

# DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

FABIANO. ROCHA, S.

DPPG / CEFET-MG  
Belo Horizonte, MG  
fabiano\_elt@yahoo.com.br

**Resumo** - Os motores de corrente contínua possuem aplicações desde o acionamento de cargas mecânicas com elevado torque até em dispositivos domésticos como impressoras. O modelo dessas máquinas são menos complexos em comparação as máquinas de corrente alternada, assim como os dispositivos eletrônicos utilizados no acionamento e os algoritmos de controle. O profundo conhecimento dos parâmetros dos motores garantem modelos mais próximos aos reais e assim sistemas de controle mais eficientes. Este trabalho propõe aplicar o método clássico utilizado em laboratórios, na determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina de corrente contínua através de um sistema eletrônico automatizado, reduzindo assim incertezas nas medidas, tempo de ensaio e custo em um único equipamento.

**Palavras-Chave** – Máquinas elétricas, parâmetros, automação

## AUTOMATIC DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE DIRECT CURRENT MACHINE

**Abstract** - Continuous current engines are applied in several ways, from the activation of high-torque mechanical loads, to domestic assets such as printers. This sort of machinery is less complex in comparison to alternate current machines, as well as the electronic devices used in their activation and their respective control algorithms. A profound knowledge regarding engine parameters guarantees the development of more realistic models and, therefore, more efficient control systems. This articles proposes the application of the classic method, generally used in labs, in order to determine the electrical and mechanical parameters of a continuous current machine through an automatized electronic system, and thus reducing uncertainties regarding measures, rehearsal time and cost in one single piece of equipment.

**Keywords** – Electrical machines, parameters, automation

## NOMENCLATURA

RNA - Rede Neural Artificial.  
C.C. - Corrente Contínua.  
USB - Universal Serial Bus.  
PWM – Pulse Width Modulation.  
ADC – Analog to Digital Converter.

## I. INTRODUÇÃO

Devido a características tais como torque elevado, possibilidade de controle de velocidade sobre uma ampla faixa de valores, portabilidade, desacoplamento total entre velocidade e torque e adaptabilidade a vários tipos de métodos de controle, os motores C.C. (Corrente Contínua) são largamente usados em numerosas aplicações de controle, incluindo manipuladores robóticos, mecanismos de transporte de fitas, acionadores de disco, máquinas-ferramentas e atuadores de servoválvulas (R. C. DORF, 2009). Por isso, um modelo adequado para um possível desenvolvimento de um sistema de controle deve ser obtida. (NAVARRO, 2010).

Problemas de controle envolvendo máquinas elétricas são atualmente objeto de fonte de estudo não somente para a engenharia de controle mas também envolve circuitos elétricos de potência da engenharia elétrica, modelos determinísticos e estocásticos mais fieis no tratamento dos comportamentos não lineares das máquinas elétricas. Modelos mais aproximados aos comportamentos reais dos processos permitem maior eficiência e controlabilidade, a complexidade das equações matemáticas já pode ser superada por dispositivos eletrônicos com maior capacidade de processamento e velocidade de chaveamento, os parâmetros são em geral valores característicos do processo a se controlar.

Ensaio em laboratório são úteis no intuito de determinar os parâmetros da máquina de corrente contínua, contudo, demandam tempo na realização dos experimentos, custo na logística de transporte dos motores submetidos as análises, relatórios pouco precisos tendo em vista a pequena quantidade de dados coletados. Este trabalho tem como objetivo determinar de forma automática e precisa os parâmetros que são utilizados nos modelos de controle da máquina de corrente contínua através de um sistema eletrônico microprocessado, possibilitando analisar os



resultados obtidos em um software computacional, possibilitando a determinação de um conjunto maior de informações da máquina e no projeto de seus controladores.

Na seção II serão abordados outros trabalhos concernentes ao tema, na seção III o desenvolvimento do trabalho bem como a fundamentação teórica aplicada, na seção IV apresentam-se os resultados obtidos e por fim as análises finais e conclusões última seção.

## II. ESTADO DA ARTE

Atualmente métodos avançados como análise espectral e inteligência computacional são utilizados na identificação do modelo das máquinas elétricas. Os algoritmos utilizados nesses métodos tem se demonstrado eficientes se aplicados em sistemas dinâmicos não lineares e com custo computacional relativamente baixo. As redes neurais artificiais podem ser treinadas e se aproximar do comportamento dos sistemas físicos dinâmicos, para o treinamento da RNA o sistema deve ter o seu comportamento previamente conhecido.

O método utilizado por DUMAN, 2010 denominado por *Gravitational Search Algorithm* (2009) ou simplesmente GSA, baseado em um algoritmo *swarm-based* permite calcular os parâmetros do motor C.C. através da lei gravitacional newtoniana e interações entre forças e massa.

O artigo de SAAB, 2001 propõe a utilização de um método estocástico baseado em algoritmo de mínimos quadrados na identificação do parâmetros do motor de corrente contínua utilizando o filtro de Kalman na estimação de variáveis do modelo.

Ainda no contexto das máquinas elétricas, (RODEIRO,2005) apresenta em sua dissertação um algoritmo para detecção automática dos parâmetros de um motor de indução trifásico utilizando análise espectral da corrente e utilizando as suas componentes de frequência estimar a velocidade, escorregamento e resistência.

No método clássico a identificação dos parâmetros do modelo da máquina de corrente contínua é realizado através de ensaios em laboratório utilizando conceitos de física e elétrica, o que o torna um procedimento lento e incluiu a necessidade de equipamentos específicos.

## III. DESENVOLVIMENTO

### A. Modelo do motor C.C.

O modelo dinâmico do motor C.C. será deduzido desprezando os efeitos na queda de tensão nas escovas/comutador e histerese que possuem comportamento não linear. Estas considerações facilitam a construção do modelo e não alteram significativamente as análises em regime permanente.

Outra importante consideração é de que o fluxo no circuito campo da máquina C.C. é constante ou composto por imã permanente. Para todos os efeitos o controle de torque e velocidade será efetuado exclusivamente pelo circuito de armadura.

A expressão do torque desenvolvido pelo motor pode ser escrita pela equação 1.

$$T_m = K_m \phi I_a \quad (1)$$

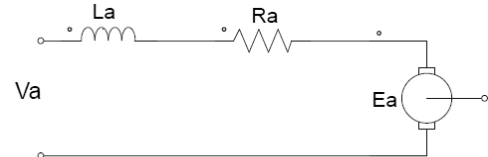
Onde:

$\phi$  é fluxo de campo no entreferro

$K_m$  é a constante do projeto de enrolamento

$I_a$  é a corrente no circuito de armadura

A análise do circuito equivalente do motor C.C. possibilita obter o modelo com as grandezas elétricas.



Aplicando a lei de Kirchoff das tensões na malha do circuito de armadura temos que:

$$V_a - L_a \frac{dI_a}{dt} - R_a I_a - E_a = 0 \quad (2)$$

Onde:

$V_a$  – A tensão nos terminais de armadura

$L_a$  – Indutância de armadura

$R_a$  – Resistência de armadura

$E_a$  – Força contra-eletromotriz gerada proporcionalmente a velocidade do motor.

Aplicando a transformada de Laplace em (2) obtemos uma relação importante entre a tensão aplicada nos terminais de armadura, a corrente de armadura e a tensão gerada como é mostrado em (3).

$$V_a(s) = (L_a s + R_a) I_a(s) + E_a(s) \quad (3)$$

A força contra-eletromotriz gerada é proporcional a velocidade do motor, desta forma  $E_a$  pode ser substituído pela equação 4.

$$E_a(s) = K_b \omega(s) \quad (4)$$

Onde:

$K_b$  – Constante de proporcionalidade

Substituindo (4) em (3) temos a corrente de armadura em termos das grandezas elétricas do motor e a velocidade de rotação.

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \omega(s)}{R_a + L_a s} \quad (5)$$

O torque de carga também pode ser representado pela forma apresentada na equação 6.

$$T_L(s) = Js^2\theta(s) + B(s)\theta(s) = T_m(s) - T_d(s) \quad (6)$$

Onde:

J é a constante de inércia do conjunto do rotor  
B é a constante de atrito viscoso

As grandezas elétricas e mecânicas podem ser relacionadas através do diagrama da figura 1.

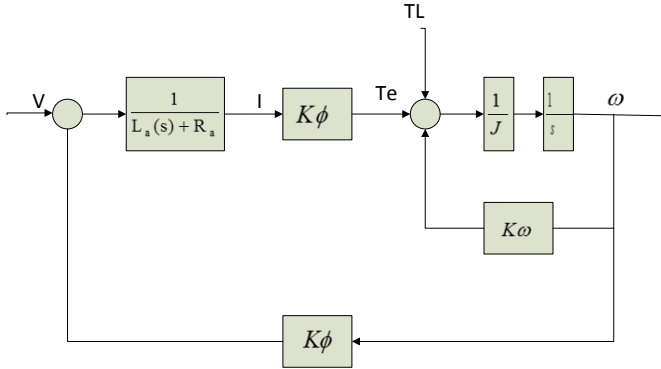


Fig. 1 Diagrama em blocos da máquina C.C.

Na construção de modelos dinâmicos e projeto de controladores é necessário o conhecimento prévio dos parâmetros da máquina que muitas vezes não são disponibilizados pelo fabricante.

## B. Metodologia

Quando se deseja obter dados mais precisos ou quando não existir muitas informações disponibilizadas pelos fabricantes em catálogo ou dados de placa é necessário utilizar de algum método para determiná-los. Será apresentado o ensaio utilizado em laboratório também aplicado ao desenvolvimento do sistema automático.

### 1. Resistência de armadura

Resistência total do circuito de armadura ( $R_a$ ) é determinada pela variação da tensão média  $V_a$ , que é medida juntamente com a corrente média  $I_a$ , a resistência então é calculada pela inclinação da parte linear da característica  $V_a \times I_a$ , traçada a partir dos resultados experimentais:

$$R_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \quad (7)$$

Este procedimento é também chamado de teste em curto circuito, deve ser feito com valores pequenos de  $V_a$ , da ordem de dez por cento ou menos da tensão nominal do motor.

### 2. Coeficiente de atrito

Um método simplificado é realizado medindo-se a potência elétrica absorvida pelo motor, girando a vazio e com

velocidade estabilizada. Desprezando-se as perdas resistivas e magnéticas, pode-se afirmar que a potência elétrica, absorvida da fonte é igual a potência mecânica desenvolvida pelo motor:

$$P_e \cong P_{mec} = T_e \omega_n = T_{mec} \omega_n \quad (8)$$

A equação pode ser escrita como:

$$P_e \cong P_{mec} = P_e - Perdas(\Omega) \quad (9)$$

Onde  $P_e = V_a I_a$  pode ser medido variando-se a tensão de armadura até a tensão nominal e medindo essas duas grandezas para diferentes velocidades, da mesma forma as perdas no circuito de armadura podem ser calculadas por:

$$Perdas(\Omega) = R_a I_a^2 \quad (10)$$

Desta forma o coeficiente de atrito pode ser calculado a partir de:

$$K\omega = \frac{T_e}{\omega} \quad (11)$$

Onde:

$$T_e = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (12)$$

### 3. Constante de inércia

Consiste em acelerar e estabilizar o motor numa velocidade, desligando-se em seguida, a alimentação e observando a queda da velocidade com o tempo. Na expressão (13) temos a relação entre o momento de inércia com a velocidade:

$$J = K\omega\tau \quad (13)$$

O  $\tau$  é definido como a constante de tempo da massa girante, é igual ao intervalo de tempo para o qual a velocidade ou tensão do motor decresce para 37% do valor inicial.

$$\tau = \frac{L_a}{R_a} \quad (14)$$

Determinado  $\tau$  o valor do momento de inércia fica determinado por (13).

### 4. Indutância de armadura

De (14) é possível determinar  $L_a$  já que a resistência de armadura já foi obtida anteriormente.

## 5. Constante de velocidade

Com a equação 4 é possível determinar a tensão gerada excitando o motor C.C. com corrente de campo nominal, e fazer com que ele gire em uma determinada velocidade, por exemplo, a nominal, acionado por outra máquina, que assume o papel de motor, como a proposta deste trabalho está relacionado com a simplicidade do sistema, podemos considerar que a vazão a tensão gerada será a mesma da tensão de alimentação, fazendo várias medições até a tensão nominal de armadura podemos determinar a constante de velocidade por:

$$K\phi = \frac{E_a}{\omega} \quad (15)$$

## IV. SISTEMA AUTOMÁTICO

A proposta do sistema é permitir a determinação dos parâmetros da máquina C.C. de forma automática e de baixo custo, onde as informações e resultados serão apresentados em um software supervisor conectado ao sistema por meio de uma comunicação USB. O projeto tem a característica de eliminar a necessidade do ensaio da máquina dentro de um laboratório especializado evitando dispendere horas de trabalho nos ensaios já abordados.

A figura 2 apresenta o diagrama em blocos do sistema proposto.

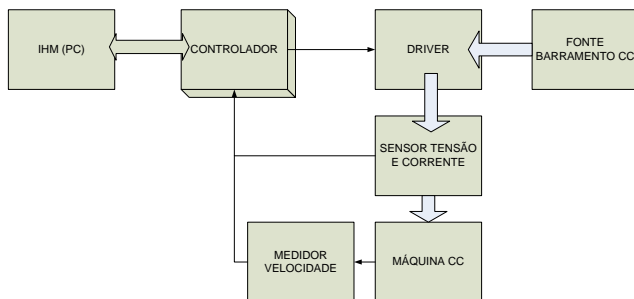


Fig. 2 Diagrama em blocos do sistema automático

O diagrama eletrônico completo é apresentado na figura 3, como dispositivo controlador é utilizado o microcontrolador da MicroChip PIC18F4450 que possui boas características no desenvolvimento deste trabalho, internamente possui uma porta USB que permite a troca de dados entre o sistema e um microcomputador onde estará instalado o software supervisor, possui conversores analógico digital com resolução de até 12 bits que serão utilizados na medição da corrente e tensão do motor C.C., módulo PWM para variar a tensão aplicada no motor, além de 16kbyte de memória para código do programa.

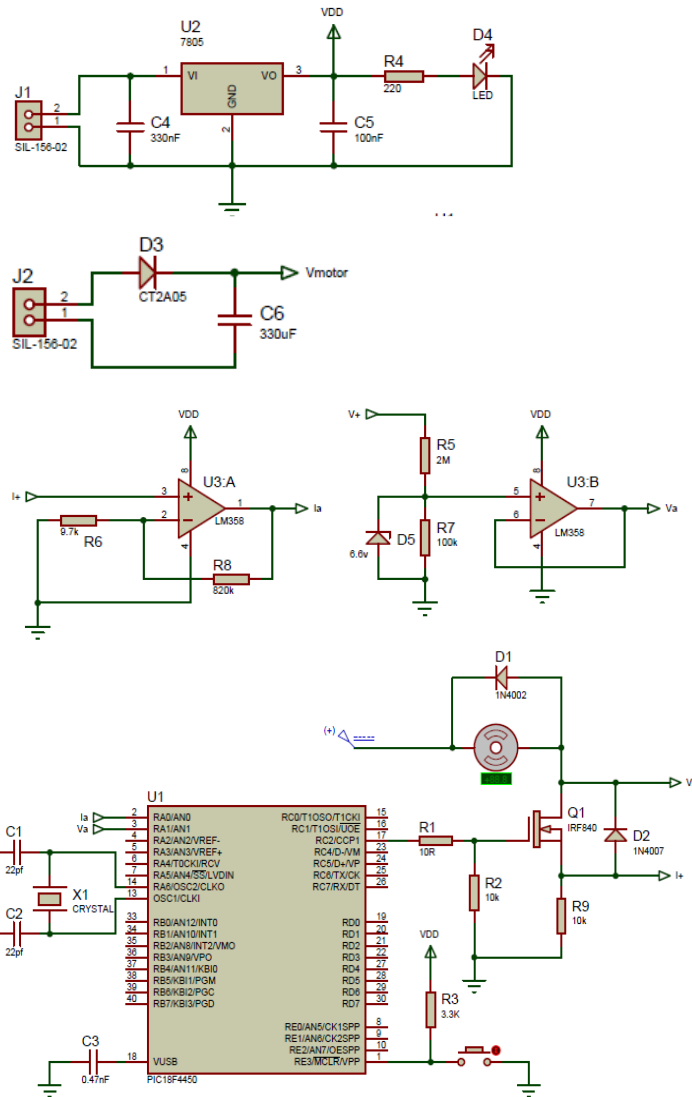


Fig. 3 – Diagrama eletrônico

A corrente do motor é medida através da queda de tensão no resistor R9 ligado em série com o enrolamento de armadura, proporcional a corrente que circula no motor e no terminal da fonte do transistor Q1. A tensão chaveada em 10kHz aplicada na armadura é medida através da tensão no terminal fonte do MOSFET menos a tensão do barramento C.C. que é de 150V, a amostra dessa tensão é gerada pelo circuito do divisor R5 e R7 juntamente com o amplificador operacional U3-B de ganho unitário e aplicada ao terminal do microcontrolador.

Todo o processo de ensaio ocorre com o motor sem carga, desta forma, as correntes envolvidas são baixas impossibilitando sensibilizar a entrada do conversor analógico digital, para elevar o ganho e possibilitar a medição foi utilizada uma configuração não inversora com o segundo amplificador operacional disponível no circuito integrado (LM358) para elevar a tensão medida em R9 tornando-a compatível com a faixa de operação do ADC.

Neste trabalho não são executados todos os ensaios, os primeiros experimentos para análises e testes foram no intuito de determinar a resistência do circuito de armadura do motor e avaliar a eficácia do sistema proposto. O algoritmo representado pelo fluxograma da figura 4 descreve o procedimento adotado neste ensaio.

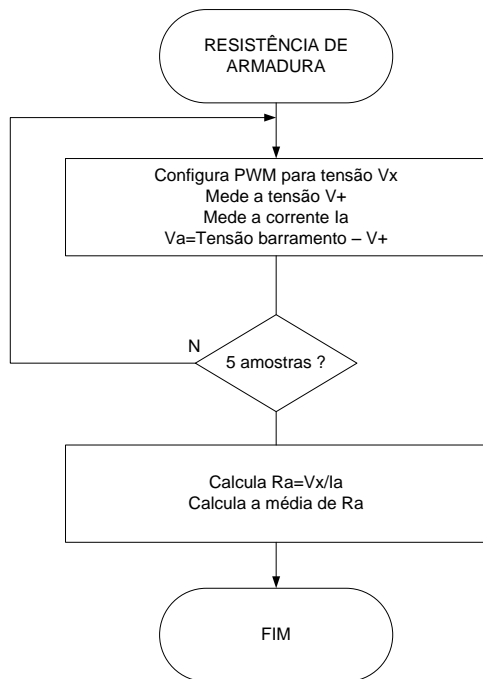


Fig. 4 Procedimento para determinação da resistência de armadura do motor.

## V. CONCLUSÃO

Após alguns testes e ajustes nos circuito pode-se concluir que o sistema é tecnicamente viável. O software supervisor não foi desenvolvido neste trabalho, contudo podemos visualizar os resultados a partir de um microcomputador executando um software terminal a partir dos dados transferidos pela USB. Algumas modificações nos circuitos devem ser realizadas para melhorar a precisão das grandezas medidas e reduzir ruído provocado pela alta frequência de chaveamento do conversor PWM.

Este trabalho não propôs inovar um método de determinação dos parâmetros do motor pois todos os conceitos já são bem conhecidos por profissionais desta área, mas sim contribuir para redução da falha humana e celeridade nos processos que envolvem os ensaios em máquinas elétricas de corrente contínua.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dorf., R.H. BISHOP., Sistemas de controle moderno, LTC Editora, 8ª Edição, Rio de Janeiro, 2001.
- [2] C. M. Navarro, G. C. P. Junior, A. S. Carvalho, Estimação dos parâmetros de um motor de corrente contínua por meio de redes neurais artificiais, *in Proc. of ENGEPE*, 2010.
- [3] DUMAN, S. MADEN, D. GÜVENÇ, U. Determination of the PID Controller Parameters for Speed and Position Control of DC Motor using Gravitational Search Algorithm. IEEE. p.225-229, 2010.
- [4] SAAB, S. S. Parameter Identification of a DC Motor: An Experimental Approach. IEEE. p.981-984, 2001.
- [5] R. V. Rodeiro, Parâmetros do motor de indução trifásico para estimação da velocidade por análise espectral, Tese de mestrado, UFB, Salvador, 2005.
- [6] J. C. Basílio, M. V. Moreira, Experimentos para estimação dos parâmetros de um motor de corrente contínua, *in Proc. of COBENGE*, vol. 01, pp. 298-307, 2001.
- [7] PIC18F4450 – Datasheet