

Estimação de parâmetros de um motor DC sem escovas usando filtro de Kalman

Fernando de Almeida Martins¹, fmartins_eng@vahoo.com

Hélio Koiti Kuga¹, hkk@dem.inpe.br

Valdemir Carrara¹, val@dem.inpe.br

Rodrigo Alvite Romano², rromano@maua.br

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Av dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12227-101

² Instituto Mauá de Tecnologia, IMT, Praça Mauá 1, São Caetano do Sul, SP, 09580 900

Resumo: Neste trabalho apresenta-se um método para estimação de parâmetros de motores CC sem escovas, para utilização no projeto de uma roda de reação de uso espacial. Embora circuitos eletrônicos micro-processados para controle de motores CC estejam disponíveis no mercado, em geral estes visam aplicações nas quais a variação na velocidade de rotação é pequena. Uma roda de reação, ao contrário, necessita operar tanto em baixas quanto em altas rotações, e a estabilidade do controle na partida e parada do motor é crítica ao desempenho da roda, principalmente quando se considera que o tempo de aceleração pode exceder alguns minutos, pois o torque é geralmente pequeno. Justifica-se, assim, a modelagem e a identificação dos parâmetros de motores CC para aplicação em rodas, de forma a fornecer informações que permitam projetar o controlador e aumentar seu desempenho.

Palavras-chave: filtro de Kalman, motor DC, motor sem escovas, estimação de parâmetros

1. Introdução

O controle do apontamento de satélites artificiais exige a presença de atuadores que consigam prover torques extremamente baixos de forma a compensar as pequenas perturbações encontradas no espaço, sem que, com isso, comprometam a estabilidade do movimento. É bastante comum o emprego de rodas de reação para esta finalidade, pois elas conseguem suprir torques numa faixa de 10^{-5} a 0,1 Nm. Rodas de reação são dispositivos compostos por um motor CC sem escovas (*Brushless DC Motor* – BLDC) acoplado a um rotor de alta inércia (quando comparado ao torque do motor), e uma eletrônica para controlar a corrente e, não simultaneamente, também a velocidade de rotação. As rodas de reação equipam a totalidade dos satélites que necessitem um apontamento preciso, desde os telescópios espaciais, satélites de comunicação até os satélites científicos e de observação da Terra.

O desenvolvimento de rodas de reação no Brasil teve início já na década de 80 com trabalhos de mestrado cobrindo aspectos do projeto do mancal (Souza, 1994 e 1995), eletrônica (Trivelato, 1988; Trivelato e Souza, 1988) e culminando no projeto de uma roda experimental (Souza e Fleury, 1987), que foi embarcada no satélite SDC2 lançado em 1998 e ainda em operação.

O atrito nos mancais de rolamento torna a resposta da roda não linear, principalmente em baixas velocidades ou durante a inversão do sentido de giro. De fato, este problema é crítico, pois aumenta consideravelmente o erro de apontamento do satélite quando ocorre a inversão (Carrara e outros, 2011). A operação da roda em modo de controle de velocidade reduz significativamente este problema, mas o projeto do controlador deve levar em conta o atrito para que possa ser ajustado convenientemente. O conhecimento dos parâmetros de motores, portanto, é fundamental para o dimensionamento e projeto de uma roda de reação.

Este trabalho irá aplicar um método de estimação de parâmetros de motores CC sem escovas, para utilização no projeto de uma roda de reação. O modelo desenvolvido será aplicado a um motor CC sem escovas de baixo torque e com um controlador de corrente em PWM (Pulse Width Modulation). O motor será excitado com perfis de corrente em diferentes velocidades angulares e os dados serão coletados por um sistema de aquisição digital e analógica que mede a velocidade com sensores de efeito Hall e a corrente por meio de um resistor *shunt* padrão em série com o motor. A corrente é determinada por meio da tensão neste resistor. Os dados são processados por um filtro de Kalman, que estima a constante do motor e os torques de atrito.

2. O AMBIENTE EXPERIMENTAL

Para emular o motor BLDC encontrado em uma roda de reação utilizada em satélites, será utilizado um motor DC sem escovas convencional com características semelhantes as de uma roda de reação comercial. Este motor é composto por 4 pares de pólos e 3 fases, com uma tensão de alimentação de 12 Volts DC e uma corrente máxima nominal contínua de 600mA. Isso permitirá uma rotação máxima de 7970 rpm e um torque de $7,92 \cdot 10^{-3}$ Nm caso o motor seja alimentado pela corrente máxima nominal. Segundo o manual do fabricante, a inércia do rotor é de $13,9 \text{ gcm}^2$. Além dessas propriedades o motor também disponibiliza 3 sensores de efeito Hall para sincronismo no chaveamento das fases.

O acionamento do motor é realizado por um micro-controlador, cujo esquema é visto na Figura 1. O torque é controlado por meio da corrente, e esta é ajustada por um acionador PWM (Pulse Width Modulation, ou modulação por largura de pulso), com base na tensão sobre o resistor *shunt*. O micro-controlador é responsável pelo monitoramento da corrente e da rotação, pelo controle do sinal PWM via um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e pelo sincronismo na comutação das fases, bem como a disponibilização dos dados por interface serial RS232.

Uma das partes que requereu mais atenção no desenvolvimento deste acionador foi a concepção de um algoritmo que garantisse a operação correta nos acionamentos dos transistores mosfets (*driver*) em configuração de ponte H. Isto foi necessário para se evitar que uma chave conectada à alimentação (“*high side*”) fosse acionada junto com a chave conectada ao terra (“*low side*”), causando assim um curto-circuito entre a alimentação da tensão e a linha de terra, como, por exemplo, no caso dos mosfets PWM1 e PWM2 da Figura 1 serem acionados conjuntamente. Para tal propósito o algoritmo executa o chaveamento com base numa tabela de acionamento para os mosfet “*high side*”: `tab_mosfet_superior[] = {0b100, 0b010, 0b010, 0b001, 0b001, 0b100}` e outra tabela para os mosfets inferiores: `tab_mosfet_inferior[] = {0b001, 0b001, 0b100, 0b100, 0b010, 0b010}`. Outro detalhe que não deve ser negligenciado é a introdução de um atraso entre as trocas de acionamentos para respeitar os tempos de resposta dos circuitos mosfets (Rashid, M. H., 2001).

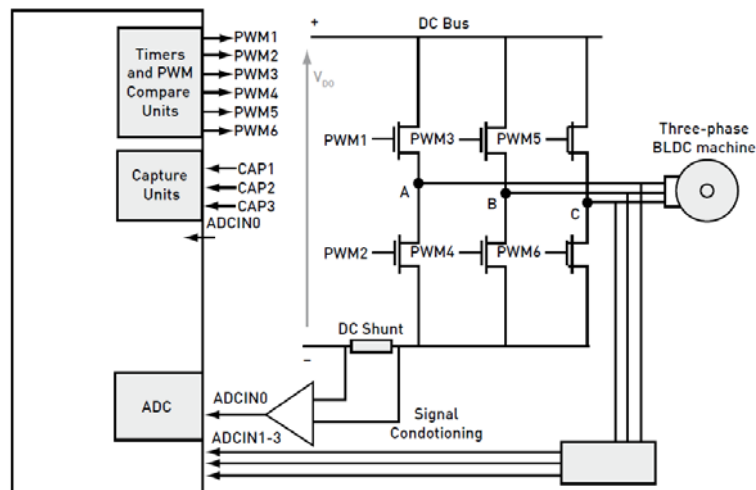


Figura 1. Circuito micro-processado para acionamento dos *drivers* Mosfets

O sinal para sincronizar o chaveamento dos mosfets com a posição do rotor é fornecido pelos sensores de efeito Hall inclusos no motor. O micro controlador recebe estes pulsos em pinos de interrupção externa e computa cada posição de modo a detectar o sentido de rotação e sua velocidade de rotação. Essas medidas permitem o controle da velocidade e sentido da rotação em malha fechada. A Figura 2 ilustra o processo de aquisição do sinal dos sensores Hall, bem como o sistema de acionamento e comutação das fases pela ponte H.

Como a corrente é controlada a partir da medida da velocidade angular do rotor, implementou-se um PWM por meio do contador (*timer*) interno do controlador que comuta os mosfets em frequência próxima de 20kHz, alterando o ciclo útil (*duty cycle*) do PWM de acordo com a necessidade de de atuação exigida pelo algoritmo de controle. Consegue-se, assim, a intensidade de corrente necessária para propiciar a velocidade de rotação desejada. Um fluxograma simplificado do controle efetuado pelo micro-controlador é mostrado na Figura 3.

Selecionou-se um resistor *shunt* com valor de 0,1 Ohms. Com uma corrente de de 1 A no resistor, tem-se 100 mV de tensão nos terminais, um valor muito baixo para que se tenha boa resolução durante a conversão para o sinal digital. Assim a tensão no resistor deve ser amplificada por um amplificador operacional, com ganho de 30 vezes, aproximadamente, de forma a transformar a tensão de 100 mV em 3 V na saída do amplificador. Com isso o micro controlador poderá ler a tensão em uma escala com maior resolução já que a entrada do conversor ADC (Analog to Digital Converter) suporta até 3,3 V. A Figura 4 mostra uma foto do experimento já montado, incluindo o micro-controlador, o visor LCD e o motor BLDC, e a Figura 5 apresenta o circuito de amplificação do sinal do resistor shunt.

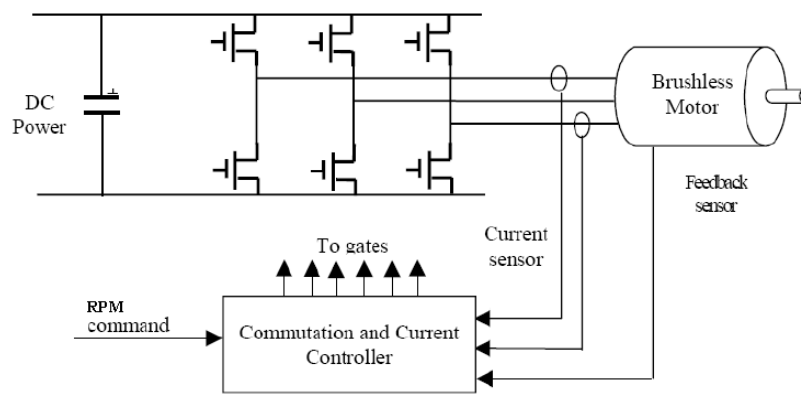


Figura 2. Diagrama de controle de rotação em malha fechada (Challapalli, R.; Gupta, U,2008).

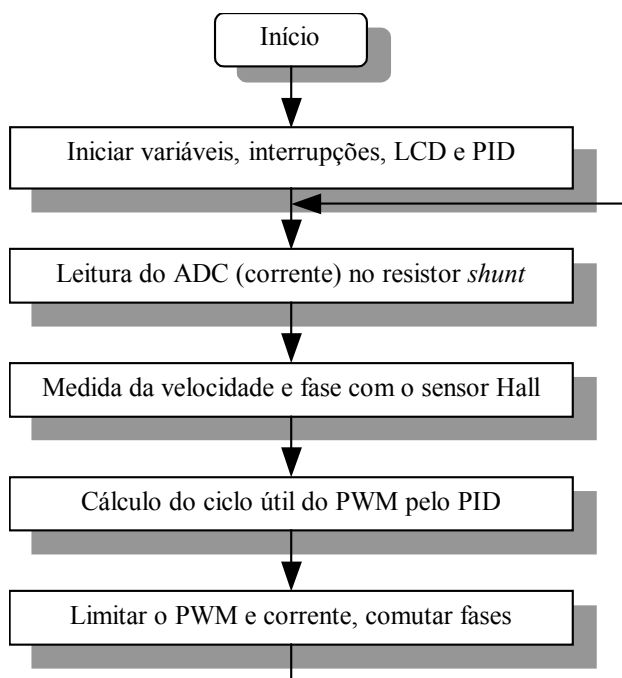


Figura 3. Fluxograma do programa implementado no micro-controlador.

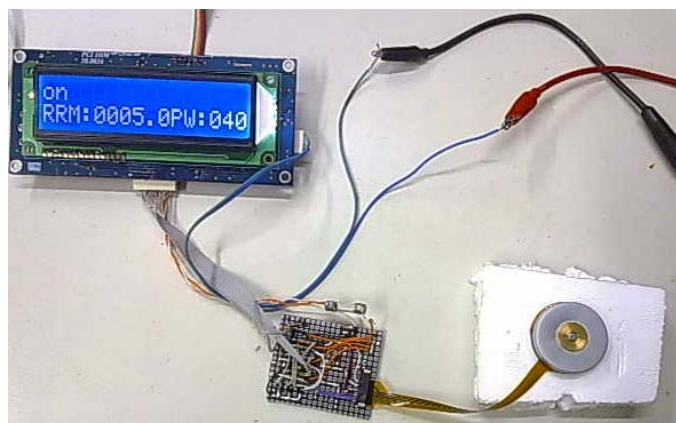


Figura 4. Foto do equipamento: placa micro controlada, placa driver e motor BLDC.

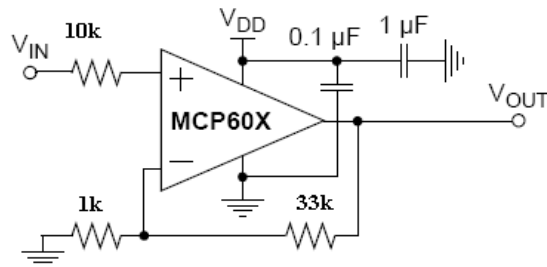


Figura 5. Amplificador operacional para leitura da corrente do motor.

3. O EXPERIMENTO

A aquisição dos dados foi feita conectando-se a placa micro-controlada a um computador padrão PC onde foram coletados tanto a velocidade de rotação do motor quanto a corrente medida naquele instante. A taxa de amostragem foi de 10Hz, ou seja, a cada 100 ms tem-se uma nova medida da velocidade angular e da corrente aplicada ao motor.

Para que o filtro de Kalman possa ser aplicado, deve-se coletar um conjunto de dados de modo que estes passem por toda a excursão de velocidades do motor necessárias para a identificação a ser realizada posteriormente. O motor é então comandado com uma referência em velocidade de rotação com amplitude senoidal por 3 ciclos completos, apresentada na Figura 6. Garante-se assim um conjunto de dados satisfatório para a estimação. Observa-se nesta figura que o erro apresentado pelo controle PID é maior quando o motor opera em velocidades baixas, causado pela não linearidade do torque de atrito nesta região. Neste ensaio foram coletadas 900 amostras em um período de 90 segundos com 3 ciclos de comando na referência da velocidade angular com amplitude de 4000 rpm. A sintonia do PID foi feita manualmente com ganho proporcional de 0,00002 $A/^\circ$ e ganho integral de 0,002 $s/^\circ$, porém o ganho derivativo foi mantido em zero.

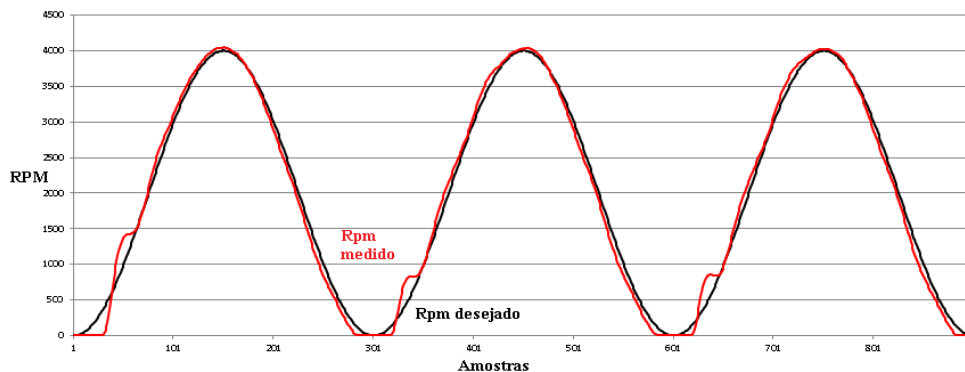


Figura 6. Velocidade angular do motor (vermelho) e velocidade comandada (preto).

4. O filtro de Kalman

Todas as 900 amostras de corrente elétrica e velocidade de rotação foram inseridas num filtro de Kalman em Matlab, de modo a estimar a corrente elétrica, a velocidade angular, a constante do motor, o atrito viscoso e os atritos de Coulomb e de Stribeck (Åström, 1998)^[1]

4.1. Modelo matemático

Uma roda de reação pode ser modelada por meio de sua inércia J_w , o atrito viscoso b e um atrito de Coulomb c conforme a seguinte equação diferencial (Carrara e Milani, 2007):

$$T_m = J_w \dot{\omega}_w + b \omega_w + c \operatorname{sgn}(\omega_w), \quad (1)$$

onde ω_w é a velocidade angular da roda de reação e T_m é o torque do motor. Admitindo a ausência de não-linearidades na conversão eletro-mecânica do motor, pode-se considerar linear a relação entre corrente de excitação I e torque T_m :

¹ O atrito de Stribeck foi verificado experimentalmente no início do século XX, pelo cientista alemão Richard Stribeck (1861-1950), enquanto investigava a relação da força de atrito com a velocidade do movimento.

$$T_m = k_m I \quad (2)$$

na qual k_m é a constante do motor. Se for considerado o efeito do atrito de Stribeck segundo o modelo de Gauss (Lantos e Márton, 2010), a Equação 1 pode ser reescrita na forma:

$$T_m = J_w \dot{\omega}_w + b \omega_w + c \operatorname{sgn}(\omega_w) + (s - c) \exp(-\omega_w / \omega_s)^2 \operatorname{sgn}(\omega_w), \quad (3)$$

onde s e ω_s ^[2] são respectivamente o torque de atrito e a velocidade de Stribeck. Por fim, sob a ótica do experimento tem-se o modelo em termos de sua entrada I e saída ω :

$$I = [J_w \dot{\omega}_w + b \omega_w + c \operatorname{sgn}(\omega_w) + (s - c) \exp(-\omega_w / \omega_s)^2 \operatorname{sgn}(\omega_w)] / k_m \quad (4)$$

4.2. Espaço de Estados

Dado o problema de estimação dos parâmetros do modelo, a representação em espaço de estados será:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t, u) + \mathbf{G} \mathbf{w}, \quad (5)$$

sendo \mathbf{G} a matriz de covariância e \mathbf{w} sendo o ruído na planta. Tendo o vetor de observações dado por

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (6)$$

onde k é a iteração no momento, \mathbf{H} é a matriz de observações e \mathbf{v} o ruído das medidas. O estado a ser estimado é

$$\mathbf{x} \equiv [I_k \quad J_w / k_m \quad b / k_m \quad c / k_m \quad (s - c) / k_m]^T \equiv (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5)^T, \quad (7)$$

cujo sinal de controle fica

$$u_k \equiv (\omega_k), \quad (8)$$

onde ω a velocidade angular. A matriz de observações é dada por

$$\mathbf{H}_k \equiv (I_{w_k} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad (9)$$

4.3. Filtro de Kalman

O filtro de Kalman selecionado para problema é o tipo estendido, pois este suporta uma dinâmica não linear, o que certamente contribuirá para se ter uma melhor estimação dos parâmetros na região ao redor da velocidade angular nula. Esse filtro é capaz de gerar trajetórias de referência que são atualizadas a cada processamento das medidas do instante correspondente (Kuga, 2005). Para aplicação do filtro estendido são geradas as matrizes do jacobiano referentes às funções não-lineares da dinâmica e das medidas.

Utilizando as equações e modelos implementados em Matlab, aplicou-se o algoritmo do filtro de Kalman aos dados mostrados na Figura 6. A Figura 7 mostra os valores medidos e estimados da corrente elétrica, em mili-Ampères. Os três pequenos saltos observados na rampa de subida da corrente deve-se à tentativa do PID de manter a velocidade próxima da referência e compensar o efeito do atrito não linear presente em velocidades baixas.

O ganho de Kalman e a estimativa da constante do motor são mostrados na Figura 8. Observa-se nesta figura que o ganho de Kalman tende a zero, demonstrando que a estimação dos parâmetros convergiram para um valor estável. De fato, quanto menor for o ganho de Kalman, mais próximo o valor estimado estará do seu valor real, embora não se possa garantir que tenha convergido para o valor correto. Ainda na Figura 8, à direita, percebe-se que a constante do motor estabiliza num valor próximo a $2 \cdot 10^{-3}$ Nm/A após 700 amostras, aproximadamente.

Completando os parâmetros estimados, a Figura 9 mostra os resultados da estimação do coeficiente de atrito viscoso, b , e o coeficiente do atrito de Coulomb, c , enquanto que a Figura 10 apresenta a estimação do coeficiente do atrito de Stribeck, s . Adotou-se nestas estimativas um valor empírico de $5,16 \cdot 10^{-6}$ Nms para o coeficiente b , $0,8795 \cdot 10^{-3}$ Nm para o coeficiente c e 350 para o coeficiente de Stribeck,

² Fator utilizado para ajuste da atenuação do termo relacionado a s ; valores empíricos são atribuídos a ele (Romano, 2010).

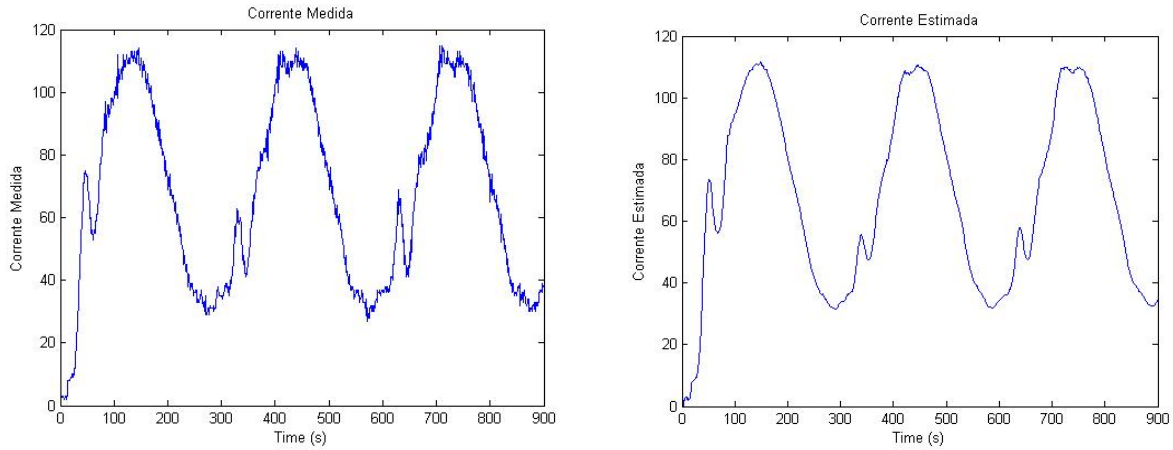


Figura 7. Corrente medida no motor (esquerda) e corrente estimada (direita) pelo filtro de Kalman.

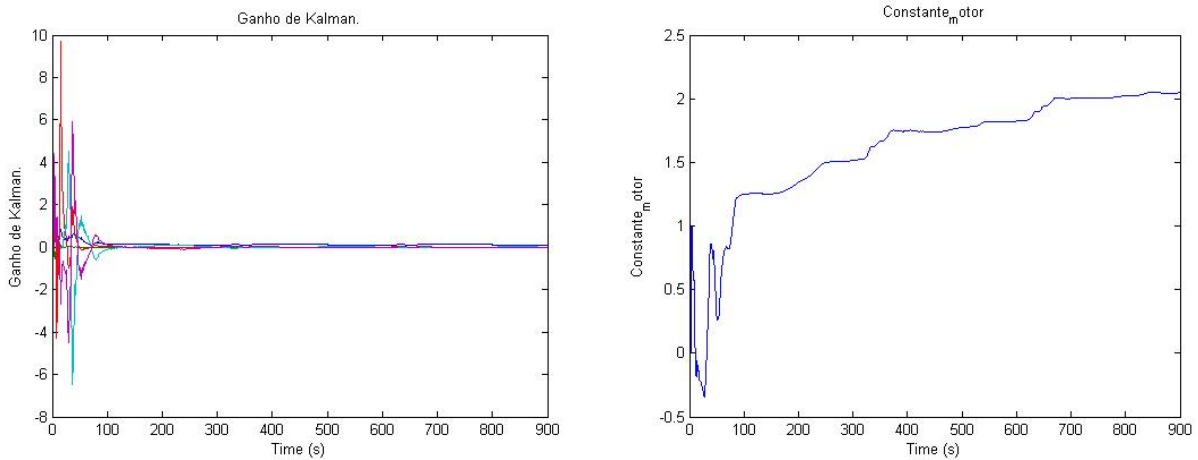


Figura 8. Ganho de Kalman e constante do motor.

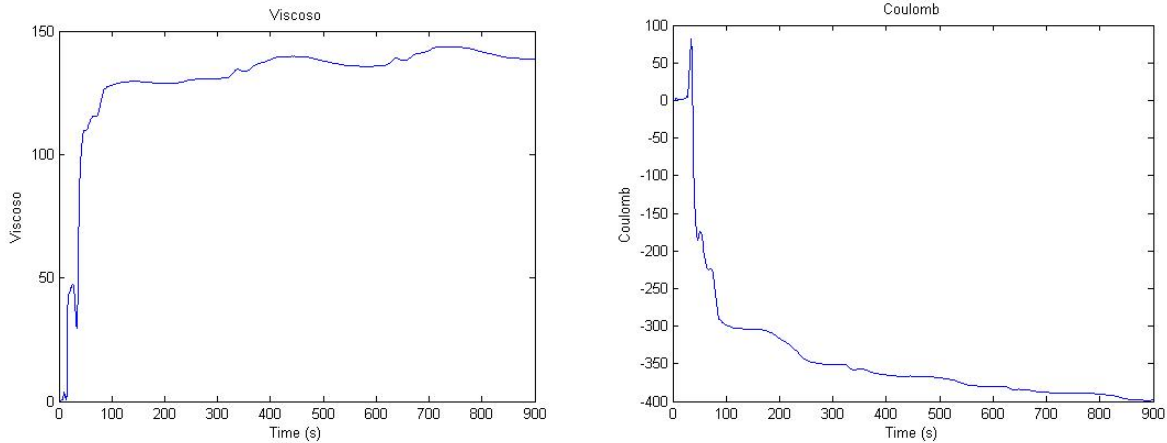


Figura 9. Coeficientes de atrito viscoso e atrito de Coulomb.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um procedimento para a obtenção dos parâmetros de motores BLDC (Brushless DC Motor) por meio de estimação com filtro de Kalman do perfil de resposta do motor a uma referência em velocidade angular que varia senoidalmente, comandada por um controlador PID em um micro-controlador. A estimação destes parâmetros será útil no projeto de rodas de reação para aplicações em controle de atitude de satélites artificiais, cujo projeto está em andamento no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos. O trabalho apresentou o projeto do dispositivo eletrônico, a arquitetura do programa de controle no micro-controlador, incluindo o controlador PID para controle da velocidade angular do motor, e o circuito dos *drivers* de acionamento do motor. Foi realizado um ensaio no qual foram medidas a corrente e a velocidade angular do motor, por meio da tensão num resistor *shunt* e sensores de efeito Hall no motor, respectivamente. Os resultados do ensaio foram submetidos a uma filtragem

de Kalman para se estimar a constante do motor, o coeficiente de atrito viscoso, o coeficiente de atrito de Coulomb e o coeficiente de atrito de Stribeck. Este estudo permitirá compreender melhor o comportamento do motor BLDC em baixas rotações além de contribuir para o projeto do motor a ser utilizado na roda de reação.

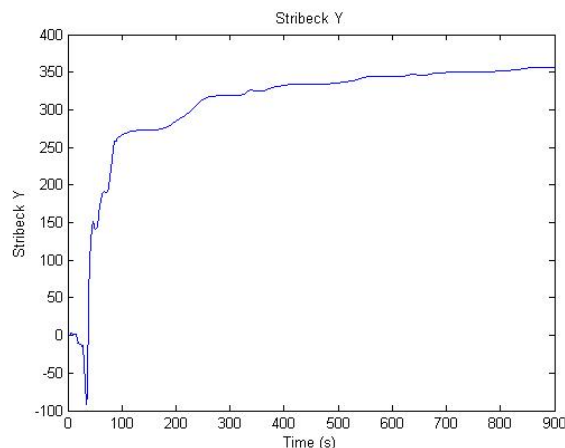


Figura 10. Coeficiente de atrito de Stribeck.

Os resultados mostraram que os parâmetros estimados variam pouco com a velocidade angular, e apresentam mudanças mais acentuadas em baixas rotações. Isto sugere que o modelo do atrito necessita ser aprimorado, pois seu efeito é mais acentuado quando o rotor se encontra em baixas velocidades.

Pretende-se no futuro aplicar este controle num motor BLDC equipado com codificador ótico para permitir uma melhor medida da velocidade angular e o correto acionamento das fases, eliminando o sensor de efeito Hall. O controle será efetuado por um novo *hardware* com tecnologia FPGA, em linguagem VHDL.

6. Agradecimentos

Agradeço ao Dr. Rodrigo Alvite (E.E. Mauá) pelo empréstimo do motor BLDC utilizado no ensaio.

7. Referências

- Åström, K. J., 1998, "Control of System with Friction". Proceedings of the Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 25-32.
- Carrara, V., Milani, P. G., 2007, "Controle de uma mesa de mancal a ar de um eixo equipada com giroscópio e roda de reação", V SBEIN - Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial. Rio de Janeiro, Brasil.
- Carrara, V.; Siqueira, R.; Oliveira, D., 2011, "Speed and current mode strategy comparison in satellite attitude control with reaction wheels". *Proceedings of COBEM 2011 – 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Natal, RN, Brazil.
- Challapalli, R.; Gupta, U., 2008, "Design of a Position Loop Servo Controller for a BLDC Motor Based Rotary Electro-Mechanical Actuation System", Department of Electronics and Instrumentation, 100, CVR College, India.
- Kuga, H.K., 2005, "Noções Práticas de Técnicas de Estimção - Notas de Aula", São José dos Campos, Brasil.
- Lantos, B.; Márton, 2010, L. "Nonlinear Control of Vehicles and Robots". Springer. ISBN 1849961212.
- Rashid, M. H., 2001, "Power Electronic Handbook", Academic Press, pp 78 - 98.
- Romano, R. A., 2010, "Identificação de processos não-lineares e quantificação de atrito em válvulas de controle", Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Souza, P.N.; Fleury, A.T., 1987, "Modelo experimental de uma roda de reação para controle da atitude de satélites artificiais: construção, simulação e testes". Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 9., (COBEM), Florianópolis. (INPE-4274- PRE/1146).
- Souza, P.N., 1994, "Análise do mancal do Experimento Roda de Reação: determinação de suas frequências naturais de vibração e das cargas atuantes durante os testes de vibração". São José dos Campos: INPE, 43 p. (A-ETD-0084).
- Souza, P.N., 1995, "Uma metodologia para a determinação da confiabilidade de mancais de rolamento sujeitos a variações de carga, rotação e temperatura". Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 12., (COBEM-CIDIM/95), Belo Horizonte. (INPE-5656-PRE/1831).
- Trivelato, G. C., 1988, "Controle de rodas de reação através de técnicas digitais usando modelos de referência". 1988. 209 p. (INPE-4618-TDL/335). Dissertação (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto de Pesquisas Espaciais, [S.l.].
- Trivelato, G. C.; Souza, M. L. O., 1988, "Projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação usando modelos de referencia". In: SBA CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMATICA, 7., São José dos Campos, p. 595-601. (INPE-4753-PRE/1425).