

Robô Holonômico Didático de Baixo Custo

Kayke A. T. Martins* Nathan A. Z. Xavier**
Lucas V. R. Alves***

* Colégio Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, MG,
(e-mail: kaykeamorim6@gmail.com)

** Colégio Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, MG,
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, SP,
Instituto de Estudos Avançados - IEAv, SP,
(e-mail: nathanxavier@ufmg.br; nathan@teiacoltec.org)

*** Colégio Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, MG
(e-mail: lucasvra@ufmg.br)

Abstract:

Robotics is a tool that encompasses concepts of automation, control, electronics, and programming, widely used in teaching through modules and didactic plants. In order to develop a low-cost system for teaching robotics, this work presents the construction of a holonomic robot with three omnidirectional wheels. For this construction, a mathematical analysis of the system is described, in addition to physical, mechanical, electronic, and programming solutions. The prototype developed allows applications of classical control, sensing and remote control, planning, and navigation, among others in the robotics area.

Resumo:

A robótica é uma ferramenta que engloba conceitos de automação, controle, eletrônica e programação, utilizada no ensino através de módulos e plantas didáticas. No intuito de desenvolver um sistema de baixo custo para o ensino de robótica, este trabalho apresenta a construção de um robô holonômico com três rodas omnidirecionais. Para esta construção, descreve-se uma análise matemática do sistema, além de soluções físicas, mecânicas, eletrônicas e de programação. O protótipo elaborado possibilita aplicações de controle clássico, sensoriamento e controle remoto, planejamento e navegação, entre outros na área de robótica.

Keywords: Didactic Module, Robotics, Holonomic Robot, Low Cost Robotics

Palavras-chaves: Módulo Didático, Robótica, Robô Holonômico, Robótica de Baixo Custo

1. INTRODUÇÃO

No ensino de automação industrial, controle e robótica, a aquisição de equipamentos e dispositivos didáticos costuma ser difícil devido aos preços elevados desses materiais. Robôs móveis, manipuladores robóticos, plantas industriais e controladores lógico programáveis costumam ser caros, dificultando a elaboração de boas aulas práticas nas universidades e escolas técnicas.

Nesse contexto, o desenvolvimento de módulos didáticos de baixo custo, além de códigos *open-source* são de extrema importância para o aprendizado nas escolas e um ensino de melhor qualidade. Desta forma, pode-se garantir uma maior compatibilidade entre temáticas estudadas em sala de aula e problemas encontrados no mercado de trabalho, fornecendo aos estudantes o conhecimento tácito necessário para solucionar problemas reais. Todas essas vantagens somente são possíveis caso o custo de construção e manutenção de tais equipamentos seja condizente com as condições financeiras das instituições de ensino público ou privada.

Vários trabalhos na literatura científica propõem a criação de plantas didáticas de baixo custo em diversas áreas de engenharia, como o desenvolvimento de pêndulos invertidos (Pinares-Mamani and Cutipa-Luque, 2020), controladores de temperatura (Takács et al., 2019), drives de motores de corrente contínua (Takács et al., 2021) ou plantas energéticas (Leach et al., 2009). Muitos estudos desenvolvem sistemas voltados ao ensino de programação aplicada em áreas como Internet das Coisas (Silva and Borges, 2018), Indústria 4.0 (Pajpach et al., 2022) e diversos outros assuntos, usualmente utilizando dispositivos embarcados microcontrolados (Segundo et al., 2015; Hassanpour et al., 2017; Tivani et al., 2019).

Em robótica, existe também uma vasta gama de trabalhos *open-source* e de baixo custo, voltados a robôs seguidores de linha (Cardeira and Da Costa, 2005), quadrotoros (Al Tahtawi and Yusuf, 2019), enxame de robôs (McLurkin et al., 2012; Rubenstein et al., 2012), robôs colaborativos (Rubenstein et al., 2014) e robôs móveis (Yunardi et al., 2021; Cardeira and Da Costa, 2005). Tais projetos de robótica também são voltados ao ensino em escolas e faculdades.

Muitas das aplicações de recursos tecnológicos no ensino, como em robótica, estão também associados à proposta de Educação STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*), sigla utilizada para descrever o ensino de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (Xie et al., 2015; do Prado and da Silva, 2020). Segundo Moreira (2018), existe uma grande relevância na aplicação do STEM na educação, uma vez que esta metodologia propõe projetos e desafios para estudantes, introduzindo ao ensino de ciência e tecnologia, um aspecto empreendedor de argumentação e validação.

Buscando um sistema capaz de aplicar o ensino de STEM por meio de uma plataforma robótica, este trabalho apresenta um robô holonômico de três rodas omnidirecionais de baixo custo. O projeto tem por base, um Arduino Nano, para realizar o controle, e um módulo *Bluetooth* que auxilia na definição de deslocamento através de um dispositivo móvel, além de equipamentos auto-fabricado. O robô holonômico proposto pode ser utilizado no ensino de disciplinas de programação, robótica, matemática e física, por exemplo.

O artigo está organizado descrevendo, inicialmente, os conceitos teóricos associados à robótica holonômica na seção 2. Na seção 3 é descrita a criação do robô omnidirecional de três rodas, envolvendo a construção física e a lógica de programação. A seção 4 conclui o artigo, apresentando as principais percepções do projeto e possibilidades de trabalhos futuros.

2. ROBÓTICA HOLONÔMICA

Um robô é um sistema composto por um conjunto de dispositivos, eletromecânicos ou biomecânicos, capazes de realizar um trabalho de maneira autônoma, pré-programada ou por controle humano. Na robótica móvel, o uso de robôs aplica-se na interação ou análise de ambientes conhecidos ou não. Esses robôs podem, por exemplo, auxiliar ou mesmo prevenir o acesso de seres humanos a ambientes com elevada periculosidade, como:

- Calor ou ruído;
- Gases tóxicos ou ambientes insalubres;
- Esforço físico extremo;
- Trabalhos monótonos, repetitivos, e;
- Ambientes onde o risco de vida é evidente.

A construção de um robô holonômico passa por diversas etapas conceituais e práticas como: estudo cinemático do sistema, análise estrutural, construção física e desenvolvimento da programação. Tais etapas são apresentadas a seguir.

2.1 Robô 3WD Omnidirecional

A robótica holonômica está associada à relação entre o número de acionamentos realizados pelo robô e o número de graus de liberdade associado ao plano ou espaço, conforme classificação a seguir (Siegwart et al., 2011; Spong et al., 2005):

- **Robôs Não-Holonômicos:** Robôs que possuem um número de velocidades atuáveis menor que a quantidade de graus de liberdade;

- **Robôs Holonômicos:** O número de atuações de movimentos é igual ao valor de grau de liberdade, e;
- **Robôs Redundantes:** Velocidades atuáveis é maior que o grau de liberdade.

Considerando todas as possibilidades de robótica holonômica, optou-se por trabalhar com um robô de três rodas 3WD (*Three Wheels-Drive*) omnidirecionais. Para a sua construção, as rodas devem ser igualmente espaçadas entre si e com igual distância ao centro do robô, conforme mostrado na Figura 1.

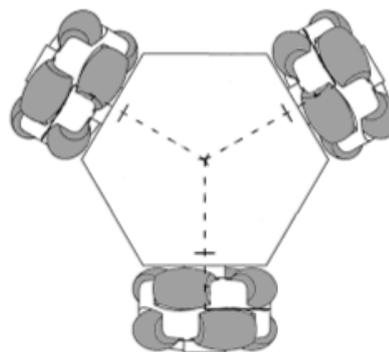


Figura 1. Robô holonômico 3WD omnidirecional (Cantú, 2017)

Como pode ser visto na Figura 1, as rodas do robô precisam ter uma estrutura diferenciada, de modo a não limitar movimentos nas direções de deslocamento do sistema. No caso do robô de interesse, a locomoção nas direções perpendiculares deve ser feitas com uma redução do atrito, comparado às rodas tradicionais. Nesse sentido, são utilizadas rodas omnidirecionais, as quais podem se locomover livremente pelo plano, sendo disponíveis em dois formatos principais, denominadas: Roda Suíça de 90° , e; Roda Suíça de 45° , como mostrado na Figura 2 (Siegwart et al., 2011).

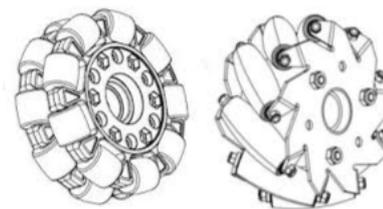


Figura 2. Rodas Suíças de 90° e 45° (Siegwart et al., 2011)

Tais estruturas são projetadas para minimizar o atrito e aumentar a área de contato com a superfície, sendo as rodas de 45° aplicadas em robôs que possuem um número par de rodas em contato ao solo, enquanto a de 90° , utilizada por robôs que possuem um número ímpar de pontos de contato com o solo. Robôs que utilizam rodas omnidirecionais descrevem o movimento no plano ou no espaço baseado na resultante da soma vetorial dos acionamentos das rodas, associado ao modelo cinemático do robô (Siegwart et al., 2011).

2.2 Modelo Cinemático

A dinâmica do robô é analisada a partir de um plano XY, de modo que a localização do robô possa ser definida a

partir de uma posição (x, y) e um ângulo de rotação θ (Siegwart et al., 2011), apresentado na Figura 3. Desta forma, pode-se descrever a *pose* (p) de um robô através do vetor:

$$p = [x \ y \ \theta]^T \quad (1)$$

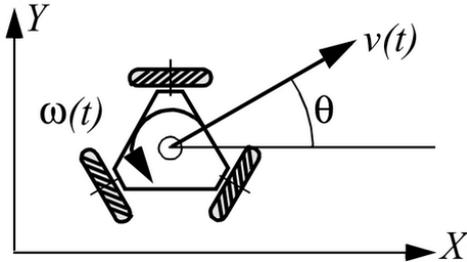


Figura 3. Modelo cinemático do robô (Siegwart et al., 2011)

Devido à construção e posição das rodas omnidirecionais, os movimentos sobre o plano XY dependem apenas da decomposição vetorial dos movimentos das rodas. A variação da *pose* do robô, portanto, pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{r}{\sqrt{3}} \\ \frac{r}{3} & -\frac{2r}{3} & \frac{r}{3} \\ \frac{r}{3L} & \frac{r}{3L} & \frac{r}{3L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

sendo:

- L : Distância da roda ao centro de massa do robô;
- r : Raio das rodas, e;
- ω_1, ω_2 e ω_3 : Velocidades angulares de cada uma das rodas.

Dada a possibilidade de rotação do robô sobre o próprio eixo, o vetor de velocidade das rodas varia conforme o ângulo θ . Desta forma, faz-se necessário aplicar a matriz de rotação sobre o plano XY do robô, sendo definida como:

$$\mathbf{R}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por fim, a cinemática do robô de três rodas omnidirecionais, a qual descreve a mudança da *pose* do robô no plano XY, pode ser calculada como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{r}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{r}{\sqrt{3}} \\ \frac{r}{3} & -\frac{2r}{3} & \frac{r}{3} \\ \frac{r}{3L} & \frac{r}{3L} & \frac{r}{3L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. DESIGN DE CONSTRUÇÃO

A construção do robô holonômico de três rodas 3WD (*Three Wheels-Drive*) omnidirecionais levou em consideração o princípio de ser um sistema de baixo custo e acessível às instituições de educação, no formato de um sistema didático aplicável ao ensino STEM.

Desta forma, as principais partes físicas do robô foram feitas de forma manufaturada ou utilizando estruturas pré-fabricadas. Na parte eletrônica, foram utilizados módulos amplamente comercializados, e uma placa de circuito impresso personalizada, cujo projeto é apresentado no artigo, proposta para melhor atender às demandas do projeto. Todos equipamentos manufaturados são descritos e apresentados no artigo, possibilitando também sua reprodução de forma artesanal.

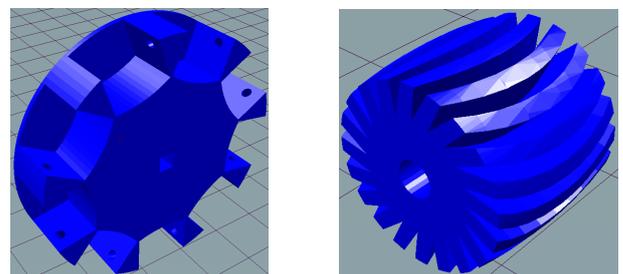
O acesso aos modelos, esquemáticos e códigos desenvolvidos são também disponibilizados no GitHub.¹

3.1 Design Mecânico

A estrutura do robô foi construída a partir do *Kit Modelix* (Modelix, 2021), que segue o padrão de peças *Meccano* e possui inúmeras peças para construção de projetos para robótica educacional. Foram utilizadas porcas, chapas de metal furadas, parafusos e arruelas. Contudo, mesmo não possuindo o kit utilizado, todas as peças podem ser reproduzidas devido sua simplicidade.

As rodas suíças, por outro lado, foram modeladas e impressas em uma impressora 3D. Essa escolha leva em consideração o fato da maioria das rodas suíças serem produzidas por empresas estrangeiras, o que eleva o custo de aquisição. O desenho e modelagem das rodas suíça de 90° foram feitas em *softwares* de código aberto, buscando definir os espaços e quantidades de rolamentos, e, em seguida, construído o rolamento. Neste último foram introduzidas pequenas ranhuras buscando aumentar a aderência com a superfície, uma vez que o rolamento liso resultava na derrapagem do robô.

Os modelos da roda e do rolamento estão respectivamente apresentados na Figura 4(a) e Figura 4(b).



(a) Modelo 3D da Roda Suíça 90°

(b) Modelo 3D do Rolamento

Figura 4. Modelagem da roda em 3D.

A partir da produção da roda e do rolamento em uma impressora 3D, tem-se a montagem da roda por completo, como mostrada na Figura 4. A fixação dos rolamentos à roda foi feita atravessando um fio de nylon nos buracos

¹ <https://github.com/KaykeAmorim/Robo-Holonomico3WD>

introduzidos para tal finalidade. A escolha desse material visa uma maior liberdade de rotação dos rolamentos, além de o nylon ser um material também resistente.



Figura 5. Montagem da roda.

A estrutura do robô segue o formato prismático triangular, cuja base é um triângulo equilátero, pensando na equidistância das rodas. Os motores e rodas são fixadas em cada um dos vértices do triângulo conforme demonstrado na Figura 6. Os demais dispositivos foram colocados pensando-se no espaço disponível e na distribuição de peso igualitária do sistema.

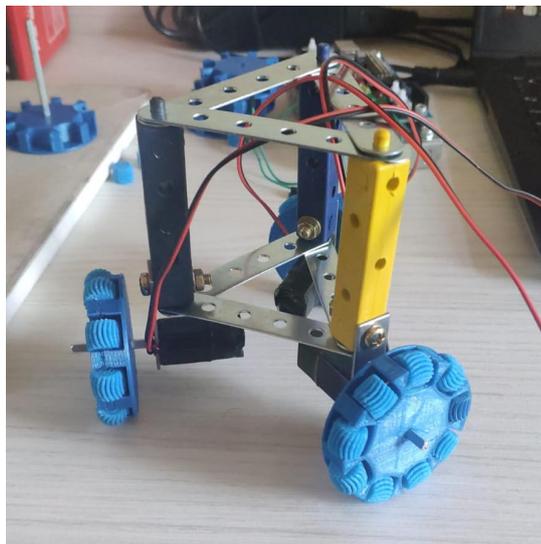


Figura 6. Fixação da roda na estrutura.

3.2 Design Eletrônico

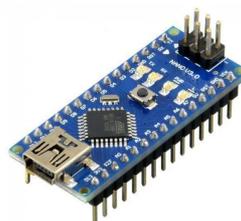
Para o controle do robô, foi usada uma placa de desenvolvimento, modelo Arduino Nano, apresentada na Figura 7(a). Observa-se que, na literatura, existe uma ampla utilização de Arduinos em sistemas de baixo custo de automação (Segundo et al., 2015; Hassanpour et al., 2017; Tivani et al., 2019), uma vez que tais placas possuem baixo custo e são de fácil compreensão e programação. Além disso, o Arduino Nano, especificamente, possui um tamanho bem reduzido, tornando mais interessante a sua aplicação em sistemas de pequeno porte.

As rodas omnidirecionais, por sua vez, são acionadas por motores DC, similares aos mostrados na Figura 7(b), os quais são conectados ao Arduino. Para que o motor possa rotacionar nos sentidos horário e anti-horário, pensando também na implementação de um controle de velocidade,

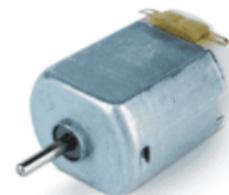
foi utilizada uma Ponte H conectando o Arduino aos motores DC. A Ponte H é um circuito eletrônico muito utilizado no controle de motores de corrente contínua, visto que utiliza quatro chaves para alterar o sentido da corrente que passa pelo motor e, desta forma, alterar seu sentido de rotação. Neste projeto foi utilizado o circuito integrado L298N que implementa uma Ponte H, apresentado na Figura 7(c).

Para que o robô realmente conseguisse ser móvel, foram utilizadas baterias do modelo INR18650, apresentada na Figura 7(d). A escolha desta bateria se justifica por suas características elétricas, principalmente (SDI, 2014):

- Tensão Nominal: 3.65V;
- Corrente Máxima: 6,400mA, e;
- Capacidade Elétrica: 3,200mAh.



(a) Arduino Nano (Arduino, 2008)



(b) Motor DC (Rapid, 2003)



(c) Módulo L298n (STMicroelectronics, 2000)



(d) Bateria INR18650 (SDI, 2014)

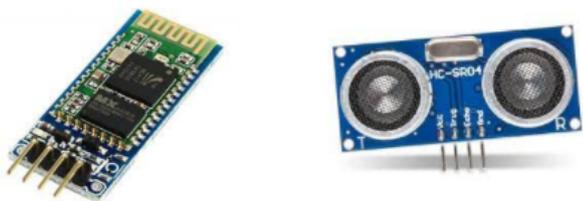
Figura 7. Componentes eletromecânicos

Buscando permitir que o robô possa sentir o ambiente, foram introduzidos sensores ultrassônicos do modelo HC-SR04 (Elec Freaks, 2019), apresentado na Figura 8(b), cuja finalidade é medir distâncias entre o robô e um obstáculo qualquer. E, para permitir o envio e recebimento de dados, foi utilizado um módulo de comunicação via *Bluetooth* HC-06, similar ao apresentado na Figura 8(a). A utilização desses dispositivos possibilita a realização de práticas de sensoriamento online do ambiente ao redor do robô, assim como o envio dados à distância, via *Bluetooth*, ou também o acionamento remoto do robô.

3.3 Design da Placa de Circuito Impresso

No intuito de criar um módulo didático com mais qualidade e que, por consequência, exija menos manutenções, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso, que proporciona as seguintes características ao projeto:

- Evitar problemas com fios (*jumpers*);
- Reduzir a chance de mal contato entre componentes;



(a) Módulo *Bluetooth* HC-06 (Technology, 2011) (b) Sensor Ultrassônico HC-SR04 (Elec Freaks, 2019)

Figura 8. Componentes de sensoriamento e comunicação

- Eliminar curtos-circuitos, e;
- Facilitar a organização da ligação do sistema.

O desenho e a modelagem da placa de circuito impresso foram feitos em um *software* livre voltado à elaboração de esquemáticos eletroeletrônicos.

A partir do conhecimento de todos os componentes, foram definidas as ligações entre eles considerando as devidas finalidades de cada conexão. Para melhor visualizar tais conexões, a Tabela 1 apresenta a ligação entre o Arduino e o módulo L298N, respeitando a ordem e tipos de sinais trabalhados, voltado à utilização de controle de velocidade.

Tabela 1. Ligações dos módulos de ponte H

Arduino	Pontes H L298N	
	Módulo 1	Módulo 2
D11	ENA	-
D8	IN1	-
D7	IN2	-
D6	IN3	-
D5	IN4	-
D10	ENB	-
D9	-	ENA
D4	-	IN1
D3	-	IN2
Vin	5V	-
GND	GND	GND

A Tabela 2, por sua vez, descreve a ligação do módulo *Bluetooth* HC-06 ao Arduino, sendo também incluído um resistor de valor $1k\Omega$ entre os pinos de alimentação e o Rx e um segundo resistor de valor igual a $2.2k\Omega$ entre os pinos Rx e o GND do sistema. Esse divisor de tensão é necessário pois a tensão de alimentação do HC-06 é de 3,3V, enquanto o Arduino Nano utiliza 5V (Technology, 2011).

Tabela 2. Ligação do módulo *Bluetooth*

Arduino	Módulo HC-06
Rx	Tx
Tx	Rx
GND	GND
5V	5V

E, finalmente, a ligação de três sensores ultrassônicos HC-SR04, conectados às portas analógicas do Arduino está apresentada na Tabela 3.

A visão geral dessas ligações é apresentada nas Figuras 9 e 10. A Figura 9 mostra as conexões elétricas para a construção da placa de circuito, descrita anteriormente nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 3. Ligações dos sensores ultrassônicos

Arduino	Sensor HC-SR04		
	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
A0	-	-	Echo
A1	-	-	Trig
A2	-	Trig	-
A3	-	Echo	-
A4	Echo	-	-
A5	Trig	-	-
5V	5V	5V	5V
GND	GND	GND	GND

O *layout* final da placa de circuito impresso é apresentado na Figura 10. O desenho é projetado de modo que todas as trilhas estejam localizadas em uma mesma camada (*layer*), o que facilita também a produção da placa por instituições de ensino que não tenham acesso a equipamentos de fabricação automática ou semiautomática, sendo possível reproduzir essa mesma placa de forma artesanal.

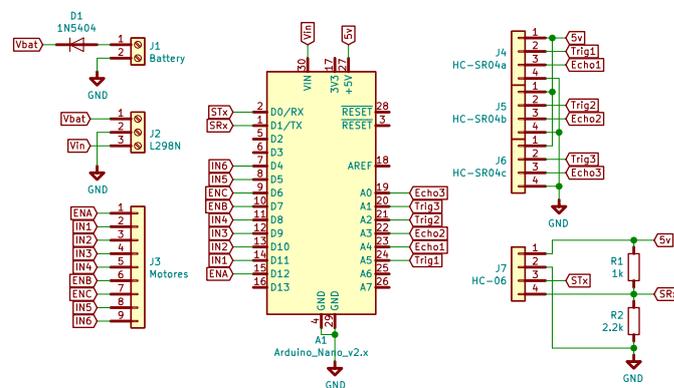


Figura 9. Esquemático elétrico da placa

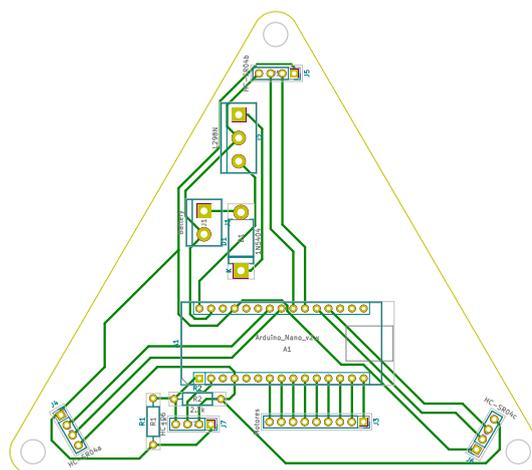


Figura 10. Esquemático de impressão da placa

3.4 Design Lógico

A parte lógica do sistema envolve a programação do Arduino, de modo que todas as funções estejam funcionais e autônomas. Desta forma, vários testes *ad hoc* são necessários para a validação do funcionamento do sistema antes de se implementar a integração. Dentre os testes realizados, listam-se:

- Alimentação dos periféricos com o nível de tensão correto;
- Rotação dos motores para ambas as direções e em velocidades variadas;
- Medição das distâncias por parte dos sensores ultrassônicos, e;
- Comunicação do *Bluetooth* com o Arduino.

Visualizando o sistema no sentido de controle de velocidade e posição do robô, um ajuste nas constantes associadas às matrizes de movimento se faz necessário, visto imperfeições e erros de modelagem do sistema. O sistema remotamente controlado, por exemplo, auxilia nestes testes, uma vez que, via um celular, é possível definir os parâmetros de posição (x, y) e o ângulo (θ) objetivo do sistema. O Arduino, ao receber os dados objetivos, calcula as variações do sistema e envia aos motores comandos de PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso) que geram a atuação necessária para o movimento, sendo as somas vetoriais de acionamento intrínsecas aos sinais de PWM. Uma visão simplificada dos dados de interesse e meio de transmissão é apresentada no esquema da Figura 11.

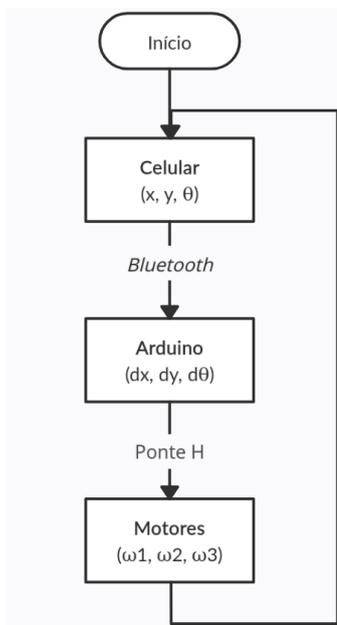


Figura 11. Visualização da transferência de dados e dispositivos

A programação necessária para a conexão dos demais dispositivos do robô envolvem também os desenvolvimentos *ad hoc* seguidos da integração, como no caso dos sensores ultrassônicos. Para facilitar a realização das operações matriciais no Arduino, foi utilizada a biblioteca *BasicLinearAlgebra* (Stewart, 2019). Esta biblioteca é *open-source* e possui funções que permitem manipular e operacionalizar matrizes bidimensionais com um baixo consumo de memória.

3.5 Protótipo

Analisadas todas as etapas de construção e realizados diversos testes tem-se um robô completamente funcional, didático e aplicável em várias áreas do conhecimento,

sendo o protótipo final do robô mostrado na Figura 12. Além de aplicações diretas como o controle de posição e evitar a colisão de obstáculos, existe a possibilidade de aplicação de técnicas de controle realimentado, como controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) ou *Sliding Mode Control* e a utilização de um Filtro de Kalman para melhorar a estimação de posição do robô.

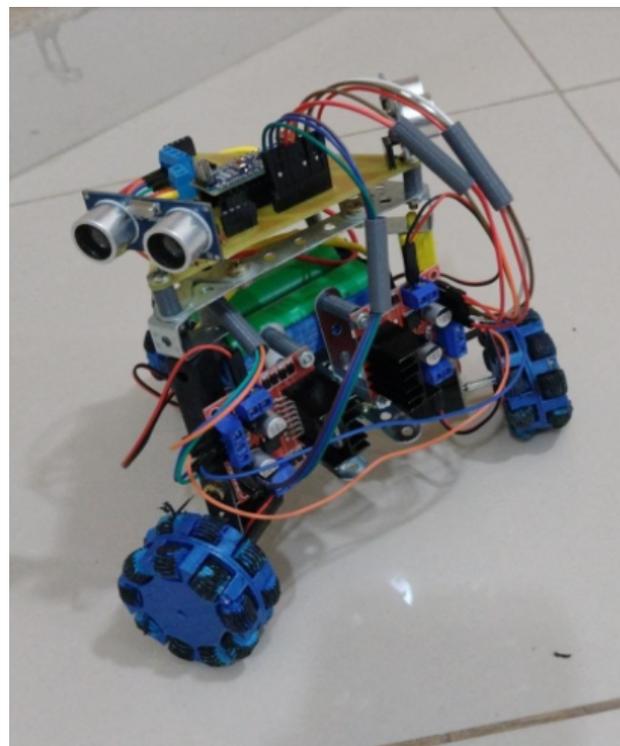


Figura 12. Robô 3WD Omnidirecional.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um robô holonômico de três rodas omnidirecionais de baixo custo, focado no uso de *softwares open-source* e na fabricação artesanal das peças. A principal aplicação do robô proposto está em auxiliar professores e estudantes a desenvolver habilidades técnicas no campo de automação e robótica.

O formato do robô introduz novos conceitos de movimentação aos estudantes, uma vez que seu movimento depende da análise vetorial dos giros das rodas. A modelagem e construção das rodas omnidirecionais foi necessária visto que as principais rodas suíças são importadas ou possuem um custo elevado.

Também é apresentada a placa de circuito impresso e suas conexões, de modo que o robô também tenha a característica de ser um sistema *open-source*. Além disso, todos os componentes utilizados são acessíveis, visto que o projeto foi focado em utilizar a tecnologia do Arduino e módulos que façam a comunicação com este.

O robô atende às premissas propostas, e também apresenta ampla possibilidade de aplicação na área de robótica móvel e de controle, podendo receber programações de controle clássico, ou mesmo ser utilizado para analisar o desempenho de diversas técnicas de planejamento e

navegação. Neste sentido, o robô pode ser remotamente controlado através da comunicação via *Bluetooth*.

4.1 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuros, considera-se:

- Implementação de um controlador PID buscando um melhor controle no posicionamento espacial do robô;
- Inclusão de sensores inerciais, como giroscópio, acelerômetro e magnetômetro;
- Inclusão de sensores ópticos, proporcionando uma redundância e melhoria nos cálculos de distância aos obstáculos, e;
- Implementação de técnicas de navegação e planejamento de trajetória.

REFERÊNCIAS

- Al Tahtawi, A.R. and Yusuf, M. (2019). Low-cost quadrotor hardware design with pid control system as flight controller. *Telkomnika*, 17(4).
- Arduino (2008). *Arduino Nano User Manual*. Arduino. URL <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>.
- Cantú, E.D. (2017). *Desenvolvimento de plataforma robótica omnidirecional*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. TCC.
- Cardeira, C. and Da Costa, J.S. (2005). A low cost mobile robot for engineering education. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, 6–pp. IEEE.
- do Prado, J.L. and da Silva, R.R. (2020). Stem: uma inovação no ensino superior. *Research, Society and Development*, 9(11), e58391110355–e58391110355.
- Elec Freaks (2019). *Ultrasonic Ranging Module HC-SR04*. Elec Freaks. URL <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>.
- Hassanpour, V., Rajabi, S., Shayan, Z., Hafezi, Z., and Arefi, M.M. (2017). Low-cost home automation using arduino and modbus protocol. In *2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, 284–289. IEEE.
- Leach, F., Munteanu, R., Vadan, I., and Capatana, D. (2009). Didactic platform for the study of hybrid wind-hydro power plants. In *2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems Electric Drives Joint Symposium*, 1–6. doi: 10.1109/ELECTROMOTION.2009.5259094.
- McLurkin, J., Rykowski, J., John, M., Kaseman, Q., and Lynch, A.J. (2012). Using multi-robot systems for engineering education: Teaching and outreach with large numbers of an advanced, low-cost robot. *IEEE transactions on education*, 56(1), 24–33.
- Modelix (2021). *Modelix robotics*. <https://www.modelix.com.br/>. Acesso em: 03-04-2022.
- Moreira, M.A. (2018). O ensino de stem (ciência, tecnologia, engenharia e matemática) no século xxi. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, 11. doi: 10.3895/rbect.v11n2.8416.
- Pajpach, M., Haffner, O., Kučera, E., and Drahoš, P. (2022). Low-cost education kit for teaching basic skills for industry 4.0 using deep-learning in quality control tasks. *Electronics*, 11(2), 230.
- Pinares-Mamani, O.G.C. and Cutipa-Luque, J.C. (2020). A low-cost didactic module for testing advanced control algorithms. *HardwareX*, 8, e00148.
- Rapid (2003). *Datasheet Motors*. Rapid Electronics. URL <https://www.filipeflop.com/img/files/download/Datasheet-MotorDC-3V-37-0140.pdf>.
- Rubenstein, M., Ahler, C., Hoff, N., Cabrera, A., and Nagpal, R. (2014). Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(7), 966–975.
- Rubenstein, M., Ahler, C., and Nagpal, R. (2012). Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. In *2012 IEEE international conference on robotics and automation*, 3293–3298. IEEE.
- SDI, S. (2014). *Specification of product for Lithium-ion rechargeable cell*. Model name: INR18650-32E. Samsung SDI Co., Ltd. URL <http://www.cleon.ru/specification/samsung-INR18650-32E.pdf>.
- Segundo, A.K.R., Junior, J.A.N.C., Hilário, R.Q., de Oliveira Gomide, V., and Ferreira, D.V.M. (2015). Low cost scada system for education. In *2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 536–542. IEEE.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I.R., and Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, 2nd edition.
- Silva, G.P. and Borges, J.A.d.S. (2018). A didactic processor and simulator for iot. In *2018 3rd International Conference of the Portuguese Society for Engineering Education (CISPEE)*, 1–7. IEEE.
- Spong, M., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. Wiley select coursepack. Wiley. URL <https://books.google.com.br/books?id=muCMAAAACAAJ>.
- Stewart, T. (2019). *Basiclinearalgebra*. URL <https://github.com/tomstewart89/BasicLinearAlgebra>.
- STMicroelectronics (2000). *Dual Full-Bridge Driver*. Model: L298. STMicroelectronics. URL <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>.
- Takács, G., Boldocký, J., Mikuláš, E., Konkoly, T., and Gulán, M. (2021). Motoshield: Open miniaturized dc motor hardware prototype for control education. In *2021 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–9. doi: 10.1109/FIE49875.2021.9637210.
- Takács, G., Gulán, M., Bavna, J., Köplinger, R., Kovács, M., Mikuláš, E., Zarghoon, S., and Saláni, R. (2019). Heatshield: a low-cost didactic device for control education simulating 3d printer heater blocks. In *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 374–383. doi:10.1109/EDUCON.2019.8725201.
- Technology, G.H.I. (2011). *Product Data Sheet*. Model: HC-06. Guangzhou HC Information Technology Co., Ltd. URL <https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>.
- Tivani, A.E.A., Murdocca, R.M., Paez, C.F.S., and Gazzano, J.D.D. (2019). Didactic prototype for teaching the mqtt protocol based on free hardware boards and node-red. *IEEE Latin America Transactions*, 18(02), 376–382.
- Xie, Y., Fang, M., and Shauman, K. (2015). Stem education. *Annual review of sociology*, 41, 331–357.

Yunardi, R.T., Arifianto, D., Bachtiar, F., and Prananingrum, J.I. (2021). Holonomic implementation of three wheels omnidirectional mobile robot using dc motors.

Journal of Robotics and Control (JRC), 2(2), 65–71.