

Daniel Ermelino Carvalho  
Lucas Pereira Lima

# **Robô omnidirecional de 3 rodas**

Brasil

2022

Daniel Ermelino Carvalho  
Lucas Pereira Lima

## **Robô omnidirecional de 3 rodas**

Universidade Federal do ABC

CECS

Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica

Orientador: Marcelo Bender Perotoni

Brasil

2022

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Veículo omnidirecional de 3 rodas</b>	<b>5</b>
3.1.1	Modelagem Cinemática - Dedução da matriz por cinemática direta	5
<b>3.2</b>	<b>Roda Omnidirecional</b>	<b>7</b>
<b>3.3</b>	<b>Motor DC com encoder e driver para motor</b>	<b>8</b>
3.3.1	Encoder magnético	9
3.3.2	Driver para motor	9
<b>3.4</b>	<b>Microcontrolador STM32</b>	<b>10</b>
<b>3.5</b>	<b>Atollic TrueSTUDIO</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Componentes</b>	<b>12</b>
4.1.1	Motor DC e driver	12
4.1.2	Microcontrolador	13
4.1.3	Alimentação	14
4.1.4	Controle do robô	14
4.1.5	Desenvolvimento do código do projeto	14
<b>5</b>	<b>PRÓXIMAS ETAPAS</b>	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>Montagem do robô</b>	<b>15</b>
<b>5.2</b>	<b>Calibração de controle nos atuadores</b>	<b>15</b>
<b>5.3</b>	<b>Mapeamento de ambientes</b>	<b>15</b>
<b>5.4</b>	<b>Calibração de controle automático</b>	<b>15</b>
<b>5.5</b>	<b>Testes autônomos</b>	<b>15</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>16</b>

# 1 Introdução

Apesar dos diversos desenvolvimentos recentes, pesquisas no campo da robótica móvel são um fenômeno ocorrendo há mais de 50 anos - segundo os padrões atuais, o primeiro robô móvel foi o Shakey, desenvolvido entre 1966 e 1972 (1). Sua principal característica distintiva era a habilidade de perceber arrazoar a respeito de seu entorno, sendo capaz de desenvolver tarefas que requeressem planejamento, encontrar rotas e reposicionar pequenos objetos (2).

À medida em que as técnicas para se construir e controlar robôs móveis (com particular interesse nos robôs móveis autônomos), e a isso se somando o fato de que os materiais para sua construção tornaram-se cada vez mais acessíveis (em termos de disponibilidade e também de redução de custos), já a partir da década de 80 começaram a surgir robôs autônomos em diversos laboratórios e centros de pesquisa; mais recentemente, empresas começaram a comercializar robôs para usuários domésticos, em aplicações como cortadores de grama, aspiradores e pó, e mesmo robôs voltados para entretenimento (1).

Robôs são classificáveis diversas maneiras, tais como forma de movimentação, os tipos de tarefas executadas e o seu grau de autonomia, bem como agrupando-os entre aquáticos, aéreos e terrestres. A escolha de um dado sistema de locomoção depende de diversas características do robô e da tarefa a ser executada, como manobrabilidade, controlabilidade, estabilidade, eficiência e tração (1).

Ao se classificar robôs móveis, também é possível se empregar como critério características cinemáticas - particularmente, a capacidade do robô se movimentar em qualquer direção. A robôs com restrições em determinados tipos de movimento dá-se o nome de não-holonômicos, em oposição a robôs holonômicos, capazes de movimentação em qualquer direção (estritamente, robôs com quantidades de velocidades igual a seu grau de liberdade (1)).

Em se tratando de robôs terrestres, suas restrições não-holonômicas são consequência direta das rodas empregadas em sua construções. Rodas convencionais permitem uma quantidade de movimentos limitada, e, para contornar isso, é possível construir rodas omnidirecionais aos se acrescentar rotores à estrutura de uma roda convencional (1).

## 2 Objetivos

### Gerais

Este trabalho tem como objetivos gerais avaliar a viabilidade da utilização de um robô omnidirecional de três rodas controlado por microcontrolador para atuação independente em ambiente interno.

### Específicos

Deseja-se realizar a construção de um robô a partir de diversos componentes (motor, microcontrolador, rodas, driver, chassi, entre outros), e também implementar rotina de controle que permita ao robô receber como entrada mapa do ambiente em que se encontra, de modo que seja capaz de nele se mover de acordo com as rotinas desejadas.

## 3 Revisão Bibliográfica

### 3.1 Veículo omnidirecional de 3 rodas

Um veículo omnidirecional de 3 rodas no contexto deste trabalho é um robô holonômico capaz de se mover em translação e rotação simultaneamente e independentemente (3). Sua geometria básica se baseia em rodas equidistantes em uma circunferência, com  $120^\circ$  de separação entre si, tangenciando o perímetro do chassi do veículo.

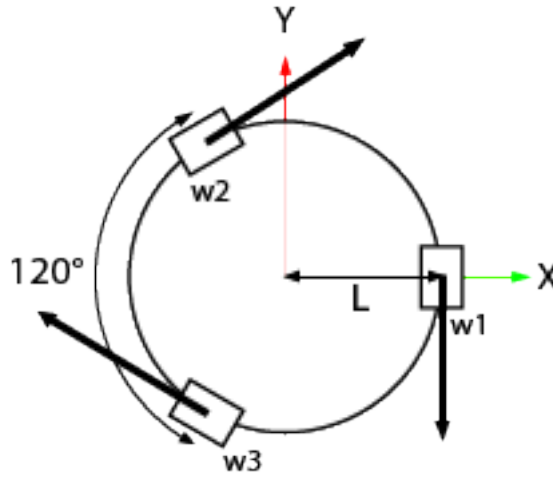


Figura 1 – Diagrama do modelo matemático do robô

#### 3.1.1 Modelagem Cinemática - Dedução da matriz por cinemática direta

$\vec{V}$  é o vetor de velocidade linear do robô,  $V_{w1}$ ,  $V_{w2}$ ,  $V_{w3}$  são as velocidades lineares das rodas 1,2,3.  $\omega$  é a velocidade angular do robô a partir do centro geométrico do robô.  $L$  é a distância entre o centro de geométrico da roda e o centro de geométrico do robô.

$$\vec{V}_l = \vec{V}_{w1} + \vec{V}_{w2} + \vec{V}_{w3} \quad (3.1)$$

$$\vec{\omega} = \frac{|\vec{V}_{w1}|}{L} + \frac{|\vec{V}_{w2}|}{L} + \frac{|\vec{V}_{w3}|}{L} \quad (3.2)$$

$$V_l \angle \theta = V_{w1} \angle \left(-\frac{\pi}{2}\right) + V_{w2} \angle \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) + V_{w3} \angle \left(\frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right)$$

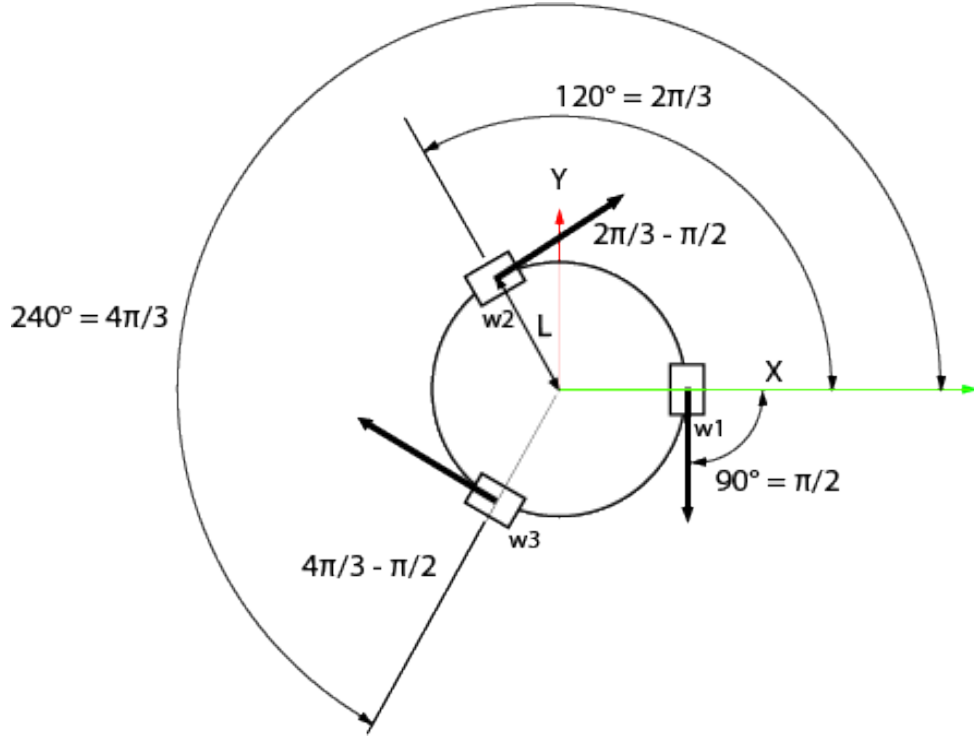


Figura 2 – Diagrama do modelo matemático do robô, com valores dos ângulos das rodas

$$\begin{aligned}
 V_l \cos \theta + j V_l \sin \theta &= V_{w1} \cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) + j V_{w1} \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \\
 &\quad + V_{w2} \cos \left( \frac{\pi}{6} \right) + j V_{w2} \sin \left( \frac{\pi}{6} \right) \\
 &\quad + V_{w3} \cos \left( \frac{5\pi}{6} \right) + j V_{w3} \sin \left( \frac{5\pi}{6} \right)
 \end{aligned}$$

$$\omega = \frac{V_{w1}}{L} + \frac{V_{w2}}{L} + \frac{V_{w3}}{L}$$

$$\begin{bmatrix} V \cdot \cos \theta \\ V \cdot \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) & \cos \left( \frac{\pi}{6} \right) & \cos \left( \frac{5\pi}{6} \right) \\ \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) & \sin \left( \frac{\pi}{6} \right) & \sin \left( \frac{5\pi}{6} \right) \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Matriz da cinemática direta.

$$\begin{bmatrix} \cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) & \cos \left( \frac{\pi}{6} \right) & \cos \left( \frac{5\pi}{6} \right) \\ \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) & \sin \left( \frac{\pi}{6} \right) & \sin \left( \frac{5\pi}{6} \right) \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 1/L & 1/L & 1/L \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Matriz inversa:

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2/3 & L/3 \\ -1/\sqrt{3} & -1/3 & L/3 \\ 1/\sqrt{3} & -1/3 & L/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \cdot \cos \theta \\ V \cdot \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A matriz gerada acima é a matriz de cinemática do robô. As entradas são o vetor velocidade linear e a velocidade angular do robô, e as saídas são as velocidades lineares de cada uma das rodas.

Desconsiderando a velocidade angular, é possível observar os vetores velocidades das rodas e o vetor velocidade linear do robô na figura 3 que foi gerada por meio de simulação em Python.

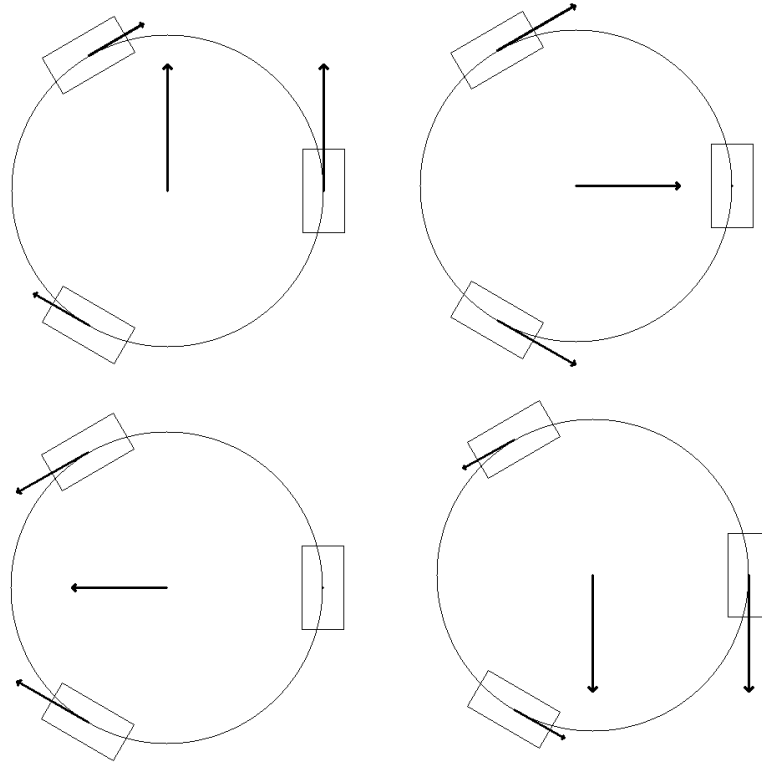


Figura 3 – Simulação dos vetores

## 3.2 Roda Omnidirecional

A roda omnidirecional aparece em vários modelos na literatura, tais como no design de J. Graboweicki em 1919 (4) e o de Josef Blumrich em 1972 (5). A roda consiste de rolos perpendiculares à sua direção de giro, cuja presença tem como efeito conferir à roda a capacidade de se locomover em qualquer direção no seu plano. Essa capacidade é o



que confere aos robôs aqui discutidos suas características holonômicas, uma vez que as restrições de movimento a que eles estão sujeitos está normalmente atrelada à construção das rodas (1).

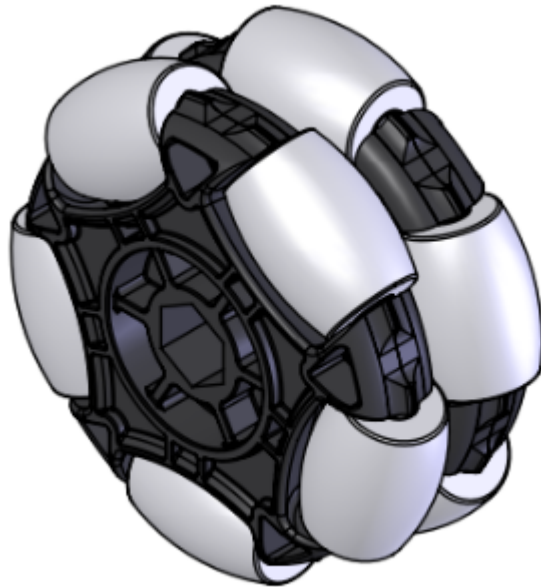


Figura 4 – Modelo de uma Omniwheel (6)

A relação entre velocidade linear e angular da roda é dada por:

$$V_{w1} = \omega_{w1} \cdot r$$

em que  $V_w$  é velocidade linear da roda,  $r$  o raio da roda,  $\omega_w$  e é a velocidade angular da roda.

Uma variação da roda omnidirecional é a roda mecanum, criada por Bengt Ilon (7) - a diferença entre elas é fundamentalmente a construção dos rolos ligados à estrutura central (que, no caso da roda mecanum, são posicionados a  $45^\circ$ ).

### 3.3 Motor DC com encoder e driver para motor

Um motor DC é fundamentalmente uma máquina elétrica de corrente contínua, que converte energia elétrica de corrente contínua em energia mecânica. Máquinas elétricas de corrente contínua são mais fáceis de controlar e oferecem uma grande faixa de velocidades (8). Devido a essas características, tornam-se ótimas candidatas para uso em eletrônica e robótica, pois podem ser usadas com baterias. Para controlar a velocidade de um motor, é

necessário o uso de um encoder, que converte o sinal de posição em um valor mensurável de velocidade angular.

### 3.3.1 Encoder magnético

Por se utilizar um encoder PRR, são produzidas duas ondas quadradas como saídas, A e B (9). As duas possuem 90° de fase entre si, e, caso a onda A esteja adiantada em relação a B (6), o sentido de rotação é positivo (anti-horário).

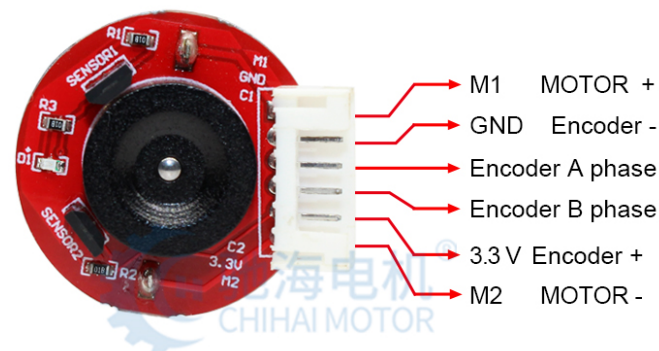


Figura 5 – Encoder holzer (10)

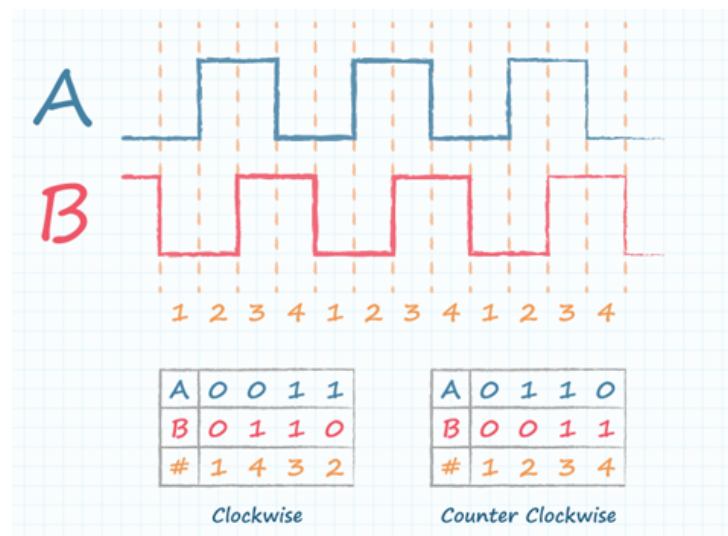


Figura 6 – Ondas quadradas resultantes dos pulsos de saída do encoder (9)

### 3.3.2 Driver para motor

Motores não podem ser ligados diretamente nos pinos de um microcontrolador - é necessário um circuito que permita à baixa corrente do microcontrolador controlar correntes mais altas, como as de um motor DC. Drivers podem ser usados em uma variedade de tensões de entrada e permitem o controle da velocidade por PWM (11).

O driver a ser usado neste trabalho é do tipo ponte H. A Ponte H permite que a polaridade da alimentação do motor DC seja alterada. Devido a sua inércia, o motor continua girando mesmo quando a energia é retirada, mas a ponte H pode curto-circuitar seus terminais, gerando uma força eletromotriz de frenagem. Outra razão para uso de um driver ponte, é lidar com a tensão gerada pelo motor quando o rotor continua a girar depois de remover alimentação - o motor se comporta com um gerador nesse momento, e a ponte H fornece um caminho livre para essa corrente gerada.

### 3.4 Microcontrolador STM32

STM32 é uma família de microcontroladores de 32-bits fabricados pela STMicroelectronics. Possuem como processadores o ARM Cortex, baseados em arquitetura Harvard, de 32-bits. Os microcontroladores STM32 fornecem base para uma grande variedade de sistemas embarcados, e com custo inferior e maior flexibilidade quando comparado ao Arduino com ATmega, que possui microcontroladores de 8 a 16 bits. Contudo, essa flexibilidade e baixo custo têm como contrapartida o requerimento de um maior nível de experiência em programação C do que o necessário para desenvolver as mesmas soluções em Arduino (cuja concepção teve como objetivo maior acessibilidade para iniciantes (12)).

### 3.5 Atollic TrueSTUDIO

A IDE a ser usada para programar um STM32 é o TrueSTUDIO, distribuído pela Atollic, que foi adquirida pela STMicroelectronics em 2017. Trata-se de um software livre para programar em C/C++, criado com base na plataforma Eclipse, e que possui todas as funções esperadas para o trabalho com o STM32, tais como edição, compilação e debug. Uma de suas principais vantagens é não haver limites para tamanho de projeto, o que o torna ideal para trabalhos profissionais. O TrueSTUDIO deixou de receber atualizações em 2017, depois da aquisição pela STMicroelectronics.(13)

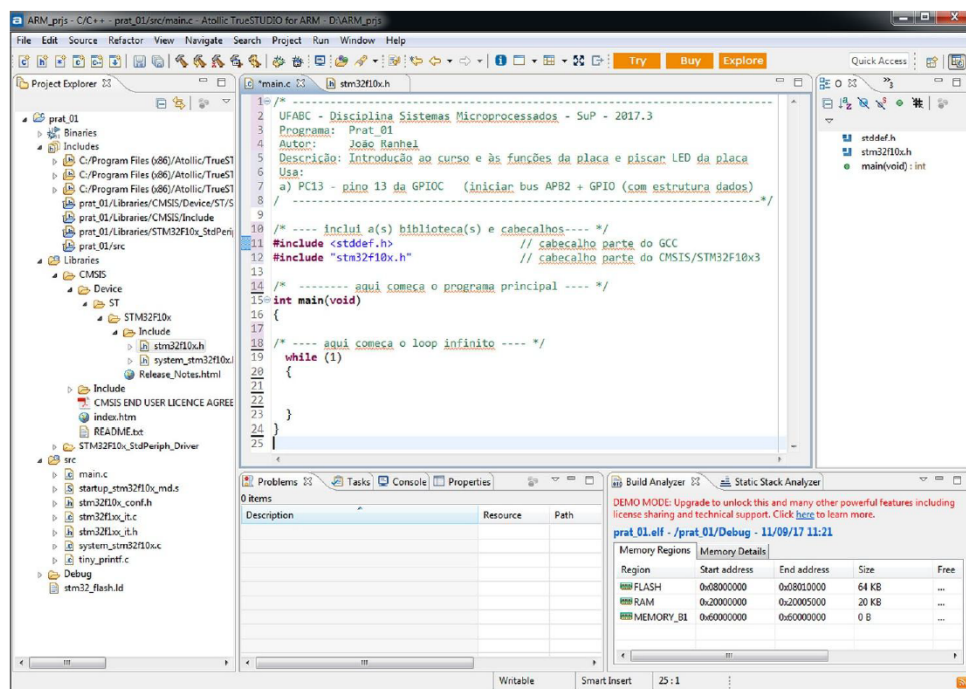


Figura 7 – Interface Atollic (13)

## 4 Metodologia

### 4.1 Componentes

#### 4.1.1 Motor DC e driver

Optou-se pelo uso de um motor DC de 6V 210rpm, com taxa de redução de 1:34. O motor já possui um encoder magnético acoplado, com 11 PPR (*Pulses Per Revolution*). Será usado o driver Ponte H L298N para uso inicial, suporta até 2A em operação DC (14), a corrente de operação máxima do motor é de 1.1A, porém a corrente de parada é drenar 3.2A. O L298N também causa uma queda de tensão, a 1A pode causar uma queda de 3.2V, fazendo com que o motor não receba a tensão necessária para operar nos valores desejados (14), Com isso, um driver de maior capacidade possa ser necessário, as opções são os da categoria *Medium-power* da Pololu, DRV8874 ou acima (15). Mas para seguir com desenvolvimento, o l298N será usado por hora.



Figura 8 – Motor DC 6V (10)

Quadro 1 – Especificações do motor DC 6V

Componente	Quant
Tensão nominal	DC 6V
Velocidade sem carga	210RPM 0.13A
Eficiência máxima	2,0kg.cm/170rpm/2,0W/0,60A
Poder maximo	5,2kg.cm/110rpm/3,1W/1,10A
Torque de parada	10kg.cm 3.2A
Taxa de Redução do Retardador	1:34
Resolução do salão	Razão Hall x 34,02 = 341,2PPR

Fonte: (16)

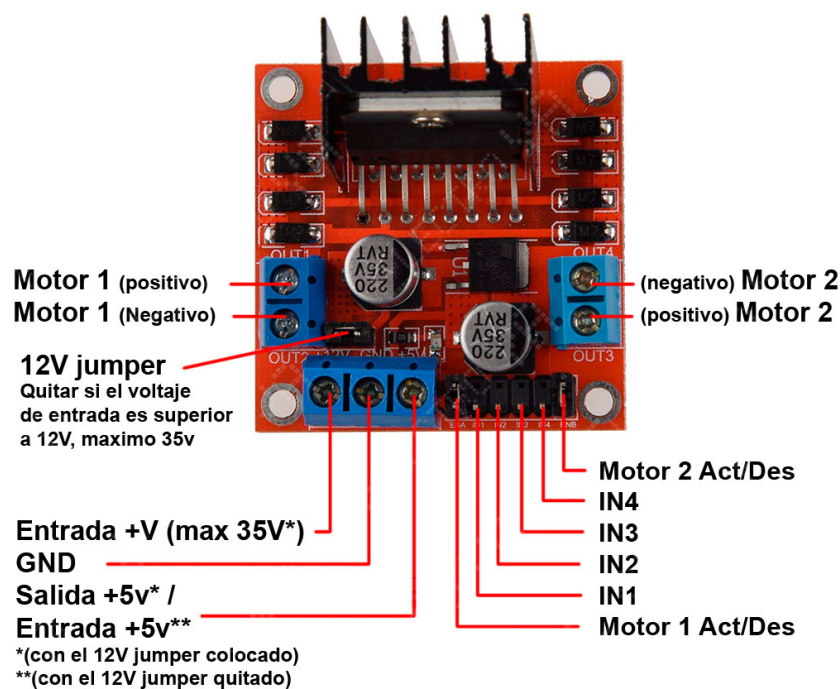


Figura 9 – Driver Ponte H L289N (17)

#### 4.1.2 Microcontrolador

Para microcontrolador, optou-se pelo uso do STM32F103C8, também conhecido como Blue Pill. Possui como processador o ARM Cortex-M3, e tem 64Kbs de memória flash. O STM32F103C8 possui 7 timers, 2 ADCs, e 9 interfaces de comunicação, incluindo I2C (*Inter-Integrated Circuit*), USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), CAN e USB 2.0. O STM32F103C8 possui 6 que suportam canais de PWM de 5V, e outros 8 canais de 3.3V, e pode ser alimentado via micro USB de 5V.

Para carregar o projeto no microcontrolador, um gravador ST-LINK USB será utilizado.

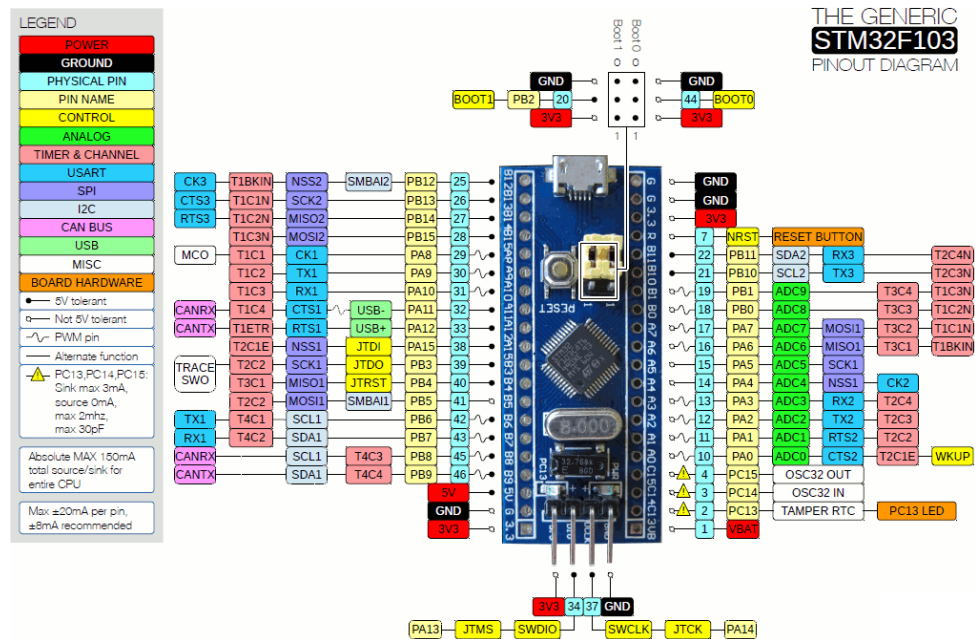


Figura 10 – Diagrama de pinos do STM32F103C8

### 4.1.3 Alimentação

Para alimentar o microcontrolador, um powerbank com saída de 5v será usado, considerando que o STM32F103C8 funciona a uma corrente abaixo de 100mA. Para alimentar os motores, para uso no desenvolvimento, optou-se o uso de pilhas AA (1,5V) e um suporte para 4 pilhas, mas será necessário trocar por bateria de lítio-ion.

### 4.1.4 Controle do robô

Inicialmente será usado um joystick de 3 eixos para controlar o robô para testar a cinemática de movimento.

### 4.1.5 Desenvolvimento do código do projeto

O projeto será codado em C, usando a IDE Atollic TrueSTUDIO. O código deverá conter o controle do PWM para os motores, e controle da cinemática.

## 5 Próximas etapas

### 5.1 Montagem do robô

Nesta etapa, será realizada a montagem mecânica do robô, com as ligações elétricas e mecânicas dos componentes segundo as especificações apresentadas até o momento.

### 5.2 Calibração de controle nos atuadores

Nesta etapa, busca-se verificar se os parâmetros especificados para o controle do robô estão corretos - mais especificamente, busca-se saber se é possível controlar o robô diretamente, modificando sua velocidade, forçando-o a fazer curvas, testando sua holonomicidade, e afins.

### 5.3 Mapeamento de ambientes

Nesta etapa, busca-se imbuir o robô da capacidade de receber mapas de ambientes internos em que ele possa operar. Procura-se aqui verificar se o formato de entrada é adequado e compatível com as habilidades de movimentação do robô.

### 5.4 Calibração de controle automático

Nesta etapa, o objetivo é definir corretamente os parâmetros de controle automático a operação do robô, correção de rotas, e similares. Espera-se fazer uso de um controlador PID para isso.

### 5.5 Testes autônomos

Nesta etapa, busca-se integrar as atividades realizadas até este momento, aferindo a capacidade do robô de se ater a rotas pré-determinadas, de acordo com o mapeamento do ambiente que lhe foi provido, a fim de atingir aos objetivos propostos deste trabalho.



# Referências

- 1 AGUIRRE, L. A. et al. *Enciclopédia de automática : controle e automação, volume III*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. ISBN 9788521207733. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- 2 INTERNATIONAL, S. *Shakey the Robot*. 2015. <<https://www.sri.com/hoi/shakey-the-robot/>>. Citado na página 3.
- 3 MESTIRI, Y. *Mobile manipulator robot: omni 3 wheels manipulator robot*. 2022. <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/25146>>. Citado na página 5.
- 4 GRABOWIECKI, J. *Vehicle Wheel*. 1919. Citado na página 7.
- 5 BLUMRICH, J. *OMNIDIRECTIONAL WHEEL*. 1972. Citado na página 7.
- 6 VEXROBOTICS. *VEXpro 3.25 OMNI WHEEL*. 2015. <<https://www.vexrobotics.com/omni-wheels.html>>. Citado na página 8.
- 7 ILON, B. *Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base*. 1972. Citado na página 8.
- 8 FITZGERALD; KINGLEY; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 7. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2014. Citado na página 8.
- 9 SMOOT, R. *What's the Difference Between an Incremental Encoder's PPR, CPR, and LPR?* <<https://www.cuidevices.com/blog/what-is-encoder-ppr-cpr-and-lpr>>. Citado na página 9.
- 10 LTD, S. C. M. C. *Holzer Encoder Data*. <[https://pt.aliexpress.com/item/4000761877459.html?spm=a2g0o.store\\_pc\\_allProduct.8148356.49.53913202eMQDkw](https://pt.aliexpress.com/item/4000761877459.html?spm=a2g0o.store_pc_allProduct.8148356.49.53913202eMQDkw)>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 12.
- 11 GMBH, T. E. E. *The H-bridge motor driver with a bridge to a wonderful heritage*. 2020. Citado na página 9.
- 12 ARM. *Cortex-M3 Devices Generic User Guide*. 2010. Issue A. Citado na página 10.
- 13 BROWN, G. *Sistemas Microprocessados - Apostila com práticas e foco nos processadores ARM CORTEX*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- 14 STMICROELECTRONICS. *L298N Dual Full-Bridge Driver Datasheet*. <[https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf)>. Citado na página 12.
- 15 POLOLU. *DRV8874 Single Brushed DC Motor Driver Carrier*. <<https://www.pololu.com/product/4035>>. Citado na página 12.
- 16 LTD, S. C. M. C. *Holzer Encoder Data*. <[https://www.banggood.com/pt/CHIHAI-MOTOR-6V-210RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-with-Mounting-Bracket-and-Wheel.html?utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc\\_organic&gmcCountry=BR&utm\\_content=minha&utm\\_campaign=](https://www.banggood.com/pt/CHIHAI-MOTOR-6V-210RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-with-Mounting-Bracket-and-Wheel.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_organic&gmcCountry=BR&utm_content=minha&utm_campaign=)>

minha-br-pt-pc&currency=BRL&cur\_warehouse=CN&createTmp=1&utm\_source=googleshopping&utm\_medium=cpc\_pt&utm\_campaign=aceng-pmax-br-main-roas5-all-220407&utm\_content=kawhi&ad\_id=&gclid=CjwKCAjwgr6TBhAGEiwA3aVuIWswcD5MV9VxdWcRutbZPqLftCYN4WGCsRkPi\_GJtY4J-5SVenmRihoCPRMQAvD\_BwE>. Citado na página 13.

17 ELECTROYA. *CONTROLADOR DUAL / CONTROLLER PARA STEP-PER E DC MOTORS - L298N*. <<https://www.electroya.com/pt/produto/driver-de-driver-duplo-para-motores-de-passo-e-dc-l298n/>>. Citado na página 13.