

## 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  
Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos (LAB-SCA)  
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 do controle de um motor elétrico do tipo Brushless Maxon 45fl-200142. Os objetivos foram: realizar o modelamento matemático das equações que regem o motor citado; simular o modelo obtido; desenvolver, simular e otimizar os parâmetros de um controlador PI; desenvolver o hardware para o controle e implementar o controlador para o motor.

Para isso, foi, inicialmente, desenvolvido 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. Logo, o controle do motor do drive de DVD em loop aberto não obteve sucesso. No entanto, foi possível realizar o controle do motor Maxon devido ao feedback de sensores de efeito Hall, além do mais os resultados de velocidade angular obtidos pelo motor foram fiéis ao modelo.

**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 descrita em Committee (2017), 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.

O controle da comutação do campo magnético para esse tipo de motor é feito eletronicamente e em malha fechada com

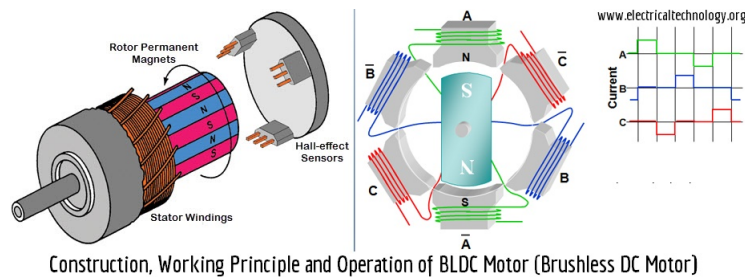


Figura 1: Esquema completo de um motor elétrico Brushless trifásico. Retirado de Store (2017).

explicado em Ogata (1982), 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.

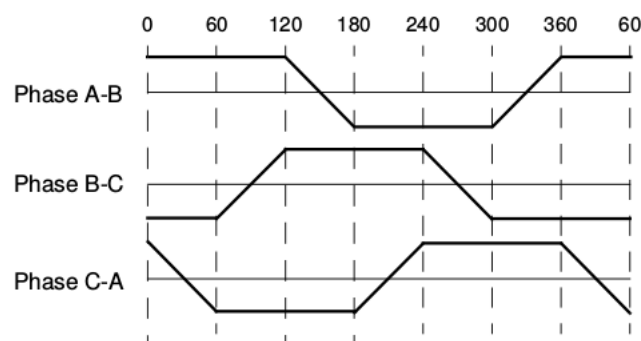


Figura 2: Contra eletromotriz nas três fases de um motor BLDC comutando. Retirado de Yedamale (2003).

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). Sen (1989) descreve mais detalhadamente o controle de motor DC. 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).

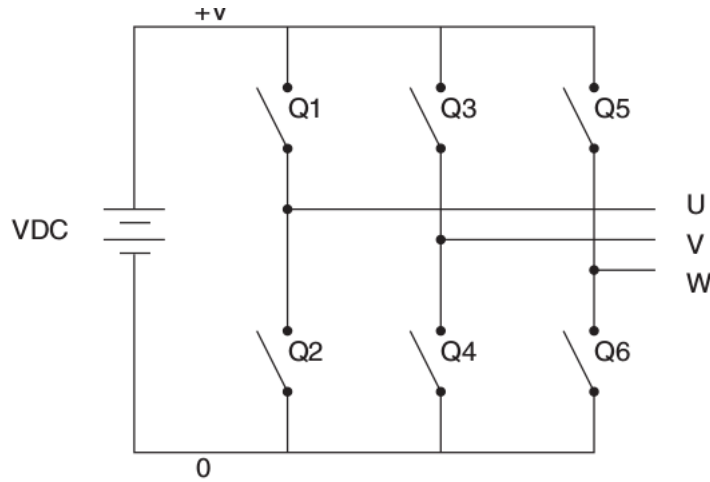


Figura 3: Diagrama do circuito para acionamento do motor. Retirado de Atmel<sup>TM</sup> (2008).

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.

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,

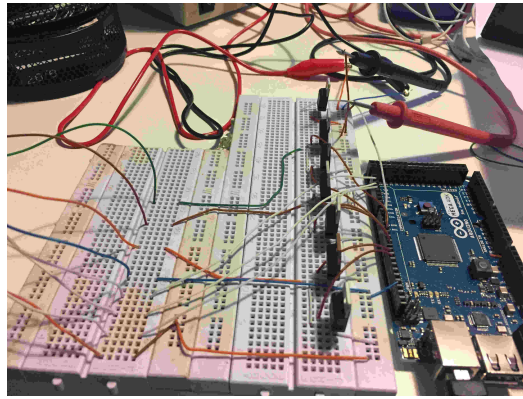


Figura 4: **Figura da montagem do circuito para controle do motor.**

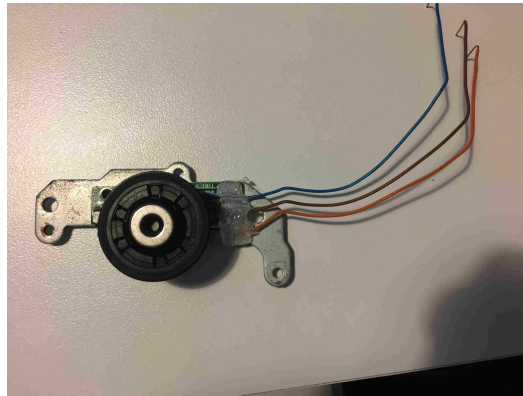


Figura 5: **Motor de drive de DVD utilizado nos testes, nota-se que não há saídas para sensores de efeito Hall.**

em seguida, fazer a leitura dos sensores de efeito Hall. Com isso, é possível montar a tabela de comutação direta; a tabela inversa é 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.

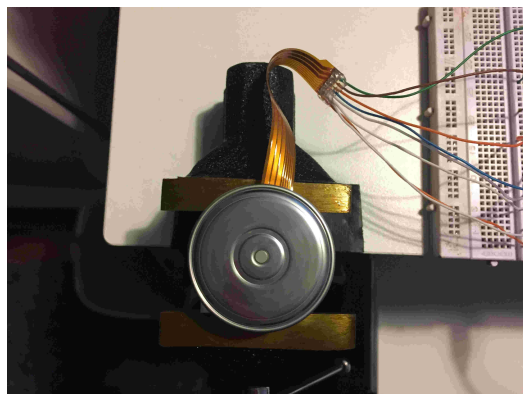


Figura 6: **Motor Maxon 45fl-200142 rotacionando.**

#### 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.

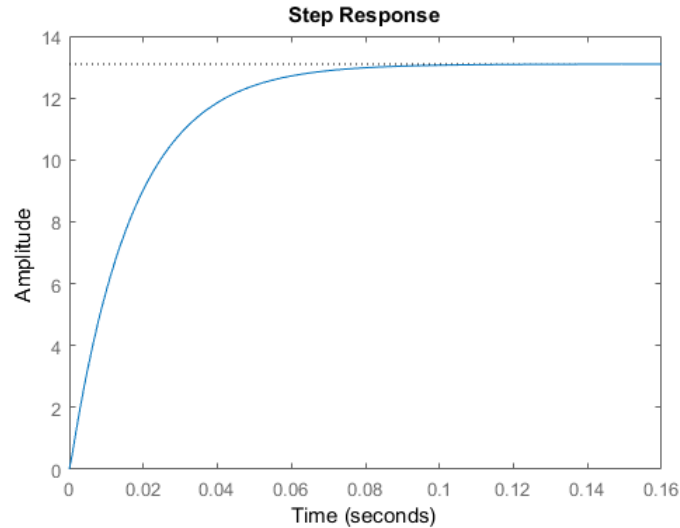


Figura 7: Análise da resposta à um degrau unitário da planta de Eq. (5).

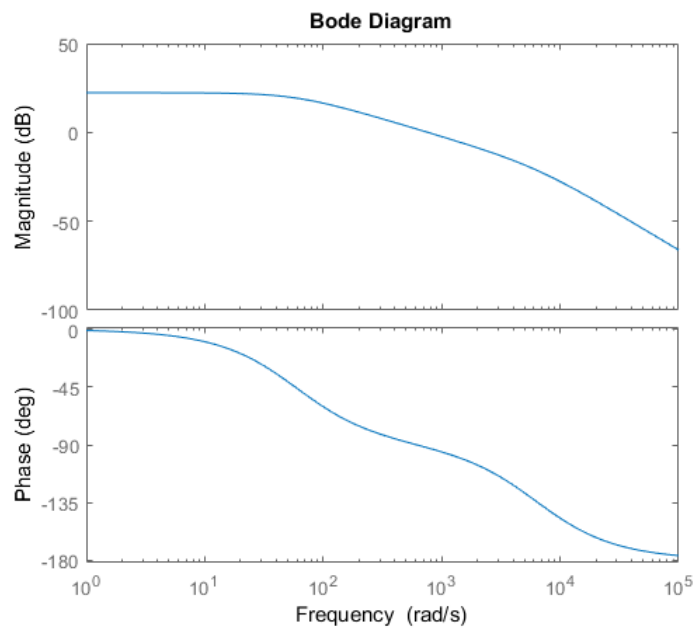


Figura 8: Diagrama de bode para a planta de Eq. (5).

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. No domínio da frequência, é possível

ver as fases de margem e de ganho em Fig. 10. As constantes obtidas foram:  $K_p = 2.8522$  e  $K_i = 104.55$ . Após isso, foi gerado o gráfico de Fig. 11 para a saída em velocidade angular do sistema mostrado em Fig. 9.

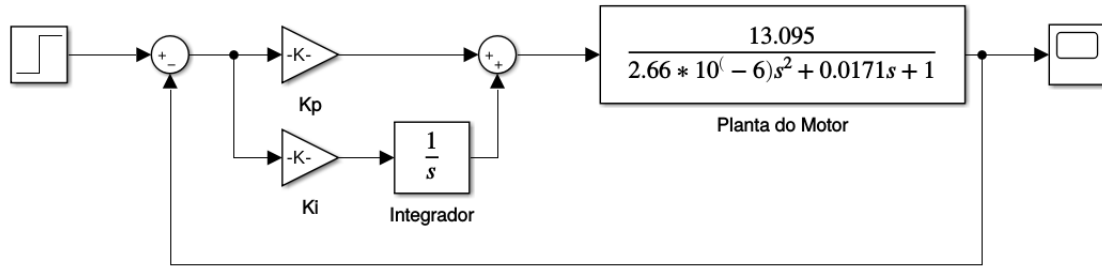


Figura 9: Sistema completo modelado com auxílio do SIMULINK™.

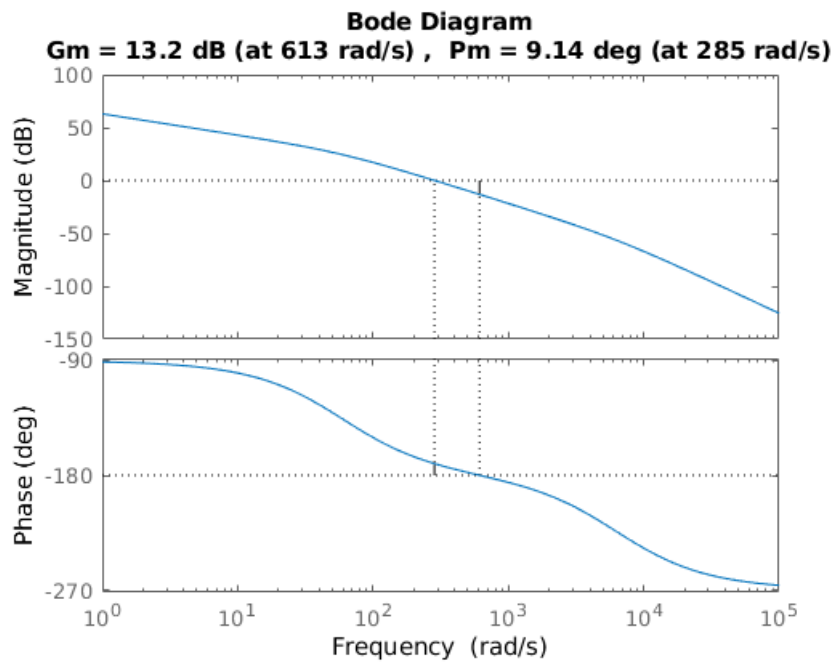


Figura 10: Margens de estabilidade do sistema em estudo.

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).

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

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

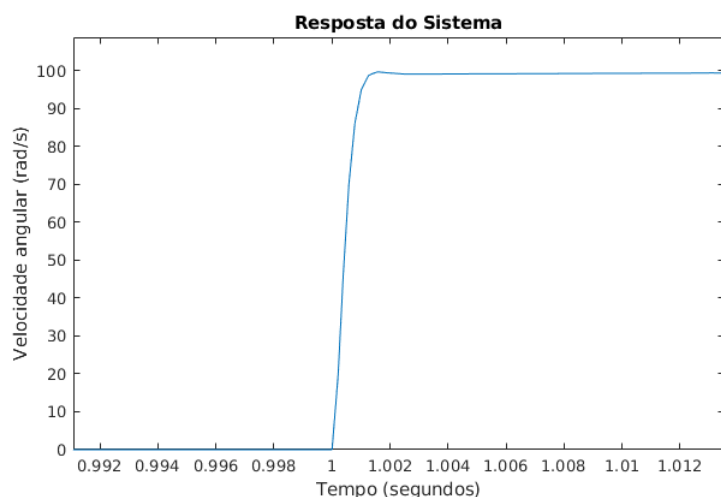


Figura 11: Saída de velocidade angular com valor fixado em 100rad/s.

## 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.

Ressalta-se, por fim, que existem alguns melhoramentos a serem realizados no controlador antes da implementação final no robô. Pode-se incluir uma malha de corrente, uma vez que o hardware do robô permite. Além disso, deve-se contar a inércia do robô no modelo final a ser utilizado e seria interessante analisar a influência de outros efeitos na simulação como a discretização do controlador, atrasos presentes na malha, atrito seco e a quantização do encoder. Os testes realizados no sistema, também, devem ser refeitos no hardware final.

Após a implementação do controlador aqui desenvolvida os próximos passos são de implementação no robô. Pretende-se implementar o controlador em uma FPGA, a qual está presente na placa principal do robô. O robô terá sua estrutura mecânica finalizada e será feita a integração dos sistemas eletrônicos e mecânicos, bem como a comunicação do hardware produzido com o computador.

Os motores já foram posicionados na carcaça do primeiro protótipo do robô Small Size como mostrado em Fig. (12).

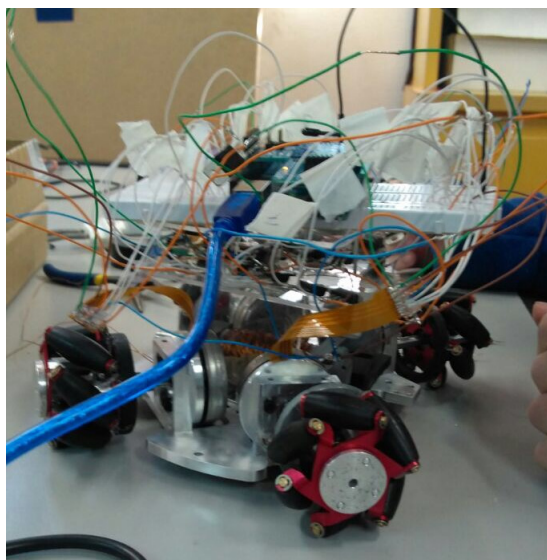


Figura 12: Fotografia do primeiro protótipo do robô Small Size com os quatro motores posicionados e operacionais.

## 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.

## 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.
- Committee, S.S.L.T., 2017. *Laws of the RoboCup Small Size League 2017*.
- Lertariyasakchai, P., Panyapiang, T., Chaiso, K. and Sukvichai, K., 2012. “Skuba 2012 team description”. *Robocup TDP*, Vol. 1.
- MATLAB, 2017. “Matlab”. The MathWorks, Natick, MA, USA.
- Maxon, 2017. Datasheet, Maxon Motor<sup>TM</sup>, <<https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/200142>>.
- Ogata, K., 1982. *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall, 4th edition. ISBN 9788587918239.
- Sen, P.C., 1989. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Wiley, 3rd edition.
- Store, E.T., 2017. “Brushless dc motor: Construction, working principle and applications”. Site da Electrical Technology Store. URL <https://www.electricaltechnology.org/>.
- Yedamale, P., 2003. “Brushless dc (blde) motor fundamentals”. *Microchip Technology Inc.*, Vol. 1.