

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Motor Brushless: Modelagem Matemática e sua Dinâmica

Ivan Paulo Canal¹

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, UNIJUÍ, Ijuí, RS
Instituto Federal Farroupilha Câmpus Panambi, Panambi, RS

Manuel Martín Pérez Reibold²

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Caroline Luft³

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Resumo. Os motores brushless tem sido crescentemente inseridos em projetos de sistemas de engenharia que envolvem propulsores elétricos, por suas vantagens, flexibilidade e desempenho quando comparados a outros tipos de motores. Suas características específicas influenciam na sua dinâmica e podem ser exploradas e estudadas com a modelagem matemática, sendo um rico campo de investigação para avaliar e analisar a dinâmica de sistemas com diferentes configurações. Neste estudo, demonstra-se a modelagem matemática de um motor brushless e realiza-se a exploração das grandezas envolvidas em um sistema de motor e hélice frente a diferentes condições, analisando a dinâmica do sistema para situações práticas, como o empuxo resultante de uma hélice acoplada ao motor, analisado através da implementação de modelos matemáticos computacionalmente.

Palavras-chave. Modelagem Matemática, Motor brushless, BLDC, EC Motor

1 Introdução

Os fabricantes de motores brushless geralmente disponibilizam os principais parâmetros das máquinas como as dimensões, peso, tensão nominal de alimentação, corrente e potência máximas, complementando-se com a relação entre rotações por minuto e tensão aplicada. Outras informações adicionais também podem ser importantes nos projetos que empregam motor brushless, como no caso de um sistema aéreo multirrotor, onde é necessário identificar hélices compatíveis, empuxo proporcionado pelo sistema motor-hélice e tempo de resposta do sistema, além de outros elementos.

A ausência de informações adicionais, não fornecidas em manuais técnicos de fabricantes, dificulta o dimensionamento dos componentes em um projeto que envolve motor brushless. Com a utilização da modelagem matemática, almeja-se investigar as respostas que caracterizam o sistema para além dos parâmetros principais fornecidos pelos fabricantes, definindo a dinâmica da velocidade e torque do motor, além da relação de empuxo

¹ivan.canal@iffarroupilha.edu.br

²manolo@unijui.edu.br

³carolluft@hotmail.com

que pode ser proporcionado por uma hélice acoplada ao seu eixo, relacionando o empuxo à variação de tamanho da hélice, contribuindo-se para o dimensionamento de sistemas com motor brushless.

2 Motor Brushless

Um fenômeno descrito em termos de símbolos e relações matemáticas, que reproduz ou transcreve o objeto estudado, é denominado como modelo matemático [1]. Para realizar a investigação com o emprego de modelagem matemática, foi proposto um sistema básico de estudo composto por um atuador, que contempla um motor brushless com uma hélice acoplada ao seu corpo. São variáveis do sistema a tensão de alimentação do motor (V_a), a velocidade do motor (W), o torque (T) e a força de empuxo proporcionada pela hélice (F_e). O sistema de estudo pode ser visualizado na Figura 1.

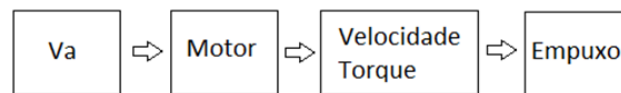


Figura 1: Sistema de estudo.

Para a realização da modelagem matemática do sistema de estudo foi considerado um motor trifásico do tipo BLDC (*Brushless Direct Current* ou motor de corrente contínua sem escovas), também conhecido como EC Motor (*Electronic Control Motor* ou motor com controle eletrônico) que possui vastas aplicações, sendo largamente empregado no projeto de sistemas aéreos multirrotores, por exemplo.

Os motores BLDC, são alimentados em corrente contínua (CC), sendo similares aos motores CC tradicionais. O motor CC é uma máquina elétrica que pode ser constituída de um rotor de ímã permanente e uma armadura bobinada, apresentando desempenho robusto para aplicações diversas, tendo um controle relativamente mais simples quando comparado por exemplo ao motor de indução de corrente alternada [2].

Os motores brushless apresentam vantagens significativas em relação aos motores CC, por não possuírem escovas de comutação, proporcionando ausência de centelhamento, menor desgaste com conseqüente maior vida útil, maior eficiência e a possibilidade de alcançar maiores velocidades. Apresentam ainda menor ruído sonoro e menor interferência eletromagnética, mas o seu controle necessita de circuitos de ordem mais complexa, além de possuírem preços mais elevados [3].

Os BLDC podem ser inrunner ou outrunner, isto é, no motor do tipo outrunner os ímãs permanentes do motor ficam alojados na estrutura girante externa, enquanto as bobinas estão posicionadas na estrutura estática interna do dispositivo [3], por exemplo proporcionando a aplicação em sistemas aéreos multirrotores, onde as hélices são fixas na parte girante externa do motor. Nos motores BLDC inrunner, os ímãs estão posicionados na estrutura girante interna e as bobinas na estrutura estática externa, proporcionando outros tipos de aplicações.

Devido a não possuírem escovas, para realizar a excitação de cada bobina no instante

correto é necessário conhecer a posição do rotor, utilizando-se de um meio auxiliar para realizar a detecção desta posição. Os circuitos de controle de motores BLDC podem utilizar-se de sensores Hall e encoders (acoplados ao motor) ou realizar a detecção de posição do rotor por força contra-eletromotriz (Back-EMF). Neste estudo, considerou-se a existência de circuitos comerciais dedicados para a realização da alimentação do motor, não sendo objetivo a abordagem deste tipo de componente, fazendo-se uso apenas do resultado de saída de um sistema de controle de motor BLDC, que é uma tensão controlada.

3 Modelagem Matemática de Motor Brushless

A modelagem matemática aplicada e suas ferramentas possibilitam descrever, simular e analisar o comportamento de sistemas com diferentes configurações, antes mesmo da implementação física dos mesmos. A escolha dos componentes adequados para um atuador motor hélice tem significativa importância neste tipo de sistema. A modelagem matemática com implementação computacional permite avaliar a dinâmica do conjunto frente a diferentes condições de estudo, possibilitando contemplar diferentes conjuntos atuadores motor e hélice, utilizando-se dos parâmetros fornecidos pelos fabricantes de motores, contribuindo com o dimensionamento e aplicação destes sistemas. Para realizar a investigação, será considerada a modelagem matemática de apenas uma fase do motor BLDC [3], a qual pode ser modelada segundo o circuito elétrico apresentado na Figura 2.

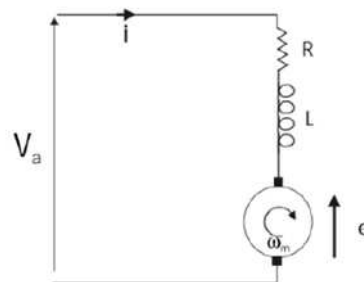


Figura 2: Modelo de circuito elétrico do BLDC, adaptado de [3].

Na Figura 2, tem-se a representação das grandezas do modelo, que são a tensão na armadura do motor (V_a), corrente na armadura do motor (i), resistência da armadura (R), indutância da armadura (L), força contra-eletromotriz (e) e velocidade angular (ω). Para estruturar o equacionamento para o modelo representativo do motor da Figura 2, considera-se a equação do circuito elétrico, realizando-se o somatório das tensões na malha, conforme (1). Considerando que a constante de torque (kt) é dependente da relação entre rotações por minuto e tensão aplicada (k_v) de forma inversa, representando-se $kt=1/k_v$ [3], pode-se reescrever (1) no formato da equação (2).

$$L.i' + R.i + e - V_a = 0 \quad (1)$$

$$i' = -\frac{R}{L}i - \frac{kt}{L}\omega + \frac{1}{L}Va \quad (2)$$

Analisando-se o sistema em relação ao movimento, relaciona-se o momento de inércia (J), o torque (T) e a razão de amortecimento (b), escrevendo-se a equação (3). Considerando-se que o torque pode ser expresso como $T=kt.i$, pode-se reescrever a equação (3) no formato da equação (4).

$$J\omega' = -b\omega + T \quad (3)$$

$$\omega' = -\frac{b}{J}\omega + \frac{kt}{J}i \quad (4)$$

Segundo os estudos de [3], a potência para um atuador produzir uma determinada quantidade de empuxo F_e é inversamente proporcional a área do rotor, sendo essencial um adequado dimensionamento de sistema de hélice. Para auxiliar nesta questão, pode-se utilizar a relação aerodinâmica da equação (5), onde F_e representa a força de empuxo gerado pelo atuador, W corresponde a velocidade angular do motor e r o raio do rotor (raio da hélice) [3].

$$F_e = r^4 \omega^2 \quad (5)$$

Cita-se que o passo da hélice, a composição do material e o número de pás da mesma são também parâmetros que influenciam sobre o motor e na capacidade de empuxo do atuador, sendo que neste trabalho, direcionou-se o estudo de maneira particularizada para a influência do comprimento da hélice no empuxo.

4 Implementação do sistema de estudo e resultados

Utilizando-se o equacionamento desenvolvido anteriormente, realizou-se a implementação da modelagem matemática no Matlab/Simulink para a avaliação da dinâmica e extração de dados do sistema de estudo. Na Figura 3 visualiza-se o modelo de estudo implementado.

Para a realização dos estudos, foram considerados os parâmetros de um motor brushless extraídos de [6], sendo o momento de inércia $J=10.5 \text{ g.cm}^2$, razão de amortecimento $b=0,1 \text{ N.m}$, relação entre rotações por minuto e tensão aplicada $k_v=1070 \text{ rpm/V}$, resistência da armadura $R=0.248 \text{ ?}$, indutância da armadura $L=0,109 \text{ mH}$. Tendo-se o sistema implementado no Simulink e alimentados os parâmetros de referência, oportunizou-se a prática de diferentes situações que serão discutidas a seguir. Na primeira situação, realizou-se a implementação do sistema de estudo variando-se a tensão de alimentação do motor para 4 V, 6 V, 8 V, 10 V e 12 V, capturando-se o comportamento da velocidade angular e o torque do motor para as respectivas alimentações, além da força de empuxo considerando-se uma hélice de raio de 3 cm. Estes resultados podem ser visualizados nas figuras 4, 5 e 6.

Das implementações anteriores, observa-se que a velocidade angular, o torque e o empuxo tem comportamentos dinâmicos semelhantes, tendo na maior parte do tempo uma

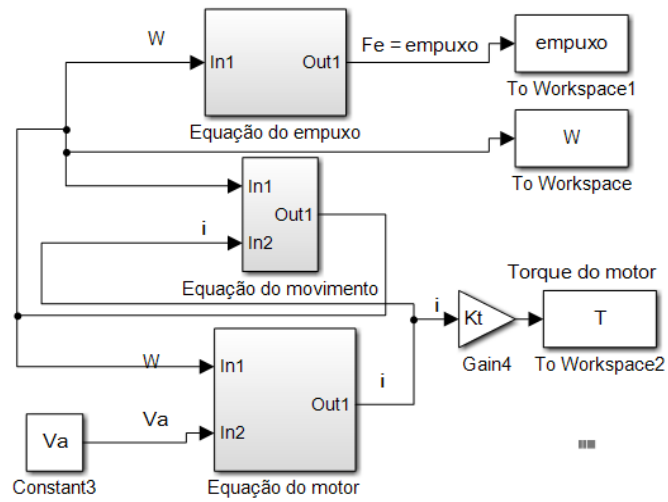


Figura 3: Modelo de estudo implementado.

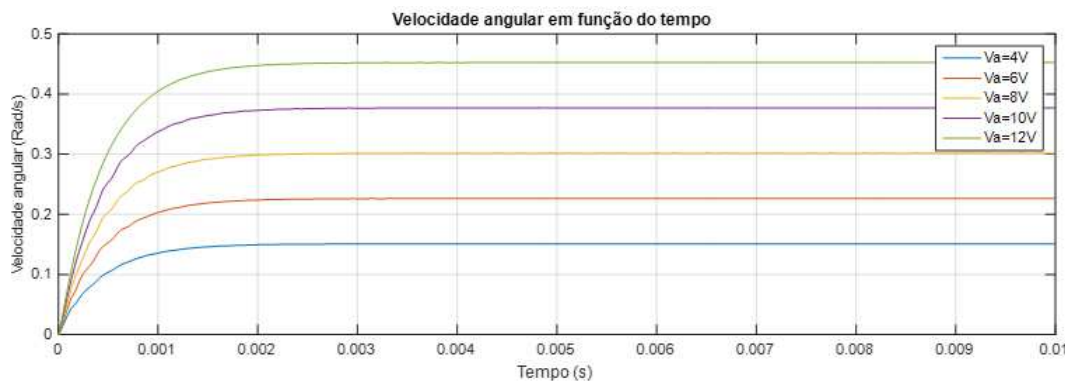


Figura 4: Dinâmica da velocidade angular para diferentes tensões de alimentação no motor.

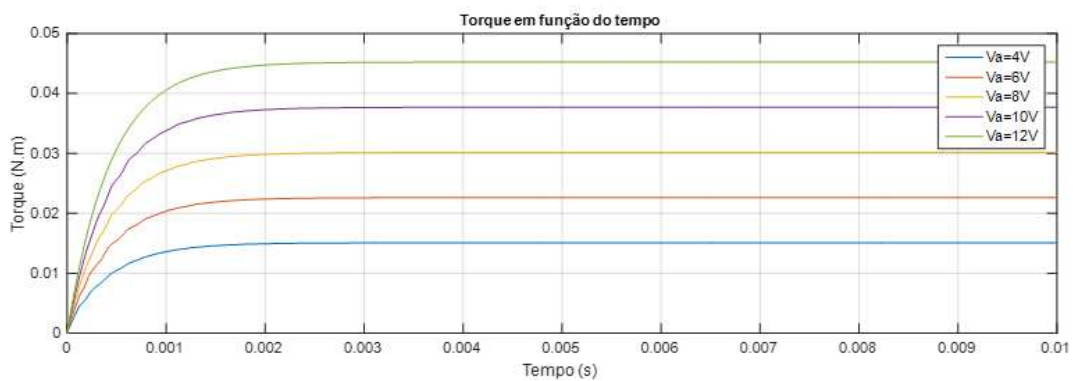


Figura 5: Dinâmica do torque para diferentes tensões de alimentação no motor.

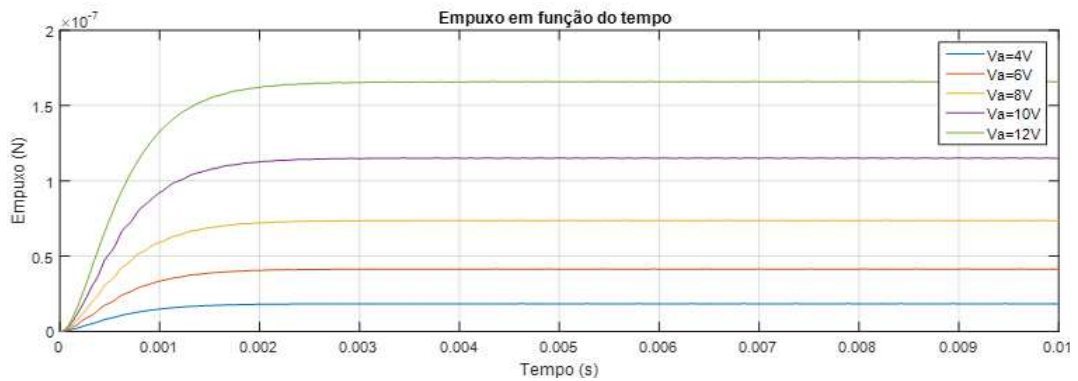


Figura 6: Dinâmica do empuxo para diferentes tensões de alimentação no motor.

região de operação linear. Salienta-se também que as três grandezas em estudo tem crescimento proporcional a tensão de alimentação, possibilitando prever o comportamento das grandezas em diferentes condições de excitação. Observa-se ainda que, para esta configuração específica de atuador motor e hélice, tem-se um período transitório para a resposta das grandezas de aproximadamente três milissegundos, indicando um atraso de resposta nesta ordem de grandeza para o motor específico em estudo. Utilizando-se a tensão nominal de alimentação do motor, capturou-se a dinâmica do empuxo proporcionado pelo atuador em função da variação do raio da hélice para 1 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, sendo os resultados desta aplicação demonstrados na Figura 7, verificando-se que com um pequeno aumento no raio do rotor tem-se um incremento significativo na força de empuxo.

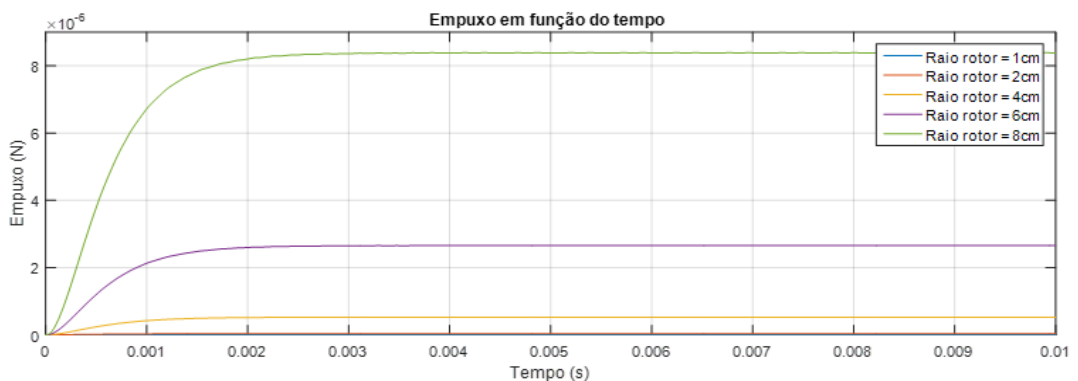


Figura 7: Dinâmica do empuxo para diferentes raios de hélice.

5 Conclusões

Através das avaliações dinâmicas das variáveis de estudo, verifica-se que a velocidade e o torque do motor tem crescimento proporcional a tensão de alimentação. Na configuração específica de atuador motor e hélice avaliada, tem-se um período transitório para a res-

posta das grandezas de aproximadamente três milissegundos, representando um atraso de resposta. Para um melhor aproveitamento da potência fornecida pelo motor, deve-se aumentar o comprimento da hélice, resultando em maior empuxo. Observou-se que motores com maiores constantes de torque podem ser mais adequados para sistemas com hélices de maior porte, por proporcionar maior aceleração, resultando em um menor tempo de resposta dinâmica.

Agradecimentos

A Unijuí e ao Instituto Federal Farroupilha, pelo suporte e apoio.

Referências

- [1] R. R. Bertolotto, R. F. Camargo. Equações Diferenciais Fracionárias em Engenharia. In *Anais do Congresso de Matemática Aplicada e Computacional (CMAC Sudeste 2015)*, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2015.
- [2] P. R. U. Guazzelli, M. Suetake, C. A. Francisco, O. Ogashawara. Proposta e simulação de um sistema de controle de motor CC para veículos elétricos considerando a dinâmica veicular. In *Anais da Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações (DINCON 2013)*, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2013.
- [3] C. S. C. C. Vasconcellos, P. R. Y. Catunda. Projeto, Construção e Controle de um Protótipo de um Quadrirrotor. UFRJ, 2013.
- [4] P. Pounds. Design, construction and control of a large quadrotor micro air vehicle. Ph.D. thesis, Australian National University, 2007.
- [5] P. Pounds, R. Mahony. Design principles large quadrotores for practical applications. In *IEEE international conference on robotics and automation*, 2009.
- [6] Maxon Motor. Datasheet of brushless motor 50 Watts. Disponível em <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/index>. Acessado em 12/01/16.