

## Controle de motor elétrico Brushless Maxon 45fl-200142 para robô jogador de futebol Small Size

### Aloysio Galvão Lopes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Rua H8C, 322, DCTA  
12.228-462 - São José dos Campos/SP  
Bolsista PIBIC - CNPq  
aloysiogl@gmail.com

### Carlos César Aparecido Eguti

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Centro de Competência em Manufatura  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50  
12.229-900 – São José dos Campos / SP  
cesar.eguti@gmail.com

### Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Divisão de Ciência da Computação  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50  
12.229-900 – São José dos Campos / SP  
maximo.marcos@gmail.com

**Resumo:** Neste trabalho é realizada a simulação e implementação de um controle do motor elétrico do tipo Brushless Maxon 45fl-200142. O objetivo do trabalho foi realizar o modelamento matemático das equações que regem o motor citado; realizar a simulação do modelo obtido; desenvolver, simular e otimizar os parâmetros de um controlador PI; desenvolver o hardware para o controle do motor e implementar o controlador para o motor.

Para isso, foi, inicialmente, projetado e criado o hardware para controle do motor. Em seguida, o hardware foi testado em um motor BLDC de drive de DVD em loop aberto. Após isso, foi realizada a modelagem do motor baseada nos parâmetros físicos fornecidos pelo fabricante; com base nisso, foi possível simular o comportamento do motor e projetar o controlador. Por fim, foi possível implementar o controlador no hardware desenvolvido e controlar o motor Maxon 45fl-200142.

Dos resultados obtidos, foi possível concluir que o controle do motor só pode ser realizado com feedback. Isso significa que o controle do motor do drive de DVD em loop aberto não obteve sucesso. No entanto, o controle do motor Maxon foi realizado com sucesso, pois foi utilizado feedback dos sensores de efeito Hall, além do mais os resultados de velocidade angular obtidos pelo motor se mantiveram fiéis ao modelo, o que mostra que o modelo utilizado descreve adequadamente o motor.

**Palavras-chave:** Motor elétrico Brushless, Modelagem física, Simulação, Controle de velocidade.

## 1. INTRODUÇÃO

A ITAndroids, equipe de robótica do ITA, é uma iniciativa de alunos do ITA que representa a instituição em diversas competições de robótica nacionais e internacionais. O principal objetivo dessa iniciativa é a integração dos alunos com atividades de pesquisa em engenharia, em especial em robótica e inteligência artificial.

A ITAndroids acredita que o hardware é fundamental no desenvolvimento de qualquer projeto de robótica, por isso, recentemente tem-se investido bastante no desenvolvimento dessa área. O desenvolvimento de conhecimento na área de controle de motores elétricos, assim, torna-se fundamental para a melhoria técnica da iniciativa.

Nesse sentido, abre-se caminho para a participação na categoria Small Size, a qual necessita de uma eletrônica mais desenvolvida o que implica diretamente no desenvolvimento de conhecimento sobre controle de motores. Os motores utilizados para a locomoção dos robôs são motores Brushless, essa escolha se justifica pelo fato de que motores Brushless (sem comutadores mecânicos do tipo escova) são mais eficientes, ocupam menos espaço e apresentam desgaste muito menor que motores DC tradicionais.

Uma vez que o desgaste mecânico durante as partidas de futebol de robôs Small Size é elevado e é preciso alto rendimento dos sistemas mecânicos: os motores Brushless, também chamados BLDC são a escolha ideal; além disso, as principais equipes internacionais fazem uso de desses motores. Como principal exemplo temos a equipe tailandesa SKUBA, descrita em Lertariyasakchai *et al.* (2012), na qual se baseia o projeto mecânico do Small Size da ITAndroids. Em contrapartida, o controle deste tipo de atuador mecânico se dá de maneira mais complexa, uma vez que a comutação do campo magnético não é feita mecanicamente por escovas. A Figura 1, abaixo, ilustra a mecânica de um motor BLDC.

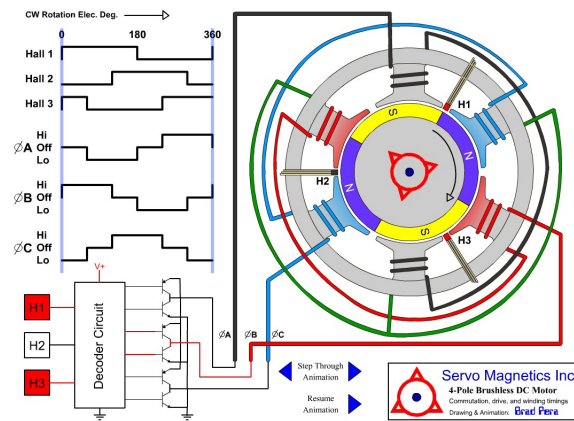


Figura 1: Esquema completo de um motor elétrico Brushless trifásico.

O controle da comutação do campo magnético para esse tipo de motor é feito eletronicamente, seguindo o procedimento descrito em Yedamale (2003), o que acarreta que seja necessário que um dispositivo eletrônico, tal como um microcontrolador, fique dedicado ao controle de cada um dos quatro motores do robô Small Size. Isso aumenta a complexidade do sistema de locomoção como um todo, no entanto traz diversos ganhos em eficiência para o projeto.

Nesse sentido, busca-se, aqui, modelar o motor Maxon 45fl-200142 e ser capaz de realizar a comutação eletronicamente. Adicionalmente, deseja-se, simular e implementar um controlador PI.

## 2. MODELAGEM DO MOTOR

### 2.1 Funcionamento do Motor Elétrico Brushless Maxon 45fl-200142

Um motor elétrico Brushless têm várias possíveis configurações, no entanto, a configuração trifásica ganha destaque em eficiência. Isso pode ser constatado pela grande preferência no mercado por tal tipo de motor BLDC. O motor aqui estudado é de configuração trifásica, logo, há três entradas cada uma para uma bobina do motor.

Isso significa que existem três fases diferentes que devem ser eletronicamente comutadas para que se obtenha a rotação do motor. Além disso, o ciclo de rotação do motor é composto de seis etapas distintas, portanto o motor rotaciona com uma comutação de seis passos. Há apenas uma sequência correta de seis combinações das fases do motor para cada sentido de rotação. Pode-se, no entanto, encontrar sequências de comutação distintas das duas principais que rotacionam o motor. Comutações com essas sequências resultam em menor eficiência e perda de precisão na rotação, por isso, é essencial encontrar as sequências corretas de comutação.

Vale destacar, como já dito, que cada fase corresponde a uma bobina do motor e que estas bobinas estão interligadas. Assim, cada passo corresponde a aplicar tensão entre dois terminais de duas bobinas. As bobinas podem estar distribuídas ao redor da carcaça do motor como pode ser notado na Fig. 1, o que faz que uma rotação mecânica completa não seja equivalente a um ciclo elétrico (ciclização entre os seis passos de comutação). No caso do motor estudado, são necessárias 48 comutações para que uma revolução completa seja atingida; isso, portanto, significa que a cada oito ciclos elétricos ocorre um ciclo mecânico no motor. A figura 2, abaixo, ilustra a comutação de fases em um motor BLDC.

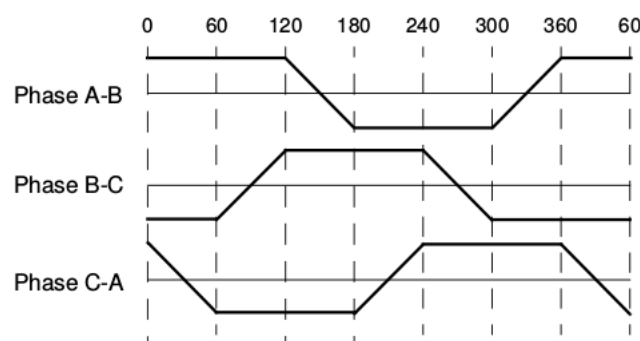


Figura 2: Contra eletromotriz nas três fases de um motor BLDC comutando. Retirado de Yedamale (2003).

Adicionalmente, é comum haver três sensores de efeito hall (como é o caso deste motor), para que seja possível controlar a comutação com feedback. A combinação das três saídas de cada um dos sensores de efeito hall dá a próxima

comutação do motor de maneira única para cada sentido de rotação. Com isso, pode-se montar uma tabela de correspondências entre saídas dos sensores de efeito hall e passo de comutação: a tabela de comutação do motor. Essa tabela, em geral, não é fornecida pelo fabricante e deve ser montada para que seja possível controlar o motor.

## 2.2 Modelamento do Motor

O modelo matemático utilizado no estudo do motor BLDC é o mesmo modelo utilizado para um motor DC convencional, o qual, em termos práticos, é uma boa aproximação. Um modelamento completo pode ser encontrado em Baldursson (2005). Considera-se que o torque produzido pelo motor é proporcional à corrente como mostrado em Eq. (1) e que a tensão no motor é proporcional à velocidade angular  $\dot{\theta}$ , como mostrado em Eq. (2).

$$\tau = K_t i \quad (1)$$

$$V = K_b \dot{\theta} \quad (2)$$

Considerando, ainda, o momento de inércia do motor  $J$  e que existe um atrito viscoso  $b\dot{\theta}$ , pela terceira lei de Newton, chega-se à Eq. (3). Utilizando a lei das malhas e considerando a queda de tensão devido à resistência do motor, à sua indutância e à conversão da energia em energia mecânica, sendo  $\varepsilon$  a tensão da fonte, chega-se à Eq. (4).

$$J\ddot{\theta} = K_t i - b\dot{\theta} \quad (3)$$

$$\varepsilon = K_b \dot{\theta} + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (4)$$

Pode-se, associando Eq. (3) e Eq. (4), chegar à função de transferência do motor, mostrada abaixo em Eq. (5). Observa-se que foram utilizados os dados fornecidos em Maxon (2017) pelo fabricante e foram desconsiderados os termos do atrito viscoso, pois eram negligenciáveis.

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{13.095}{2.66 \cdot 10^{-6} s^2 + 0.0171s + 1} \quad (5)$$

## 3. HARDWARE

Foi confeccionado um hardware para acionamento do motor baseado no esquema mostrado abaixo, em Fig 3, descrito em Atmel<sup>TM</sup> (2008).

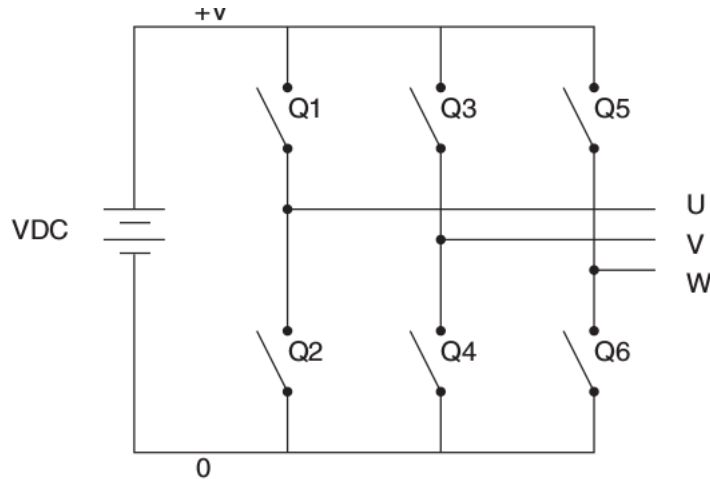


Figura 3: Diagrama do circuito para acionamento do motor. Retirado de Atmel<sup>TM</sup> (2008).

Foram utilizados seis pares darlington TIP 122 para montar o esquema mostrado acima de três meias pontes H e uma placa de desenvolvimento Arduino<sup>TM</sup> Mega ADK para o controle. O sistema inicialmente foi testado com um motor Brushless retirado de um drive de DVD em loop aberto. Observou-se que sem um feedback dos sensores a velocidade máxima atingida pelo motor era muito pequena e a rotação não se dava de maneira suave. Isso mostra que sem informações sobre a posição do rotor, este facilmente não é capaz de acompanhar a variação do campo magnético.

Abaixo, é mostrada na Figura 4 a montagem do circuito para o controle do motor. Na Figura 5, é mostrado o motor de drive de DVD utilizado inicialmente.

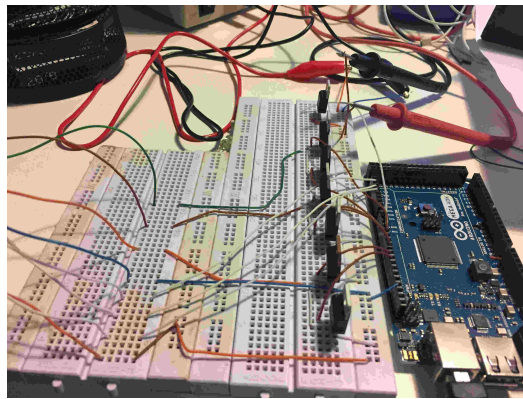


Figura 4: **Figura da montagem do circuito para controle do motor.**

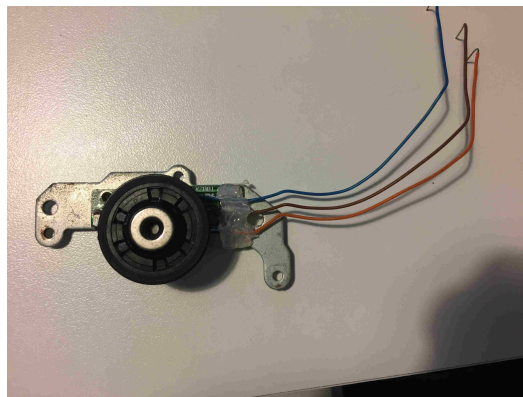


Figura 5: **Motor de drive de DVD utilizado nos testes, nota-se que não há saídas para sensores de efeito hall.**

Em uma segunda etapa, utilizou-se o motor Maxon 45fl-200142, cujo controle é o objetivo deste estudo. Nesse caso, foi possível utilizar o feedback dos sensores de efeito hall e obter uma rotação suave, além disso, foi desenvolvido um script para a obtenção da tabela de comutação, uma vez que esta não é fornecida pelo fabricante. O que este script faz é ciclar lentamente (1s) as saídas do motor conforme descrito na sequência de comutação direta em Atmel<sup>TM</sup> (2008) e, em seguida, fazer a leitura dos sensores de efeito hall. Com isso, é possível montar a tabela de comutação direta; a tabela inversa pe montada por meio da tabela direta, apenas invertendo a lógica de rotação.

Este script pode ser, posteriormente, utilizado para a obtenção da tabela de comutação de qualquer motor Brushless com sensores de efeito hall. Vale ressaltar que a regulação da velocidade aqui é feita utilizando PWM. Para isso, uma saída PWM é gerada para cada transistor que leva corrente do motor ao ground, seguindo o esquema mostrado em Fig. 3. A Figura 6, abaixo, mostra o motor da Maxon rotacionando. Mais adiante serão tratados os aspectos de controle implementados.

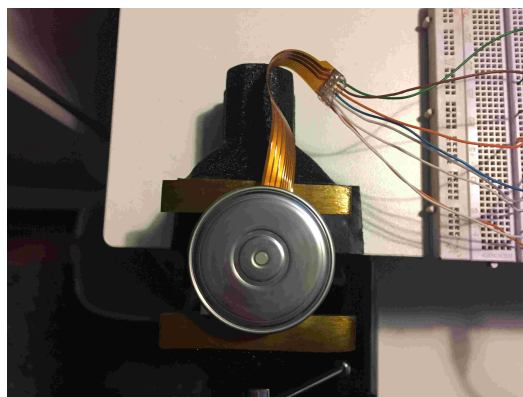


Figura 6: **Motor Maxon 45fl-200142 rotacionando.**

#### 4. SIMULAÇÃO

Foi implementada em MATLAB<sup>TM</sup> a função de transferência de Eq. (5) e, com isso, foi possível obter o gráfico para a resposta em degrau do sistema, bem como o diagrama de Bode. As figuras Fig. 7 e Fig 8, respectivamente, representam a resposta em degrau unitário e o diagrama de Bode da planta obtidos.

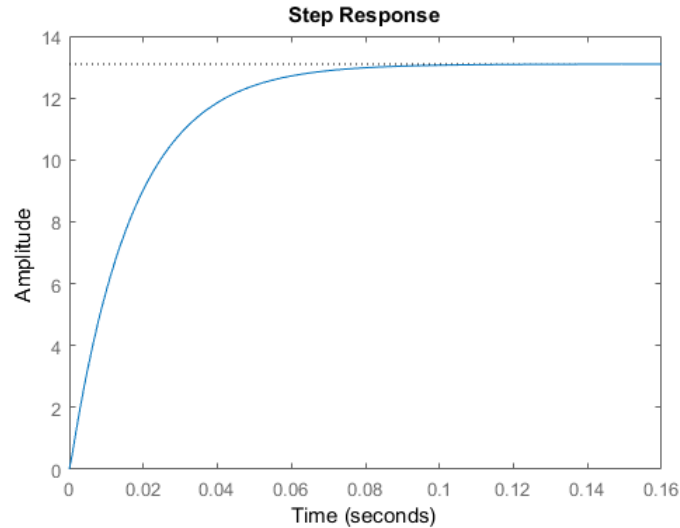


Figura 7: Análise da resposta à um degrau unitário da planta de Eq. (5).

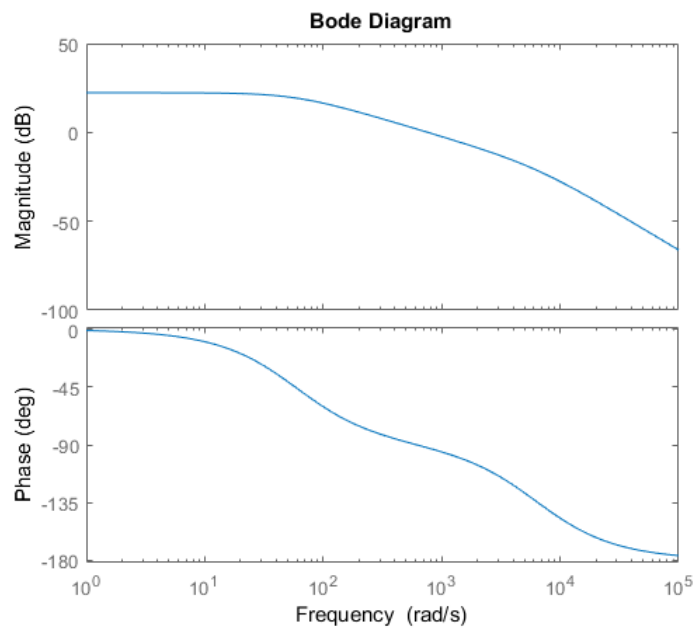


Figura 8: Diagrama de bode para a planta de Eq. (5).

Foi utilizado um controlador PI (proporcional e integral); esta escolha se deve ao fato de que o termo integral do controlador elimina os erros em regime. Ademais, o controle de velocidade não exige tempo de resposta elevado (como seria o caso de um controlador PD). A função de transferência em tempo contínuo para o controlador PI pode ser vista na Eq. (6).

$$\frac{\varepsilon(s)}{\epsilon(s)} = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (6)$$

Foi realizada uma otimização com auxílio da ferramenta de PI tuning, presente no MATLAB<sup>TM</sup>. Buscou-se obter um pequeno overshoot e cerca de 0.001 segundo até atingir o estado estacionário. As constantes obtidas foram: Kp =

2.8522 e  $K_i = 104.55$ . Após isso, foi gerado o gráfico de Fig. 10 para a saída em velocidade angular do sistema mostrado em Fig. 9.

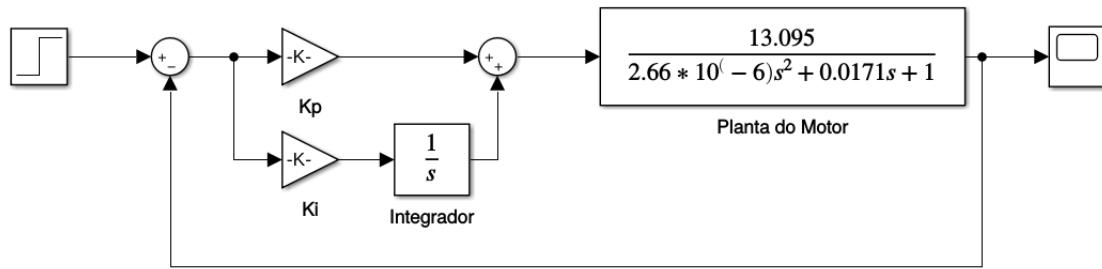


Figura 9: Sistema completo modelado com auxílio do SIMULINK™.

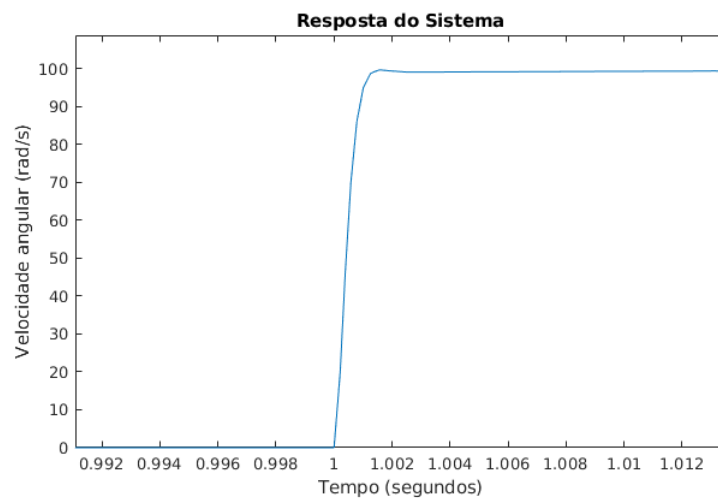


Figura 10: Saída de velocidade angular com valor fixado em 100rad/s.

Após a discretização, utilizando o método de Tustin, foi possível chegar à função de transferência discreta, mostrada em Eq. (7), a qual possibilitou a implementação do controle seguindo a relação de recorrência mostrada em Eq. (8).

$$\frac{\varepsilon(z)}{\epsilon(z)} = Kp + \frac{KiT}{2} \frac{z+1}{z-1} \quad (7)$$

$$\varepsilon[z] = \varepsilon[z-1] + Kp \cdot \epsilon[z] - Kp \cdot \epsilon[z-1] - \frac{KiT}{2} (\epsilon[z] + \epsilon[z-1]) \quad (8)$$

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a implementação do algoritmo, observou-se que o motor era capaz de atingir a velocidade de 99.2 radianos por segundo, o que mostra que o modelo se adequa aos parâmetros físicos do sistema.

...falar das melhoramentos Ressalta-se, por fim, que ainda restam muitos testes a serem realizados no motor. Além disso, a implementação no hardware eletrônico final será feita até outubro, tendo em vista que espera-se que a placa eletrônica final já tenha sido confeccionada e testada até esta data. A tabela de comutação já está montada e serão mantidos o mesmo modelo físico e o mesmo controlador, bastando apenas adaptar o código ao hardware final do robô. ...

Além disso, os quatro motores foram posicionados na carcaça do primeiro protótipo do robô Small Size como mostrado em Fig. (11).

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPQ, pelo apoio financeiro durante a realização do projeto, bem como ao meu professor orientador pelo apoio à realização do projeto. Agradeço à iniciativa ITAndroids, por fornecer os treinamentos necessários e recursos materiais para a realização do projeto.

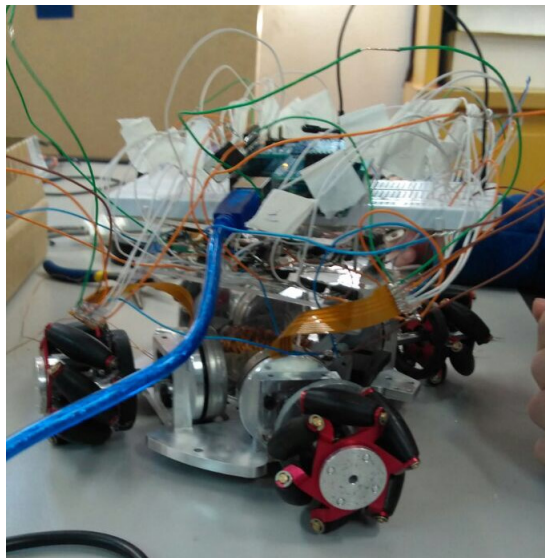


Figura 11: Fotografia do primeiro protótipo do robô Small Size com os quatro motores posicionados e operacionais.

## 7. REFERÊNCIAS

- Atmel<sup>TM</sup>, 2008. Application note, AVR194: Brushless DC Motor Control using ATmega32M1, <<https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/200142>>.
- Baldursson, S., 2005. *BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab<sup>TM</sup> /Simulink<sup>TM</sup> Implementation*. Dissertação de mestrado, Institutionen för Energi och Miljö.
- Lertariyasakchai, P., Panyapiang, T., Chaiso, K. and Sukvichai, K., 2012. “Skuba 2012 team description”. *Robocup TDP*, Vol. 1.
- Maxon, 2017. Datasheet, Maxon Motor<sup>TM</sup>, <<https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/200142>>.
- Yedamale, P., 2003. “Brushless dc (blde) motor fundamentals”. *Microchip Technology Inc.*, Vol. 1.

## 8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.



## Maxon 45fl-200142 Brushless motor control for Small Size league soccer robot

Aloysio Galvão Lopes, aloysiogl@gmail.com

Carlos César Aparecido Eguti, cesar.eguti@gmail.com

Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo, maximo.marcos@gmail.com

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Rua H8C, 322, DCTA 12.228-462 - São José dos Campos/SP

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Centro de Competência em Manufatura Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 12.229-900 – São José dos Campos / SP

**Abstract:** *In this work, the control of a Maxon 45fl-200142 Brushless type DC motor is simulated and implemented. The objective of the work is to develop a mathematical modeling of the equations which rule the motor's physical behavior; perform a simulation of the model; develop, simulate and optimize the parameters of a PI controller; develop the hardware for the motor control and implement the controller for the motor.*

*To achieve this objective, initially, the hardware was projected and produced. After that the hardware was tested in a generic DVD drive Brushless motor in open loop. The next step was the modeling of Maxon's 45fl-200142 BLDC motor based in manufacturer parameters. This way it was possible to simulate the behavior of the motor and develop the controller.*

*Finally, it was possible to implement the controller in the physical system and control Maxon's motor. The results showed that the control of a BLDC motor can only be achieved using feedback. This means that the control of the DVD drive motor in open loop was unsuccessful. Maxon's motor control, on the other hand, was successfully achieved, because there was feedback of the Hall effect sensors, furthermore the results of angular velocity obtained were consistent with the model. This demonstrates that the utilized model describes correctly the motor.*

**Keywords:** *Electrical Brushless Motor, Physical Modeling, Simulation, Speed Control.*

### 9. FORMATO DO TEXTO

O artigo deve ser digitado em papel tamanho A4, usando fonte Times New Roman, tamanho 10, exceto para o título, nomes dos autores, instituição, endereço, resumo e palavras-chave, que têm formatações específicas indicadas acima. Espaço simples entre linhas deve ser usado ao longo do texto.

O corpo de texto que contém o título deve ser centralizado, em parágrafo com recuo esquerdo de 0,1 cm e marcado com borda esquerda de largura  $2\frac{1}{4}$  pontos.

O corpo de texto que contém os nomes de autores e de instituições devem ser alinhados à esquerda, em parágrafo com recuo esquerdo de 0,1 cm e marcados com borda esquerda de largura  $2\frac{1}{4}$  pontos.

A primeira página deve ter margem superior igual a 5 cm, e todas as outras margens (esquerda, direita e inferior) iguais a 2 cm. Todas as demais páginas do trabalho devem ter todas as suas margens iguais a 2 cm.

#### **NÃO NUMERAR AS PÁGINAS.**

**QUANDO SUBMETER O TRABALHO PELA PRIMEIRA VEZ EM PDF, OS NOMES DOS AUTORES E AFILIAÇÕES DEVEM SER SUPRIMIDOS. INCLUA APENAS O CÓDIGO DO RESUMO, O QUAL FOI FORNECIDO NO E-MAIL DE ACEITAÇÃO DO SEU RESUMO, MANTENDO O ESPAÇO ORIGINAL DESTINADO AOS NOMES DOS AUTORES E AFILIAÇÃO.**

#### 9.1 Títulos e Subtítulos das Seções

Os títulos e subtítulos das seções devem ser digitados em fonte Times New Roman, tamanho 10, estilo negrito, e alinhados à esquerda. Os títulos das seções são com letras maiúsculas (Exemplo: **MODELO MATEMÁTICO**), enquanto os subtítulos só têm as primeiras letras maiúsculas (Exemplo: **Modelo Matemático**). Eles devem ser numerados, usando numerais arábicos separados por pontos, até o máximo de 3 subníveis. Uma linha em branco de espaçamento simples deve ser incluída acima e abaixo de cada título ou subtítulo.

#### 9.2 Corpo do Texto

O corpo do texto é justificado e com espaçamento simples. A primeira linha de cada parágrafo tem recuo de 0,6 cm a partir da margem esquerda.

As equações matemáticas são alinhadas à esquerda com recuo de 0,6 cm. Elas são referidas como "Eq. (1)" no meio de uma frase, ou "Equação (1)" quando usada no início de uma sentença. Os números das equações são numerais arábicos colocados entre parênteses, e alinhados à direita, como mostrado na Eq. (1).

Os símbolos usados nas equações devem ser definidos imediatamente antes ou depois de sua primeira ocorrência no texto. (Maximo, 2015)

O tamanho da fonte usado nas equações deve ser compatível com o utilizado no texto. Todas as grandezas físicas



devem ter suas unidades expressas no sistema S.I. (métrico).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

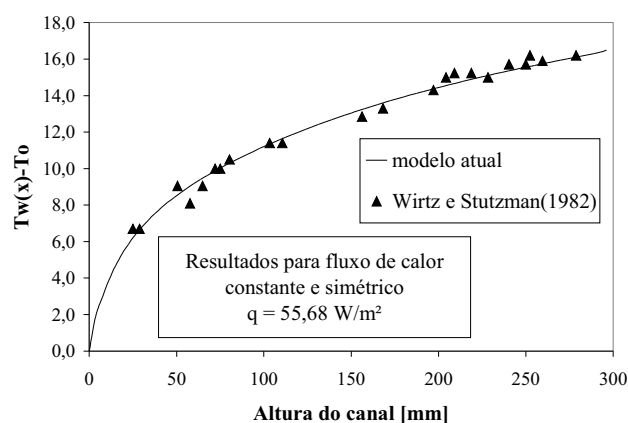
As tabelas devem ser centralizadas. Elas são referidas por "Tab. 1" no meio de uma frase, ou por "Tabela 1" quando usada no início de uma sentença. A legenda deve ser centralizada e localizada imediatamente acima da tabela. Anotações e valores numéricos nela incluídos devem ter tamanhos compatíveis com o da fonte usada no texto do trabalho, e todas as unidades devem ser expressas no sistema S.I. (métrico). As unidades são incluídas apenas na primeira linha ou primeira coluna de cada tabela, conforme for apropriado. As tabelas devem ser colocadas tão perto quanto possível de sua primeira citação no texto. Uma linha em branco, em espaço simples, deve ser introduzida entre a tabela, seu título e o texto.

O estilo de borda da tabela é livre. As legendas das Figuras e das Tabelas não devem exceder 3 linhas.

**Tabela 1: Resultados experimentais para as propriedades de flexão dos materiais MAT1 e MAT2. Valores médios obtidos em 20 ensaios.**

Propriedades do compósito	CFRC-TWILL	CFRC-4HS
Resistência à Flexão (MPa)	209 ± 10	180 ± 15
Módulo de Flexão (GPa)	57.0 ± 2.8	18.0 ± 1.3

As figuras devem ser centralizadas. Elas são referenciadas por "Fig. 1" no meio de uma frase ou por "Figura 1" quando usada no início de uma sentença. Sua legenda deve ser centralizada e localizada imediatamente abaixo da figura. As anotações e numerações devem ter tamanhos compatíveis com o da fonte usada no texto, e todas as unidades devem ser expressas no sistema S.I. (métrico). As figuras devem ser colocadas o mais próximo possível de sua primeira citação no texto. Deve ser deixada uma linha em branco, de espaçamento simples, entre as figuras e o texto.



**Figura 12: Comparação entre os resultados do presente modelo com os resultados experimentais de Wirtz e Stutzman (1982).**

Figuras coloridas e fotografias de alta qualidade podem ser incluídas no trabalho. Para reduzir o tamanho do arquivo e preservar a resolução gráfica, os arquivos das imagens devem ser convertidos para o formato GIFF (para figuras com até 16 cores) ou para o formato JPEG (alta densidade de cores), antes de serem inseridos no trabalho.

A citação das referências no corpo do texto pode ser feita nos formatos: "Bordalo *et al.* (1989) mostra que o corpo...", ou: "Vários trabalhos (Coimbra, 1978; Clark, 1986 e Sparrow, 1980) mostram que a rigidez...".

Referências aceitas incluem: artigos de periódicos, dissertações, teses, artigos publicados em anais de congressos, livros, comunicações privadas e artigos submetidos e aceitos (com fonte identificada) e citações a páginas da internet.

A lista de referências deve ser uma seção específica denominada Referências, localizada no fim do artigo.

A primeira linha de cada referência deve ser alinhada à esquerda; todas as outras linhas têm recuo de 0,6 cm da margem esquerda. Todas as referências incluídas na lista devem aparecer como citações no texto do trabalho.

As referências devem ser postas em ordem alfabética, usando o último nome do primeiro autor, seguida do ano da publicação. Exemplo da lista de referências é apresentado abaixo.