

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROPULSORES ELETROMECAÑICOS¹ MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTROMECHANICAL PROPULSION SYSTEM

João Vitor Das Chagas Silva², Manuel Martín Pérez Reibold³, Elisiane Pelke Paixão⁴, Christopher Sauer⁵

¹ Projeto de iniciação científica desenvolvido no GAIC (Grupo de Automação Industrial e Controle) pertencente ao DCEEng - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias.

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI, Bolsista de Iniciação Científica PROBIC/FAPERGS, joaovitor753pw@gmail.com.

³ Professor Dr. no Curso de Mestrado e Doutorado em Modelagem Matemática e no Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIJUI. Orientador.

⁴ Aluna do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI, elisianep251@gmail.com.

⁵ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI, kikisauer@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A popularidade de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem crescido nos últimos anos. No qual destacam-se os quadricópteros. A principal causa disso é a possibilidade de sustentação, aterragem e navegação vertical (VTOL) (REIMBOLD et al., 2015). Possuem estrutura mecânica simples onde quatro propulsores eletromecânicos são distribuídos em torno da aeronave.

Os propulsores são responsáveis pela movimentação e sustentação da aeronave e cada um é constituído de uma hélice, motor e ESC (Eletronic Speed Control). As hélices geram as forças de empuxo e torque necessárias para a aeronave movimentar-se. O motor é responsável pela rotação da hélice. O ESC é responsável por controlar a velocidade dos motores a partir de uma referência fornecida pelo controlador de bordo.

O desenvolvimento de um modelo matemático do quadricóptero que considere os efeitos dinâmicos do propulsor, necessita de modelos que descrevam o comportamento de cada um desses elementos. Com isso, através da simulação computacional é possível verificar o desempenho da aeronave. Essa verificação permite ao projetista definir a melhor combinação possível de componentes para a finalidade na qual a aeronave está sendo construída. Através da simulação, também é possível explorar técnicas de controle de voo.

Portanto o objetivo desse trabalho é apresentar uma investigação a respeito dos modelos matemáticos do motor e da hélice presentes na literatura. Com isso espera-se auxiliar na elaboração do modelo matemático do quadricóptero.

O trabalho está organizado em 5 seções. Na seção 2 é apresentado o objeto de estudo, neste caso o propulsor eletromecânico. A metodologia é apresentada na seção 3. Na seção 4 apresentam-se os modelos matemáticos investigados. Na seção 5 finalmente, são apresentadas as considerações finais e os trabalhos futuros.

2 PROPULSOR ELETROMECAÑICO

Como mencionado anteriormente o propulsor eletromecânico é constituído de uma hélice, motor e

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

ESC. A hélice se constitui de uma estrutura central denominada de cubo, onde pás são fixadas em seu entorno. As pás através de reações aerodinâmicas geram as forças de empuxo e torque. São classificadas de acordo o passo e o diâmetro, fornecidos em polegadas. O passo representa a distância teórica que a hélice percorre em uma volta e está associado ao ângulo da hélice. O motor utilizado pelos quadricopteros é chamado de Brushless DC (BLDC). A ligação é trifásica, geralmente na configuração em estrela com neutro isolado. As bobinas são montadas no estator e o rotor possui ímãs permanentes (PAL; SHUBHUM; OJHA, 2014). A força contra eletromotriz é trapezoidal conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Forma de onda da força contra eletromotriz e das correntes de fase

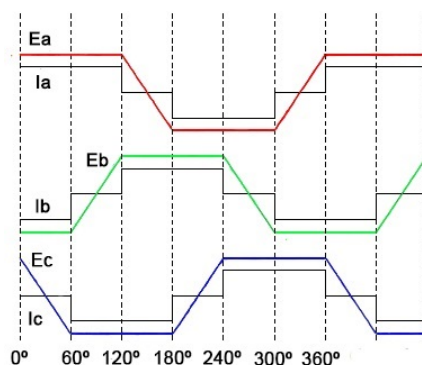


Figura 2 - Fonte: Adaptado de Baldursson (2005)

Nesses motores apenas duas fases conduzem por vez, onde a comutação é realizada por um circuito inversor. As fases que estarão conduzindo em um determinado intervalo de tempo dependem da posição do rotor, definindo a comutação do circuito inversor. Como também está ilustrado na Figura 1.

O ESC possui duas partes basicamente, o circuito inversor que comutará as fases dependendo da posição do rotor e o controlador de velocidade. A topologia do controlador de velocidade depende do fabricante. Dessa forma um modelo matemático de um ESC comercial é dificultado, pois a técnica de controle é inserida dentro do microcontrolador. Dessa forma para obter o modelo matemático desse circuito técnicas de modelagem matemática caixa preta podem ser implementadas.

3 METODOLOGIA

No desenvolvimento desse trabalho a metodologia adotada foi uma intensa revisão bibliográfica. Onde a pesquisa priorizou artigos científicos, livros e teses, disponíveis em base de dados, como na biblioteca da universidade (Unijuí) e na internet, posteriormente tais modelos foram avaliados considerando a possibilidade de obter os parâmetros mediante ensaios e o custo computacional envolvido durante o processamento do modelo. Com o intuito de aplica-lo no modelo matemático e simulação de um quadricoptero.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijui

4 MODELOS MATEMÁTICOS DA HÉLICE E DO MOTOR

Duas grandezas relacionadas às hélices devem ser descritas, o Empuxo (T) e o torque (Q), o qual é implementado como carga no motor BLDC. Ambos podem ser descritos através das equações 1 e 2. É a mesma abordagem apresentada por Roskam (1997) para avaliar o desempenho das hélices.

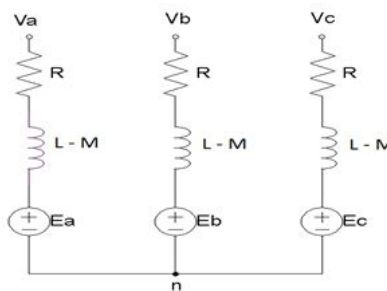
$$T = C_t \rho n^2 D^4 \quad (1)$$

$$Q = C_q \rho n^2 D^5 \quad (2)$$

No qual ρ é a densidade do ar, n é o número de revoluções por segundo, D o diâmetro, C_t é o coeficiente de empuxo e C_q o coeficiente de torque. Esses coeficientes podem ser obtidos experimentalmente através de plataformas específicas como em Brandt e Selig (2011), onde a performance de diversas hélices utilizadas em VANTS foram analisadas. Para condições onde a aeronave está pairando esses coeficientes podem ser considerados constantes, porém quando a mesma está se locomovendo no ar eles não são mais constantes e dependem da velocidade da aeronave e da velocidade angular da hélice. Podendo serem assim escritos através de uma função após realizar-se uma interpolação.

Na Figura 2 o circuito equivalente do motor BLDC está ilustrado. Onde V_a , V_b e V_c e E_a , E_b e E_c são as tensões e forças contra eletromotrizes das fases A, B e C respectivamente. R é a resistência de fase, L é a indutância própria e M a indutância mútua.

Figura 2 - Circuito equivalente de um BLDC



Fonte: Adaptado de Xia (2012)

Com isso a partir do circuito da Figura 2 é possível obter as equações das tensões de fase descritas na equação 3 na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim como o torque elétrico (T_e) pode ser descrito através da equação 4. No qual J é coeficiente

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

de inércia, K_f o coeficiente de fricção, ω a velocidade angular e T_L é o torque de carga, nesse caso o torque da hélice dado pela equação 2.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + K_f \omega + T_L \quad (4)$$

A amplitude da força contra eletromotriz depende da velocidade angular e é descrita pela equação 5. No qual K_e é o coeficiente da força contra eletromotriz.

$$E = K_e \omega \quad (5)$$

As equações da forma de onda das forças contra eletromotrices da fase A B e C podem ser derivadas da figura 1. Sendo descritos por $F_a(\theta_e)$, $F_b(\theta_e)$ e $F_c(\theta_e)$ mostrados nas equações 6, 7 e 8 em função do ângulo elétrico, descrito através da equação 9, onde p é o número de polos e θ_m o ângulo do rotor (BALDURSSON, 2005).

$$F_a(\theta_e) = \begin{cases} 1 & , & 0 \leq \theta < 2\pi/3 \\ -\frac{6}{\pi}\theta + 5 & , & 2\pi/3 < \theta \leq \pi \\ -1 & , & \pi < \theta \leq 5\pi/3 \\ \frac{6}{\pi}\theta - 11 & , & \pi < \theta \leq 5\pi/3 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_b(\theta_e) = \begin{cases} -1 & , & 0 \leq \theta < \pi/3 \\ \frac{6}{\pi}\theta - 3 & , & \pi/3 < \theta \leq 2\pi/3 \\ 1 & , & 2\pi/3 < \theta \leq 4\pi/3 \\ -\frac{6}{\pi}\theta + 9 & , & 4\pi/3 < \theta \leq 5\pi/3 \\ -1 & , & 5\pi/3 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

$$F_c(\theta_e) = \begin{cases} -\frac{6}{\pi}\theta + 1 & , & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{3} \\ -1 & , & \pi/3 < \theta \leq \pi \\ \frac{6}{\pi}\theta - 7 & , & \pi < \theta \leq 4\pi/3 \\ 1 & , & 4\pi/3 < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (9)$$

O torque elétrico também pode ser descrito em função dos parâmetros elétricos através da equação 10. No qual, K_t é o coeficiente de torque e I_a, I_b e I_c são as correntes das fases A, B e C respectivamente.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

$$T_e = \frac{K_t}{2} [F_a(\theta_e)I_a + F_b(\theta_e)I_b + F_c(\theta_e)I_c] \quad (10)$$

Para simular essas equações também é necessária a simulação de um circuito inversor o que acarreta uma maior carga computacional, portanto uma abordagem para simplificar as equações é implementar o motor BLDC através de um motor DC convencional, devido a ambos possuírem características de torque versus velocidade similares, divergindo apenas que o motor BLDC possui oscilação no torque devido ao chaveamento do inversor. Com isso, reduzir o custo computacional necessário, e simplificar as equações do quadricóptero.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As equações para implementação de um motor BLDC e das hélices de um propulsor eletromecânico foram apresentadas. Com isso espera-se auxiliar na construção de um modelo matemático do quadricóptero que considere a dinâmica dos rotores. Para implementar essas equações é necessário conhecer as constantes do motor e hélice, além dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor como indutância, resistência e coeficiente de inércia. Existe a necessidade, portanto de realizar ensaios tanto com as hélices como com os motores, afim de obtê-los. Dessa forma, como sugestão de trabalhos futuros tem-se o desenvolvimento de plataformas para realizar esses ensaios.

Palavras-chaves: Motor DC; Hélice; Propulsor eletromecânico, quadricóptero

Keywords: BLDC; Electromechanical propulsor; UAV; Propeller

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS o apoio concedido para a elaboração desse trabalho investigativo, à UNIJUI e ao GAIC (Grupo de Automação Industrial e controle).

6 REFERÊNCIAS

- BALDURSSON, S. **BLDC Motor Modelling and Control - A Matlab®/Simulink® Implementation**. Dissertação de mestrado - Institutionen för Energi och Miljö, Maskingränd/SE, 2005. Disponível em: < <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/BaldurssonStefanMSc.pdf> >. Acesso em: 25 junho 2018.
- BRANDT J. B.; SELIG M. S. **Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers**. 49^o AIAA Aerospace Sciences Meeting, p. 1- 18, 2011.
- PAL, P.; SHUBHUM TM; OJHA A. **Simulation of Brushless DC Motor for Performance Analysis using MATLAB/SIMULINK Environment**. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, V. 2, n. 6, 2014.
- REIMBOLD M. M. P. et al. **Plataforma experimental para modelagem matemática**. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), p. 1149-1155, 2015.
- ROSKAM, J.; LAN, C. T. E. **Airplane Aerodynamics and Performance**. Lawrence, E.U.A: Design,

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

Analysis and Research Corporation (DARcorporation), 1997.

XIA, C. L. **Permanent magnet brushless dc motor drives and controls**. Singapura: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2012.