

Parameters Identification and Analysis of Brushless Direct Current Motors

M. F. da Silva, F. F. Bastos, D. S. da S. Casillo and L. A. Casillo

Abstract— This paper presents the parameters identification and analysis of brushless direct current motors. As it is not always possible to find such information in manuals, the objective was to perform experiments to find the parameters of the brushless direct current motors. By the results of the experiments, it was possible to determine important constants for obtaining the motor transfer function, and the efficiency and performance motor curves. The motor transfer function is a mathematical representation to describe the system inputs and outputs, and it is used in response analysis and control simulations. Besides contributing to the procedure to obtaining the transfer function, and efficiency and performance curves for research applications in the control and automation field, this work contributes to the obtained results for the motor A2212/13T.

Keywords— Brushless Direct Current Motor, Parameters, Identification.

I. INTRODUÇÃO

SEGUNDO Bolton [1] os motores de Corrente Contínua (CC) podem ser divididos em dois grupos principais: os que utilizam escovas para fazer contato com um anel comutador montado no rotor para comutar a corrente de uma bobina do rotor para a outra, e os que não usam escovas. O rotor é a parte rotativa do motor que gira no campo de um ímã permanente ou de um eletroímã, sendo esse denominado de estator, visto ser estacionário.

Os motores CC com escovas possuem rotor constituído de uma bobina enrolada na armadura (cilindro de material magnético) e estator composto de polos de campo de ímã permanente ou eletroímã que produzem um campo magnético. Ao contrário dos motores CC com escovas, os motores de Corrente Contínua Sem Escovas, do inglês *Brushless Direct Current* (BLDC) possuem rotor constituído de ímã permanente e estator composto de três bobinas enroladas também conhecidas como fases [1].

Uma das vantagens do motor BLDC sobre os motores CC convencionais é a ausência de um comutador eletromecânico e de escovas. Quando comparados com os motores CC com escovas, os motores BLDC têm maior eficiência, menor ruído e menor relação entre suas dimensões e a potência que podem desenvolver [2], além de um alto desempenho juntamente com confiabilidade e baixo índice de manutenção e capacidade de altas velocidades devido à falta de escovas [1]. Como

principal desvantagem, os motores BLDC apresentam custo mais elevado devido à necessidade de um circuito de acionamento e controle de velocidade dedicado [3].

Os principais parâmetros para a escolha dos motores BLDC em suas diversas aplicações são: tensão de trabalho, corrente máxima e constante de velocidade (ou constante do motor) que é relação entre a velocidade e a tensão e que determina a rotação máxima que o motor pode atingir [3].

Os motores BLDC estão tendo uma utilização crescente em situações onde um alto desempenho juntamente com confiabilidade e baixo índice de manutenção são essenciais [1]. Dependendo da aplicação específica, os motores BLDC podem ser utilizados quando se necessita de um baixo momento de inércia, como no caso do acionamento do fuso de leitores de disco de alto desempenho utilizados em computadores [4]. Outras aplicações são o da sua utilização em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) [5], carros elétricos [2], aplicações industriais, entre outras.

Este trabalho tem por objetivo apresentar o procedimento de obtenção da função de transferência de um motor BLDC, além de suas curvas de eficiência e desempenho. A função de transferência do motor é uma representação matemática da relação da entrada e da saída do sistema, sendo utilizada em análise de respostas e em simulações de controle.

As próximas seções deste artigo estão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 serão abordados os parâmetros necessários para a obtenção da função de transferência e das curvas de eficiência e desempenho de motores BLDC. Na seção 3 serão apresentados os materiais utilizados nos experimentos. A seção 4 apresenta os resultados obtidos dos experimentos. Por fim, na seção 5 as considerações finais são apresentadas.

II. PARÂMETROS

Os parâmetros necessários para a obtenção da função de transferência do motor BLDC e para a obtenção das curvas de eficiência e desempenho do motor são obtidos conforme as equações apresentadas nesta seção.

A. Função de Transferência:

A equação (1) [6], [7], apresenta a função de transferência $G(s)$ para o motor de corrente contínua sem escovas.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad (1)$$

M. F. da Silva, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil, monique.2411@hotmail.com

F. F. Bastos, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil, catrak@artilhariadigital.com

D. S. da S. Casillo, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil, danielle@ufersa.edu.br

L. A. Casillo, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil, casillo@gmail.com

Onde $\Omega(s)$ é a velocidade angular do rotor no domínio da frequência, $V(s)$ é a tensão de entrada no domínio da frequência, K_m é a constante do motor e τ é a constante de tempo.

A constante do motor é equivalente à equação (2) [6], [7].

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e} \quad (2)$$

Onde K_t é a constante de torque, K_e é a constante elétrica, R_a é a resistência de armadura e B é o coeficiente de atrito viscoso do motor.

A constante de tempo é equivalente à equação (3) [6], [7].

$$\tau = \frac{R_a J_{mz}}{R_a B + K_t K_e} \quad (3)$$

Onde J_{mz} é o momento de inércia do rotor.

A constante de torque é equivalente à equação (4) [6].

$$K_t = K_e \quad (4)$$

Essa igualdade se deve ao fato de a potência mecânica desenvolvida ser igual à potência elétrica absorvida no rotor [6].

A constante elétrica é equivalente à equação (5) [2], [6].

$$K_e = \frac{1}{K_V} \quad (5)$$

Onde K_V é a constante de velocidade do motor.

A constante de velocidade é equivalente à equação (6) [2].

$$K_V = \frac{\omega(t)}{V_a(t) - R_a I_a(t)} \quad (6)$$

Onde $\omega(t)$ é a velocidade angular máxima sem carga, $V_a(t)$ é a tensão nominal, R_a é a resistência de armadura e $I_a(t)$ é a corrente máxima sem carga.

O momento de inércia do rotor é equivalente à equação (7) [8].

$$J_{mz} = \frac{1}{2} m_m r_m^2 \quad (7)$$

Onde m_m é a massa do motor e r_m é o raio do motor.

B. Gráfico de Eficiência:

Os principais parâmetros para a obtenção da curva de eficiência do motor são: rendimento (eficiência), potência mecânica máxima, corrente máxima (de rotor bloqueado) e torque máximo.

O rendimento do motor BLDC é obtido pela equação (8) [2].

$$n = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + P_{perdas}} \quad (8)$$

Onde n é o rendimento, P_m é a potência mecânica, P_e é a potência elétrica, P_{perdas} são as perdas de potência do motor.

Substituindo equações da potência mecânica e das perdas na equação (8) [2], a equação do rendimento resultante é dada pela equação (9).

$$n = \frac{(I_n - I_a)(V_a - R_a I_n)}{(I_n - I_a)(V_a - R_a I_n) + R_a I_n^2 + 2V_a I_a - R_a I_a^2} \quad (9)$$

Onde I_n é a corrente correspondente à eficiência máxima.

A potência mecânica máxima do motor é obtida pela equação (10) [2], [6], [7]. O valor de potência máxima é obtido quando as curvas de velocidade angular e de torque se cruzam no gráfico de desempenho do motor, ou seja, é equivalente à metade do valor de velocidade angular máxima multiplicada pela metade do valor de torque máximo.

$$P_m = \frac{T_{rb} \omega}{4} \quad (10)$$

Onde T_{rb} é o torque máximo (torque de rotor bloqueado).

O torque máximo do motor é obtido pela equação (11) [2] [6], [7].

$$T_{rb} = K_t (I_{rb} - I_a) \quad (11)$$

Onde I_{rb} é a corrente máxima (corrente de rotor bloqueado).

A corrente máxima do motor é obtida pela equação (12) [2].

$$I_{rb} = \left(\frac{\omega}{K_V} - V_a \right) \left(\frac{1}{-R_a} \right) \quad (12)$$

Onde ω deve ser zero para que a corrente I_{rb} seja máxima.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nos experimentos são apresentados nesta seção.

A. Motor BLDC:

O motor BLDC utilizado neste trabalho é o modelo A2212/13T, o qual é apresentado na Fig. 1.



Figura 1. Motor BLDC.

B. Circuito de Acionamento e Controle de Velocidade:

O acionamento do motor BLDC é realizado por meio de um dispositivo Controlador Eletrônico de Velocidade, do inglês *Electronic Speed Controller* (ESC), o qual é capaz de controlar a velocidade de giro deste tipo de motor. Seu acionamento é por PWM com frequência de 50 Hz e razão cíclica de 10% a 20%, portanto pulsos de 1 ms equivalem ao motor parado e 2 ms em rotação máxima [3].

Para os motores BLDC não basta ajustar a intensidade de fluxo do campo ou a tensão da armadura, como nos motores de CC com escova. A maneira correta de se controlar a velocidade é variando a frequência das correntes entre suas fases. Isto é realizado por um circuito dedicado que, eletronicamente, gera uma sequência de acionamento para um conjunto de Transistores de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico, do inglês *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET), que por sua vez acionam as bobinas do motor na sequência adequada [3].

O ESC deve ser ligado à bateria, apresenta três saídas que regulam a velocidade angular do motor e possui um conector onde é captado o sinal PWM de controle. Deve ser selecionado a partir da corrente máxima do motor que será acionado. Recomenda-se 20% acima desta corrente máxima para evitar superaquecimento [3].

A Fig. 2 apresenta o ESC Toward Pro Mag 8 (18 A) utilizado no experimento de identificação dos parâmetros do motor BLDC.



Figura 2. ESC.

C. Bateria:

Baterias de polímero de lítio, do inglês *Lithium Polymer* (LiPo), permitem elevadas correntes de descarga e também possuem maior capacidade e menor peso comparado com outros tipos de baterias com mesma capacidade. Quanto à sua recarga, as baterias LiPo não necessitam de um ciclo específico, podendo ser recarregadas sempre que houver

necessidade, sendo seu tempo de carga reduzido [3]. A Fig. 3 apresenta a bateria Lion Power® utilizada neste trabalho.



Figura 3. Bateria.

São três as principais características das baterias LiPo: carga elétrica, número de células e capacidade de descarga. A carga da bateria é dada normalmente em mAh, que equivale a 3,6 C (Coulomb). A partir dessa característica é possível calcular o quanto uma bateria totalmente carregada deve durar conhecendo-se a corrente consumida. Estas baterias apresentam 3,7 V por célula, portanto o número de células define a tensão nominal da bateria. Outro dado importante na escolha de baterias é o quanto de corrente elas podem fornecer, isto é dado pela sua capacidade de descarga, e é indicada pela letra C [3].

A bateria utilizada possui três células, carga de 2200 mAh, taxa de descarga contínua de 25 C, ou seja, é capaz de fornecer até 25 vezes sua carga, o que indica a possibilidade de correntes até 55 A sem danificar a bateria.

D. Unidade Microcontroladora:

A unidade microcontroladora utilizada para enviar sinais de Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse-Width Modulation* (PWM) para o circuito de acionamento e controle de velocidade do motor BLDC é o Arduino Uno®, visualizado na Fig. 4, o qual é portado de um microcontrolador ATmega328, fabricado pela Atmel®, contendo 14 pinos de Entrada/Saída (E/S) digitais, sendo 6 pinos adaptados para PWM, 6 entradas analógicas, 32 kB de memória *flash*, 2 kB de Memória Estática de Acesso Aleatório, do inglês *Static Random-Access Memory* (SRAM), um oscilador de cristal de 16 MHz, pinos de alimentação (5 V, 3,3 V e GND), porta de Barramento Serial Universal, do inglês *Universal Serial Bus* (USB), para conexão com o computador e conector *jack* para alimentação externa (de 7 a 12 V), além de um conversor Analógico/Digital (A/D) de 10 bits para tratamento dos valores provenientes das entradas analógicas. Este modelo contém a quantidade de pinos e memória suficientes para a implantação dos testes deste projeto [9].

Arduino® é o nome dado ao Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês *Integrated Development Environment* (IDE), baseado em um microcontrolador da família Atmel®. O Arduino® tem uma biblioteca bem organizada para diferentes sensores e atuadores [10].

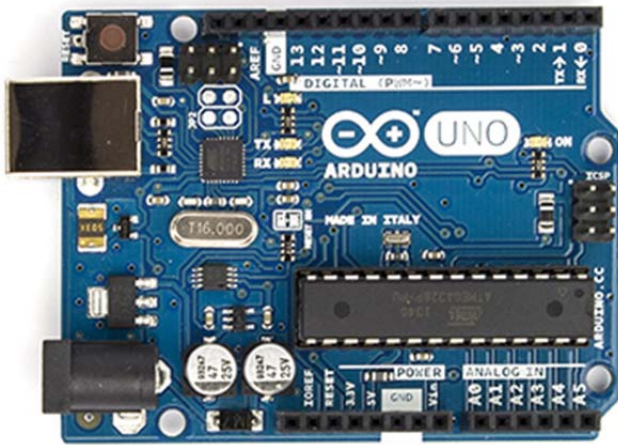


Figura 4. Arduino Uno.

E. Tacômetro:

Para a medição da velocidade dos motores são utilizados sensores de velocidade angular também conhecidos por tacômetros. Os tacômetros são dispositivos que fornecem uma saída proporcional a uma velocidade angular. O tacômetro utilizado, apresentado na Fig. 5, é um tacômetro óptico, o qual permite determinar a velocidade do motor em rps (contabilizando o número de pulsos gerados por segundo).

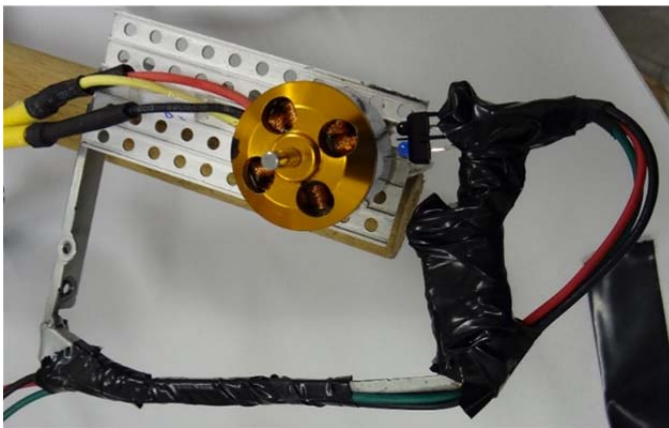


Figura 5. Tacômetro.

A contabilização do número de pulsos é realizada através de um sensor óptico reflexivo, o TCRT5000, que possui um led infravermelho de cor azul e um transistor infravermelho, do inglês *Infrared* (IR), que é um fototransistor de cor preta. Quando um objeto, no caso um pedaço de adesivo branco colado no motor, se aproxima do sensor, a luz infravermelha é refletida no objeto, atravessa para o outro lado e ativa o transistor, como mostra a Fig. 6, fazendo com que juntamente com o Arduino Uno[®] seja contabilizado o número de pulsos [11].

O tacômetro foi utilizado para medir a velocidade máxima do motor sem carga. A velocidade encontrada é dada em rps, podendo ser convertida para rpm ou rad/s.

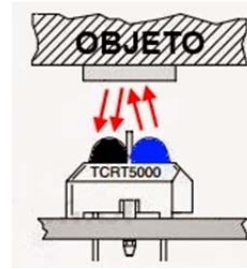


Figura 6. Sensor óptico.

F. IDE para Arduino:

A implementação do algoritmo que controla a velocidade do motor BLDC e determina sua velocidade em rps ocorre através da programação do Arduino[®], realizada por meio de uma linguagem de programação própria, baseada em Wiring, que é um subconjunto das linguagens C e C++. Esta linguagem é implementada em um IDE próprio, baseado em Processing, utilizado em sistemas operacionais Windows, Mac OS X e Linux [12].

G. Instrumentos de Medição:

Para a obtenção da resistência de armadura do motor BLDC foi utilizado um multímetro. Um alicate amperímetro foi utilizado para medir a corrente de fase do motor sem carga, bem como a potência ativa e o fator de potência. Para medir o diâmetro do motor foi utilizado um paquímetro. E por fim, foi utilizada uma balança de precisão para medir a massa do motor BLDC.

H. Plataforma de Teste:

Uma placa de alumínio foi utilizada como base de sustentação para o motor BLDC que foi fixada em um pedaço de madeira, como mostra a Fig. 7.



Figura 7. Plataforma de teste.

Em seguida, o tacômetro óptico também foi fixado na estrutura de madeira, como apresentado na Fig. 8, de modo que possibilitasse a medição da velocidade do motor.

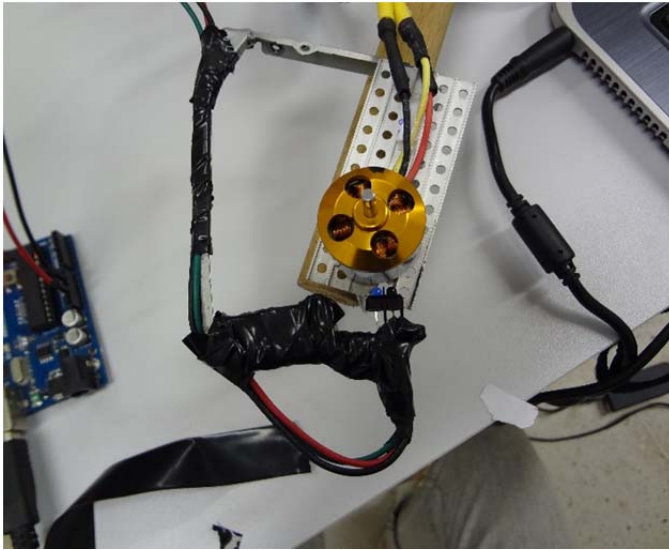


Figura 8. Experimento.

IV. RESULTADOS

Os resultados dos experimentos para a obtenção das características do motor BLDC são apresentados na Tabela I. O coeficiente de atrito viscoso foi considerado nulo.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DO MOTOR BLDC

SIMBOLOGIA	PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
m_m	Massa do motor	0,05417	kg
r_m	Raio do Motor	0,0125	m
B	Coeficiente de atrito	0	N.m.s/rad
R_a	Resistência de armadura	0,14	Ω
ω	Velocidade máxima sem carga	1445,133	rad/s
I_a	Corrente de fase sem carga	0,67	A
V_a	Tensão nominal	11,1	V

Com os resultados da Tabela I foram calculados os valores do momento de inércia, equação (7), da constante de velocidade, equação (6), da constante de torque, equação (4), da constante elétrica, equação (5), da constante do motor, equação (2), e da constante de tempo, equação (3), que são apresentados na Tabela II.

TABELA II
CARACTERÍSTICAS DO MOTOR BLDC

SIMBOLOGIA	PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
J_{mz}	Momento de inércia do rotor	$4,23203 \times 10^{-6}$	kg.m ²
K_v	Constante de velocidade	131,3016864	rad/V.s
K_t	Constante de torque	$7,616048 \times 10^{-3}$	N.m/A
K_e	Constante elétrica	$7,616048 \times 10^{-3}$	V.s/rad
K_m	Constante do motor	131,3016864	rad/V.s
τ	Constante de tempo	0,010214509	s

A equação (13) apresenta a função de transferência resultante, obtida pela equação (1).

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{131,3016864}{0,010214509s + 1} \quad (13)$$

Caso o motor tenha aplicações em VANTs, por exemplo, o momento de inércia da hélice em relação ao eixo de giro do rotor deve ser calculado e somado ao momento de inércia do rotor, fazendo com que apenas o valor da constante de tempo seja alterada.

A Tabela III apresenta os valores necessários para a obtenção da curva de eficiência e desempenho do motor BLDC.

TABELA III
CARACTERÍSTICAS DO MOTOR BLDC

SIMBOLOGIA	PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
ω	Velocidade máxima	13800	rpm
I_{rb}	Corrente de rotor bloqueado	79,28	A
T_{rb}	Torque de rotor bloqueado	0,6	N.m
P_m	Potência mecânica máxima	216,3	W
I_n	Corrente para rendimento máximo	9,51	A
n	Rendimento	75,86	%

Com os valores encontrados para velocidade, medida com a utilização do tacômetro; corrente, equação (12); torque, equação (11); potência, equação (10); e rendimento, equação (9); foram obtidas as curvas de eficiência e desempenho do motor BLDC como mostra a Fig. 9.

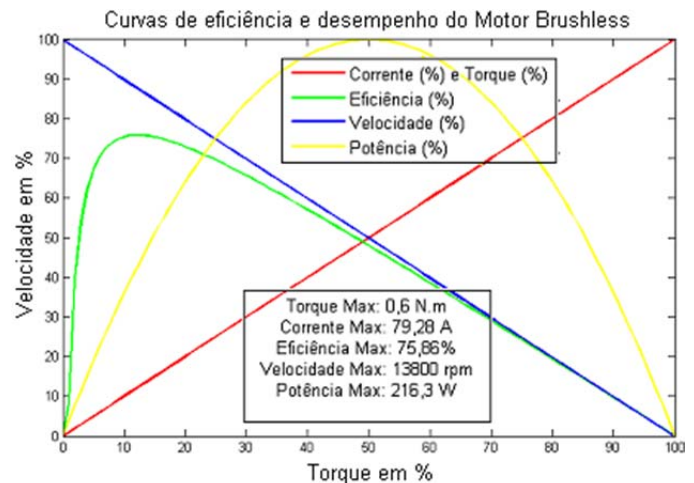


Figura 9. Curvas de eficiência e desempenho do motor BLDC.

Os valores máximos do gráfico estão em forma de porcentagem, onde a linha azul representa a velocidade, a linha verde representa a eficiência, a linha amarela representa a potência e a linha vermelha representa a corrente e o torque. Os resultados indicaram uma eficiência de 75,86%, velocidade máxima de 13800 rpm, torque máximo de 0,6 N.m, corrente máxima de 79,28 A e potência máxima de 216,3 W. A eficiência máxima do motor ocorre quando a corrente é de 9,51 A, correspondendo a um torque de 0,53 N.m, potência de 91,37 W e velocidade de 173,42 rad/s ou 1656 rpm.

V. CONCLUSÃO

A crescente utilização de motores BLDC em aplicações como VANTs e carros elétricos, que são objetos de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de engenharia elétrica e controle e automação, motivaram o estudo referente a motores BLDC.

Foram apresentados os materiais e procedimentos necessários para a realização de experimentos de identificação de parâmetros de motores BLDC, utilizados na obtenção de sua função de transferência, curvas de eficiência e desempenho, os quais são interessantes nas aplicações que possuem motores BLDC como atuadores, além da contribuição com os resultados obtidos referentes à velocidade, corrente, potência, torques máximos e eficiência do motor A2212/13T.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio concedido na forma de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Bolton, *Mecatrônica: Uma abordagem multidisciplinar*, 4th ed. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2010.
- [2] C. E. P. D'Avila, L. C. Gertz e M. A. Silveira, A. Cervieri, "Estudo de um motor CC brushless aplicados no acionamento de um carro elétrico de pequeno porte," *Revista Liberato*, vol. 12, no. 18, pp. 159–168, jul./dez. 2011.
- [3] K. L. Silva, A. S. Morais, J. S. Morais e R. Gedraite, "Hardware para controle avançado de um Veículo Aéreo Não Tripulado do tipo Quadróptero," in *XII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEEL)*, Uberlândia, 2013, pp. 1–6.
- [4] F. Golnaraghi e B. C. Kuo, *Sistemas de Controle Automático*, 9th ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2012.
- [5] S. Bouabdallah e R. Siegwart, "Full Control of a Quadrotor," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Diego, CA, 2007, pp. 153–158.
- [6] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, "Modelo Matemático de Motores de Corrente Contínua," Available: http://www2.dem.inpe.br/mcr/Usjt/Motores/pdf/Aulas_57-60.pdf. Accessed: 29 abr. 2014.
- [7] R. C. Dorf e R. H. Bishop, *Sistemas de Controle Modernos*, 11th ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2011.
- [8] F. P. Beer e E. R. Johnston Jr, *Mecânica Vetorial para Engenheiros*, 5th ed. São Paulo, Brasil: Pearson Makron Books, 2006.
- [9] Arduino, "Arduino/Genuino Uno: Overview and Technical Specs", Available: <http://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>. Accessed: 04 ago. 2015
- [10] H. Lim, J. Park, D. Lee e H. J. Kim, "Build Your Own Quadrotor," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 33–45, set. 2012.
- [11] Arduino e Cia, "Sensor Óptico Reflexivo TCRT500," Available: <http://www.arduinoocia.com.br/2013/10/sensor-optico-reflexivo-tert5000.html>. Accessed: 28 jun. 2015.
- [12] L. L. Gioppo, M. M. K. Higaskino, R. F. Costa e W.H. T. Meira, "Robô Seguidor de Linha," Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Relatório, 2009.



Monique Fernandes da Silva é graduada em Engenharia de Energia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, em 2013 e mestre em Sistemas de Comunicação e Automação, na área de Controle, da Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA), em 2015. Suas principais áreas de pesquisa são: Modelagem Dinâmica e Controle de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).



Felipe Fonseca Bastos é graduado em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, em 2014. Atualmente é aluno de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).



Danielle Simone da Silva Casillo possui graduação em Engenharia de Computação pela Universidade Potiguar (UnP), mestrado e doutorado na área de Automação e Controle em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Atualmente é professora Adjunto III do curso de Ciências da Computação do Departamento de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Atua também como professora colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. É coordenadora de cursos Técnicos em Tecnologia da Informação do Instituto Metrópole Digital – polo Mossoró. Tem experiência em projetos de engenharia na área de segurança eletrônica. Atua na área de Ciência da Computação e Engenharia de Energia, com ênfase em Controle e Automação de Processos.



Leonardo Augusto Casillo é graduado em Engenharia de Computação pela Universidade Potiguar (UnP), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, em 2002. Obteve o título de mestre em Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, em 2005 e de Doutor, em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, em 2013. Atualmente é professor Adjunto I do curso de Ciências da Computação do Departamento de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e suas pesquisas se concentram na área de microprocessadores e microcontroladores, com ênfase em programação em VHDL e projetos com arduino.