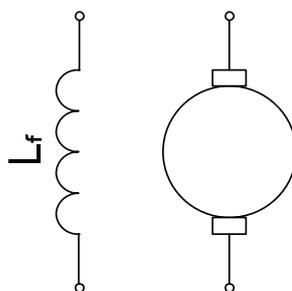
Motor com excitação em paralelo



Motor com excitação composta

- Motores com excitação independente.

No motor com excitação independente as bobinas de campo apresentam características semelhantes às do motor shunt e são alimentadas por uma fonte de tensão CC independente.



Motor com excitação independente

5.5. O controle de velocidade e torque em motores CC com excitação independente

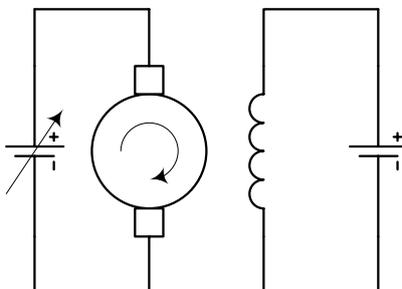
O controle de velocidade e torque em motores CC com excitação independente pode ser dividido basicamente em:

- Controle pela tensão aplicada na armadura (V);
- Controle pela tensão aplicada no campo (Φ);
- Controle por adição de resistência na armadura (R_a).

5.5.1. Controle pela tensão aplicada na armadura (V):

No controle pela armadura mantém-se a tensão e a corrente no campo constantes, desta forma o fluxo magnético produzido no campo também é constante. Varia-se a tensão aplicada na armadura (V) e por conseqüência a rotação da máquina, seguindo uma relação direta entre a tensão da armadura e a rotação da máquina. Neste método o torque permanece constante e a potência varia proporcionalmente com a velocidade.

Os motores CC com excitação independente e controle pela tensão aplicada na armadura são utilizados normalmente em acionamentos de máquinas operatrizes, tais como: ferramentas de avanço, bombas a pistão, compressores, etc. Aplicações onde é necessário um torque constante em toda a faixa de rotação.

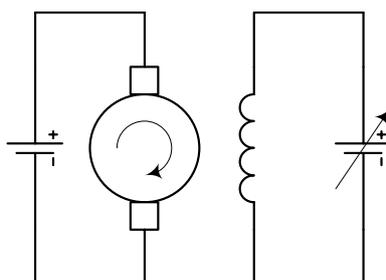


Controle pela Armadura

5.5.2. Controle pela tensão aplicada no campo (Φ):

No controle pelo campo, mantém-se a tensão de armadura constante e varia-se a corrente de excitação (I_f). Como o fluxo magnético é proporcional a corrente de excitação, diminuindo-se I_f diminui-se o fluxo magnético (Φ) e aumenta-se a velocidade de rotação N da máquina. No controle de campo a potência permanece constante enquanto a rotação se eleva e o torque se reduz. Este processo de aumento da velocidade de rotação pela diminuição do fluxo é conhecido por enfraquecimento de campo.

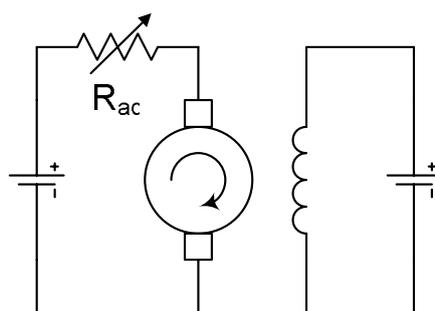
O controle pelo campo é utilizado em acionamentos de máquinas de corte periférico, como chapeamento de tiras, tornos, bobinadeiras, máquinas têxteis, etc.



Controle pelo Campo

5.5.3. Controle por adição de resistência na armadura (R_a):

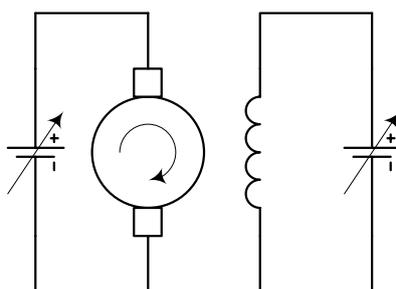
Além dos métodos de controle pelo campo e controle pela armadura, verifica-se que variando a resistência da armadura também se obtém uma variação na velocidade do motor. Para se conseguir esta variação coloca-se em série um reostato com a armadura do motor e através da variação do valor do reostato consegue-se variar a velocidade do motor. Neste método existe uma perda considerável de energia devido à potência dissipada no reostato adicional.



Controle pela Adição de Resistência na Armadura

5.5.4. Controle pela tensão aplicada na armadura (V) e no Campo (Φ):

Neste método são aplicadas as duas técnicas anteriormente abordadas proporcionando um controle integral da operação do motor de corrente contínua. Esta técnica permite varias alternativas de conjugado e rotações. Esta técnica vem sendo empregada nos modernos conversores para acionamento em corrente contínua.

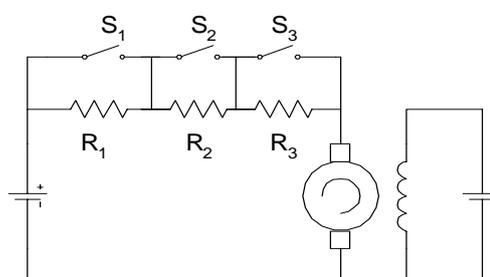


Controle através do campo e da armadura

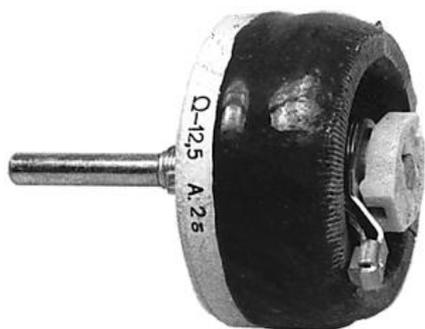
5.6. Métodos Práticos Para o Controle de Velocidade e Torque:

5.6.1. Resistores chaveados:

Na prática a aplicação do método de adição de resistência na armadura pode ser implementado de diferentes formas com a utilização de reostato em série ou como a instalação de vários resistores em série, chaveados através de contadores. Este método consiste em comutar os contadores de acordo com a velocidade desejada.



? Quantas velocidades podem ser obtidas com este circuito?



Reostato

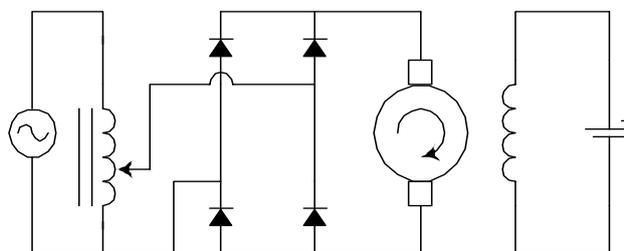


Resistor fixo

5.6.2. Variador de Tensão (Variac):

É formado por um autotransformador variador de tensão (Variac) e um circuito retificador de tensão CA/CC.

A velocidade é modificada através do ajuste de tensão no autotransformador, variando-se assim o nível da tensão contínua fornecida para armadura.



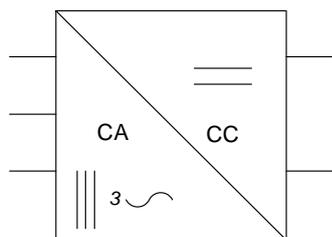
Variac para aplicações gerais



Variac sem acessórios

5.6.3. Pontes Retificadoras Controladas

As pontes retificadoras controladas realizam a conversão de potência de corrente alternada para corrente contínua. Estas pontes podem ser monofásicas ou trifásicas, semi-controladas ou totalmente controladas.



Conversor CA- CC



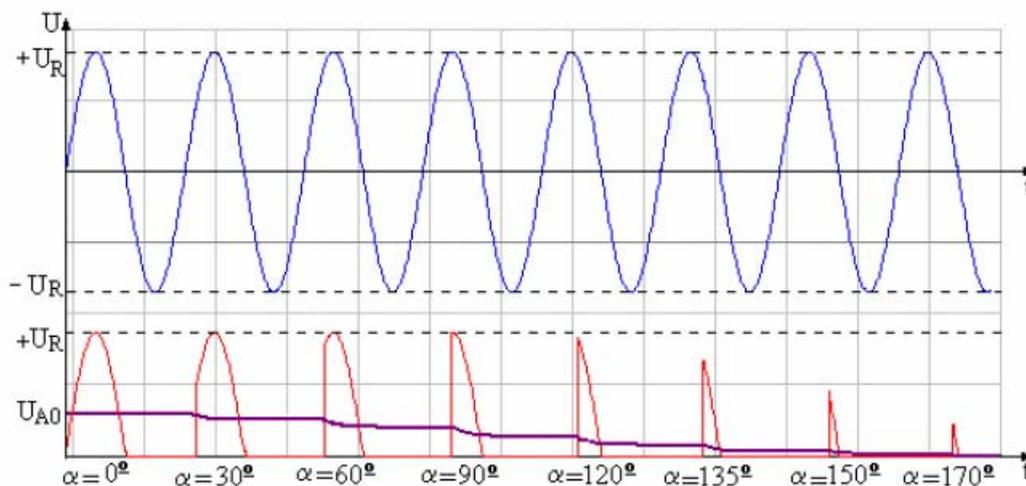
Tiristor – SCR – Retificador Controlado de Silício



SCR

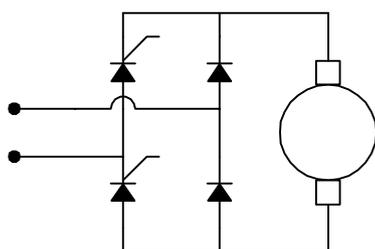


SCRs em diversos encapsulamentos

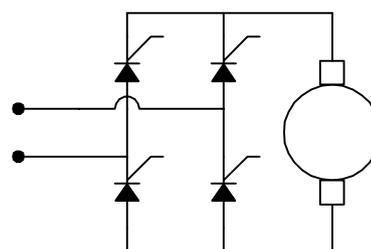


Variação do ângulo de disparo do SCR e a tensão resultante

- Ponte Monofásica Semi-Controlada: É formada por dois SCRs e dois diodos retificadores, com aplicação em acionamentos de baixa potência, por motivos econômicos.
- Ponte Monofásica Totalmente Controlada: É formada por quatro SCRs com aplicação em acionamentos de baixa potência, onde é necessária a frenagem do motor CC.

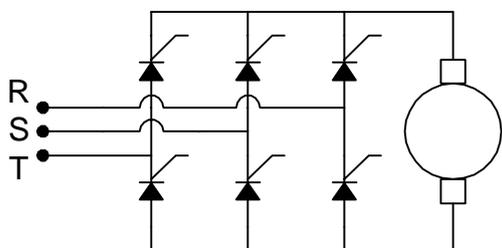


Ponte Monofásica Semi-Controlada

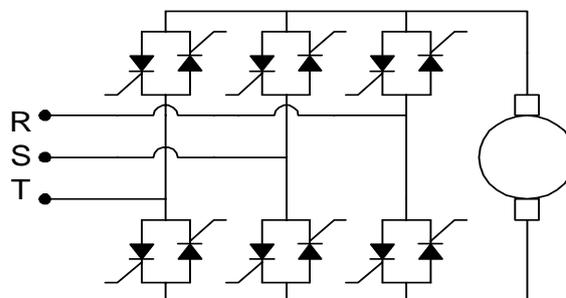


Ponte Monofásica Totalmente Controlada

- Ponte Trifásica Totalmente Controlada: É formada por seis SCRs. com aplicação em acionamentos de potência superior a 10kW onde é necessária a aceleração e frenagem do motor CC em um sentido de rotação. Para aplicações onde é necessário a aceleração e frenagem nos dois sentidos de rotação deve-se utilizar duas pontes totalmente controladas em anti-paralelo.



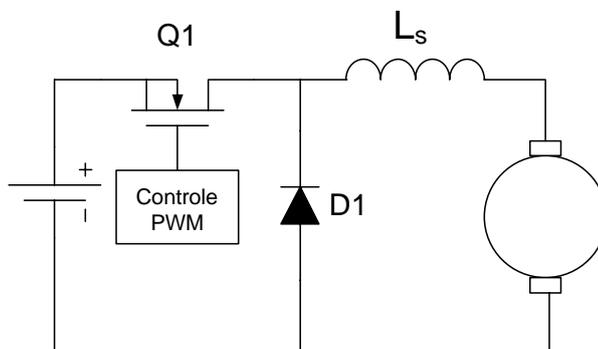
Ponte Trifásica Totalmente Controlada



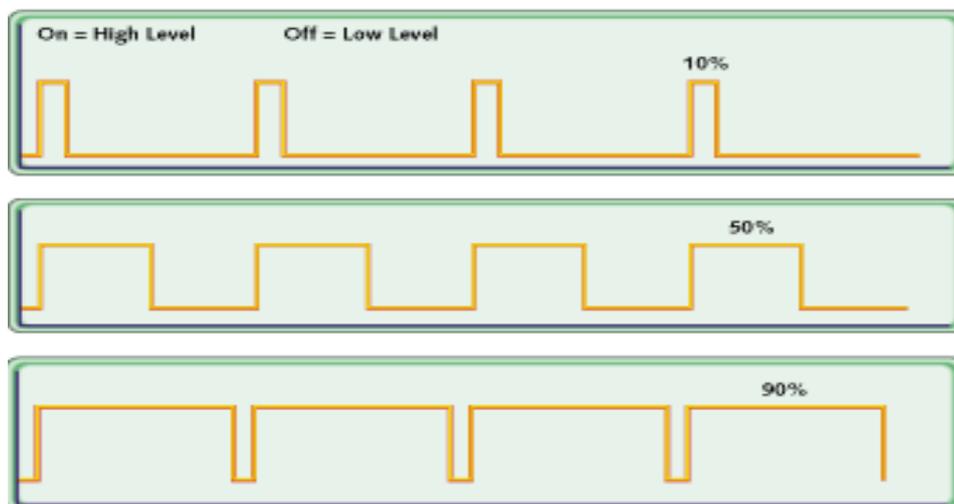
Duas Pontes Trifásicas Totalmente Controladas

5.6.4. Circuito Chopper

No circuito Chopper o transistor Q1 opera como uma chave comandada por um circuito de controle PWM. Controle PWM (Pulse Width Modulation) significa Modulação por Largura de Pulso. Onde um sinal de frequência constante comandará os instantes de abertura e fechamento do transistor. A tensão resultante no motor será proporcional à relação entre o tempo que a chave permanece ligada (t_{ON}) e o período total do sinal ($t_{ON}+t_{OFF}$).



Circuito Chopper



Modulação PWM

$$V_{Motor} = \frac{V_{entrada} \times t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$$

Equação para a determinação da tensão aplicada no motor

5.7. Conversores Estáticos:

Com a evolução da indústria foram desenvolvidas máquinas que necessitam controles precisos de velocidade e dinamicamente estáveis, isto é, grandes variações de carga e velocidade. Para atender estas características cada vez mais exigentes é que foram desenvolvidos os conversores estáticos a semicondutor.



Conversor Estático CA – CC

5.7.1. Diagrama de Blocos de um Conversor CA-CC

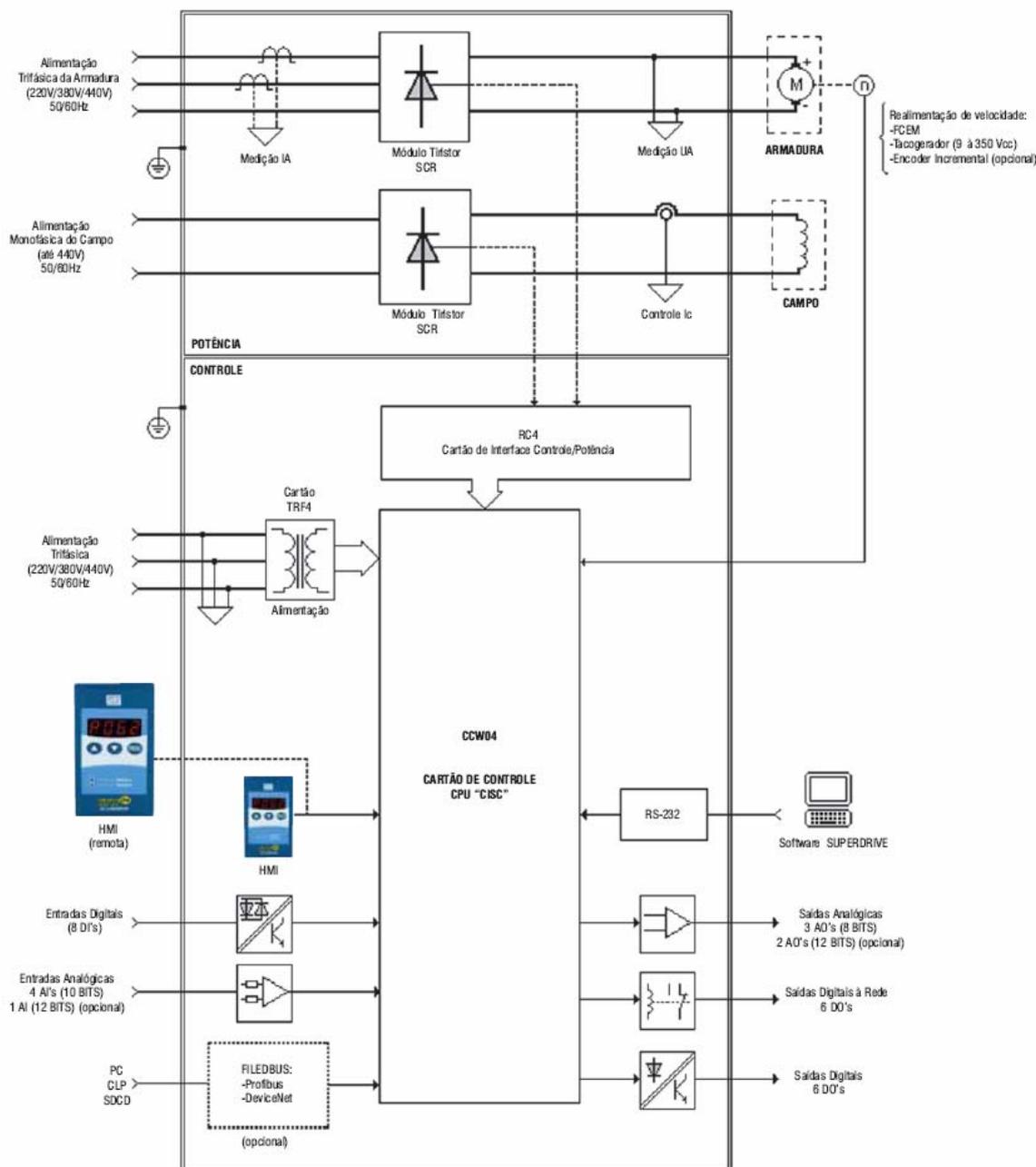
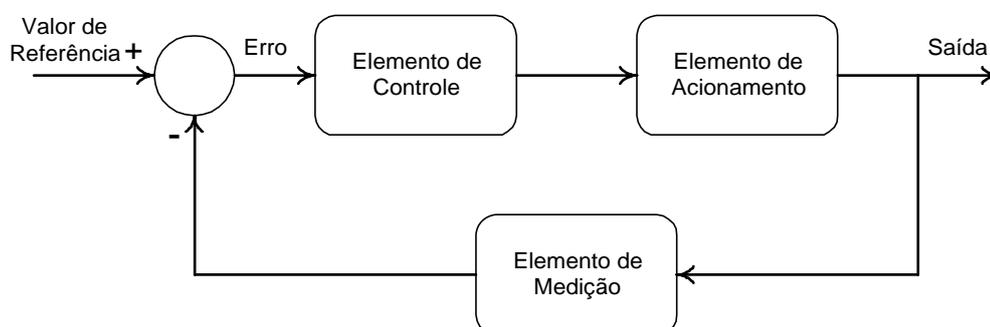


Diagrama de Blocos de um conversor CA-CC

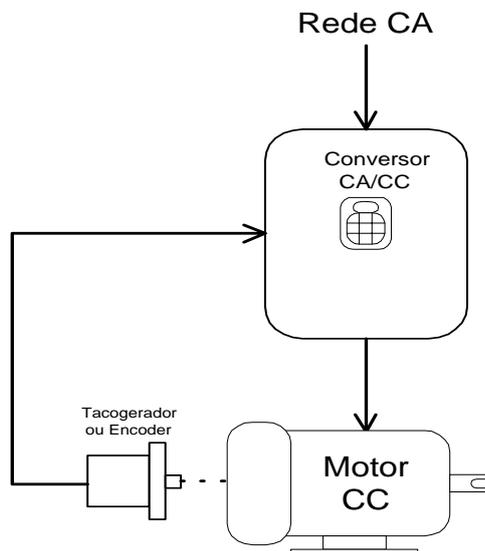
Os conversores CA - CC estáticos consistem basicamente de duas pontes retificadoras controladas, que convertem a corrente alternada fornecida pela rede de energia elétrica em corrente contínua. O valor médio da tensão contínua retificada deve variar de um valor mínimo até um valor máximo conforme a necessidade do circuito de controle. O campo e a armadura do motor CC são alimentados independentemente pelos circuitos retificadores possibilitando a ação de controle sobre a rotação e torque do motor.

5.7.2. Controle de Conversores estáticos:

O principal objetivo de um conversor CA/CC como um todo é regular a velocidade de um motor CC, tornando-o insensível a variações de carga. Para garantir esta operação deve-se aplicar um sistema de controle em malha fechada. O sinal de referência de velocidade é feito através de um nível de tensão contínua de (0...10V) ou corrente (4...20mA) que representará uma determinada velocidade no eixo do motor. Para garantir uma alta precisão é necessário o uso de um sensor de velocidade (ex. tacogerador ou encoder) no eixo do motor para fins de realimentação de velocidade. Em aplicações menos críticas pode-se dispensar o uso do transdutor realimentando-se para o comando eletrônico a própria tensão de armadura. Neste caso costuma-se compensar através de ajuste proporcional a corrente de armadura e a queda na resistência de armadura.



Sistema de Controle em Malha Fechada

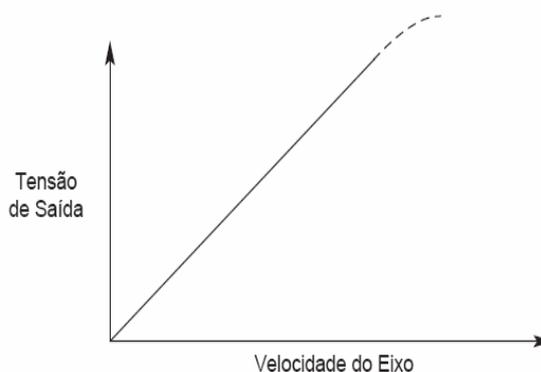


Os seguintes requisitos para os reguladores do conversor são exigidos:

- O desvio do valor de controle do valor desejado deve ser o menor possível, sob todas as variáveis de perturbação;
- Os reguladores devem ser estáveis, após uma perturbação, a nova condição em regime permanente deve ser atingida o mais rápido possível.



Tacogerador



Curva característica do tacogerador

O conversor apresenta ainda uma interface homem máquina IHM que proporciona uma fácil interação com o usuário, facilitando a parametrização e a obtenção dos valores medidos pelo conversor.



IHM

Com a finalidade de proporcionar a operação conjunta com controladores programáveis o conversor possui entradas e saídas do tipo analógicas e digitais. Alguns modelos apresentam interfaces de comunicação (Rs-232, Profibus, DeviceNet), o que garante o acionamento, controle e supervisão remotos.

5.8. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do motor CC, seu funcionamento e as técnicas de controle de torque e rotação. As técnicas apresentadas vão desde as mais simples até as mais complexas como o controle em malha fechada. Nas aplicações práticas vale salientar a relação custo benefício para uma escolha mais adequada.

O motor de corrente contínua com a sua versatilidade de controle de torque e rotação, associado aos modernos conversores estáticos torna-se uma alternativa atrativa para muitas aplicações industriais. Quanto à instalação e parametrização dos conversores estáticos, o técnico deve seguir as orientações do fabricante e dos manuais técnicos dos produtos.

Para saber mais:

- <http://www.weg.com.br>
- <http://www.parker.com.br>
- <http://www.sew.com.br>