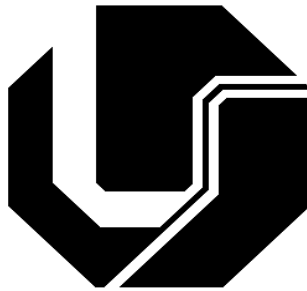


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**INTRODUÇÃO A SISTEMAS DE ACIONAMENTO  
ESTÁTICO**

PROF. DARIZON ALVES DE ANDRADE

# O Acionamento Eletrônico de Motores Elétricos

## 1. Introdução.

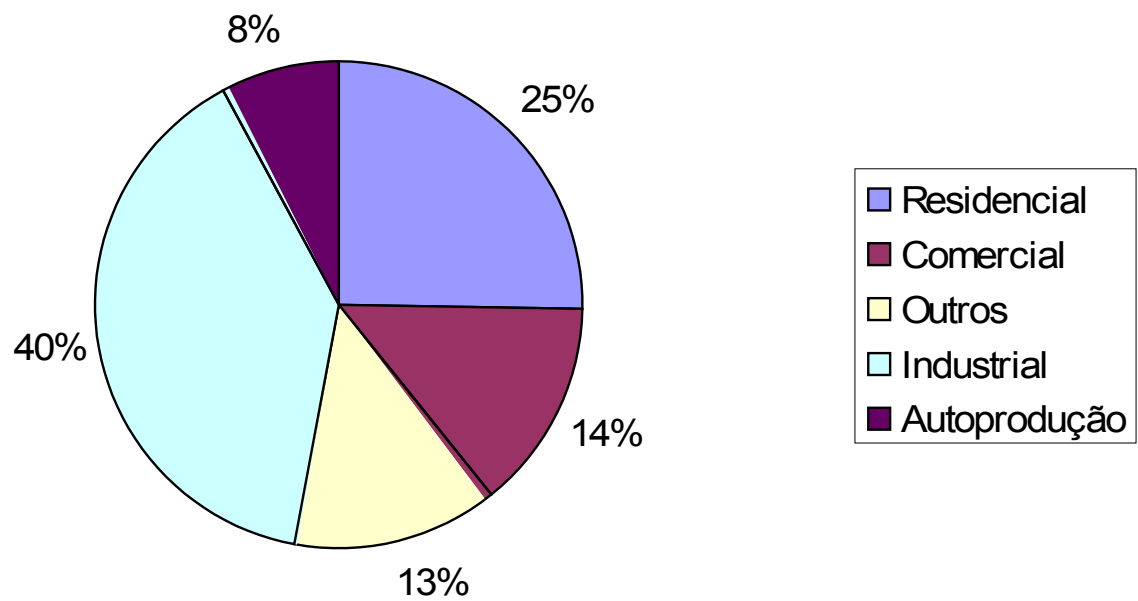
Em países industrializados, em torno de 70% de toda a energia elétrica gerada é consumida por plantas industriais, dos quais 50% são consumidos por motores elétricos. Energia elétrica é distribuída e entregue aos consumidores em tensões e frequências fixas de 50 ou 60 Hz. Uma vez que a velocidade de máquinas de corrente alternada é proporcional à frequência das tensões e correntes de entrada, as máquinas operam com velocidades fixas quando alimentadas diretamente das redes das empresas de distribuição de energia. Por outro lado os processos modernos de manufatura, tais como máquinas ferramentas, requerem velocidades variáveis. Isto ocorre para um grande número de aplicações, dentre as quais algumas são:

- a) Propulsão elétrica
- b) Bombas, ventiladores e compressores
- c) Automação da planta industrial
- d) Sistemas flexíveis de manufatura
- e) Servomotores e "spindle"
- f) Atuadores aeroespaciais
- g) Robôs
- h) Indústria do Cimento
- i) Siderúrgicas
- j) Usinas de papel e polpa de madeira
- k) Indústrias têxteis
- l) Aplicações automotivas
- m) Escavadeiras submersas, equipamento de mineração
- n) Correias transportadoras, elevadores, escadas rolantes e elevadores de carga
- o) Ferramentas
- p) Antenas

A introdução de acionamentos com velocidades variáveis aumenta a produtividade e automação e conseqüentemente o rendimento. Diminuir a entrada de energia ou aumentar a eficiência do processo de transmissão mecânica pode reduzir o consumo de energia. O rendimento global do sistema pode ser aumentado de 15 a 27% por meio da introdução de acionamentos com velocidades variáveis em substituição aos sistemas de velocidade fixa. Isto resultaria em uma considerável redução na conta anual de energia de aproximadamente 90 bilhões de dólares nos EUA. Deve-se observar que os lucros de muitas empresas em tempos recentes, são originários principalmente na economia de suas contas de energia. A questão de economia de energia utilizando acionamentos de velocidade variável traz

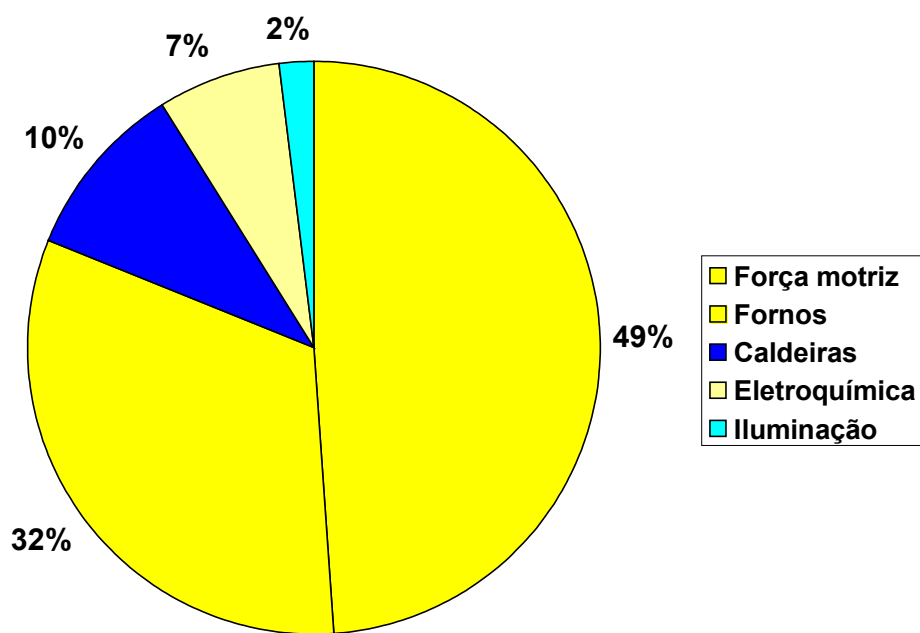
## Perfil de consumo de energia elétrica no Brasil por setor

(Revista Eletricidade Moderna – N. 387 - Junho 2006)



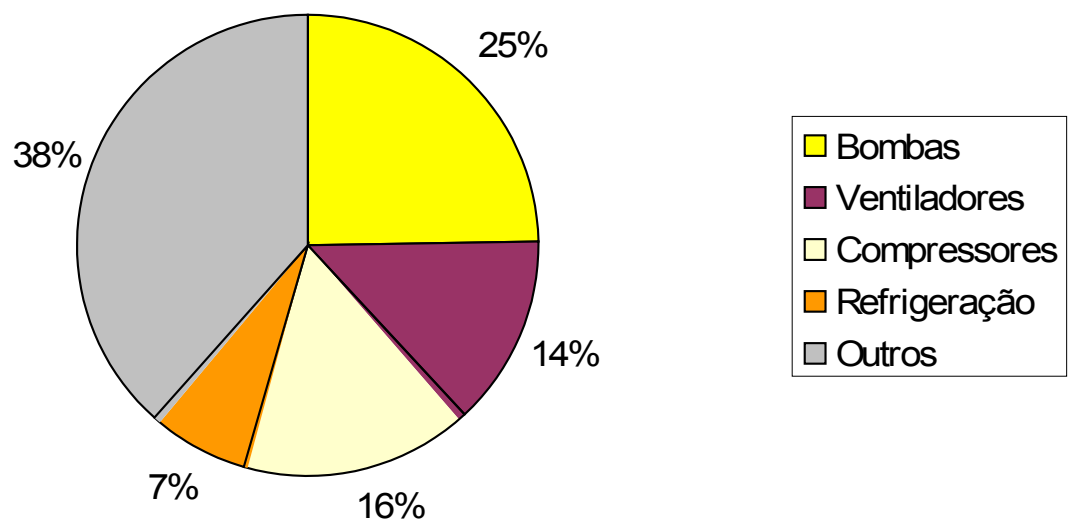
## Distribuição do consumo de energia elétrica no sistema industrial brasileiro

(Revista Eletricidade Moderna – N. 387 - Junho 2006)



## Distribuição do consumo de sistemas fluidomecânicos em relação ao consumo motriz total

(Revista Eletricidade Moderna – N. 387 - Junho 2006)



os benefícios da conservação de recursos naturais, redução da poluição atmosférica, e competitividade devido à economia. Esses benefícios são obtidos com investimento de capital inicial que pode ser pago em curto período de tempo. O tempo de pagamento depende das taxas de juros com a qual o dinheiro é tomado emprestado, economia anual de energia e depreciação e amortização do equipamento. Para um sistema de bombeamento de grande capacidade operando com velocidades variáveis estima-se que o tempo de recuperação do capital investido seja da ordem de 3 a 5 anos no presente, enquanto a vida do equipamento é de 20 anos. Isto

corresponde a um período de 15 a 17 anos de operação lucrativa e economia de energia com sistemas de velocidade variável.

## 2. Sistemas de Acionamento de Motores Elétricos

Um sistema moderno de acionamento a velocidade variável possui quatro componentes:

- (i) Máquinas elétricas – C.C. ou C.A.
- (ii) Conversor Estático de Potência – Retificadores, choppers, inversores e cicloconversores
- (iii) Controladores – Ajustando o motor e o conversor de potência para atender as exigências da carga acionada
- (iv) Carga mecânica.

Estes componentes são apresentados esquematicamente na Fig.1. Uma breve descrição dos componentes de sistema é dada a seguir.

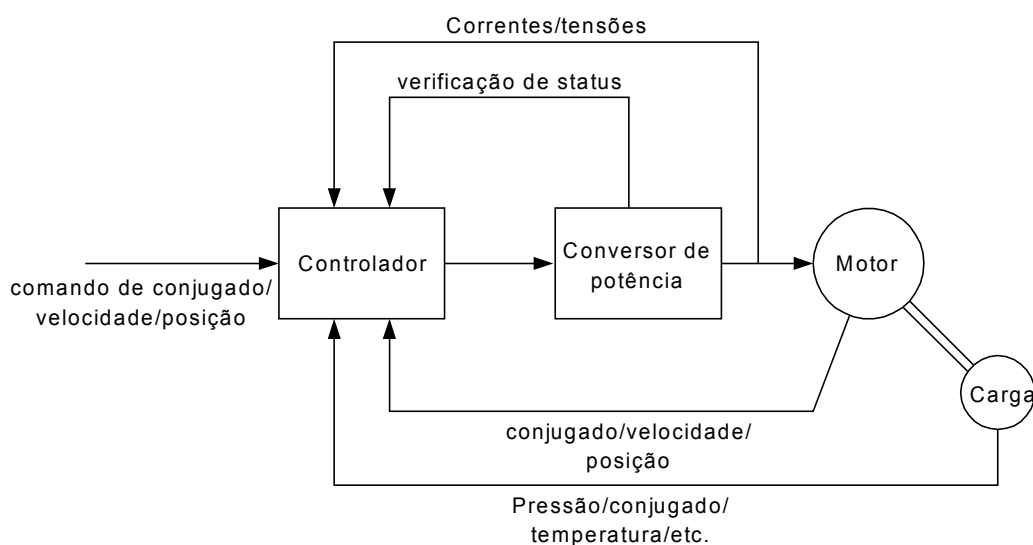


Fig. 1 – Componentes de um sistema de acionamento elétrico moderno

### 2.1 Máquinas elétricas

As máquinas elétricas usadas atualmente para aplicações de controle de velocidade são as seguintes:

- (i) máquinas de corrente contínua – derivação, série, composta, excitação independente;
- (ii) máquinas de corrente alternada – Indução, síncronas de rotor enrolado, síncronas a imã permanente, síncronas a relutância variável;
- (iii) máquinas especiais – máquinas de corrente contínua sem escovas e máquinas a relutância chaveadas, motores de passo.

Todas essas máquinas são comercialmente disponíveis em uma gama de potências que varia de fração de kW até MW, com exceção das máquinas síncronas a imã permanente e as máquinas a relutância chaveadas, que são disponíveis em potências de até 150 kW. As últimas são disponíveis em maiores potências mas seriam muito caras do ponto de vista comercial porque requerem projetos dedicados. Um conjunto de fatores influencia na **seleção de uma máquina** para uma aplicação particular

- (i) custo
- (ii) capacidade térmica
- (iii) rendimento
- (iv) perfil de conjugado por velocidade
- (v) capacidade de aceleração
- (vi) Densidade de potência, volume do motor
- (vii) Oscilações de conjugado, e conjugados “cogging”
- (viii) Disponibilidade de reserva e fontes secundárias
- (ix) Robustez
- (x) Adequabilidade para ambientes perigosos
- (xi) Capacidade de pico de conjugado.

Esses fatores não são uniformemente relevantes para qualquer aplicação em particular. Alguns podem ter precedência sobre outros. Por exemplo, em uma aplicação de servo-posicionador o pico de conjugado e a capacidade térmica juntamente com os conjugados oscilantes são características preponderantes a se considerar. Elevada capacidade de pico de conjugado diminui os tempos de aceleração/desaceleração, pequenos conjugados de alinhamento e pequenas oscilações de conjugado ajudam a manter a repetibilidade de posicionamento, e uma elevada capacidade térmica leva a uma vida mais longa do motor bem como maior capacidade de carga.

*Cálculo do rendimento* – O interesse em economia de energia é um dos maiores fatores motivacionais para a introdução de acionamentos com velocidades variáveis em algumas indústrias. Portanto, é importante realizar o cálculo do rendimento para os motores elétricos sempre que operação com velocidades variáveis seja considerada. Uma breve introdução do cálculo de rendimento para motores elétricos é apresentada a seguir.

A potência, tensão e velocidade dados na placa do motor são os seus valores nominais, isto é, para operação contínua em regime permanente. Observe que a potência de placa corresponde à potência no eixo do motor. O conjugado no eixo ou conjugado de saída,  $T_0$ , da máquina é calculado como

$$T_0 = \frac{\text{Potência, W}}{\text{velocidade, rad/s}} = \frac{P_0 \cdot 745,6}{\omega_m}, \text{ Nm.}$$

$$\omega_m = \frac{2\pi N_r}{60}, \text{ rad/s}$$

onde  $P_0$  é a potência de saída em HP,  $N_r$  é a velocidade em rpm, e  $\omega_m$  é a velocidade em rad/s.

O conjugado interno,  $T_e$ , do motor é igual à soma do conjugado no eixo mais as perdas de conjugado no eixo a saber, atrito e ventilação. Atrito ocorre nos rolamentos (normalmente proporcional à velocidade) e ventilação pelos efeitos do ar circulante nas partes girantes (proporcional ao quadrado da velocidade). Seja a potência perdida indicada por  $P_{sh}$  e a perda de conjugado indicada por  $T_{l0}$ . O conjugado interno então é dado por

$$T_e = T_0 + T_{l0}, \text{ Nm}$$

Esse conjugado interno é conhecido como conjugado de entreferro ou conjugado eletromagnético, porque é o conjugado desenvolvido pelo motor a partir da potência que atravessa o entreferro vinda da armadura (normalmente o estator em máquinas ca e o rotor em máquinas cc) e é conhecida como potência de entreferro,  $P_a$ . Em geral é obtida a partir da potência de entrada da armadura,  $P_i$ , e de suas perdas,  $P_l$ , devido à resistência da armadura (conhecida como perdas joule), perdas no núcleo, e perdas de difícil identificação (conhecidas como "stray losses"), que variam de 0,5 a 1% da potência de saída.

Observe que o conjugado de entreferro é calculado a partir da potência de entreferro por

$$T_e = \frac{P_a}{\omega_m}, \text{ Nm}$$

O rendimento é então calculado como

$$\eta = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}} = \frac{P_0}{P_i}$$

Para motores particulares os detalhes dos cálculos são apresentados nos capítulos respectivos. Observe que o conjugado de saída é igual ao



conjugado de carga,  $T_l$ . Se as perdas por atrito e ventilação são desprezadas então o conjugado eletromagnético é igual ao conjugado de carga.

**Especificações do motor.** As características típicas de velocidade e conjugado de um trem elétrico para um ciclo de operação são apresentadas na figura 2. Observa-se que tanto velocidade como conjugado não são constantes, ambos variam. Tais cargas são normalmente encontradas na prática. A seleção do conjugado e potência nominal do motor nesses casos não é direta como no caso de acionamentos com velocidades constantes. No caso de carga variável o conjugado e potência do motor são selecionados com base no **conjugado e potência efetivos**. O conjugado é calculado a partir do perfil de conjugado da carga, tal como aquele mostrado na figura. Por exemplo o conjugado eletromagnético efetivo para um ciclo de carga como o mostrado na figura, descontando o período de repouso, é obtido como

$$T_e = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

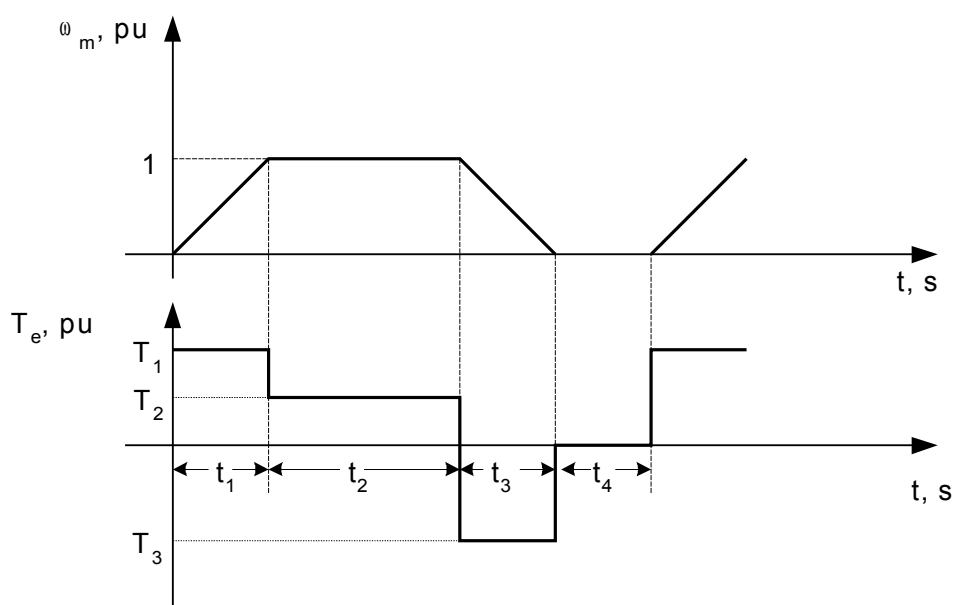


Fig. 2 – Perfil de conjugado e velocidade de um determinado acionamento

De forma semelhante, a potência efetiva é determinada por sua história no tempo. Esses cálculos levam aos conjugados e potência efetivos. Garantir que os conjugado e potência de saída efetivos estejam bem abaixo dos valores nominais da máquina não garante que a máquina opere dentro de seus limites térmicos. A **especificação térmica** influencia na operação do motor. O capacidade térmica é dependente das perdas do motor, e estas

por sua vez, são preponderantemente influenciadas pela corrente efetiva no caso de máquinas de corrente contínua, mas também por fatores adicionais tais como frequência do estator e tensão aplicada no caso de máquinas de corrente alternada. Para determinar se a máquina está operando dentro dos limites térmicos permissíveis determinados pelas perdas nominais, é necessário **calcular as perdas efetivas** na máquina dentro de um ciclo de carga. Se as perdas efetivas forem mais baixas que as perdas nominais, então a máquina está adequada para operação do ponto de vista térmico.

## **Conversores de Potência.**

Os conversores de potência acionando as máquinas elétricas são

- (i) Retificadores controlados: São alimentados a partir de redes monofásicas ou trifásicas e provêem uma tensão de saída c.c. para controle de máquinas de corrente contínua ou entrada para inversores no caso de máquinas de corrente alternada.
- (ii) Inversores: Fornecem tensões e correntes alternadas variáveis em frequência e fase para controle de máquinas de corrente alternada. A entrada c.c. para alimentação dos inversores é derivada de baterias como no caso de veículos elétricos, ou de uma fonte c.a. retificada com retificadores a diodo ou controlados. Devido ao barramento de c.c. intermediário, conhecido como link, entre a fonte de suprimento e o inversor, não existe limitação na frequência de saída possível do inversor a não ser aquelas impostas pelos dispositivos semicondutores utilizados no inversor.
- (iii) Cicloconversores: Fornecem uma conversão direta entre a frequência fixa das tensões e correntes da rede de suprimento para tensões/correntes variáveis e com frequências variáveis para o controle de máquinas de corrente alternada. A frequência de saída é usualmente limitada entre 33 e 50% da frequência da entrada, para evitar distorções das formas de onda, e portanto eles são usados somente em acionamentos de motores de baixa velocidade mas de elevadas potências.
- (iv) Estes conversores de potência podem ser tratados como caixas pretas com determinadas funções de transferência. Neste caso, os conversores são simbolicamente representados como mostrado na Fig. 3. As funções de transferência são derivadas para vários conversores neste texto.

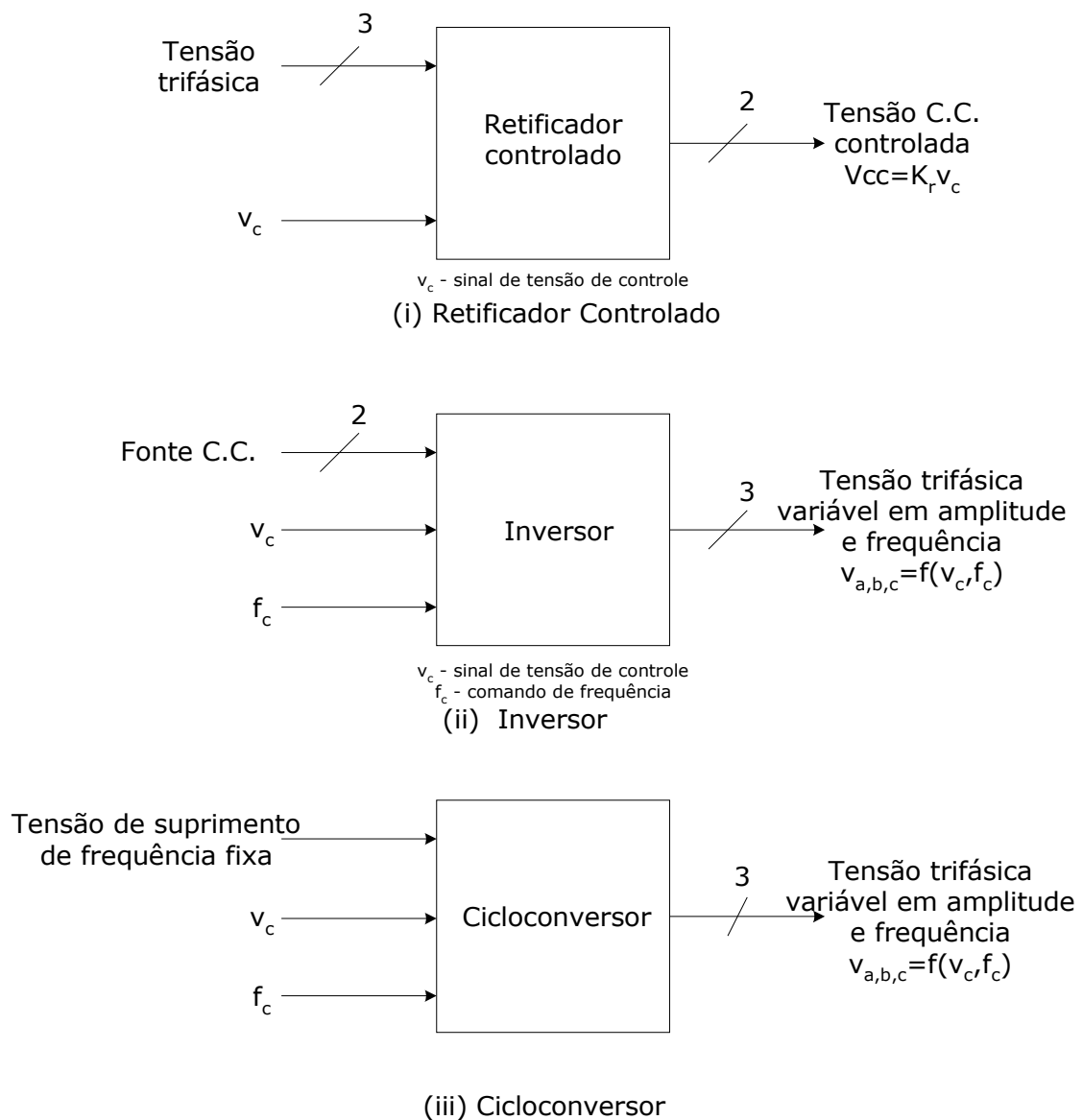


Fig. 3 – Representação esquemática dos conversores de potência utilizados em acionamentos elétricos

## Controladores

Os controladores contêm as leis de controle que governam as características da carga e do motor e a sua interação. Para casar a carga e o motor a partir do conversor de potência, o controlador controla a entrada para o conversor de potência. Muitas estratégias de controle tem sido formuladas para diversos acionamentos e os controladores implementam os seus algoritmos.

Por exemplo, o controle de fluxo e conjugado requer a coordenação das correntes de campo e de armadura em um motor de corrente contínua com excitação independente. No caso de um motor de indução, o mesmo é implementado coordenando as três correntes de estator, enquanto o controle do motor síncrono requer o controle das três correntes de estator e da corrente de campo. As leis que governam os controladores são complexas e formam o núcleo deste texto.

O diagrama de um controlador é mostrado na figura 4. Sua entrada consiste do seguinte

- (i) Comandos de conjugado, fluxo, e/ou posição
- (ii) A sua taxa de variação, para facilitar partidas suaves e preservar a integridade mecânica das cargas
- (iii) O conjugado medido, fluxo, velocidade, e/ou posição para controle realimentado
- (iv) Valores limitantes para correntes, conjugado, aceleração, etc.
- (v) Realimentação de temperatura e correntes instantâneas e/ou tensões no motor e/ou conversor
- (vi) As constantes nos controladores de velocidade e posição, tais como ganhos proporcional, integral e diferencial.

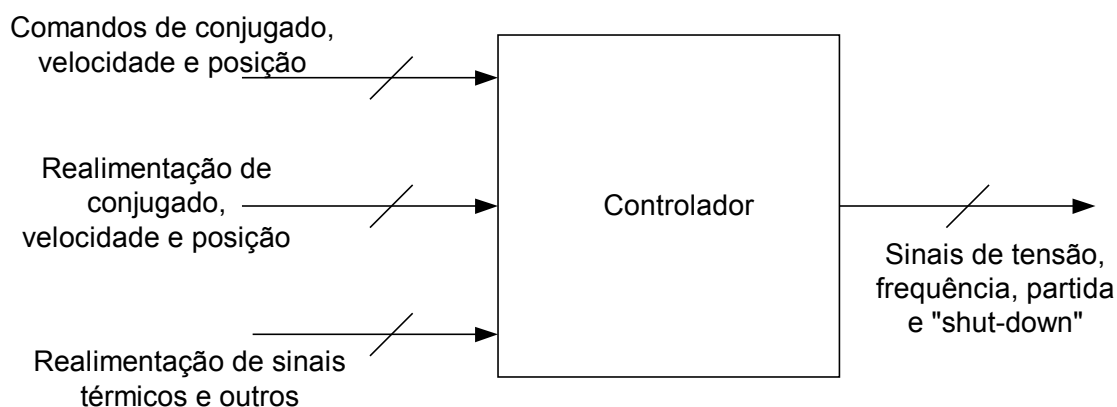


Fig. 4 – Esquema do controlador

A saída do controlador determina o sinal de controle para a magnitude de tensão, "vc" no caso de inversores, e o sinal de controle para determinação da frequência, "fc". Essas funções podem ser combinadas, e somente os sinais finais de gate disponibilizados para acionar o conversor. Eles podem também desempenhar função de proteção e outras funções de monitoramento bem como de emergência tais como perda repentina de campo ou falha no suprimento de potência.

Os controladores são implementados com circuitos analógicos e circuitos integrados. A tendência atual é a de utilizar microprocessadores,

microcontroladores e processadores digitais de sinais (DSPs), VLSI, e circuitos especialmente produzidos para aplicações determinadas conhecidos como CIs para aplicações específicas (ASICs) que englobam as funções do controlador. A capacidade de realizar computação em tempo real desses controladores permite que algoritmos complexos sejam implementados. Também, esses circuitos propiciam o uso de software e controle remoto, portanto abrindo caminho para sistemas integrados de manufatura e elevado grau de automação.

## Cargas Mecânicas

O motor aciona cargas que possuem características determinadas de conjugado por velocidade. Em geral, o conjugado de carga é uma função da velocidade e pode ser escrito como  $T_l \propto \omega_m^x$  onde  $x$  pode ser um inteiro ou uma fração. Por exemplo, o conjugado de carga é proporcional à velocidade em sistemas de fricção tais como um alimentador a correia. Em ventiladores e bombas, o conjugado de carga é proporcional ao quadrado da velocidade.

Em alguns casos, o motor é conectado à carga por meio de um conjunto de engrenagens. As engrenagens possuem uma relação de dentes e podem ser tratadas como transformadores de conjugado. A conexão motor-engrenagem-carga é mostrada esquematicamente na Fig. 5. As engrenagens são usadas principalmente para amplificar o conjugado no lado da carga que opera em velocidade mais baixa que a do motor. O motor é projetado para girar em altas velocidades porque quanto mais alta a velocidade, menor é o volume e tamanho do motor. Mas a maioria dos movimentos de interesse ocorrem em baixas velocidades, portanto a necessidade de engrenagens na conexão motor-carga. As engrenagens podem ser modeladas a partir dos seguintes fatos [5]:

- (i) A potência manuseada pelas engrenagens é a mesma dos dois lados.
- (ii) A velocidade em cada lado é inversamente proporcional ao número de dentes.

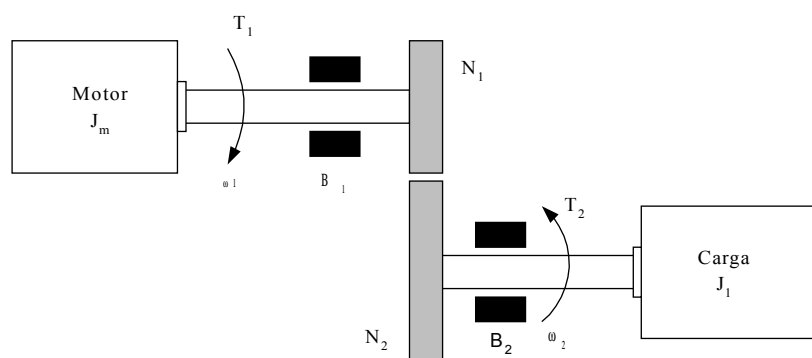


Fig. 5 – Sistema de engrenagens que amplifica o conjugado e reduz a velocidade para acionamento da carga

Portanto  $T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2 \quad \rightarrow \quad T_2 = T_1 \frac{\omega_1}{\omega_2},$

e  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \rightarrow \quad T_2 = \frac{N_2}{N_1} T_1$

Observe que esses resultados assumem perdas nulas no conjunto de engrenagens, e que para maior precisão as perdas devem ser modeladas. Nesse caso, a diferença entre  $T_1$  e o conjugado de perdas terão que ser multiplicados pela relação de transformação  $N_2/N_1$ , para obter o conjugado de saída na engrenagem  $T_2$ . Semelhante a transformadores, as constantes da carga refletidas para o lado do motor são escritas

$$J_1(\text{refletido}) = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 J_1; \quad B_2(\text{refletido}) = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 B_2$$

A relação entre  $N_1$  e  $N_2$  é normalmente muito pequena, assim o momento de inércia e o coeficiente de atrito refletidos são desprezíveis em muitos casos.

Portanto, as constantes mecânicas resultantes são

$$J = J_m + \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 J_1 \quad B = B_1 + \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 B_2$$

A equação de conjugados da combinação motor-carga é descrita por

$$J \frac{d\omega_1}{dt} + B\omega_1 = T_1 - T_2(\text{refletido}) = T_1 - \left( \frac{N_1}{N_2} \right) T_2$$

É muito importante salientar que em regime permanente o conjugado fornecido pelo motor é igual ao conjugado resistente da carga. Se houver desequilíbrio de conjugado o sistema vai acelerar ou desacelerar procurando um novo ponto de equilíbrio. Para modelar o acionamento, é essencial ter um modelo físico de sua carga, com as características de atrito, inércia, perfil de conjugado por velocidade, engrenagens e folga das engrenagens (backlash). Modelagem de sistemas físicos pode ser encontrada em diversas referências.

## **Fundamentos do Acionamento Elétrico – Operação em quatro quadrantes**

Muitas aplicações requerem partidas e paradas controladas dos motores, tais como aplicações em robótica. Considere que a máquina está operando em regime permanente com velocidade  $\omega_m$ , e é desejável trazer a velocidade a zero. Existem duas maneiras de se fazer isso:

1. Cortar a fonte de suprimento e deixar que a velocidade do rotor caia a zero naturalmente,
2. A máquina pode ser colocada em operação no modo gerador, de forma que a energia cinética das massas girantes possa ser efetivamente transferida para a fonte. Isto economiza energia e traz a velocidade da máquina rapidamente para zero.

Cortar a fonte de suprimento leva a uma resposta de velocidade sem controle; o segundo método permite o freio controlado da máquina. Por exemplo em um motor de corrente contínua a imã permanente ou de excitação independente tudo o que precisa ser feito para freiar é inverter o sentido de corrente de armadura. Primeiro, a corrente drenada da fonte durante a operação motora deve ser levada a zero; então, a corrente deve ser aplicada na direção oposta. Para zerar a corrente faz-se a tensão aplicada ao enrolamento igual a zero, ou negativa. Após isso, a corrente é aplicada no sentido oposto fazendo com que a fonte de tensão aplique uma tensão inferior à força eletromotriz do motor. Observe que a medida que a velocidade reduz se torna necessário reduzir a tensão da fonte de suprimento para que a corrente permaneça constante. Potência flui da armadura da máquina em direção à fonte. Esse modo de operação recebe o nome de freio regenerativo, ou regeneração. A frenagem é obtida por meio da regeneração, o que implica que conjugado negativo é gerado na máquina, em direção contrária ao conjugado motor.

Em geral o conjugado da máquina vai atuar a favor (motor) ou em sentido contrário ao da rotação (gerador). Portanto existem quatro quadrantes de operação possíveis no diagrama de conjugado por velocidade conforme mostrado na Fig. 6 . Os quadrantes são numerados de 1 a 4 na forma convencional.

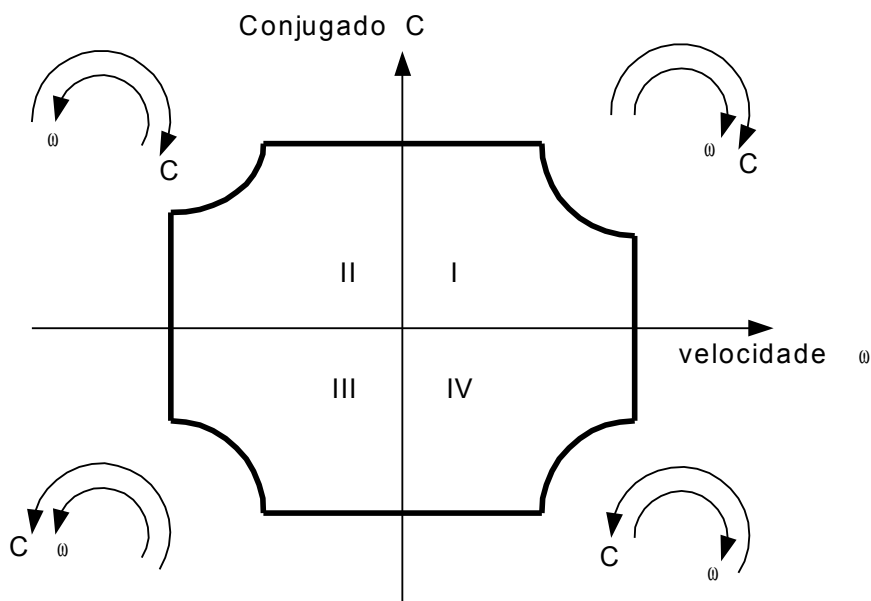


Fig. 6 – Os quatro quadrantes possíveis para uma acionamento.

No primeiro quadrante conjugado e velocidade são ambos positivos, indicando operação motora em um sentido de rotação (direto). No terceiro quadrante, conjugado e velocidade são ambos negativos, indicando operação como motor na direção de rotação invertida. No segundo e quarto quadrantes, conjugado e velocidade possuem sinais opostos indicando que a máquina está operando como gerador ou em frenagem regenerativa. Um acionamento de um quadrante é adequado para operação somente no primeiro e/ou terceiro quadrantes. Um sistema de acionamento a dois quadrantes é capaz de acionar o motor ou provocar regeneração em apenas uma direção de rotação, enquanto um acionamento a quatro quadrantes pode operar como motor ou em frenagem em qualquer dos dois sentidos de rotação.

A Fig. 7 a seguir mostra a trajetória de um acionamento que opera nos quatro quadrantes. Inicialmente o sistema se encontra operando no ponto  $P_1$ , com velocidade  $\omega_1$  e conjugado  $C_1$ . Ao receber o comando para sair de  $P_1$  e ir para  $Q_1$  o sistema de controle inverte o conjugado levando o acionamento a operar no modo regenerativo. Com o conjugado do motor invertido em relação ao sentido de rotação a velocidade cai rapidamente a zero. Mantendo o conjugado no valor máximo negativo permitido acelera o motor no sentido de rotação oposto, agora indicando operação motora no terceiro quadrante. Ao atingir a velocidade determinada o sistema de controle ajusta o conjugado para o valor de referência e o acionamento passa a operar em  $Q_1$  em regime permanente.



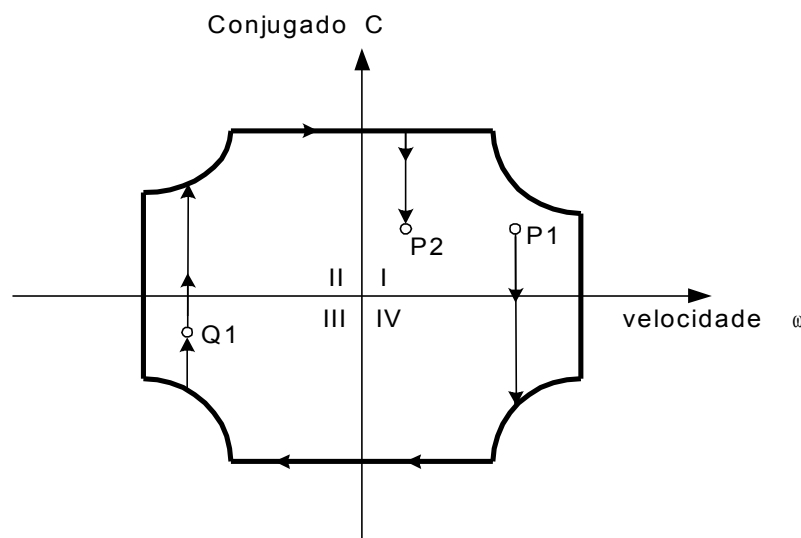


Fig. 7 - Acionamento com ponto de operação inicial em P1, depois vai a Q1 e na sequência vai a P2.

Novamente, ao receber o sinal de comando para operar no ponto  $P_2$  o sistema de controle ajusta as correntes do motor de forma que conjugado positivo (contrário ao sentido de rotação reversa) seja aplicado. Esse conjugado é o máximo valor permissível.

A velocidade segue a trajetória indicada pelas setas, reduzindo a zero sob ação do conjugado. Ao chegar a zero, mantendo-se o conjugado positivo o motor vai acelerar novamente com rotação no sentido positivo até atingir a velocidade desejada. Uma vez alcançada a velocidade o sistema de controle ajusta o conjugado para o valor de referência capaz de manter o sistema operando no ponto  $P_2$ . Observe que no segundo e quarto quadrantes conjugado e velocidade possuem sinais opostos indicando potência negativa, ou seja fluxo de potência do motor para a fonte, ou do motor para um outro elemento consumidor.

A tabela 1 abaixo apresenta um sumário da operação em quatro quadrantes:

| Tabela 1 – Características de operação em quatro quadrantes |           |            |           |                   |
|---|-----------|------------|-----------|-------------------|
| Função  | Quadrante | Velocidade | Conjugado | Potência de Saída |
| Motor sentido direto  | I         | +          | +         | +                 |
| Regeneração sentido direto                                  | IV        | +          | -         | -                 |
| Motor sentido inverso                                       | III       | -          | -         | +                 |
| Regeneração sentido inverso                                 | II        | -          | +         | -                 |