



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

JOÃO PEREIRA DE SOUSA NETO

**ESTUDO E CRIAÇÃO DE UM TUTORIAL DIDÁTICO SOBRE A TOOLBOX MOBILE
ROBOTICS SIMULATION NO MATLAB PARA DEFINIÇÃO DE CAMINHOS DE UM
ROBÔ MÓVEL COM QUATRO RODAS MECANUM**

RUSSAS

2026

JOÃO PEREIRA DE SOUSA NETO

ESTUDO E CRIAÇÃO DE UM TUTORIAL DIDÁTICO SOBRE A TOOLBOX MOBILE
ROBOTICS SIMULATION NO MATLAB PARA DEFINIÇÃO DE CAMINHOS DE UM
ROBÔ MÓVEL COM QUATRO RODAS MECANUM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Ciência da Computação
do Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Reuber Regis de
Melo.

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N385e Neto, João.
ESTUDO E CRIAÇÃO DE UM TUTORIAL DIDÁTICO SOBRE A TOOLBOX MOBILE ROBOTICS
SIMULATION NO MATLAB PARA DEFINIÇÃO DE CAMINHOS DE UM ROBÔ MÓVEL COM
QUATRO RODAS MECANUM / João Neto. – 2026.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Ciência da Computação, Russas, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Reuber Regis de Melo.

1. robótica móvel. 2. matlab. 3. toolbox. 4. tutorial didático. 5. uatro rodas mecanum. I. Título.
CDD 005

À minha família, em especial à minha mãe e ao meu pai, por acreditarem em mim, investirem em meus sonhos e por todo o cuidado e segurança oferecidos ao longo da minha trajetória. À minha esposa, pelo amor, apoio, compreensão e parceria constantes, sendo essencial em cada desafio e conquista ao longo desse percurso.

RESUMO

Este trabalho apresenta a elaboração de um tutorial didático para instalação, configuração e uso das toolboxes Mobile Robotics Simulation (MRS) e Mobile Robotics Training (MRT) no ambiente MATLAB/Simulink, com foco no apoio ao ensino e à aprendizagem de robótica móvel. O objetivo principal é fornecer um guia prático passo a passo que permita a estudantes e iniciantes reproduzirem simulações de robôs móveis, compreenderem os principais conceitos envolvidos e criarem seus próprios cenários de simulação. O tutorial descreve desde a preparação do ambiente de trabalho e instalação das toolboxes até a utilização de seus principais recursos, incluindo a simulação da cinemática de robôs móveis, a configuração de sensores e a visualização do movimento em mapas de ocupação. Também é apresentado o uso do aplicativo Simulation Map Generator para a criação de mapas a partir de imagens, possibilitando a definição de ambientes personalizados para simulação. Como demonstração prática do conteúdo apresentado no tutorial, é descrito um modelo de simulação de um robô com rodas Mecanum no Simulink, utilizando blocos da toolbox MRS para representar a cinemática inversa, a cinemática direta, a simulação de sensores de distância e a visualização do robô em um ambiente bidimensional gerado pela MRT. Esse exemplo tem caráter ilustrativo e educacional, servindo como referência para a aplicação dos conceitos abordados. Dessa forma, o principal resultado do trabalho é a disponibilização de um material didático estruturado, que pode ser utilizado como apoio em disciplinas, projetos acadêmicos e atividades introdutórias em robótica móvel, facilitando o uso das toolboxes MRS e MRT no contexto educacional.

Palavras-chave: robótica móvel; matlab; toolbox mrs e mrt; tutorial didático; quatro rodas mecanum; definição de caminhos.

ABSTRACT

This paper presents the development of an educational tutorial for installing, configuring, and using the Mobile Robotics Simulation (MRS) and Mobile Robotics Training (MRT) toolboxes in the MATLAB/Simulink environment, with a focus on supporting the teaching and learning of mobile robotics. The main objective is to provide a practical step-by-step guide that allows students and beginners to reproduce mobile robot simulations, understand the main concepts involved, and create their own simulation scenarios. The tutorial describes everything from preparing the work environment and installing the toolboxes to using their main features, including simulating the kinematics of mobile robots, configuring sensors, and visualizing movement on occupancy maps. The use of the Simulation Map Generator application for creating maps from images is also presented, enabling the definition of customized environments for simulation. As a practical demonstration of the content presented in the tutorial, a simulation model of a robot with Mecanum wheels in Simulink is described, using blocks from the MRS toolbox to represent inverse kinematics, direct kinematics, distance sensor simulation, and visualization of the robot in a two-dimensional environment generated by MRT. This example is illustrative and educational in nature, serving as a reference for the application of the concepts covered. Thus, the main result of the work is the availability of structured teaching material that can be used as support in courses, academic projects, and introductory activities in mobile robotics, facilitating the use of the MRS and MRT toolboxes in an educational context.

Keywords: mobile robotics; matlab; toolbox mrs and mrt; didactic tutorial; four wheels mecanum; path definition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possível classificação para máquinas	13
Figura 2 – Disposição das rodas no robô omnidirecional	17
Figura 3 – Diagrama de movimentos de um robô omnidirecional com rodas mecanum	18
Figura 4 – Modelo Uniciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Pioneer (Adept MobileRobots).	18
Figura 5 – Modelo Diferencial. a) Vista frontal do robô diferencial , b) Vista da parte de trás do robô diferencial.	19
Figura 6 – Modelo Triciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Meptune (Universidade Carnegie Mellon).	20
Figura 7 – Modelo Quadriciclo. Sistema de direção Ackerman.	20
Figura 8 – Sensores infravermelhos.	22
Figura 9 – Acelerômetro.	23
Figura 10 – a) Microfone b) Exemplo de ligação.	23
Figura 11 – b) Exemplo de sinal gerado por odômetro, a) usando um disco com padrão opaco/transparente	24
Figura 12 – Sensor Kinect: Câmera do tipo RGB-D.	25
Figura 13 – Configuração das rodas e definição da postura	28
Figura 14 – (a) roda i na coordenada do robô, (b) princípio de movimento da roda i	29
Figura 15 – Visão geral do trabalho	36
Figura 16 – Modelo no Simulink.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MRS	Mobile Robotics Simulation
RIA	Robotic Industries Association
SMG	Simulation Map Generation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>11</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivo Específico</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3</i>	<i>Organização</i>	<i>11</i>
2	ROBÓTICA MÓVEL	13
2.1	Todas as categorias da robótica móvel	16
<i>2.1.1</i>	<i>Modelo omnidirecional (Rodas Mecanum)</i>	<i>16</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Modelo unicycle</i>	<i>17</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Modelo diferencial</i>	<i>19</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Modelo triciclo</i>	<i>19</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Modelo quadriciclo</i>	<i>20</i>
2.2	Sensores e Atuadores	21
<i>2.2.1</i>	<i>Sensores</i>	<i>21</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Sensores infravermelhos:</i>	<i>21</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Acelerômetros</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Microfone</i>	<i>22</i>
<i>2.2.1.4</i>	<i>Odômetro Ótico</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1.5</i>	<i>Câmeras</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.6</i>	<i>Sensores de Posição, Orientação e Movimentação</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Atuadores</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>Tipos de motores</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2.2</i>	<i>Modo de operação/controle do motor</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2.3</i>	<i>Tipos de atuações</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2.4</i>	<i>Tipos de locomoção</i>	<i>27</i>
2.3	Cinemática de Robô móvel	27
<i>2.3.1</i>	<i>Cinemática Direta e Inversa Genérica</i>	<i>29</i>
2.4	Simulação de robôs no MatLab	33
<i>2.4.1</i>	<i>Mobile Robotic Simulation - MRS</i>	<i>33</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Mobile Robotics Training Toolbox (MRT)</i>	<i>34</i>

3	METODOLOGIA	36
3.1	Visão Geral do Trabalho	36
3.1.1	<i>Definir os principais pontos do tutorial..</i>	36
3.1.2	<i>Elaborar exemplos didáticos de simulação no ambiente Matlab.</i>	37
3.1.3	<i>Uso do tutorial para programar um Robô com Rodas Mecanum</i>	38
3.2	Materiais e Métodos	39
3.2.1	<i>Uso do Matlab</i>	39
4	RESULTADOS	41
4.1	Produto Gerado: Tutorial Didático das Toolboxs MRS e MRT	41
4.2	Simulação de Robô Móvel com Rodas Mecanum	41
4.2.1	<i>Modelagem Cinemática no Simulink</i>	42
4.2.2	<i>Integração com Sensores e Ambiente Simulado</i>	43
4.3	Análise dos Resultados das Simulações	43
4.4	Discussão dos Resultados	43
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	47
6	TUTORIAL PARA PROGRAMAÇÃO DE UM ROBÔ COM RODAS MECANUM	49

1 INTRODUÇÃO

A robótica móvel, de acordo com Devol (1961) tem desempenhado um papel crucial na automação de tarefas complexas em diversos setores, como a indústria, a medicina e a exploração espacial. Um dos desafios enfrentados nessa área é a definição de caminhos para robôs móveis, permitindo que eles se movam de forma eficiente e segura em ambientes desconhecidos ou dinâmicos. Para solucionar essa questão, o uso de simulações computacionais tornou-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento e teste de algoritmos de navegação e planejamento de trajetórias.

Por conceito, a robótica móvel é a área da robótica que trata de dispositivos sem base fixa, que possuem a capacidade de locomover-se em um ambiente limitado ou não, tendo autonomia para interagir de forma direta com o meio em que estão (Sechhi, 2008). Dentro da robótica móvel encontra-se o robô omnidirecional, um dispositivo que tem como principal característica a facilidade na mudança de direção (Nascimento, 2009).

Esta concepção de robô pode se deslocar em todas as direções no plano sem a necessidade de mudança de orientação, isto se dá em função das rodas omnidirecionais, também conhecidas como rodas suecas ou quatro rodas mecanum (Sechhi, 2008). Este tipo de roda possui a propriedade de diminuir consideravelmente o atrito com o solo, já que possuem roldanas perpendiculares à linha de tração que permitem o deslizamento da roda (Nascimento, 2009). Esta característica atribui ao robô omnidirecional uma maior facilidade na mudança de direção, sendo muito utilizado no futebol de robôs e transporte de carga (Sobrinho, 2011).

A escolha de um robô móvel com quatro rodas Mecanum é motivada pela sua capacidade de movimentação omnidirecional (Ilon, 1975). Esses robôs possuem rodas especiais, dispostas em ângulos estratégicos, que permitem que eles se movam para frente, para trás, para os lados e até mesmo realizam rotações no próprio eixo com facilidade. Essa habilidade de movimentação torna os robôs Mecanum ideais para aplicações que exigem alta agilidade e precisão, como a movimentação em espaços apertados e a execução de tarefas complexas em ambientes desafiadores.

Ao longo deste trabalho, foram explorados conceitos fundamentais relacionados à robótica móvel, incluindo a cinemática do robô com quatro rodas Mecanum e os desafios associados à definição de caminhos. Foi apresentada a Toolbox Mobile Robotics Simulation (MRS) como uma solução eficiente para simular o comportamento do robô em diferentes cenários e testar estratégias de planejamento de trajetórias (Taheri *et al.*, 2015)

Além disso, foram desenvolvidos experimentos simulados com a Toolbox MRS no MatLab, para validar a eficácia da abordagem proposta. Os resultados obtidos permitirão avaliar a precisão da trajetória planejada, a capacidade de evitar obstáculos e a eficiência geral do robô móvel com quatro rodas Mecanum na execução de tarefas de navegação.

Espera-se que este estudo contribua para o avanço do campo da robótica móvel, fornecendo uma metodologia eficiente e confiável para a definição de caminhos de robôs móveis com quatro rodas Mecanum (Ilon, 1975). Além disso, espera-se que os resultados obtidos incentivem futuras pesquisas e aplicações práticas nessa área, impulsionando a automação de tarefas complexas e ampliando o uso de robôs móveis em diferentes setores industriais e sociais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar e elaborar um tutorial didático sobre a cinemática de robô móvel com quatro rodas mecanum, utilizando para isso, a Toolbox Simulation Map Generation (SMG) para criação de caminhos e a Toolbox MRS para simulação de movimentos do robô móvel.

1.1.2 Objetivo Específico

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre robótica móvel para entender os conceitos básicos;
- Estudar as Toolbox MALTAB Mobile Robotics Simulation Toolbox (MRS) e Mobile Robotics Training Toolbox (MRT) para elaboração de um tutorial;
- Criar Exemplos na MRT E MRS para elaboração do Tutorial;
- Aplicar os passos do tutorial no desenvolvimento e simulação dos movimentos de um robô com rodas mecanum;
- Analisar resultados simulados;

1.1.3 Organização

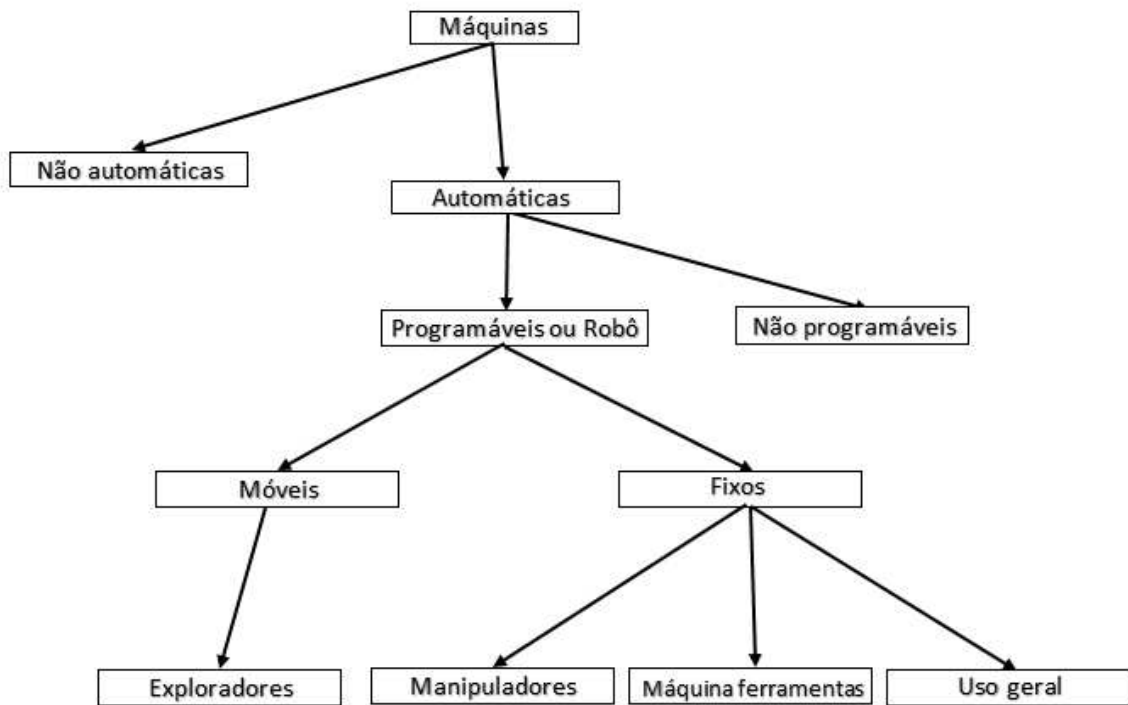
Este trabalho está dividido em seis capítulos, além da introdução e conclusão. No capítulo 2 está a revisão bibliográfica, na qual se descreve conceitos sobre robótica móvel, a cinemática do Robô móvel e sensores e atuadores em robôs móveis e conceitos sobre as Toolboxes

Mobile Robotics Simulation(MRS) e a Toolbox Simulation Map Generation(SMG). O capítulo 3 trata da metodologia, na qual se descreve como é a divisão do trabalho e os principais pontos. No capítulo 4 cronograma de como foi dividido a realização do TCC 2. Capítulo 5 Resultados esperados. Por último, no capítulo 6 têm-se a conclusão juntamente com a sugestão de trabalhos futuros.

2 ROBÓTICA MÓVEL

De acordo com Russell e Norvig (2010), um robot é definido pela Robotic Industries Association (RIA) como um manipulador multifuncional programável capaz de mover certos materiais, componentes, ferramentas ou dispositivos através de movimentos variáveis programados para realizar uma série de tarefas. Este conceito abrange uma vasta gama de máquinas. Por conseguinte, um robô é qualquer dispositivo que possa ser programado de alguma forma. Nas indústrias onde existem perigos, esta tecnologia já foi utilizada para substituir o trabalho humano. A maioria dos robôs industriais são grandes, imóveis, com baixo nível de inteligência e não autônomos. Poderíamos classificá-los como máquinas automáticas programáveis como podemos observar na Figura 1.

Figura 1 – Possível classificação para máquinas



Fonte: Adaptada de (Silva, 2003)

Além desta classificação funcional, também podemos distribuí-los em gerações segundo sua complexidade w (Nof, 1999):

Primeira Geração: São robôs tipicamente utilizados em ambientes industriais, desprovidos de "inteligência" senão aquela programada. O mundo onde atuam deve ser preparado pois eles não são capazes de perceber os objetos ao seu redor. Poucos utilizam um computador

dedicado embarcado. No entanto, ainda são usados em fábricas devido ao aumento de produtividade e qualidade do produto gerado e da durabilidade. Tendem a desaparecer à medida que as exigências em termos de produtividade e velocidade aumentam ainda mais.

Segunda Geração: A rápida expansão do mercado de semicondutores fez com que computadores se tornassem produtos baratos o suficiente para equipar robôs. Isto permitiu um avanço significativo pois máquinas anteriormente muito limitadas puderam ser equipadas com controladores que permitiram cálculos em tempo real e controle mais preciso dos atuadores ao longo de trajetórias. Sensores de força, torque e proximidade puderam ser integrados proporcionando maior adaptabilidade e precisão ao trabalho desempenhado pelo robô em seu ambiente. Entre as aplicações estão, pintura, montagem e soldagem.

Terceira Geração: Representam os modelos mais avançados hoje disponíveis. Caracterizam-se por incorporarem múltiplos processadores, cada um deles funcionando de forma assíncrona e independente dos demais. Também possuem sistemas supervisórios e de controle destes processadores utilizando funções de alto nível. Além disso, a fusão sensorial, ou seja, a incorporação e utilização em conjunto de vários tipos de sensores está permitindo comportamentos reativos e, eventualmente, cognitivos. São capazes de se comunicarem com outros sistemas. Todo seu potencial ainda não foi explorado. Entre suas aplicações estão tarefas extremamente delicadas e especializadas como medicina.

Em 1950, Isaac Asimov publicou o livro *I Robot* (Eu robô), onde define as três famosas leis da robótica:

- a) Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra algum mal;
- b) Um robô deve obedecer às ordens que lhe sejam dadas, exceto nos casos em que tais ordens contrariam a Primeira Lei;
- c) Um robô deve proteger sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou a Segunda Leis.

Nesse livro, Asimov (1950) assumia que o robô tinha raciocínio e percepção similares às do ser humano. Embora essas leis sejam simples, as histórias demonstravam a dificuldade em aplicá-las em várias situações do mundo real. As leis de Asimov criaram uma certa cultura na sociedade de como um robô deve atuar com os seres humanos. Atualmente elas são chamadas de “As três leis da insegurança” (Three Laws Unsafe) devido a sua dificuldade em aplicá-las.

A primeira lei é um anacronismo quando observamos os esforços de certas potências

na construção de robôs equipados com armas. Além disso, ela responsabiliza o robô por qualquer falha que venha a causar algum dano ao ser humano. Do ponto de vista legal, o robô é um equipamento, e como tal não deve ser responsabilizado. O responsável real é a pessoa ou grupo que o desenvolveu.

A segunda lei considera que o robô consegue compreender comandos verbais. Infelizmente, a compreensão de linguagem natural ainda é um problema em aberto. Ademais, devemos considerar também que existem inúmeras formas de comunicação que não são verbais, como posição corporal e expressões faciais que são usadas na comunicação entre as pessoas.

A terceira lei aumenta o custo do robô com a adição de sensores e sistemas de proteção. A grande maioria dos robôs atuais não possui sensores suficientes e adequados para garantir uma segurança total, assim como a capacidade de identificar se ele está ferindo algum ser vivo ou se está causando algum tipo de dano. Em geral, esse custo adicional muito elevado é evitado e para muitas aplicações não justificado.

Atualmente existe um amplo debate em torno dessas leis a fim de gerar novas que sejam mais condizentes com o estado atual e futuro da robótica. Existe a seguinte proposta, que é chamada “As três leis da robótica responsável”:

Um humano não pode desenvolver/implantar um robô sem seguir altos padrões legais e profissionais de segurança e ética. Um erro ou falha de um robô que coloque em risco a vida de uma pessoa pode levar ao cancelamento ou à proibição das pesquisas em robótica na área em que o incidente ocorreu.

Um robô deve responder aos humanos de acordo com seu papel dentro do ambiente onde está inserido. A interação entre humanos e robôs deve levar em consideração o papel de cada membro dentro do ambiente de trabalho. O robô deve ignorar hackers e obedecer ordens apenas de pessoas que tenham autoridade para comandá-lo.

Um robô deve ser dotado de autonomia suficiente para proteger sua própria existência, contanto que tal proteção forneça uma transferência suave de controle ao humano que não entre em conflito com a primeira e segunda leis. Se o robô estiver mais bem informado sobre a situação corrente de operação, então ele deve tomar o controle. Por exemplo, se existir uma situação de risco que exija um tempo curto de resposta, então um piloto não poderá sobrescrever um comando produzido por algoritmos que tentam proteger sua aeronave. O oposto poderá ocorrer quando o usuário estiver mais bem informado e a situação extrapolar o conhecimento do robô.

Este estudo tem o foco voltado para robôs móveis, isto é, robôs que se locomovem de

diferentes formas (veículos com rodas, robôs com pernas, robôs aéreos e robôs submarinos), que apresentam diferentes níveis de inteligência e de autonomia, podendo operar de modo isolado, interagindo com humanos, ou mesmo atuando em grupos/equipes. A fim de poder tratar dessas questões, inicialmente é necessário que sejam apresentados os dispositivos que irão dotar esses robôs de diferentes capacidades de atuação (motores atuadores) e de percepção (sensores), assim como é necessário que sejam discutidas as questões relativas ao software de controle que foi responsável pelo processamento das informações percebidas e pela geração de comandos de ação.

2.1 Todas as categorias da robótica móvel

Os robôs móveis têm sido objeto de extenso estudo e pesquisa em várias áreas, como robótica, engenharia mecânica, inteligência artificial e ciência da computação. A literatura acadêmica sobre robôs móveis abrange uma ampla gama de tópicos, desde o projeto e controle de robôs até a aplicação de técnicas avançadas de navegação e percepção. Aqui está uma revisão bibliográfica resumida sobre alguns dos aspectos-chave relacionados aos robôs móveis:

2.1.1 Modelo omnidirecional (Rodas Mecanum)

Os robôs omnidirecionais possuem a habilidade de se mover em qualquer direção de um plano 2D, independente de sua orientação. A rotação das rodas é realizada sobre seu eixo principal, mas podem mover-se com pouco atrito em todas as direções, devido à sua forma e devido aos pequenos roletes que constituem a roda maior (Indiveri, 2009).

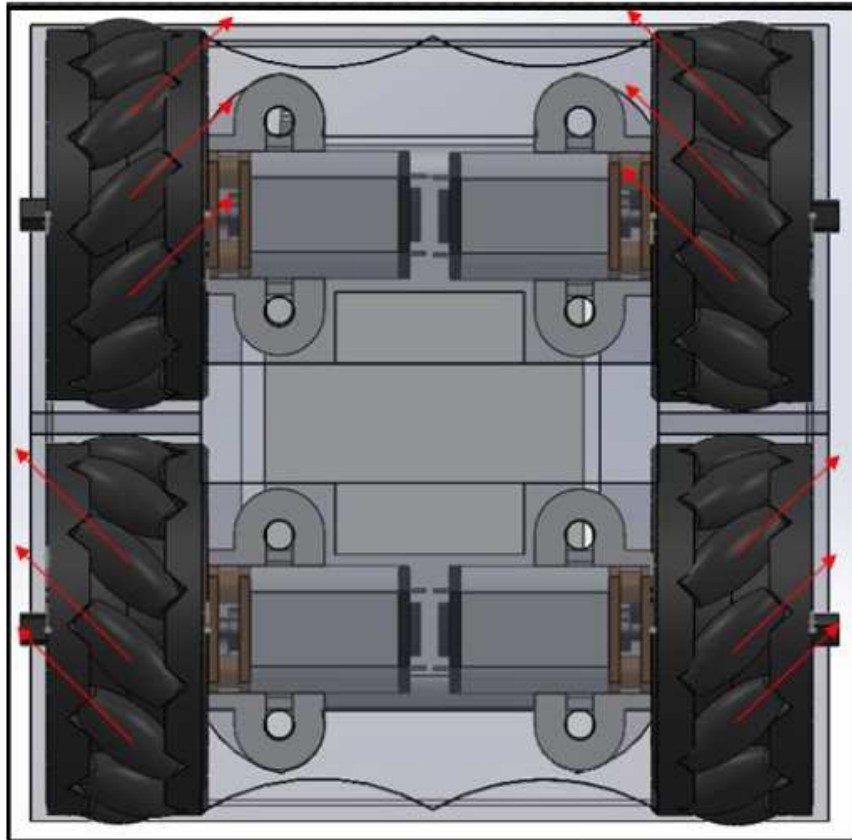
A mobilidade possibilitada pelas rodas modificadas permite que um robô omnidirecional atue de forma mais rápida e precisa do que um robô comum, uma vez que exige menos movimentos e deslocamentos para alcançar a posição desejada.

Os veículos omnidirecionais têm grandes vantagens em relação às plataformas convencionais (não-holonômicas), eles podem seguir trajetórias complexas em pequenos espaços, podendo se movimentar lateralmente ou em diagonal, um descolamento em linhas retas. Em contraste, os robôs não-holonômicos podem andar em algumas direções, mas possuem a limitação de necessitarem realizar algumas curvas para alcançar um mesmo ponto.

A configuração do robô consiste em quatro rodas localizadas de forma semelhante à de um automóvel. Estas rodas devem estar dispostas em um formato específico, como mostra a

Figura 2.

Figura 2 – Disposição das rodas no robô omnidirecional



Fonte: Adaptada de (Silva, 2003)

As forças devidas à direção e velocidade de cada uma das quatro rodas podem ser somadas em um vetor de força total, este vetor final permite a translação do veículo em qualquer direção e a partir de diversas combinações de direção e velocidade de cada roda é possível criar várias configurações de movimentação, como podemos observar na Figura 3.

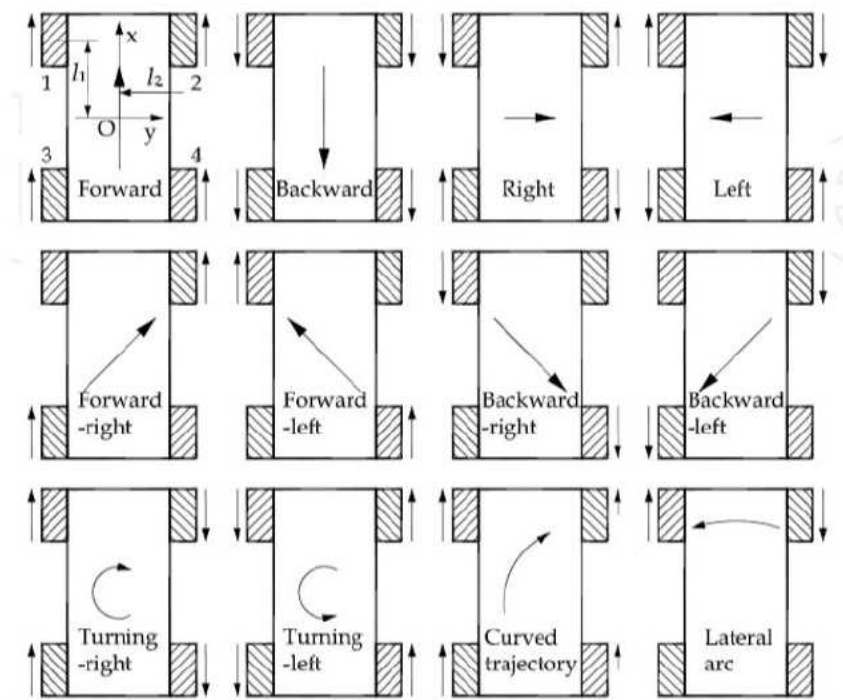
O robô é capaz de se movimentar em qualquer direção, para a frente ou para trás, mas também lateralmente para a esquerda/direita e girando no local, graças às suas rodas especiais,

“dependendo da direção e velocidade individual de cada roda, a combinação resultante de todas essas forças produz um vetor de força total em qualquer direção desejada, permitindo que a plataforma se mova livremente na direção do vetor de força resultante, sem alterar as próprias rodas” Doroftei *et al.* (2007).

2.1.2 Modelo unicycle

O robô tipo unicycle é, em geral, o eleito por pesquisadores para experimentar novas estratégias de controle por possuir uma cinemática simples. É uma estrutura formada por duas

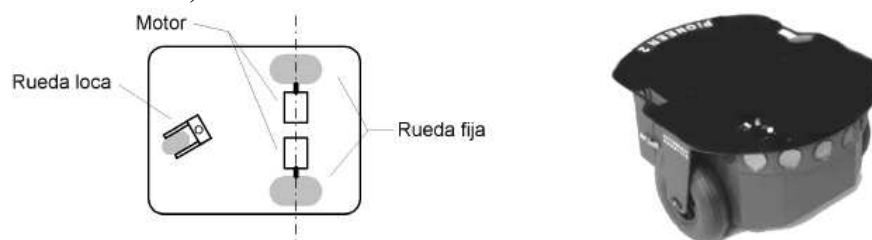
Figura 3 – Diagrama de movimentos de um robô omnidirecional com rodas mecanum



Fonte: (Doroftei *et al.*, 2007)

rodas fixas convencionais, sobre um mesmo eixo, controladas de maneira independente, e por uma roda louca que lhe confere estabilidade, como podemos observar na Figura 4.

Figura 4 – Modelo Uniciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Pioneer (Adept MobileRobots).



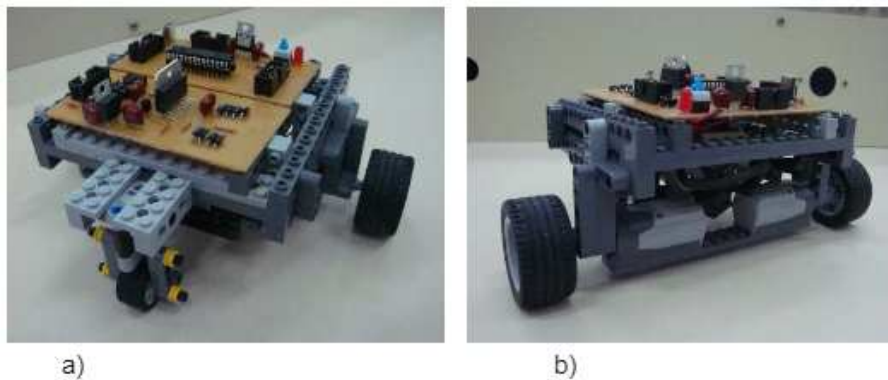
Fonte: (Sechhi, 2008)

O sistema de tração-direção associado ao robô lhe permite controlar de forma independente suas velocidades linear e angular. As vantagens que derivam de sua estrutura mecânica e da eletrônica de controle fazem desta configuração a preferida para robôs de laboratório.

2.1.3 Modelo diferencial

O sistema de direção diferencial é um dos mais simples para um robô autônomo terrestre. Ele consiste basicamente em duas rodas montadas num eixo comum e controladas por motores independentes. Para que o robô gire em torno do Centro Instantâneo de Rotação (CIR) que está na direção do eixo comum às duas rodas, é necessário variar a velocidade relativa entre as duas rodas. O ponto de giro pode ser alterado, fazendo com que o robô possa realizar trajetórias diferentes. Em cada instante, o ponto de giro do robô tem a propriedade de que as rodas direita e esquerda seguem caminhos que se movem em torno do CIR à mesma velocidade angular (Dudek; Jenkin, 2010).

Figura 5 – Modelo Diferencial. a) Vista frontal do robô diferencial , b) Vista da parte de trás do robô diferencial.



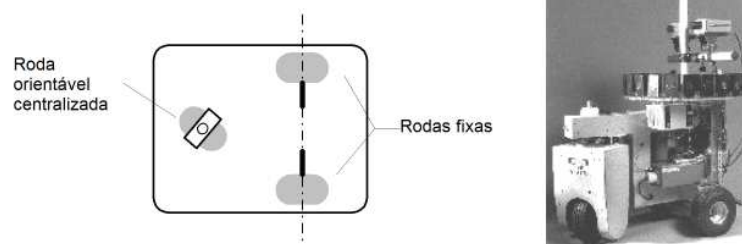
Fonte: (Stefano R. Zeplin, 2012)

2.1.4 Modelo triciclo

O robô triciclo é formado por duas rodas convencionais fixadas sobre um mesmo eixo e por uma roda convencional centralizada orientável que concentra as funções de tração e direção Figura 6.

Assim como no caso anterior, a estrutura mecânica e a eletrônica de controle são simples. Por isso, seu tratamento cinemático é de interesse em áreas específicas de controle de robôs móveis. Em relação a aplicações industriais, esta configuração é apta para transporte de cargas pesadas em baixa velocidade.

Figura 6 – Modelo Triciclo. (a) Estrutura. (b) Robô Meptune (Universidade Carnegie Mellon).

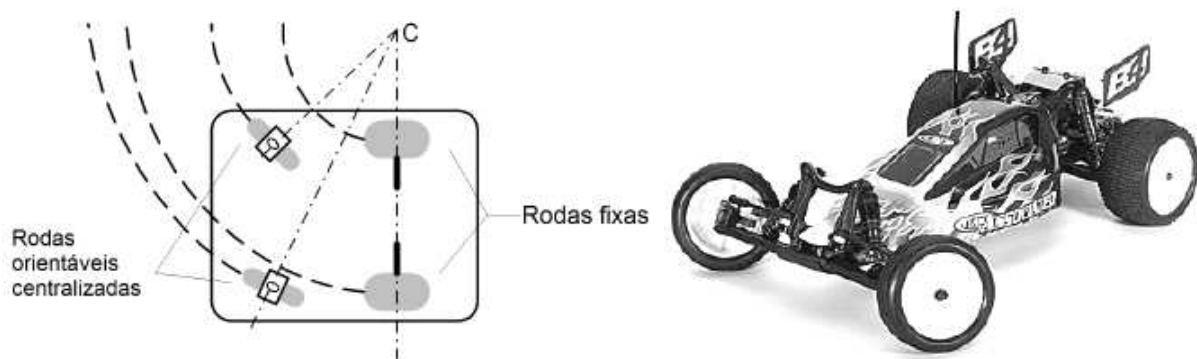


Fonte: (Sechhi, 2008)

2.1.5 Modelo quadriciclo

Um problema associado com a configuração tipo triciclo é que, quando em movimento, o centro de gravidade do veículo se posiciona, em alguns casos, nos limites da superfície de equilíbrio definida pelas três rodas. Tal fato pode produzir perda momentânea de tração e é fonte de erro no momento de se estimar a posição do robô. Uma solução para este problema está presente no sistema de direção Ackerman. Como se observa na Figura 7, os eixos das duas rodas frontais se interceptam em um ponto C que pertence ao eixo comum das rodas traseiras. O lugar geométrico dos pontos no plano traçados por cada roda ao redor de C forma um conjunto de arcos concêntricos, sendo todos os vetores de velocidade instantânea tangentes a tais arcos. Esta estrutura, além de prover maior estabilidade, evita o deslizamento nas rodas e, portanto, reduz erros de odometria.

Figura 7 – Modelo Quadriciclo. Sistema de direção Ackerman.



Fonte: (Sechhi, 2008)

Apesar de sua cinemática, estrutura mecânica e eletrônica não serem tão simples, esta configuração é de grande interesse para os amantes de robôs off-road, sendo os principais desenvolvimentos produzidos nas áreas de informação sensorial e seu posterior tratamento para

se conseguir reconstruir o ambiente e para realização de controle em tempo real.

2.2 Sensores e Atuadores

Sensores, atuadores e o sistema de controle encarregado de coordenar e operar esses componentes são apenas algumas das partes que compõem os robôs móveis. Uma vez que cada robô é definido pelos componentes montados a bordo, que determinam as suas capacidades e funções, o estudo destes componentes é crucial. As características e qualidades de cada um destes componentes são objecto de várias obras literárias. Em seguida, foram abordados os princípios fundamentais e mais gerais relativos aos sensores e atuadores primários.

Os robôs móveis mecanum (*omnidireccionais*) são equipados com uma variedade de sensores e atuadores para auxiliar na percepção do ambiente e na execução de tarefas. Aqui estão alguns exemplos comuns de sensores e atuadores usados em robôs móveis mecanum:

2.2.1 Sensores

De acordo com a afirmação de Romero *et al.* (2014, p. 13) sobre sensores:

Para que consiga atuar de forma satisfatória, um robô precisa de dispositivos que lhe permitam extrair informações sobre si mesmo e sobre o ambiente à sua volta. Esses dispositivos são chamados de sensores, e possibilitam que o robô estime seu deslocamento e a posição relativa dos objetos presentes no ambiente. Eles também auxiliam o robô a identificar e reconhecer a presença de pessoas, reconhecer comandos gestuais ou vocais, emoções. Sensores são também chamados de transdutores porque transformam a energia associada com uma dada medida em outra forma de energia. Basicamente, um sensor recebe energia (som, pressão, luz) e a transforma em um sinal analógico ou digital que pode ser usado pelo robô.

2.2.1.1 Sensores infravermelhos:

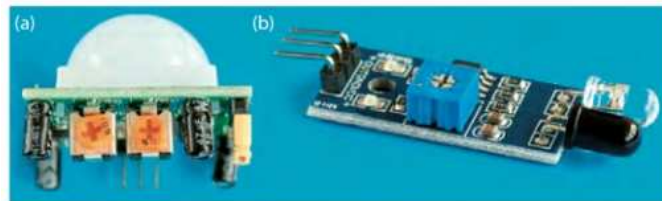
Os comprimentos de onda mais longos da radiação infravermelha tornam-na invisível ao olho humano. Os sensores de infravermelhos podem detectar a radiação infravermelha de forma passiva ou ativa. O único componente de um sensor passivo é um detector de infravermelhos. Este pode distinguir entre itens de várias temperaturas, como uma pessoa entrar na propriedade de alguém, detectando a radiação que os objectos liberam. Um emissor de infravermelhos e um detector de infravermelhos constituem um sensor ativo. Como se observa na Figura 8, qualquer objeto pode refletir a radiação emitida por um sensor ativo, que é depois captada pelo detector. Os sensores ativos são úteis para determinar a presença de obstáculos, por

exemplo, quando um objeto passa entre o emissor e o receptor.

Junior *et al.* (2019, p. 113) fala sobre uma aplicação do sensor de infravermelho:

Uma aplicação desse tipo de sensor muito utilizada com o Arduino é em encoders de motores. Nesse caso, o motor possui um disco com várias “janelas”; de um lado está o emissor e do outro está o receptor. Quando o disco gira com o eixo do motor, existe a indicação de passagem da radiação ou não. Com esse tipo de sinal podemos calcular precisamente a velocidade de rotação do motor, estimar a posição relativa.

Figura 8 – Sensores infravermelhos.



Fonte: (Junior *et al.*, 2019)

2.2.1.2 Acelerômetros

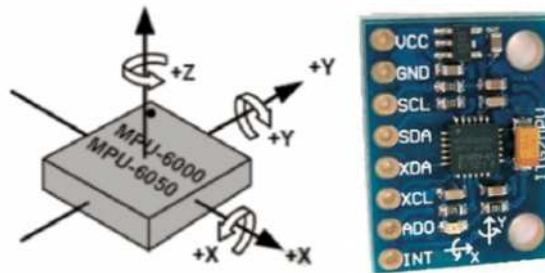
Com a afirmação de Junior *et al.* (2019) que fala sobre o sensor de acelerômetro e como se observa na Figura 9:

Os acelerômetros medem forças de aceleração. Essas forças podem ser estáticas, como a força de gravidade constante, ou dinâmicas, como aquelas causadas pelo movimento do dispositivo. Há mais de uma maneira de construir um acelerômetro, mas todas incluem estruturas micro mecânicas que se movem sob força e, assim, causam uma alteração nas propriedades elétricas do dispositivo. Muitos acelerômetros vêm com um minúsculo cristal piezoelétrico em seu interior, que, quando estressado por movimentos súbitos, produzirá uma tensão mensurável. Outros vêm com estruturas em miniatura que coletivamente carregam uma capacitância, que muda conforme uma dessas estruturas se move em relação a outra. Geralmente, a maioria dos acelerômetros mede forças ao longo de três eixos (X, Y e Z) e pode variar em sensibilidade e oscilações máximas. A conexão do acelerômetro pode ser feita nas entradas analógicas do Arduino; alguns modelos fazem a transferência dos dados por meio de comunicação serial.

2.2.1.3 Microfone

O sensor de microfone disponível para uso no Arduino apenas detecta a intensidade sonora do ruído ao qual é exposto como se observa na Figura 10. Nesse tipo de aplicação o sensor não consegue identificar palavras ou frequências específicas (por exemplo, um apito ou uma música), devido às características de processamento do Arduino e pelo próprio princípio de

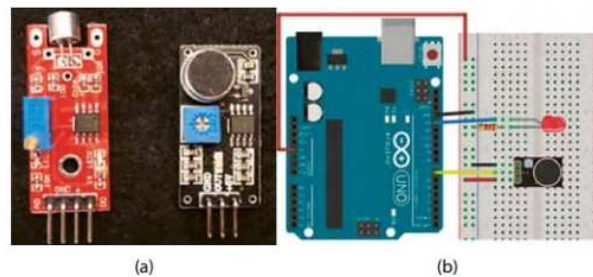
Figura 9 – Acelerômetro.



Fonte: (Junior *et al.*, 2019)

funcionamento do sensor. Ele tem uma saída analógica, que indica o nível de pressão sonora, e um potenciômetro, para ajuste da sensibilidade.

Figura 10 – a) Microfone b) Exemplo de ligação.



Fonte: (Junior *et al.*, 2019)

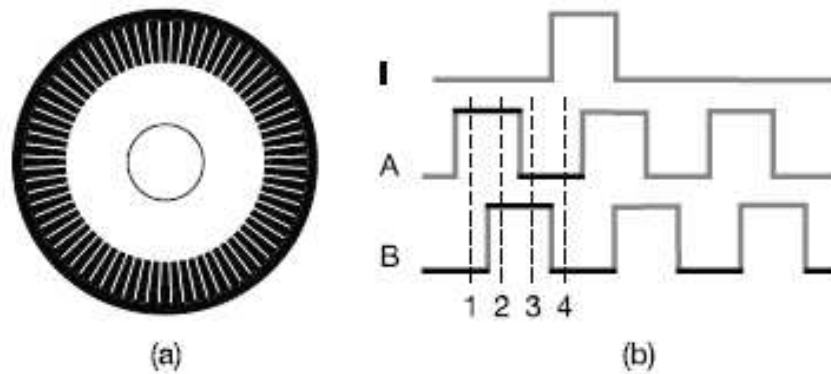
2.2.1.4 Odômetro Ótico

Com base no estudo do Romero *et al.* (2014). Os odômetros óticos são muito populares em robótica móvel. Eles são sensores proprioceptivos e servem para controlar a posição e a velocidade das rodas do robô, fornecendo uma estimativa da distância relativa navegada. Quando o robô usa apenas essa estimativa para determinar sua posição no ambiente, dizemos que ele está usando o reconhecimento passivo (dead reckoning). Dead reckoning é derivado do termo deduced reckoning, usado na aviação, que consiste em determinar a posição da aeronave, usando uma bússola, a velocidade e o tempo de deslocamento. A distância estimada por esse tipo de sensor é relativamente precisa a curtos deslocamentos, porém, como discutido adiante, ela pode ser comprometida por inúmeras fontes de erros, como derrapagens, modelagem errada do robô etc.

Um odômetro ótico é composto por componentes como fotoemissor, fotorreceptor e um disco com um padrão específico que é anexado ao eixo do robô. A luz emitida pelo fotoemissor é periodicamente interrompida pelo padrão do disco. Como se observa na Figura 11,

a partir do movimento do disco, a quantidade de luz que incide no fotodetector varia, resultando em uma onda senoidal que é transformada em uma onda quadrada. Essa onda está associada à revolução do eixo e serve para medir o deslocamento do robô.

Figura 11 – b) Exemplo de sinal gerado por odômetro, a) usando um disco com padrão opaco/transparente .



Fonte: (Romero *et al.*, 2014)

2.2.1.5 Câmeras

As câmeras são utilizadas para calcular a distância/profundidade usando perspectiva e algumas suposições sobre a estrutura do ambiente onde está localizado o robô móvel assim como se observa na Figura 12..

De acordo com Romero *et al.* (2014). As câmeras, através de seus sensores, capturam determinados comprimentos de onda da luz incidente na lente da câmera. A luz capturada é convertida e armazenada de forma digital, podendo representar apenas a luminosidade, no caso das imagens em preto e branco, ou ser representada pelas componentes básicas que formam uma determinada cor. As imagens coloridas são usualmente representadas pela intensidade dos seus componentes (que representam uma determinada faixa de comprimentos de onda), em que o modelo mais adotado é o RGB (componentes Red-Green-Blue). Entretanto, podemos também adotar representações de outros espaços de cores, como por exemplo o HSV ou YUV, que também são usados no processamento digital de imagens em aplicações de robótica.

2.2.1.6 Sensores de Posição, Orientação e Movimentação

Os sensores de detecção de presença e estimativa da distância de obstáculos são muito importantes para a navegação, tendo um papel fundamental no desvio dos obstáculos e na detecção de marcos do ambiente usados para a localização. Por outro lado, a tarefa de se autolocalizar não é uma tarefa simples, sendo também importante a determinação da pose do

Figura 12 – Sensor Kinect: Câmera do tipo RGB-D.



Fonte: (Romero *et al.*, 2014)

robô, ou seja, sua posição e orientação espacial: pose 2D no plano, ou pose 3D quando são determinadas sua posição X, Y, Z e sua orientação em relação aos três eixos (Romero *et al.*, 2014).

Através do uso de odômetros é possível estimar as distâncias percorridas e a pose do robô quando sua pose inicial é conhecida. Entretanto, o uso de odometria (sensor incremental) está sujeito a erros, e principalmente sujeito a um erro cumulativo. Em função disso, outros sensores podem ser usados, como por exemplo a bússola (sensor absoluto), que permite obter a orientação do robô sem no entanto estar sujeita a um erro cumulativo. O GPS (*Global Positioning System*) também é um sensor absoluto, que, apesar de possuir um erro local (estimativa aproximada da posição), permite estimar com uma certa precisão a localização do robô (latitude, longitude e altitude), não sofrendo do problema de acúmulo do erro com o deslocamento do robô. O GPS usualmente informa apenas a localização, em que a orientação é estimada, ou pela variação da posição do robô, ou através da integração desse tipo de dispositivo ao uso de um magnetômetro digital (bússola). O GPS é usado em ambientes externos, pois determina a localização através da triangulação de sinais de satélites, e a recepção desse tipo de sinais se torna inviável em ambientes fechados, ou mesmo dentro de túneis ou em áreas com cobertura vegetal muito densa.

Por fim, um outro tipo de sensor de movimentação/orientação é fornecido por acelerômetros e giroscópios. Esse tipo de dispositivo é similar aos odômetros, pois é necessário acompanhar a movimentação do dispositivo de modo a integrar a informação de deslocamento/giro e assim obter uma estimativa da pose final. Assim, esses dispositivos são considerados sensores incrementais, e o erro da estimativa é portanto cumulativo. Atualmente encontramos no mercado dispositivos integrados, as IMUs (*Inertial Measurement Units*), que usualmente

integram os dados de mais de um tipo de sensor (GPS, bússola, acelerômetro e giroscópio), através da fusão de sensores, visando assim prover uma informação mais confiável da pose do robô (localização e orientação 3D).

2.2.2 Atuadores

De acordo com Romero *et al.* (2014) fala sobre atuadores:

Os robôs inteligentes devem, além de poder perceber o ambiente, atuar sobre esse ambiente, ou seja, devem poder se deslocar, manipular e interagir de algum modo com os elementos presentes no ambiente em que estão inseridos. Para que isso seja possível, os robôs devem ser dotados de mecanismos de atuação (motores) capazes de produzir as ações requeridas pelo robô a fim de executar uma determinada tarefa.

Os atuadores na robótica podem se classificados de diferentes formas, como por exemplo:

2.2.2.1 Tipos de motores

Motores de corrente contínua (*DC motors*), motores de passo (*stepper motors*), motores tipo servo (servo). Cada um desses tipos de motores irá requerer uma forma específica de controle, que, conforme o tipo, pode ser: da posição angular, da velocidade, do sentido de rotação, e mesmo do tamanho do passo. O tipo de motor também deve levar em consideração o seu modo de operação, como indicado no item seguinte;

2.2.2.2 Modo de operação/controle do motor

Malha aberta (atuação e posicionamento sem um *feedback*), malha fechada (garante uma adequada atuação e posicionamento), em que o motor possui sensores (angulares e de giro, como, por exemplo, um encoder), permitindo assim que ele atue de forma a alcançar um determinado ponto-alvo (set point);

2.2.2.3 Tipos de atuações

Atuadores de manipulação (braços robóticos, garras ou mãos), atuadores de locomoção (atuação sobre rodas, esteiras, hélices etc.), atuadores específicos (bases giratórias tipo pan-tilt, atuadores lineares, sistemas de disparo e chute etc.);

2.2.2.4 Tipos de locomoção

Atuadores de manipulação (braços robóticos, garras ou mãos), atuadores de locomoção (atuação sobre rodas, esteiras, hélices etc.), atuadores específicos (bases giratórias tipo pan-tilt, atuadores lineares, sistemas de disparo e chute etc.);

2.3 Cinemática de Robô móvel

Como o conceito de movimento é ubíquo na área da robótica móvel, é importante definir o termo “cinemática”.

De acordo com Craig (2005):

A cinemática é a ciência que trata do movimento, sem considerar as forças que causam. Dentro da cinemática, se estudam a posição, velocidade, aceleração e todas as derivadas de maior ordem das variáveis de posição (em relação ao tempo ou a qualquer outra variável).

e com García (2009):

[...] Existem duas abordagens dentro da cinemática, chamadas de cinemática direta e cinemática inversa. O problema da cinemática direta consiste em calcular a posição e orientação do veículo em relação a um sistema de coordenadas fixo, que sem perda de generalidade é a origem do plano XY . [...] em robótica móvel cinemática direta pode ser visto como uma transformação que mapeia pares de trajetórias de velocidade [...] do veículo em trajetórias percorridas pelo veículo no espaço cartesiano, [...]

[...]

Além disso, dada uma trajetória nominal ou desejada [...], pode-se dizer que o problema da cinemática inversa é encontrar um perfil de velocidade [...] que gera a posição e a orientação desejada do veículo, [...]

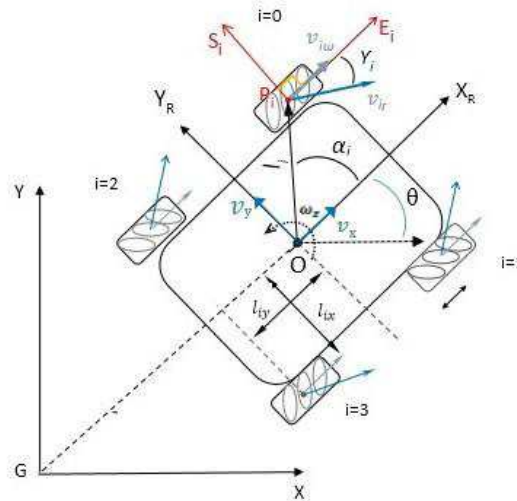
Como podemos observar na Figura 13 que mostra a configuração de um robô com quatro rodas omnidirecionais.

Com isso podemos mostrar uma cinemática de um robô móvel de quatro rodas mecanum (omnidirecionais) genérico.

Os parâmetros de configuração e as velocidades do sistema são definidos da seguinte forma:

- x, y, θ : posição do robô (x, y) e o seu ângulo de orientação θ (o ângulo entre X e X_R);
- $X_G Y$: quadro de inércia; x, y são as coordenadas do ponto de referência O na base de inércia;

Figura 13 – Configuração das rodas e definição da postura



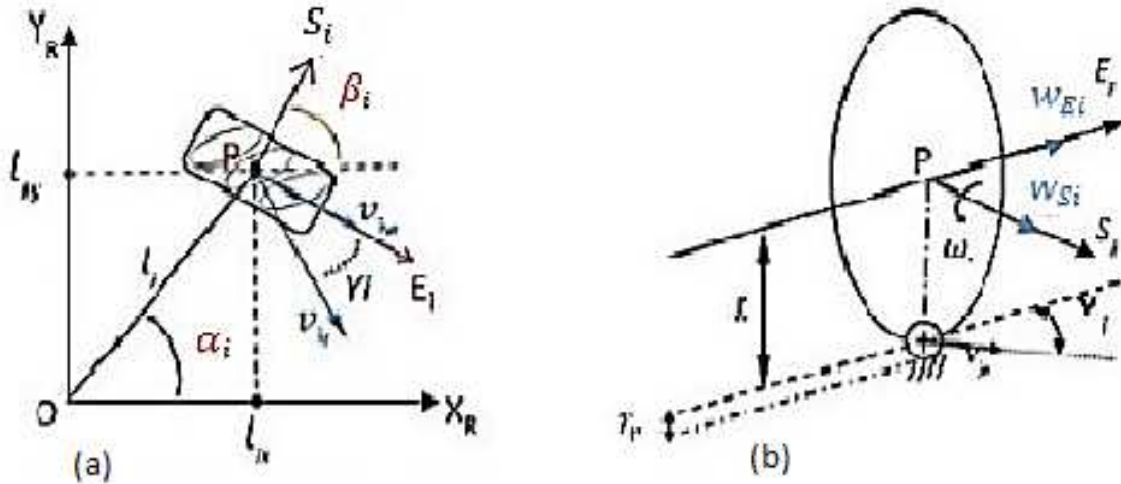
Fonte: (Taheri *et al.*, 2015)

- $X_R O Y_R$: quadro de base do robô; sistema de coordenadas cartesianas associado ao movimento do centro do corpo;
- $S_i P_i E_i$: sistema de coordenadas da i -ésima roda no ponto central da roda P_i ;
- O, P_i : a base inercial do robô na estrutura do robô e $P_i = \{X_{P_i}, Y_{P_i}\}$ o centro do eixo de rotação da roda i ;
- $\overrightarrow{OP_i}$: vetor que indica a distância entre o centro do robô e o centro da roda i ;
- l_{ix}, l_{iy} : l_{ix} , metade da distância entre as rodas dianteiras e l_{iy} , metade da distância entre a roda dianteira e as rodas traseiras;
- l_i : distância entre as rodas e a base (centro do robô O);
- r_i : raio da roda i (distância do centro da roda ao centro do rolo);
- r_r : raio dos rolos das rodas;
- α_i : ângulo entre OP_i e X_R ;
- β_i : ângulo entre S_i e X_R ;
- γ_i : ângulo entre v_{ir} e E_i ;
- ω_i [rad/s]: velocidade angular das rodas;
- $v_{i\omega}$ [m/s], $i \in \{0, 1, 2, 3\}$: vetor velocidade correspondente às rotações da roda;
- v_{ir} : velocidade do rolo passivo na roda i ;
- $[w_{S_i} w_{E_i} \omega_i]^T$: velocidade generalizada do ponto P_i no referencial $S_i P_i E_i$;
- $[v_{S_i} v_{E_i} \omega_i]^T$: velocidade generalizada do ponto P_i no referencial $X_R O Y_R$;
- v_x, v_y [m/s]: velocidade linear do robô;

- ω_z [rad/s]: velocidade angular do robô;

De acordo com a Figura 14 podemos ver a coordenada da roda do robô e o princípio do movimento da roda.

Figura 14 – (a) roda i na coordenada do robô, (b) princípio de movimento da roda i



Fonte: Adaptada de (Taheri *et al.*, 2015)

2.3.1 Cinemática Direta e Inversa Genérica

Nessa sessão abordaremos o conceito de cinemática direta e inversa genérica do robô movel de quatro rodas mecanum. De acordo com a Figura 14(b), podemos calcular a velocidade da roda i e a velocidade tangencial do rolo livre ligado à roda que toca no chão:

$$v_{i_r} = \frac{1}{\cos 45} r_r \omega_i, \quad W_{E_i} = r_i \omega_i \quad [4], \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (2.1)$$

De acordo com a Figura 14(b) e considerando a equação 2.1, a velocidade da roda i no quadro $S_i P_i E_i$ pode ser derivada por:

$$v_{S_i} = v_{i_r} \sin \gamma_i, \quad v_{E_i} = \omega_i r_i + v_{i_r} \cos \gamma_i.$$

$$\begin{bmatrix} v_{S_i} \\ v_{E_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \gamma_i \\ r_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix} = {}^{w_i}T_{P_i} \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

A matriz de transformação das velocidades da i -ésima roda para o seu centro é:

$$w_{iT_{P_i}} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \gamma_i \\ r_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

De acordo com a Figura 14(a) e a Figura 13, a velocidade do centro da roda translada para o sistema de coordenadas $X_R O Y_R$ pode ser obtida por:

$$\begin{bmatrix} v_{i,X_R} \\ v_{i,Y_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{S_i} \\ v_{E_i} \end{bmatrix} = P_{iT_R} \begin{bmatrix} v_{S_i} \\ v_{E_i} \end{bmatrix} = w_{iT_{P_i}} P_{iT_R} \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Em seguida, a matriz de transformação do centro da i -ésima roda para o sistema de coordenadas do robô é:

$$P_{iT_R} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Como o movimento do robô é planar, temos também:

$$\begin{bmatrix} v_{i,X_R} \\ v_{i,Y_R} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_{iy} \\ 0 & 1 & -l_{ix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} v_{X_R} \\ v_{Y_R} \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Onde:

$$T' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_{iy} \\ 0 & 1 & -l_{ix} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

A partir das equações 2.3 e 2.5, o modelo cinemático inverso pode ser obtido:

$$w_{iT_{P_i}} P_{iT_R} \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} v_{X_R} \\ v_{Y_R} \\ \omega_R \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (2.8)$$

Assim, através da fusão das equações 2.4 e 2.6, a velocidade de base do robô (no ponto O) relacionada com a velocidade de rotação da i -ésima roda pode ser obtida pela equação 2.9:

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix} = w_{iT_{P_i}}^{-1} P_{iT_R}^{-1} T' \begin{bmatrix} v_{X_R} \\ v_{Y_R} \\ \omega_Z \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (2.9)$$

De acordo com as equações 2.3 e 2.4 existe uma relação entre variáveis nos quadros das rodas de cada robô e o seu centro. E com a cinemática inversa, a velocidade do sistema pode ser obtida implementando v_{i_r} (velocidade linear) e ω_i (velocidade de rotação da roda i -ésima) na equação 2.10 e o contrário na equação 2.11.

$$\begin{bmatrix} v_{X_R} \\ v_{Y_R} \\ \omega_Z \end{bmatrix} = T^+ \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ v_{i_r} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_{X_R} \\ v_{Y_R} \\ \omega_R \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Onde

$$T = w_{iT_{P_i}}^{-1} P_{iT_R}^{-1} T', \quad T^+ = (T^T T)^{-1} T^T.$$

Além disso, pode-se explicitar T como:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & \sin \gamma_i \\ r_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_{i_y} \\ 0 & 1 & -l_{i_x} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Considerando o fato de $l_{i_x} = l_i \cos \alpha_i$ e $l_{i_y} = l_i \sin \alpha_i$, assumimos que todas as rodas são do mesmo tamanho, e a matriz de transformação pode ser escrita como:

$$T = \frac{1}{-r} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\beta_i - \gamma_i)}{\sin(\gamma_i)} & \frac{\sin(\beta_i - \gamma_i)}{\sin(\gamma_i)} & \frac{l_i \sin(-\alpha_i + \beta_i - \gamma_i)}{\sin(\gamma_i)} \\ \frac{r \cos(\beta_i)}{\sin(\gamma_i)} & \frac{r \sin(\beta_i)}{\sin(\gamma_i)} & \frac{l_i \sin(-\alpha_i + \beta_i) r}{\sin(\gamma_i)} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

A pseudoinversa T^+ pode ser escrita como (Taheri *et al.*, 2015):

$$T^+ = \frac{1}{lr^2+1} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(lr^2 \sin(\beta_i) - lr^2 \sin(-\beta_i + 2\alpha_i) + 2 \sin(\beta_i))r & \frac{1}{2}lr^2 \sin(\gamma_i - \beta_i + 2\alpha_i) - \frac{1}{2} \sin(\gamma_i - \beta_i)lr^2 - \sin(\gamma_i - \beta_i) \\ \frac{1}{2}r(lr^2 \cos(\beta_i) - lr^2 \cos(-\beta_i + 2\alpha_i) + 2 \sin(\beta_i)) & -\frac{1}{2}lr^2 \cos(\gamma_i - \beta_i + 2\alpha_i) + \frac{1}{2} \cos(-\gamma_i + \beta_i)lr^2 - \cos(-\gamma_i + \beta_i) \\ \cos(\alpha_1 - \beta_i)l_i r & \cos(\alpha_1 - \beta_i + \gamma_i)l_i r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Como existe uma relação entre as variáveis independentes v_{i_r} e ω_i em cada junta e as velocidades angular e linear do sistema, assumindo que não há deslizamento da roda no solo, a cinemática inversa do sistema pode ser obtida pela equação 2.15:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{-1}{r} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\beta_1 - \gamma_1)}{\sin(\gamma_1)} & \frac{\sin(\beta_1 - \gamma_1)}{\sin(\gamma_1)} & \frac{l_1 \sin(\beta_1 - \gamma_1 - \alpha_1)}{\sin(\gamma_1)} \\ \frac{\cos(\beta_2 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_2)} & \frac{\sin(\beta_2 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_2)} & \frac{l_2 \sin(\beta_2 - \gamma_2 - \alpha_2)}{\sin(\gamma_2)} \\ \frac{\cos(\beta_3 - \gamma_3)}{\sin(\gamma_3)} & \frac{\sin(\beta_3 - \gamma_3)}{\sin(\gamma_3)} & \frac{l_3 \sin(\beta_3 - \gamma_3 - \alpha_3)}{\sin(\gamma_3)} \\ \frac{\cos(\beta_4 - \gamma_4)}{\sin(\gamma_4)} & \frac{\sin(\beta_4 - \gamma_4)}{\sin(\gamma_4)} & \frac{l_4 \sin(\beta_4 - \gamma_4 - \alpha_4)}{\sin(\gamma_4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

A equação 2.16 é referente à matriz Jacobiana para a cinemática inversa do sistema:

$$T = \frac{-1}{r} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\beta_1 - \gamma_1)}{\sin(\gamma_1)} & \frac{\sin(\beta_1 - \gamma_1)}{\sin(\gamma_1)} & \frac{l_1 \sin(\beta_1 - \gamma_1 - \alpha_1)}{\sin(\gamma_1)} \\ \frac{\cos(\beta_2 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_2)} & \frac{\sin(\beta_2 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_2)} & \frac{l_2 \sin(\beta_2 - \gamma_2 - \alpha_2)}{\sin(\gamma_2)} \\ \frac{\cos(\beta_3 - \gamma_3)}{\sin(\gamma_3)} & \frac{\sin(\beta_3 - \gamma_3)}{\sin(\gamma_3)} & \frac{l_3 \sin(\beta_3 - \gamma_3 - \alpha_3)}{\sin(\gamma_3)} \\ \frac{\cos(\beta_4 - \gamma_4)}{\sin(\gamma_4)} & \frac{\sin(\beta_4 - \gamma_4)}{\sin(\gamma_4)} & \frac{l_4 \sin(\beta_4 - \gamma_4 - \alpha_4)}{\sin(\gamma_4)} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

E para a cinemática direta, de acordo com a equação 2.10, temos:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = T^+ \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Contudo, concluímos a cinemática direta e inversa do robô móvel de quatro rodas mecanum (omnidirecional) (Taheri *et al.*, 2015).

2.4 Simulação de robôs no MatLab

MATLAB, também conhecido como *Matrix Laboratory*, é um *software* interativo de alto desempenho destinado ao cálculo numérico. Ao contrário da programação tradicional, o MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente simples de usar, onde as soluções e os problemas são apresentados apenas matematicamente (Lages, 1999; Miranda *et al.*, 2007).

Os comandos do MATLAB são muito semelhantes à maneira como escrevemos expressões algébricas, o que os torna mais fáceis de usar. Podem ser incorporados a pacotes de cálculos específicos ou rotinas pré-definidas (Lages, 1999).

De acordo com Miranda *et al.* (2007) sobre as vantagens do MATLAB:

A grande vantagem que o MATLAB possui em relação à outras linguagens como, por exemplo, o C e o Fortran consiste no fato de que no MATLAB as informações são facilmente armazenáveis em matrizes o que proporciona uma fácil e rápida manipulação de uma grande quantidade de informações. Além disso, o MATLAB possui uma grande quantidade de bibliotecas auxiliares ("Toolboxes") que otimizam o tempo gasto para realizar tarefas, uma vez que, o usuário poderá utilizar muitas funções já definidas, poupando o tempo de criá-las.

O programa tem várias extensões, conhecidas (*toolboxes ou blocksets*). O MATLAB usa o Simulink, um ambiente de simulação baseado em diagrama de blocos, além de muitos outros módulos. Além disso, com o passar dos anos foram criadas novas toolboxes para várias áreas. Caso a sua máquina não suporte o aplicativo do MATLAB, o mesmo também está disponível para web sem precisar de instalação na sua própria máquina.

2.4.1 Mobile Robotic Simulation - MRS

A *Mobile Robotics Simulation Toolbox* é uma ferramenta de simulação de robôs móveis desenvolvida pela *MathWorks*. Ela fornece utilitários para simulação de robôs e desenvolvimento de algoritmos, incluindo modelos cinemáticos 2D para geometrias de robôs, com acionamento diferencial, veículos com três e quatro rodas, incluindo cinemática direta e inversa. Além disso, ela também possui simuladores configuráveis de lidar, objetos e detectores de robôs, visualização de veículos robóticos e sensores em mapas de ocupação, exemplos e documentação do MATLAB e *Simulink* (MathWorks, 2023a).

A toolbox baseia-se em um método geral de representação da cinemática e da dinâmica dos manipuladores de ligação em série através de "matrizes de descrição". Estas

compreendem os parâmetros de Denavit e Hartenberg do robô e podem ser criadas pelo usuário para qualquer manipulador de ligação em série. A toolbox fornece vários exemplos para robôs bem conhecidos, como o Puma 560 e o braço Stanford. A descrição do manipulador pode ser elaborada aumentando a matriz para incluir parâmetros de inércia do elo, do motor e de fricção (Karakaya *et al.*, 2017).

2.4.2 *Mobile Robotics Training Toolbox (MRT)*

A *Mobile Robotics Training Toolbox (MRT)*, desenvolvida pela equipa de competições estudantis da MathWorks, reúne o *Simulation Map Generator* e uma biblioteca de blocos voltados ao ensino e treinamento em robótica móvel. Essa biblioteca inclui blocos para simulação de sistemas robóticos em malha fechada, como codificadores, sensores de linha, sensores ultrassônicos e um simulador de robô que auxilia na visualização da cinemática, especialmente em plataformas de acionamento diferencial. Ao oferecer um conjunto integrado de ferramentas para criação de mapas, simulação de sensores e análise da cinemática do robô, a MRT foi projetada com foco didático, apoiando o aprendizado e a validação conceitual em robótica móvel por meio de exemplos práticos, documentação e lições em vídeo (MathWorks, 2023b).

O *Simulation Map Generator (SMG)*, atualmente integrado e também referido como parte da *Mobile Robotics Training Toolbox (MRT)*, é uma aplicação do MATLAB destinada à criação e geração de mapas de simulação para aplicações de robótica móvel. Essa ferramenta permite aos utilizadores importar mapas formatados, esboços ou imagens de percursos e ambientes, possibilitando a definição de cenários utilizados em tarefas como seguimento de linhas, detecção de obstáculos e navegação em ambientes estruturados. Os mapas gerados podem ser exportados e utilizados em conjunto com outras toolboxes do MATLAB, como a *Mobile Robotics Simulation Toolbox (MRS)*, facilitando a separação entre a modelagem do ambiente e a simulação do comportamento do robô (MathWorks, 2023b).

Com o objetivo de evitar ambiguidades conceituais, é importante distinguir claramente os papéis da *Mobile Robotics Simulation Toolbox (MRS)*, da *Mobile Robotics Training Toolbox (MRT)* e do *Simulation Map Generator (SMG)*. A MRS é utilizada principalmente para a simulação dinâmica e cinemática de robôs móveis, permitindo a execução de algoritmos de controle, navegação e planejamento de trajetórias em ambientes previamente definidos. Já a MRT, que engloba o SMG, tem como foco a criação e preparação dos ambientes de simulação, fornecendo ferramentas para geração, edição e exportação de mapas, bem como blocos didáticos

para a simulação de sensores e sistemas robóticos em malha fechada. O SMG, por sua vez, constitui-se como a aplicação responsável especificamente pela construção dos mapas de simulação, atuando como um componente funcional da MRT. Dessa forma, enquanto a MRT e o SMG concentram-se na modelagem do ambiente e no apoio ao aprendizado, a MRS é responsável pela análise do comportamento do robô nesses ambientes, estabelecendo um fluxo de trabalho modular e bem definido para o estudo da robótica móvel.

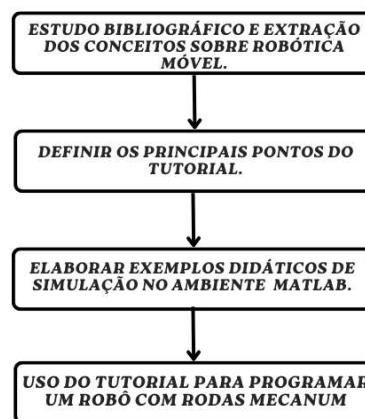
3 METODOLOGIA

Este estudo foi executado com formação teórica sobre o tema, iniciando com a revisão bibliográfica e uma análise inicial sobre o tema. Com base nisso foi feito um estudo sobre robótica móvel e sobre a cinemática do robô móvel *omnidirecional (Mecanum)*, e também um breve estudo sobre as *Toolboxes* MRS e SMG. Por fim, foi criado um tutorial sobre como utilizar as *Toolboxes*.

3.1 Visão Geral do Trabalho

Figura 15 – Visão geral do trabalho

Desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.1 Definir os principais pontos do tutorial..

Para a criação de um tutorial didático sobre o uso da Toolbox *Toolboxes* MRS e SMG no MATLAB, alguns pontos principais devem ser definidos para guiar o usuário de maneira clara e objetiva. Estes pontos são essenciais para que o usuário possa utilizar eficientemente as ferramentas oferecidas pelo MATLAB. A seguir, cada ponto foi descrito detalhadamente:

1. Registro no MATLAB: O primeiro passo para utilizar o MATLAB é realizar o registro. Esse processo envolve a criação de uma conta no site oficial da MathWorks, fornecendo

informações básicas como nome, e-mail e detalhes de filiação (Email institucional). O registro é necessário para obter acesso ao software MATLAB, suas atualizações e a documentação oficial, além de permitir o download e a instalação de toolboxes específicas.

2. **Login no MATLAB:** Após o registro, o usuário deve realizar o login. Isso pode ser feito diretamente no software ou através do site da MathWorks. Fazer login é crucial para sincronizar suas licenças, preferências e projetos, garantindo que todas as funcionalidades e toolboxes adquiridas estejam disponíveis para uso.
3. **Instalação de Toolboxes:** Com a conta configurada e o login efetuado, o próximo passo é a instalação das toolboxes necessárias para o projeto. Isso inclui a Toolboxes MRS e SMG, entre outras que possam ser relevantes. As toolboxes são pacotes de funções adicionais que expandem as capacidades do MATLAB, permitindo a execução de tarefas específicas como simulações de robótica móvel.
4. **Utilizando os simuladores:** Com as toolboxes instaladas, o usuário pode começar a utilizar os simuladores oferecidos pelo MATLAB. Este ponto do tutorial deve cobrir como iniciar uma simulação. Os simuladores são ferramentas fundamentais para testar e validar algoritmos de navegação e planejamento de trajetórias em um ambiente controlado, sem a necessidade de hardware real. Isso acelera o desenvolvimento e facilita o aprendizado.

Esses são os principais pontos que foram abordados de maneira detalhada no tutorial, com exemplos práticos e instruções passo a passo para garantir que os usuários possam seguir e compreender cada etapa do processo, desde o registro até a execução de simulações complexas. O objetivo é proporcionar um guia completo e acessível, que facilite o uso eficiente do MATLAB na área de robótica móvel.

3.1.2 Elaborar exemplos didáticos de simulação no ambiente Matlab.

Neste tutorial, vamos aprofundar nossa compreensão através de exemplos práticos de simulação no ambiente MATLAB, destacando a versatilidade das toolboxes MRS e SMG.

Demonstraremos como a toolbox MRS pode ser aplicada para simplificar o desenvolvimento de modelos robóticos, exploraremos como essa toolbox agiliza o processo de

simulação.

Abordaremos a utilização da toolbox SMG para a geração na criação de mapas. Exploraremos como essa toolbox é essencial para projetos que envolvem sistemas de navegação, reconhecimento de padrões ou outras aplicações relacionadas.

3.1.3 Uso do tutorial para programar um Robô com Rodas Mecanum

O tutorial desenvolvido neste trabalho foi utilizado como base para a programação e simulação de um robô móvel equipado com quatro rodas mecanum, permitindo a aplicação prática dos conceitos abordados ao longo do estudo. Por meio do material elaborado, foi possível orientar o usuário desde a configuração inicial do ambiente MATLAB até a implementação de comandos de movimento e definição de trajetórias para o robô.

Inicialmente, o tutorial apresenta as etapas necessárias para a criação do modelo do robô no ambiente de simulação, incluindo a definição de parâmetros físicos, como dimensões, orientação das rodas e sistema de coordenadas adotado. Essa configuração é fundamental para garantir que o comportamento do robô na simulação represente adequadamente as características de um sistema mecanum, conhecido por sua capacidade de movimentação omnidirecional.

Em seguida, o material orienta a implementação da cinemática do robô, demonstrando como os comandos de velocidade aplicados às rodas influenciam diretamente os movimentos de translação e rotação do robô. O tutorial explora exemplos práticos de deslocamento longitudinal, lateral e rotacional, possibilitando a compreensão do funcionamento das rodas mecanum e da relação entre as velocidades individuais das rodas e o movimento resultante do robô.

O uso do tutorial também permitiu a programação de trajetórias pré-definidas, nas quais o robô é capaz de seguir caminhos específicos dentro do ambiente simulado. Essas trajetórias foram definidas por meio de comandos sequenciais e funções disponibilizadas pela toolbox *Mobile Robotics Simulation*, possibilitando a visualização do deslocamento do robô em tempo real e a análise de seu comportamento ao longo do percurso.

Por fim, a aplicação do tutorial demonstrou sua eficácia como ferramenta de apoio ao aprendizado e à experimentação prática, uma vez que fornece exemplos claros, códigos comentados e instruções detalhadas para a programação de robôs com rodas mecanum. Dessa forma, o material contribui para a consolidação dos conceitos de robótica móvel e para o desenvolvimento de habilidades relacionadas à simulação e ao planejamento de movimentos de

robôs omnidirecionais.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 *Uso do Matlab*

Para utilizar o MATLAB, o primeiro passo é criar uma conta no site oficial da MathWorks. Este processo exige informações básicas, como nome, e-mail e detalhes de filiação. Ter uma conta é crucial para acessar o software MATLAB, atualizações e documentação oficial.

Até 2023, era possível baixar o instalador do MATLAB utilizando uma licença estudantil gratuita após criar uma conta com um e-mail universitário. Contudo, a partir de 2024, mesmo com uma conta universitária, é necessário efetuar o pagamento para obter uma licença e utilizar o MATLAB em seu computador. Uma alternativa é o MATLAB Online, que oferece algumas toolboxes gratuitas para usuários com e-mail universitário. Apesar de conveniente, essa opção tem limitações, pois a maioria das toolboxes mais utilizadas e algumas funcionalidades de simulação requerem uma licença paga.

Após realizar o login, é possível utilizar o MATLAB diretamente no navegador via MATLAB Online, eliminando a necessidade de downloads ou instalações. Esse acesso permite a execução de scripts, visualização de dados e uso de ferramentas básicas.

Os arquivos podem ser armazenados no MATLAB Drive, facilitando o acesso a projetos e dados de qualquer lugar com internet.

Depois de logado no portal do MATLAB, deve-se proceder com a instalação das toolboxes necessárias. Essas toolboxes são essenciais para tarefas específicas, como simulações de robótica móvel. A instalação de toolboxes adicionais requer privilégios administrativos e, em sua maioria, exigem a compra de uma licença. Portanto, a disponibilidade das ferramentas depende do orçamento e das necessidades específicas do projeto.

É crucial verificar a compatibilidade das toolboxes com a versão do MATLAB em uso. A MathWorks fornece informações detalhadas sobre compatibilidade que devem ser conferidas antes da instalação para evitar problemas de integração.

Com as toolboxes instaladas, você pode começar a utilizar os simuladores oferecidos pelo MATLAB, configurando parâmetros de simulação, iniciando simulações e interpretando os resultados.

Os simuladores permitem uma análise detalhada e interativa, essencial para o de-

envolvimento eficiente em robótica. Eles incluem exemplos simples para garantir que os usuários possam seguir e compreender cada etapa do processo, desde o registro até a execução de simulações complexas.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do desenvolvimento, aplicação e validação do tutorial didático sobre o uso das toolboxes *Mobile Robotics Simulation* (MRS) e *Mobile Robotics Training* (MRT) no ambiente MATLAB, com foco na simulação e definição de caminhos de um robô móvel omnidirecional com quatro rodas mecanum. Os resultados discutidos contemplam tanto o produto educacional gerado (tutorial) quanto os experimentos de simulação realizados, demonstrando a aplicabilidade prática do material desenvolvido.

4.1 Produto Gerado: Tutorial Didático das Toolboxes MRS e MRT

O principal resultado deste trabalho é a elaboração de um tutorial didático completo, organizado em formato de guia prático passo a passo, apresentado como Apêndice A do trabalho. O material foi estruturado de forma progressiva, iniciando pela preparação do ambiente MATLAB, passando pela instalação das toolboxes, apresentação dos principais recursos e culminando na construção de simulações funcionais de robôs móveis.

O tutorial contempla:

- procedimentos de instalação e verificação das toolboxes MRS e MRT;
- exemplos iniciais de simulação de robôs móveis no MATLAB;
- uso do *Simulation Map Generator* para criação de mapas de ocupação a partir de imagens;
- integração entre mapas, sensores e modelos de robôs no Simulink;
- exemplos práticos que podem ser facilmente adaptados para diferentes configurações de robôs.

Esse material foi desenvolvido com foco em clareza didática, reprodutibilidade e uso acadêmico, permitindo que estudantes e pesquisadores consigam reproduzir os experimentos apresentados no TCC e criar novas simulações a partir do mesmo fluxo de trabalho.

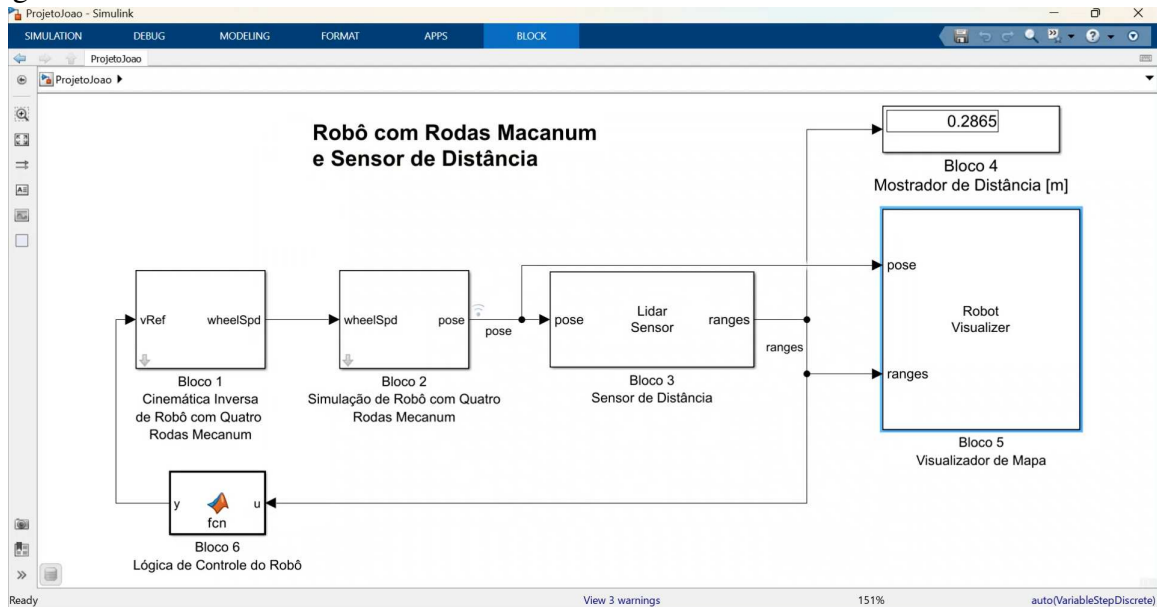
4.2 Simulação de Robô Móvel com Rodas Mecanum

Como validação prática do tutorial, foi implementado um modelo de simulação de um robô móvel com quatro rodas mecanum, operando em um ambiente 2D gerado pela toolbox MRT. O modelo foi construído no ambiente Simulink, utilizando blocos da toolbox MRS para representar a cinemática do robô, sensores e visualização do movimento.

O modelo final, ilustrado na Figura ??, é composto por seis blocos principais interco-

nectados, sendo que quatro deles pertencem diretamente à toolbox *Mobile Robotics Simulation*. Essa estrutura permitiu representar, de forma modular, os principais elementos do sistema robótico: cinemática inversa, cinemática direta, sensoriamento e visualização.

Figura 16 – Modelo no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.1 Modelagem Cinemática no Simulink

A cinemática do robô foi dividida em dois estágios complementares:

- **Cinemática inversa (Bloco 1):** responsável por converter comandos de velocidade linear nos eixos x e y , além da velocidade angular em torno do eixo vertical, nas velocidades individuais das quatro rodas mecanum. Esse processo é realizado por um bloco específico da MRS, no qual também são definidos os parâmetros físicos do robô, como dimensões e configuração das rodas.
- **Cinemática direta (Bloco 2):** responsável por calcular o deslocamento do robô no plano a partir das velocidades angulares das rodas. Esse bloco gera a pose do robô (posição e orientação) ao longo do tempo, permitindo a visualização do movimento no ambiente simulado.

A separação entre cinemática direta e inversa mostrou-se adequada tanto do ponto de vista conceitual quanto didático, pois facilita a compreensão do funcionamento de robôs omnidirecionais e a análise do impacto de cada comando de velocidade sobre o movimento resultante.

4.2.2 Integração com Sensores e Ambiente Simulado

Além da modelagem cinemática, foi incorporado ao modelo um sensor de distância (Bloco 3), também fornecido pela toolbox MRS. Esse sensor foi configurado com base em um mapa 2D gerado previamente pelo *Simulation Map Generator*, permitindo simular a percepção do robô em relação aos obstáculos presentes no ambiente.

Os principais parâmetros configurados no sensor incluem:

- mapa de ocupação 2D;
- posição relativa (*offset*) do sensor em relação ao centro do robô;
- ângulo de abertura do campo de visão;
- distância máxima de medição.

Durante a simulação, o sensor gera como saída as distâncias medidas até os obstáculos, possibilitando a análise do comportamento do robô em relação ao ambiente e abrindo espaço para a implementação futura de algoritmos de desvio de obstáculos e navegação autônoma.

4.3 Análise dos Resultados das Simulações

Os experimentos realizados demonstraram que o modelo construído é capaz de:

- reproduzir corretamente os movimentos omnidirecionais característicos de robôs com rodas mecanum;
- executar deslocamentos longitudinais, laterais e rotações no próprio eixo;
- interagir com mapas de ocupação gerados a partir de imagens reais;
- fornecer dados de sensoriamento coerentes com a posição do robô no ambiente.

A visualização gráfica do robô em um mapa 2D permitiu acompanhar, em tempo real, sua trajetória e orientação, facilitando a análise qualitativa do comportamento do sistema. Observou-se que a toolbox MRS fornece abstrações adequadas para fins educacionais, reduzindo a complexidade da implementação sem comprometer a fidelidade do modelo cinemático.

4.4 Discussão dos Resultados

De forma geral, os resultados indicam que o tutorial desenvolvido cumpre seu papel como ferramenta de apoio ao ensino e à aprendizagem de robótica móvel, especialmente no contexto de simulações computacionais. A integração entre MRS e MRT mostrou-se eficaz para a construção de cenários realistas e para a experimentação de conceitos de cinemática e

navegação de robôs móveis.

Além disso, o modelo de simulação com rodas mecanum evidencia o potencial dessas toolboxes para disciplinas de graduação, projetos de extensão e atividades de iniciação científica, permitindo que conceitos teóricos sejam explorados de forma prática, visual e interativa.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo e a elaboração de um tutorial didático para o uso das toolboxes *Mobile Robotics Simulation* (MRS) e *Mobile Robotics Training* (MRT) no ambiente MATLAB, com foco na definição e simulação de caminhos de um robô móvel omnidirecional com quatro rodas mecanum. Ao longo do desenvolvimento do projeto, foi possível integrar conceitos teóricos da robótica móvel com práticas de simulação computacional, resultando em um material aplicado e voltado ao ensino.

A partir da revisão bibliográfica realizada, foram consolidados os principais conceitos relacionados à robótica móvel, com ênfase na cinemática de robôs omnidirecionais e nas características específicas das rodas mecanum. Esse embasamento teórico foi fundamental para compreender o funcionamento dos modelos cinemáticos implementados e para orientar a construção dos exemplos apresentados no tutorial.

Como principal resultado, destaca-se a produção de um tutorial estruturado, progressivo e reproduzível, que orienta o usuário desde a preparação do ambiente MATLAB até a execução de simulações completas envolvendo mapas, sensores e modelos de robôs móveis. O material desenvolvido mostrou-se adequado para fins educacionais, uma vez que apresenta instruções claras, exemplos comentados e um fluxo de trabalho compatível com atividades acadêmicas de graduação.

As simulações realizadas permitiram validar a aplicabilidade das toolboxes MRS e MRT para o estudo de robôs móveis, evidenciando que essas ferramentas oferecem recursos suficientes para a modelagem cinemática, visualização do movimento em ambientes 2D e integração com sensores simulados. O modelo de robô com rodas mecanum implementado no Simulink demonstrou corretamente os movimentos omnidirecionais esperados, reforçando a coerência entre a teoria estudada e os resultados obtidos.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo proposto neste trabalho foi alcançado, uma vez que o tutorial desenvolvido contribui para a compreensão prática da simulação de robôs móveis e pode ser utilizado como material de apoio em disciplinas, projetos de pesquisa e atividades de extensão relacionadas à robótica móvel.

Como trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do tutorial com a inclusão de algoritmos mais avançados de planejamento de caminhos, como métodos baseados em inteligência artificial, algoritmos de busca em grafos e técnicas de otimização. Outra possibilidade é a incorporação de ambientes mais complexos, com obstáculos dinâmicos, ruídos de sensores e

múltiplos robôs operando simultaneamente, aproximando a simulação de cenários reais.

Adicionalmente, o tutorial pode ser estendido para a validação em plataformas físicas reais, utilizando robôs compatíveis com o modelo mecanum. Essa etapa permitiria comparar os resultados simulados com o comportamento de sistemas reais, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das limitações e vantagens da simulação computacional no contexto da robótica móvel.

REFERÊNCIAS

- ASIMOV, I. I. **Robot**. Nova York, EUA: Gnome Press, 1950.
- CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. Pearson/Prentice Hall, 2005. (Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: control engineering). ISBN 9780201543612. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=MqMeAQAAIAAJ>.
- George Charles Devol. **Programmed Article Transfer**. 1961. US2988237A. Patente registrada no final da década de 1950, base do primeiro robô industrial.
- DOROFTEI, I.; GROSU, V.; SPINU, V. Omnidirectional mobile robot - design and implementation. In: . [S. l.: s. n.], 2007. ISBN 978-3-902613-15-8.
- DUDEK, G.; JENKIN, M. **Computational Principles of Mobile Robotics**. Cambridge University Press, 2010. ISBN 9781139855594. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=0cggAwAAQBAJ>.
- GARCÍA, J. F. C. **Análisis Cinemático, Dinámico y Control en Tiempo Real de un Vehículo Guiado Automáticamente**. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Cuernavaca, México, 2009. Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica.
- Bengt Ilon. **Wheels for a Course Stable Self-Propelling Vehicle**. 1975. US3876255A. Pedido de patente realizado em 1973, base do conceito das rodas Mecanum.
- INDIVERI, G. Swedish wheeled omnidirectional mobile robots: Kinematics analysis and control. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 25, p. 164–171, 03 2009.
- JUNIOR, F. L. P.; GOULART, C. S.; TORRES, F. E. **Robótica**. Minha Biblioteca, 2019. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595029125/>.
- KARAKAYA, S.; KUCUKYILDIZ, G.; OCAK, H. A new mobile robot toolbox for matlab. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Springer, v. 87, p. 125–140, 2017.
- LAGES, E. N. Introdução ao matlab. **Universidade Federal de Alagoas (UFAL)**, 1999.
- MATHWORKS, S. C. T. **Mobile Robotics Simulation Toolbox**. 2023. <https://github.com/mathworks-robotics/mobile-robotics-simulation-toolbox>. GitHub repository.
- MATHWORKS, T. S. C. **Mobile Robotics Training Toolbox**. 2023. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62961-mobile-robotics-training-toolbox>. MATLAB Central File Exchange. Acesso em: 07 out. 2023.
- MIRANDA, A. T.; ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. Introdução ao matlab. **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPFNT-002/2007**, 2007.
- NASCIMENTO, T. P. d. **Controle de Trajetória de Robôs Móveis Omni-direcionais: Uma abordagem multivariável**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, 2009. Dissertação (Mestrado).
- NOF, S. Y. **Handbook of Industrial Robotics**. Wiley, 1999. (Electrical and electronic engineering). ISBN 9780471177838. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=7od4alFKfNMC>.

ROMERO, R. A. F.; JUNIOR, E. P. S.; OSÓRIO, F. S.; WOLF, D. F. **Robótica móvel**. [S. l.]: LTC, 2014.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3. ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2010.

SECHHI, H. **Uma Introdução aos Robôs Móveis**. Argentina: Universidade Nacional de San Juan - UNSJ, 2008. Monografia. Tradução: Netto de Almeida, Cynthia and Nascimento Martins, Felipe.

SILVA, L. R. da. **Análise e programação de robôs móveis autônomos da plataforma Eyebot**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica., Santa Catarina, 2003.

SOBRINHO, J. C. L. B. **Controle Preditivo de um Robô Omnidirecional com Compensação de Atrito**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, 2011. Dissertação (Mestrado).

TAHERI, H.; QIAO, B.; GHAEMINEZHAD, N. Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot. **International Journal of Computer Applications**, v. 113, p. 6–9, 03 2015.

6 TUTORIAL PARA PROGRAMAÇÃO DE UM ROBÔ COM RODAS MECANUM

Os passos detalhados para a programação do robô com rodas mecanum podem ser consultados no material complementar disponível em **Tutorial completo**.