

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 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 e projetar o hardware para o controle.

Para isso, foi, inicialmente, desenvolvido o hardware para controle do motor. Em seguida, testes preliminares foram realizados 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.

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 explicado em Ogata (1982), seguindo o procedimento descrito em Yedamale (2003), o que acarreta que seja necessário

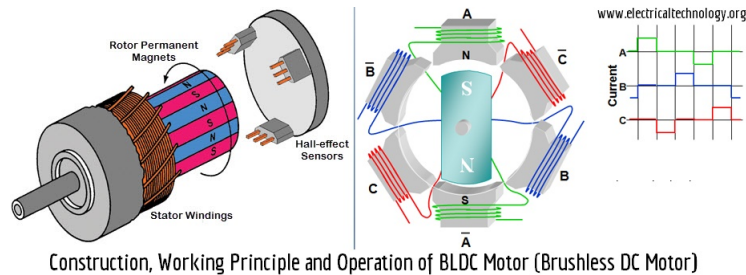


Figura 1: Esquema completo de um motor elétrico Brushless trifásico. Retirado de Store (2017).

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.

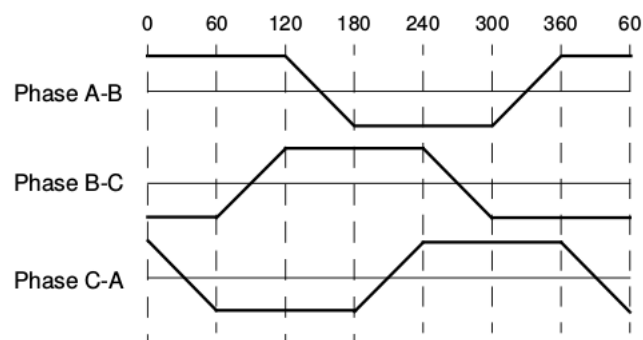


Figura 2: Contra eletromotriz nas três fases de um motor BLDC comutando. Retirado de Yedamale (2003).

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 ε 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.

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

3. Hardware

Foi confeccionado um hardware para acionamento do motor baseado no esquema mostrado abaixo, em Fig 3, descrito em AtmelTM (2008).

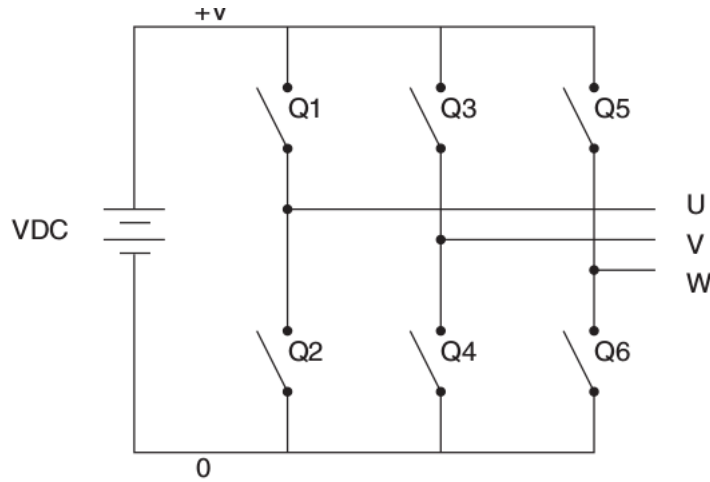


Figura 3: Diagrama do circuito para acionamento do motor. Retirado de AtmelTM (2008).

Foram utilizados seis pares darlington TIP 122 para montar o esquema mostrado acima de três meias pontes H e uma placa de desenvolvimento ArduinoTM 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 AtmelTM (2008) e,

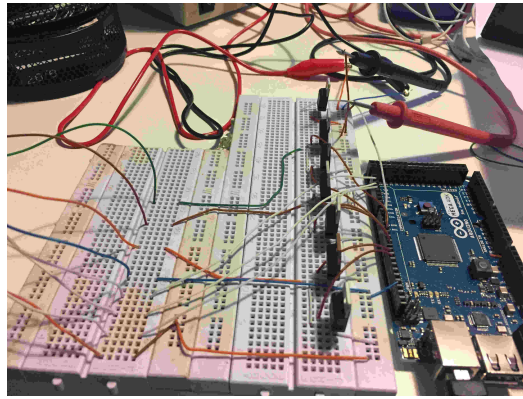


Figura 4: **Figura da montagem do circuito para controle do motor.**

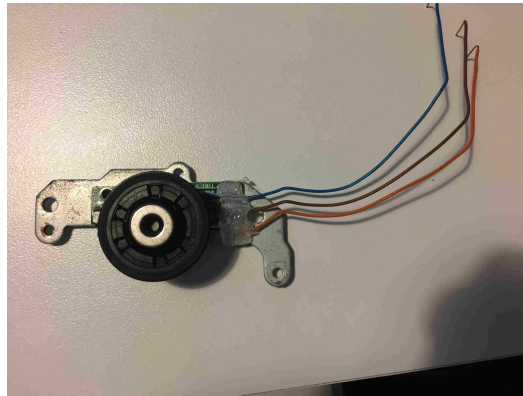


Figura 5: **Motor de drive de DVD utilizado nos testes, nota-se que não há saídas para sensores de efeito Hall.**

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.

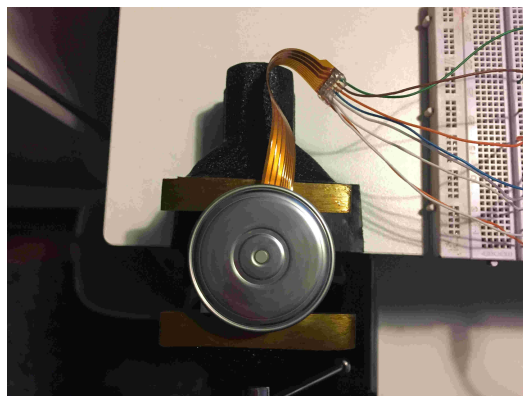


Figura 6: **Motor Maxon 45fl-200142 rotacionando.**

4. Simulação

Foi implementada em MATLABTM 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.

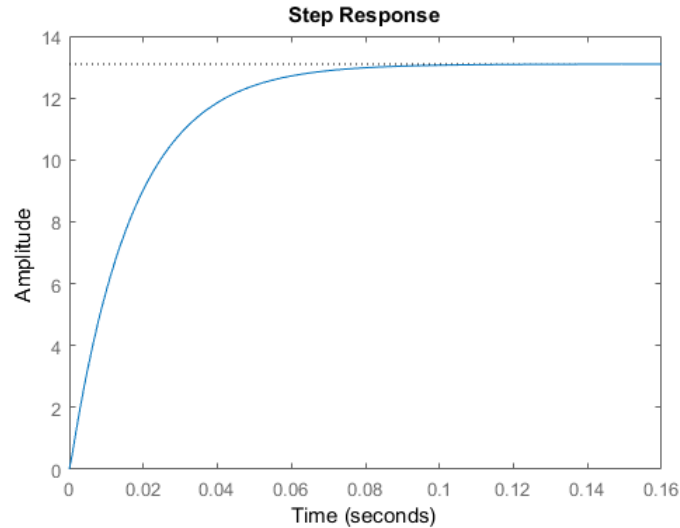


Figura 7: Análise da resposta à um degrau unitário da planta de Eq. (5).

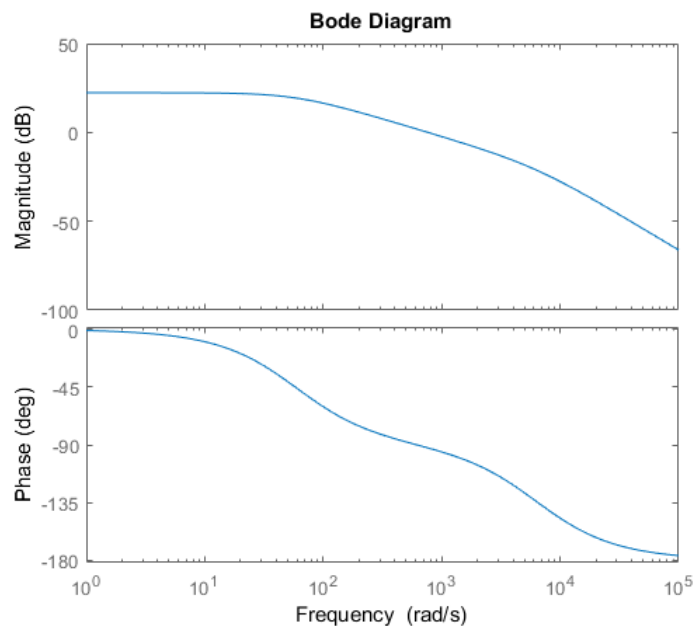


Figura 8: Diagrama de bode para a planta de Eq. (5).

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 MATLABTM. 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.

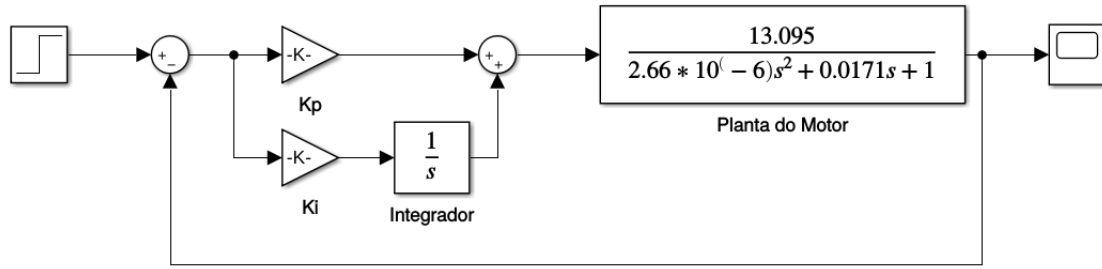


Figura 9: Sistema completo modelado com auxílio do SIMULINK™.

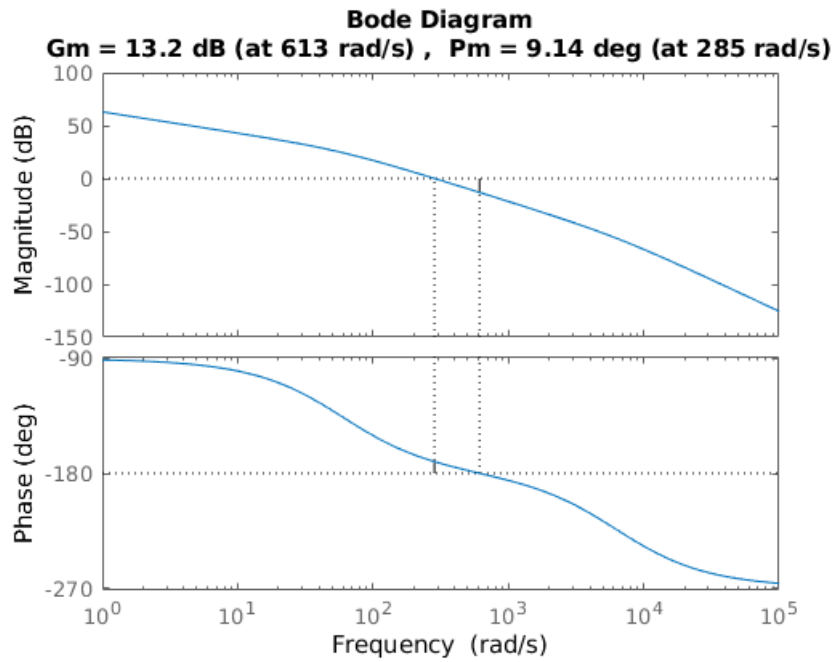


Figura 10: Margens de estabilidade do sistema em estudo.

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).

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

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

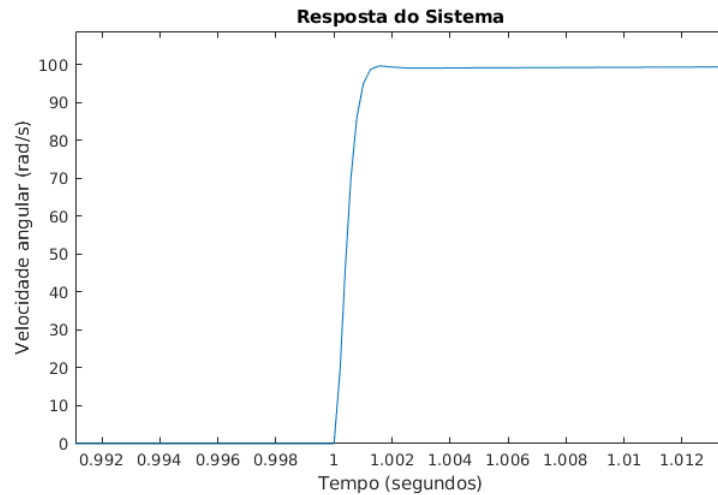


Figura 11: Saída de velocidade angular com valor fixado em 100rad/s.

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).

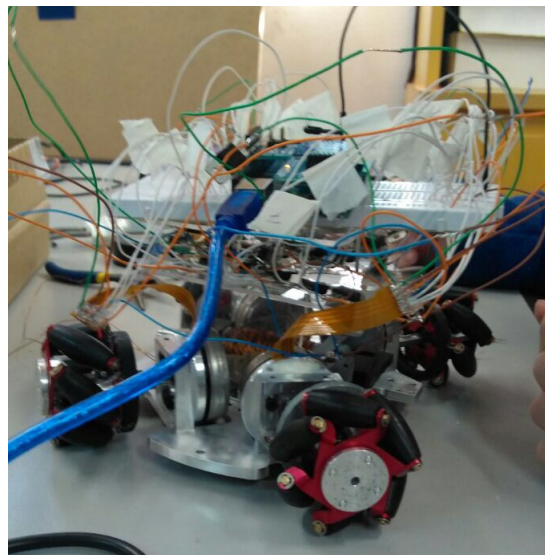


Figura 12: Fotografia do primeiro protótipo do robô Small Size com os quatro motores posicionados e operacionais.

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

- AtmelTM, 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 MatlabTM /SimulinkTM 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 MotorTM, <<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.