

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CC

* Pedro Urbano B. de Albuquerque

** Carlos Anísio Gomes Bastos

Este trabalho tem como objetivo apresentar como é feito o controle e regulação eletrônica de velocidade em motores de corrente contínua, em especial o de excitação independente. Serão mostrados os principais tipos de controle na aplicação em 2 (dois) e 4 (quatro) quadrantes, isto é, operando como motor ou freio em um ou dois sentido de rotação.

01. INTRODUÇÃO

Os motores C.C. são em geral, muito mais adaptáveis a serviços que necessitem de regulação fina de velocidade em relação aos motores C.A. a partir de uma certa potência, os quais estão associados a um campo girante de velocidade constante, consequentemente serão necessários circuitos eletrônicos bem mais complexos para um controle/regulação de velocidade eficiente. Por conta disso, a adaptabilidade dos motores cc ao controle e regulação em amplas faixas de velocidade e com métodos de implementação através de circuitos relativamente simples são razões que ainda justificam sua grande aplicação em máquinas industriais modernas.

02. REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE MOTORES CC COM EXCITAÇÃO INDEPENDENTE

Para executar regulação neste tipo de motor, devemos levar em consideração três grandezas limite:

- Corrente máxima de armadura que é função

da máxima temperatura suportável pelos enrolamentos do motor;

- Máximo fluxo de excitação que não deve levar em saturação o circuito magnético;
- Tensão nominal da armadura.

Da equação $N = (V_a - I_a R_a) / K\phi$, se vê que a rotação deste tipo de motor pode ser variado seja variando a tensão da armadura como variando a excitação. Mantendo o fluxo no valor nominal a rotação é proporcional a tensão terminal.

Da equação $T = K\phi I_a$ se vê que o conjugado máximo disponível, sendo o fluxo constante, permanece substancialmente constante com a variação de V . Este tipo de regulação sobre a tensão de armadura é chamado de **conjugado** (torque) **constante** e é um dos mais importantes dos controles industriais. Da equação $P = N.T$ podemos ver que a potência disponível no eixo do motor aumenta de maneira diretamente proporcional a rotação do motor.

Se no lugar de variar a tensão da armadura, se varia o fluxo, mantendo constante a tensão V_a , se obtém uma variação da rotação do motor inversamente proporcional a variação do fluxo de excitação o qual depende de V_e .

O torque ao contrário é diretamente proporcional ao fluxo, $T = K\phi I_a$ o qual sendo variável somente para valores abaixo do nominal, terá uma diminuição do torque máximo disponível. A velocidade mais alta é limitada eletricamente pelos efeitos da reação da

* Eng. do NUTEC e Coord. do Curso de Informática Industrial da ETFCe.

** Eng. do NUTEC e Prof. da UNIFOR

armadura sob condições de campo fraco, provocando instabilidade no motor, comutação e torque insatisfatório.

A potência mecânica, como foi visto, é dado pela equação

$$P = T.N \quad \text{Onde:}$$

$$T = K I_a \phi$$

$$N = K \frac{E}{\phi} \quad (1)$$

Logo, podemos tirar que: $P = K_1 \cdot K_2 \cdot E \cdot I_a$ (2) o que mostra que a potência independente do fluxo de excitação por esse motivo a regulação de velocidade pela variação do fluxo é chamada de **potência constante**. Na figura abaixo temos um resumo dos dois tipos de regulação partindo do motor parado até a velocidade máxima.

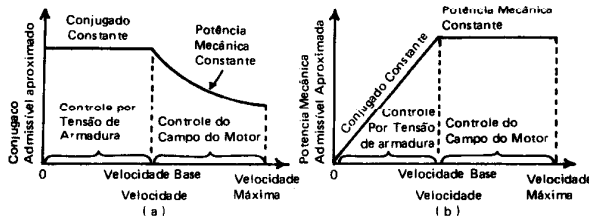


Figura 1

A velocidade base ou nominal pode ser definida como a velocidade na tensão de armadura normal (nominal) e pleno campo de excitação. A curva do conjugado para a variação a potência constante tem o formato mostrado na figura acima devido as seguintes considerações:

- Como foi visto $T = K\phi$ (p/I_a constante).
- Considerando E constante na equação (1) ficará.

$$N = K \frac{1}{\phi}$$

ou do item (a) Teremos

$$T = K \frac{1}{N}$$

Para máquinas convencionais, o limite mais baixo para funcionamento confiável é cerca de 0,1 da velocidade nominal, correspondendo a uma faixa total máxima a mínima de 40:1.

É interessante observar que, como varia a velocidade em função do torque resistente, mantendo constante a tensão de armadura e excitação (ver fig. a seguir).

Da equação ($V_a = E + I_a R_a$) ao aumentar a corrente de armadura, mantendo V constante deve diminuir a força contra eletromotriz, E , pois, ϕ permanece constante, se deve constatar uma diminuição de rotação proporcional a I_a . Por outro lado I_a é ligado ao conjugado pela equação $T = K I_a \phi$, isto é, o aumento de I_a é diretamente proporcional ao aumento do conjugado motor que segue com aumento

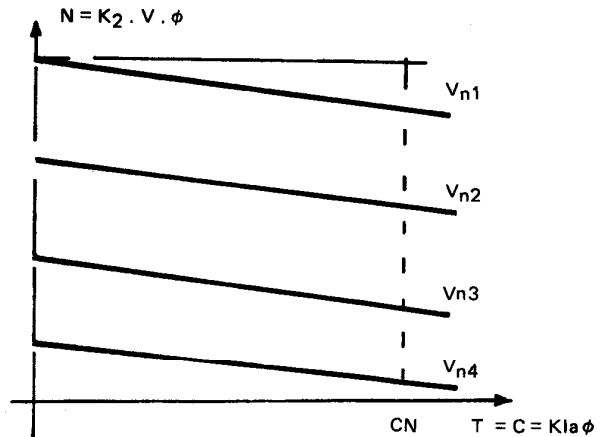


Figura 2

eventual do conjugado resistente. É bom observar que o funcionamento do motor a conjugado constante, devido a excitação ter sido mantida a um valor constante, não significa que o motor fornece conjugado constante, mas que o conjugado disponível é constante de fato se o motor fornecesse conjugado solicitado pela carga não teríamos a possibilidade de atingir o equilíbrio dinâmico e com isso a possibilidade da rotação permanecer constante no valor desejado. Obviamente essa observação não vale durante a fase de partida ou no momento de variação brusca da carga.

2.1. Partida

Quando o motor está parado a f.c.e.m. E é nula, portanto a corrente é limitada somente pela resistência do enrolamento da armadura. É portanto necessário efetuar a partida, a partir de um valor baixo de tensão, fazendo a tensão de excitação constante e igual a nominal.

2.2. Freio Dinâmico

Para se freiar um motor, basta ligar um resistor em paralelo aos terminais da armadura depois de haver retirado a tensão de alimentação e mantendo o motor excitado. Neste modo a energia cinética é transformada em calor por efeito joule o que faz deste método simples mas pouco conveniente. O freio é eficaz somente no início, pois, com a diminuição da velocidade diminui também a f.c.e.m. E . Um freio mais racional é possível se o motor recebe a alimentação através de um conversor C.A - C.C. por meio de uma ponte retificadora totalmente controlada em antiparalelo como mostra figura a seguir.

A ponte retificadora totalmente controlada e por sua natureza regenerativa, no sentido que o fluxo de potência pode ser bidirecional, isto é, da rede a carga e da carga para a rede, todavia a corrente só pode ser unidirecional devido a presença dos diodos. Caso o efeito regenerativo não seja desejado, pode-se eliminá-lo colocando um diodo livre (de rotor no ou free-wheeling) em paralelo com o motor polarizado inversamente.

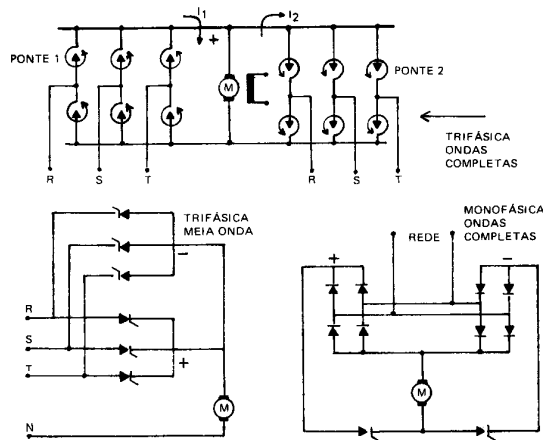


Figura 3

Um motor elétrico pode ser freiado só invertendo o sentido do conjugado gerado, isto é da corrente de armadura e é portanto em grau de restituir a energia a rede quando está alimentado por um par de ponte totalmente controlada em ligação antiparalelo, a qual pode fornecer corrente bidirecional e portanto, conjugado motriz como também conjugado freiante.

2.3. Inversão do Sentido de Rotação

Para inverter o sentido de rotação é necessário inverter o seu torque motriz. É então suficiente inverter o fluxo de excitação ou a tensão de armadura. Se um motor está girando a uma certa velocidade, não é possível inverter o sentido de rotação brusca-

mente, através da inversão do fluxo de excitação por dois motivos:

- Primeiro a inversão de E fará com que circule uma corrente de valor muito alto que produz um efeito desastroso nos enrolamentos da armadura como podemos ver na equação a seguir.

$$I_a = (V_\mu + E) / R_a$$

- Acontecerá uma violenta solitação mecânica no eixo do motor. Por outro lado se a inversão do sentido de rotação for por meio da corrente de armadura, acontecerá problemas análogos aos precedentes, além da dificuldade de interromper em modo brusco correntes de valores elevados em circuitos indutivos. Toda essa operação vem grandemente facilitada e desenvolvida rapidamente se o controle também é feito por uma ponte totalmente controlada.

2.4. Funcionamento do Motor em Dois Quadrantes

Motores utilizados na tração de veículos giram sempre no mesmo sentido. Neste caso seria interessante que o motor pudesse fornecer tanto conjugado motriz como freiante durante a tração o fluxo de potência vai do circuito de alimentação para o motor, enquanto que durante o freio vai no sentido oposto restituindo a energia. A figura a seguir mostra um gráfico com as características velocidade X conjugado (Kla).

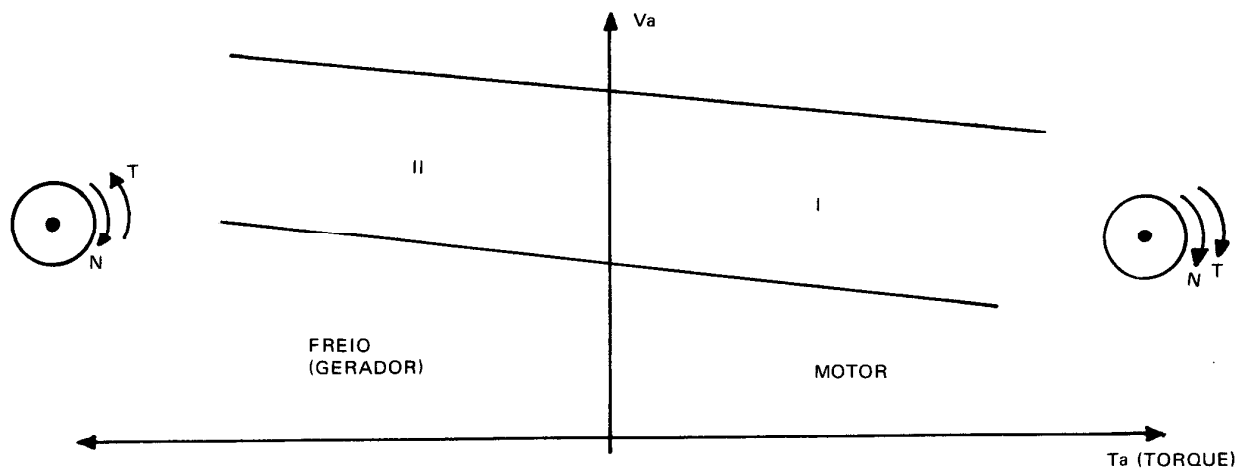


Figura 4

No primeiro quadrante $E < V$ e no segundo $E > V$ daí a inversão da I_a . Nos dois quadrantes não se vê a possibilidade de inverter o sentido de rotação do motor. Devido, certamente pela limitação do circuito de controle que só permite agir sobre a amplitude da tensão de armadura e não sua polaridade.

Outro caso interessante de funcionamento sobre dois quadrantes, I e IV, é representado pelo funcionamento de um guindaste que deve produzir conjugado unidirecional nos dois sentidos, isto é, deve se com-

portar como motor quando elevar uma carga, e de freio no sentido contrário.

Para esse último caso (guindaste), o circuito de alimentação poderia ser utilizado o mostrado a seguir.

2.5. Funcionamento do Motor em Quatro Quadrantes

O controle em quatro quadrantes pode ser obtido por meio de duas pontes totalmente controlada em

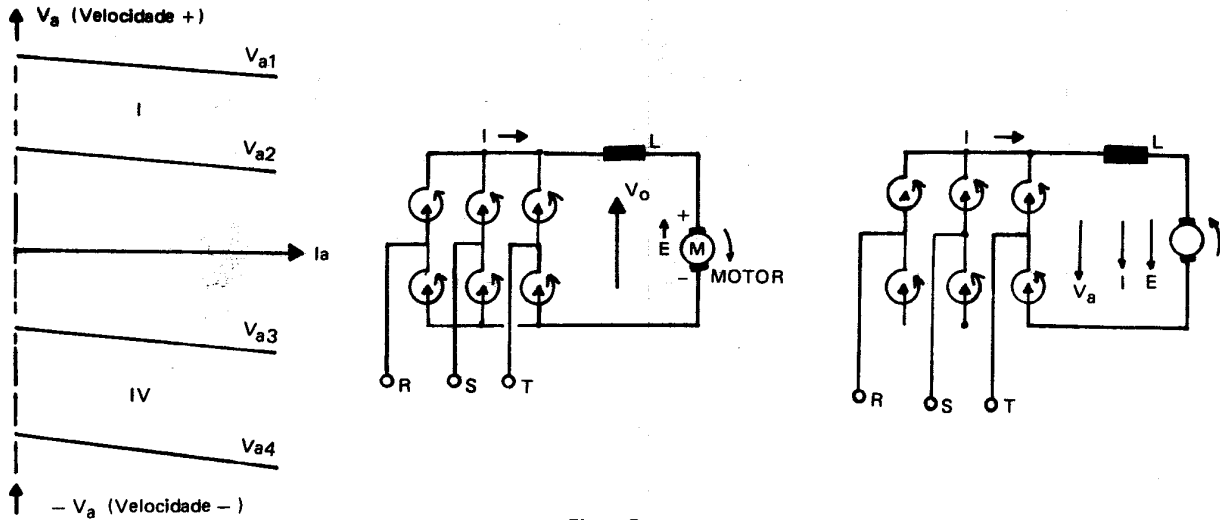


Figura 5

antiparalelo como já foi mostrada anteriormente. Os quatro quadrantes são mostrados a seguir. O funcionamento como motor acontece nos quadrantes I e III e como gerador nos quadrantes II e IV. A ponte 1 opera nos quadrantes I e IV e a ponte 2 em II e III. Invertendo a excitação teremos o contrário (Ver fig. 13).

A corrente circula em qualquer ponte como indicado na figura. O funcionamento nos outros quadrantes permite atingir a máxima velocidade em um sentido e a máxima no sentido inverso. O freio regenerativo permite a rápida passagem de uma velocidade a outra.

A figura a seguir mostra a curva velocidade X conjugado para o funcionamento de um motor em quatro quadrantes em diferentes tensões de armadura.

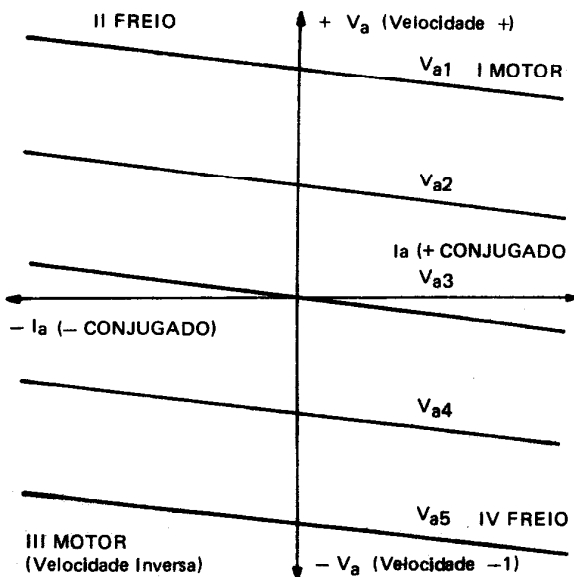


Figura 6

03. MEDIDA DE VELOCIDADE NO CONTROLE DE MOTORES CC

Devido ao uso intensivo de motores elétricos de corrente contínua nas máquinas industriais, o problema de medida da velocidade angular para os controladores, torna-se de grande importância. Na figura abaixo é mostrado através de um diagrama de blocos um exemplo típico de um controle automático em malha fechada.

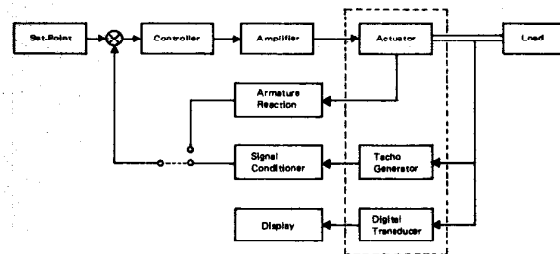


Figura 7

A seguir estudaremos os métodos mais utilizados para medida de velocidade para aplicação em controle.

3.1. Taco-Gerador (Dínamo Taquimétrico)

Este dispositivo normalmente é utilizado para duas aplicações fundamentais: Transdutor de medida e elemento de compensação e estabilização em sistemas de regulação de posição.

Em princípio, um taco-gerador pode ser representado pelo esquema da figura a seguir...

O campo magnético é obtido por meio de ímã permanente do tipo U, cujos pólos encontram-se dispostos nas faces. Para entender o funcionamento, considere uma única espira girando a uma velocidade

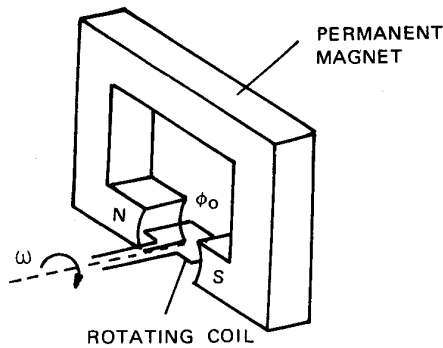


Figura 8

angular w . Esta espira é influenciada por um fluxo variável de acordo com a relação:

$$\phi = \phi_0 \cdot \cos(wt)$$

logo, a tensão nos terminais da espira é:

$$e = -d\phi/dt = \phi_0 \cdot \sin(wt)$$

cujo valor máximo é proporcional a velocidade angular. Na realidade o taco-gerador consiste de um estator no qual está inserido um ímã permanente e de um rotor no qual são enrolados N espiras, espaçadas entre elas de um ângulo de $2\pi/N$. As N espiras são conectadas a um coletor a lâminas (lâminas comutadoras) e através de duas escovas se tem disponível a tensão induzida.

Sobreposta a componente contínua proporcional a w , se encontra uma componente alternada cujo harmônico fundamental tem frequência proporcional a Nw , e amplitude inversamente proporcional a N . Esta componente alternada constitui um erro chamado de "ripple" (ondulação), e é muito pequeno em relação a tensão de saída.

Devido a comutação, impulsos de frequência relativamente superior a componente alternada, são sobrepostos a tensão induzida. Recorrendo-se a um filtro passa-baixo é possível eliminar este ruído da comutação.

Além dos problemas já apontados para este tipo de transdutor, podemos relacionar os seguintes:

- * Presença das escovas (contato deslizante) que limita fortemente a sua confiabilidade e aumenta a manutenção;
- * Baixa linearidade: $> 2\%$;
- * Elevada inércia e atrito mecânico.

O parâmetro fundamental que caracteriza um taco-gerador e constante taquimétrica (K_t), também chamado de gradiente taquimétrico ou sensibilidade, que exprime a relação entre a tensão de saída nos seus terminais e a velocidade de rotação. É expressa pela relação:

$$K_t = E/w$$

Um valor típico para K_t em taco-gerador e comercial é de $0,06V/rpm$ para uma velocidade máxima

de $10.000rpm$, corrente máxima de $250mA$ e resistência de carga mínima de 500 Ohms .

3.2. Transdutor Digital de Velocidade

São denominados desta forma, aqueles transdutores que fornecem uma saída impulsiva variável com a velocidade. Esses impulsos são normalmente enviados a instrumentos contadores e, se a contagem é feita de forma oportuna, o contador pode fornecer diretamente a velocidade em rpm.

Entre os transdutores digitais de velocidade mais populares, temos os fotoelétricos que podem ser de disco furado ou por reflexão. No primeiro caso, consta de um disco onde na sua periferia são feitos os furos, o qual gira solidamente ligado eixo que se quer medir a rotação (figura abaixo). A rotação do disco interrompe o feixe de luz que atinge o elemento fotosensível no qual se obtém um pulso correspondente a cada furo.

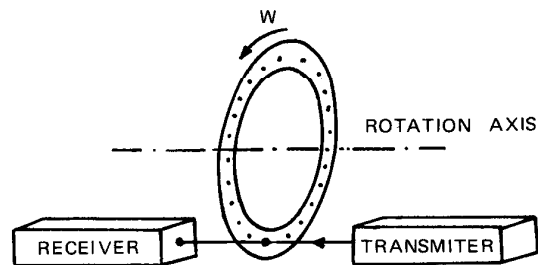


Figura 9

Para aumentar a precisão do sistema, em especial em baixas rotações, é necessário incrementar o número de furos.

O transdutor fotoelétrico a reflexão, no lugar de usar um transmissor e um receptor separados, usa transmissor e receptor em um único encapsulamento. No lugar do disco furado se emprega um disco com traços que refletem e outros opacos. Encontrando uma superfície refletora, a luz transmitida do transmissor é refletida para o receptor. A vantagem deste sistema está no fato que não é necessário dispor de um disco especial, mas é suficiente aplicar sobre a parte em movimento do taco-refletor. O problema dos transdutores fotoelétricos consiste em fornecer um sinal diretamente utilizável nas regulações automáticas (por exemplo em malha fechada) que normalmente (atualmente em grande maioria) são do tipo analógicas. Neste caso é necessário converter o sinal de digital para analógico através de um conversor A/D ou frequência/tensão.

Outro tipo de transdutor digital de velocidade é aquele que utiliza sensores indutivos de aproximação em associação com discos metálicos com furos distribuídos na sua periferia ou discos não metálicos com pequenas circunferências metálicas coladas a sua periferia.

3.3. Bobina Piloto/Alternador Taquimétrico

Consiste de um ímã permanente, acoplado diretamente ao eixo do motor que se quer medir a rotação, imerso em uma bobina.

Outro alternador taquimétrico típico é o mostrado na figura a seguir:

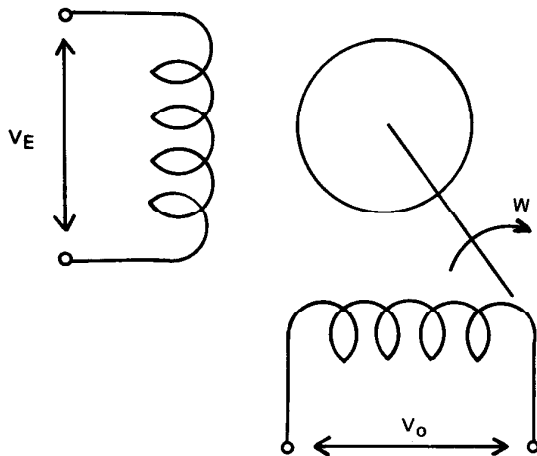


Figura 10

Nesta configuração (semelhante a de um motor bifásico) o estator apresenta dois enrolamentos cujos eixos são dispostos a 90° e o rotor é do tipo em curto-circuito. Um dos enrolamentos é alimentado por uma tensão alternada ($V_{sen} \omega t$). Quando o motor está parado, o sistema se comporta como um transformador em curto-circuito, devido o eixo do enrolamento de saída está a 90° em relação ao fluxo, logo, não é gerada tensão na saída. Se o motor é colocado em rotação, é gerado nos terminais do enrolamento de saída uma f.e.m. de mesma frequência da tensão

de alimentação e com amplitude que é função da velocidade de rotação do motor.

As características de um alternador taquimétrico típico são:

- * Boa linearidade: < 0,5%
- * Baixa inércia
- * K_t : 0,08V/rpm
- * Resistência estatórica: 80 Ohms
- * Velocidade de rotação de 0 a 20.000rpm

3.4. Reação da Armadura

A velocidade de rotação pode ser medida também sem o uso de um transdutor específico. Se considerarmos a fórmula que fornece a velocidade de um motor CC em função da tensão de armadura V_a , da corrente de armadura I_a , da resistência de armadura R_a e da constante magnética K :

$$N = E/K\phi = (V_a - R_a \cdot I_a)/K\phi$$

Se mantemos $K\phi$ constante (como acontece nas aplicações de regulação de velocidade de motor CC agindo somente sobre a tensão de armadura), para determinar N se deve obter através de um circuito o termo $R_a \cdot I_a$ e subtrair da tensão de armadura V_a . Em geral, é bastante simples realizar um circuito que forneça essa informação, porém, não são encontrados na prática devido suas limitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- C. CONCETTI — A Cupido G. Lotti, **Eletrônica Industrial**.
- R. MIALICH — C. ROSSI, **Eletrônica Industriale, Sistemi e Automazione**.
- A. E. FITZGERALD, C. Kwgsley Jr. — **Alexander Kusk — Máquinas Elétricas**.
- INFORMATIVO TÉCNICO DA SIEMENS — **Controle e acionamento de máquinas de corrente contínua**.