

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRÉ SALES SASAKI

ESTRATÉGIA DE DESVIO DE OBSTÁCULO PARA  
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA DE UM ROBÔ MÓVEL  
DO TIPO *CAR-LIKE*

VIÇOSA  
2012

**ANDRÉ SALES SASAKI**

**ESTRATÉGIA DE DESVIO DE OBSTÁCULO PARA  
NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA DE UM ROBÔ MÓVEL  
DO TIPO *CAR-LIKE***

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M.Sc. Alexandre S. Brandão.

VIÇOSA  
2012



**ANDRÉ SALES SASAKI**

**ESTRATÉGIA DE DESVIO DE OBSTÁCULO PARA NAVEGAÇÃO  
AUTÔNOMA DE UM ROBÔ MÓVEL DO TIPO *CAR-LIKE***

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de Julho de 2012.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. M.Sc. Alexandre Santos Brandão - Orientador  
Universidade Federal de Viçosa

---

Prof. M.Sc. Mauro de Oliveira Prates  
Universidade Federal de Viçosa

---

Eng. B.Sc. Cláudio Dario Rosales  
Universidad Nacional de San Juan

*“A meus pais e meu irmão”*

# *Agradecimentos*

Aos meus pais Seigi e Suziane, meus maiores exemplos e meus grandes incentivadores, por todo amor, carinho e apoio que me deram forças para concluir mais essa etapa, agradeço pelos tantos conselhos e puxões de orelha, e por terem feito de tudo, para me dar a melhor educação e formação possível, vejo hoje o quanto tenho de vocês em mim, e fico muito feliz, pois sei que isto, é o melhor presente que eu tenho.

Ao meu irmão Fernando, que por algumas vezes assume o papel de irmão mais velho e por sempre acreditar em mim e nas minhas conquistas, por algumas vezes mais do que eu.

Ao Chris, meu fiel companheiro de república, que suportou minhas bagunças e manias, agradeço pela companhia, paciência e organização nas contas da casa, e por ter me ajudado muito durante todos esses anos e em todas as repúblicas que morei, fazendo com que ela fosse mais parecida possível com uma casa de verdade hahahaha, valeu mesmo Chris, tenho certeza de que sempre manteremos um bom contato.

Ao meu grande amigo Baiano, com toda certeza, um dos meus melhores amigos que tenho hoje, e que tenho certeza de que vai ser para a vida toda, alguém que esteve me fazendo rir durante estes 5 anos, agradeço as resenhas, amizade, suporte e por sempre tentar me botar para cima independente da situação, as vezes até mesmo quando estava mais triste do que eu, mas arrumava alguma forma de nos distrairmos, seja “resenhando” nossos amigos, vendo filmes, desenterrando episódios de chaves e chapolim ou indo tomar um açaí totalmente do nada.

Ao meu grande amigo Brunãooooooooooooo, mestre da elétrica, e que me orgulho muito de poder ser, e te ter como um dos meus melhores amigos, você com certeza é alguém a quem devo sempre agradecer pelo apoio e confiança em mim, afinal quantas vezes eu ouvi e acreditei em você me falando: “Japa, vai dar tudo certo cara, confia em mim beleza mano?”. E foi confiando em você e nessa nossa amizade, nas noites viradas de estudo, nas jantinhas e nos churrasco que cheguei aqui, e concluo mais essa etapa.

Aos meus companheiros de curso e de república, por estarem presentes em todas as lembranças que levarei desta cidade e desta fase da minha vida, por serem minha segunda

família e estarem presentes nos momentos de dificuldade, de festa, de choro, de Nico Lopes, de churrasco, de futebol, de torcida, de esquentar, de estudo, de prova e de viagem, do começo ao fim.

À minha namorada Paulinha, por todo apoio, carinho e paciência, vivenciando junto comigo os problemas e alegrias durante a realização deste projeto, agradeço seu apoio e compreensão por entender as “poucas” vezes que tive que troca-la para que fosse possível concluir este trabalho.

Aos meus companheiros de trabalho da BDP/NERO principalmente Leita e Carlin que me proporcionaram a descoberta de muito conhecimento e também de uma boa amizade, fazendo com que eu tivesse o melhor ambiente possível para trabalhar, desenvolver e crescer nesse curso de Engenharia Elétrica.

Aos professores que me apoiaram e principalmente ao meu professor, orientador e amigo Alexandre Santos Brandão que tem muita responsabilidade pela minha ascensão acadêmica e pela viabilização deste projeto, por acreditar em mim e na minha capacidade, me cobrando e me incentivando. Terei sempre uma gratidão especial, pela forma que me apoiou e me incentivou, acreditando que eu seria capaz de realizar os projetos, sonhos e conquistas, e muito obrigado mesmo principalmente por me ensinar que muito esforço, perseverança e sonhos, constroem valiosos talentos.

Ao professor Dr. Ing. Ricardo Carelli, pelo apoio durante minha estada em San Juan - Argentina, fornecendo todo suporte necessário no INAUT para a realização deste projeto.

Aos meus familiares, que me apoiaram e entenderam minha ausência.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro, indispensável na realização desta monografia.

A todos vocês, MUITO OBRIGADO!

*André Sales Sasaki*

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original”*

***Albert Einstein***

# *Resumo*

Um robô móvel do tipo *Car-Like* se assemelha muito a um veículo comum usado no dia a dia, este possui em sua constituição um par de rodas montadas sobre um mesmo eixo, as quais são tracionadas simultaneamente, e normalmente se localizam em sua parte traseira, além disso, possuem um par de rodas localizadas na parte posterior, que define sua orientação ou direcionamento durante um processo de navegação. Tratando-se de deslocamento, um robô comumente deve navegar de forma autônoma dentro de um ambiente semi-estruturado, ou seja, o usuário apenas define o objetivo a ser alcançado e não a forma que o robô deve atuar para realizar a tarefa desejada. No que diz respeito a tarefas de desvio de obstáculo, o robô em questão utiliza de uma abordagem reativa. Onde as informações do ambiente capturadas por sensores estão intimamente ligadas às suas ações de controle. Neste trabalho, uma análise do modelo cinemático do robô é realizado. Afim de criar um modelo mais sucinto e igualmente eficiente, características intrínsecas do veículo são estudadas para que seja possível a descrição de um modelo cinemático mais simples do tipo “bicicleta”. A arquitetura de controle é aqui proposta considerando os controladores de alto- e baixo-nível, que são responsáveis por guiar os atuadores e a navegação, respectivamente. A fim de minimizar os efeitos da restrição mecânica do robô, um algoritmo que comuta os controladores para manobras para frente e de marcha-ré é proposto e apresentado como principal contribuição deste trabalho. Simulações e resultados experimentais validam a proposta em uma navegação livre sem colisões usando uma estratégia reativa dentro de um ambiente semi-estruturado.

# *Abstract*

This work details an avoidance obstacle strategy applied in an autonomous navigation for a mobile robot of the Car-Like type, which is very similar a normal vehicle, considering it has in its constitution a par of wheels upon the same axis, which are pulled simultaneously and are usually located at the rear of the robot, it also has a par of wheels normally located at the front of the robot which are responsible for the orientation, or direction during a navigation process. The navigation process developed by the robot is of the autonomous way within a semi-structured environment, in other words, the user just has to define the goal to be reached, and not the way whose the robot must do to perform the desired task. Highlighting that the robot just uses reative approach, where the environment information, captured by sensors are closely linked to its control action. An analysis of the kinematics model is performed in order to create a model more succinct and equal efficient, intrinsic characteristics of the vehicle are studied to be able to describe a kinematic model more simple of the type "Bicycle". Beyond that, the control architecture is here proposed dealing with a low- and high-level controller, which are responsible for driving the actuators and for guiding the navigation, respectively. In order to minimize the car-like motion constrain effects, a forward/backward maneuver switched controller is proposed and here presented as the main contribution. Simulation and experimental results validate the proposal, i.e., a free-path navigation without any collision in a reactive way within a semi-structured environment

# *Sumário*

## Lista de Figuras

## Lista de Tabelas

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.1	Sistema Sensorial . . . . .	16
1.2	Robôs Móveis com Rodas . . . . .	18
1.2.1	Estrutura Omnidirecional de três rodas . . . . .	18
1.2.2	Estrutura Uniciclo . . . . .	19
1.2.3	Estrutura <i>Car-Like</i> . . . . .	19
1.3	Controladores de Posição e de Orientação . . . . .	20
1.3.1	Controlador de Posição . . . . .	22
1.3.2	Controle de manobra para frente . . . . .	23
1.3.3	Controle de manobra de marcha ré . . . . .	24
1.4	Definição do Problema . . . . .	25
1.5	Objetivo . . . . .	25
1.6	Estrutura do Projeto . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Controle de Alto-Nível e de Baixo-Nível</b>	<b>27</b>
2.1	Estratégia de Controle de Baixo Nível . . . . .	27
2.2	Sistema de comunicação entre baixo- e alto-nível . . . . .	28
2.3	Protocolo de comunicação do alto-nível para baixo-nível . . . . .	29
2.4	Protocolo de comunicação do baixo-nível para alto-nível . . . . .	30

2.5	Estratégia de Controle de Alto Nível e Controlador de Marcha-Ré . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Desvio de Obstáculo</b>	<b>32</b>
3.1	Desvio Tangencial . . . . .	32
3.2	A Estratégia de Desvio Proposta . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Resultados e Simulações</b>	<b>37</b>
4.1	Experimento Real com Missão de Seguimento de Trajetória . . . . .	37
4.2	Resultados de simulação considerando a estratégia de desvio de obstáculo.	38
4.2.1	Caso 1: Manobras para Frente . . . . .	40
4.2.2	Caso 2: Manobra em Marcha-Ré Sem a Presença de Obstáculos Próximo ao Ponto de Partida . . . . .	41
4.2.3	Caso 3: Condição de Marcha-Ré Com a Presença de Obstáculos Próximos Iniciais . . . . .	41
4.2.4	Caso 4: Desvio de Obstáculo Sem a Utilização do Controlador de Marcha-Ré . . . . .	43
4.3	Discussões . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>45</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	45
	<b>Referências</b>	<b>47</b>

# *Lista de Figuras*

1	Manipuladores robóticos e Robôs móveis. . . . .	14
2	Arquitetura de uma abordagem deliberativa . . . . .	15
3	Arquitetura de uma abordagem reativa . . . . .	15
4	Área de detecção do sensor utilizado. . . . .	17
5	Rodas Omnidirecionais . . . . .	18
6	Imagens de um robô omnidirecional utilizado em competições de futebol de robô F-180. . . . .	19
7	Robô do tipo uniclo. . . . .	20
8	Modelo cinemático de um veículo do tipo <i>Car-Like</i> como um modelo bicicleta. . . . .	21
9	Veículo do tipo <i>Car-Like</i> utilizado na realização do trabalho. . . . .	21
10	Sistemas de coordenadas para projeto do controlador de posição . . . . .	22
11	Estrutura do controlador de baixo-nível. . . . .	28
12	Estrutura do pacote de dados recebido pelo sistema de baixo-nível do robô. . . . .	29
13	Orientação máxima desenvolvida pelo robô. . . . .	30
14	Estrutura do pacote de dados recebido pelo sistema de alto nível do robô. . . . .	31
15	Modelo do tipo bicicleta utilizado. . . . .	31
16	Desvio Tangencial - Determinação do ângulo de rotação. . . . .	33
17	Encontrando a menor distância para obstáculo e calculando o ângulo $\beta$ . . . . .	35
18	Decidindo a maneira de alcançar o ponto desejado. . . . .	35
19	Demonstração da estratégia de melhor escolha de caminho de desvio. . . . .	36
20	Trajetória Realizada pelo Robô. . . . .	38
21	Erros no seguimento de trajetória. . . . .	39

22	Sinais de Controle. . . . .	39
23	Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo utilizando somente movimentos para frente. . . . .	40
24	Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo na ausência de obstáculos usando o controlador de marcha-ré. . . . .	41
25	Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo na presença de obstáculos usando o controlador de marcha-ré. . . . .	42
26	Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo sem a utilização do controlador de marcha-ré. . . . .	43

# *Lista de Tabelas*

1	Características do sensor Hokuyo URG-04LX-UG01 . . . . .	17
---	--	----

# 1 *Introdução*

*“Há três coisas na vida que nunca voltam atrás: a flecha lançada, a palavra pronunciada e a oportunidade perdida”*

*Provérbio Chinês*

Atualmente, a grande funcionalidade dos robôs móveis possibilita sua utilização em diversas áreas, seja para aumentar a qualidade de processos, para auxiliar nas tarefas domésticas e nas tarefas de transporte de cargas, e para entretenimento. Através de sensores e atuadores, estes veículos são capazes de se deslocar, perceber e interagir com o ambiente em que estão postos a navegar, podendo haver intervenção e/ou interação com seres humanos. Tais características os tornam uma ótima plataforma experimental de sistemas de controle e inteligência artificial.

O cenário encontrado em muitas indústrias e ambientes em que se utilizam robôs tem conduzido ao desenvolvimento de pesquisas com robôs autônomos trabalhando de forma cooperativa em ambientes não estruturados como proposto em [1], para execução de tarefas como por exemplo transporte de cargas, escolta, resgate de pessoas em escombros, exploração e mapeamento de grandes áreas ([2, 3, 4]).(É recomendado a leitura de [5] para uma breve revisão do assunto).

Ao mencionar da Robótica, faz-se uma divisão em duas grandes áreas: robótica industrial, ou de manipuladores robóticos, e a robótica móvel, que podem ser vistas na Figura 1(a) e 1(b) respectivamente.

Na robótica móvel, um de seus principais objetivos consiste na criação de robôs autônomos que devem ser capazes de navegar em ambientes complexos e dinâmicos sem intervenção humana, em outras palavras, o robô deve ser capaz de adquirir e utilizar conhecimentos sobre o ambiente, como detectar obstáculos, a fim de concluir a tarefa que lhe foi previamente designada. Desta forma, o usuário apenas determina a tarefa a ser realizada

e não a maneira como o robô deve agir para que a mesma seja concluída. Para que isto seja possível, deve-se haver uma interação do robô com o ambiente através de sensores embarcados.

Sempre que um robô navega dentro de um ambiente não-estruturado, existe a necessidade de assegurar sua integridade, evitando sua colisão com obstáculos. Logo, na maioria das aplicações existentes é necessário que haja uma estratégia de desvio de obstáculo. Dentre os métodos existentes, pode-se citar o Método de Detecção de Bordas [6], Grade de Certeza [7], Campos Potenciais [8], Campos de Forças Virtual [9], Histograma do Campo Vetorial (VFH) [10], Diagrama de Proximidade (ND) [11], e Desvio Tangencial [12].

No contexto da navegação do robô, estratégias deliberativas e reativas podem ser adotadas. Sendo que a principal diferença entre elas consiste no uso de informações do ambiente no algoritmo. Na primeira, são utilizadas todas as informações do ambiente antes do início da realização da tarefa, sendo possível que o robô percorra uma trajetória livre de obstáculos até o ponto de destino, desde que este caminho exista. Entretanto estes tipos de estratégia possui um elevado custo operacional e não se demonstra eficiente em ambientes dinâmicos. Este tipo de estratégia é esquematizado conforme mostrado na Figura 2. Em contraste, na estratégia reativa são utilizadas as informações correntes do local para o cálculo da próxima ação. Logo, este tipo de navegação foca o fato de que as percepções estão intimamente ligadas com as ações, o que resulta em uma maior simplicidade e baixo custo computacional. O esquema de uma abordagem reativa pode ser visto na Figura 3. Assim, tendo em vista a não necessidade de qualquer conhecimento prévio, estratégias reativas são recomendadas para ambientes não estruturados e são aplicados tanto em manipuladores robóticos ([13]), como também pode ser utilizada em robôs móveis ([14] e

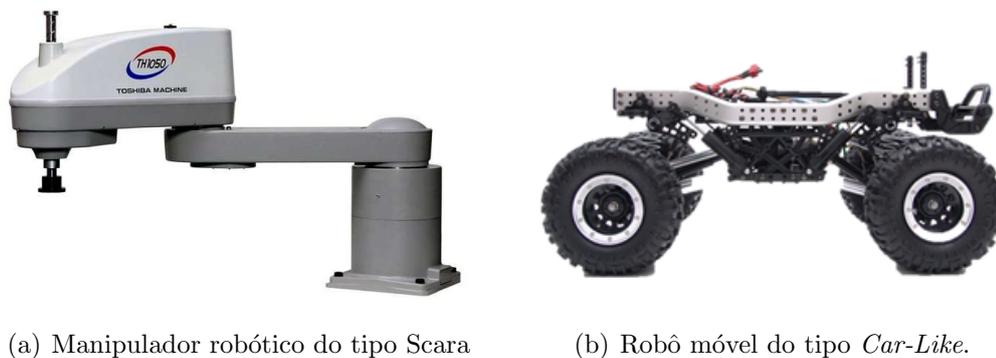


Figura 1: Manipuladores robóticos e Robôs móveis.

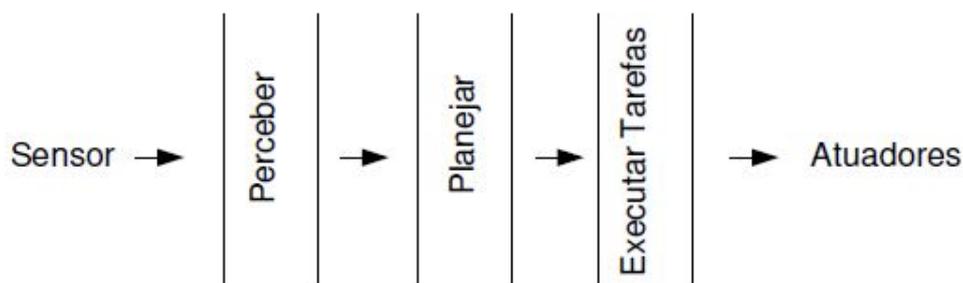


Figura 2: Arquitetura de uma abordagem deliberativa

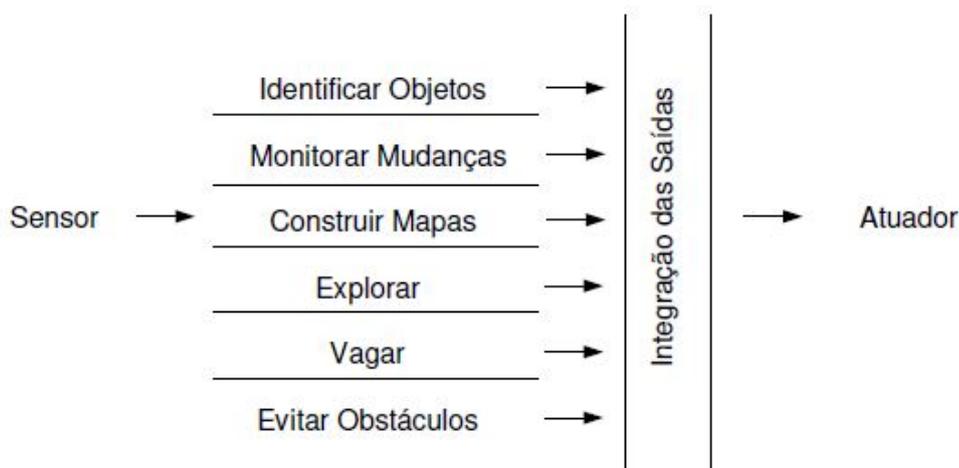


Figura 3: Arquitetura de uma abordagem reativa

[15]).

Existe ainda o paradigma híbrido de navegação. Neste tipo, as duas técnicas de navegação citadas anteriormente são usadas em conjunto para se obter a capacidade de planejar as tarefas a serem realizadas e desviar de obstáculos dinâmicos presentes no ambiente. Vale ressaltar que os algoritmos de desvio de obstáculo que foram implementados neste trabalho são baseados na arquitetura de controle reativa, ou seja, o robô "sente" o ambiente de trabalho e reage de forma que a tarefa que lhe foi designada possa ser realizada.

Normalmente, o modelo do robô (cinemático ou dinâmico) é utilizado para desenvolver o controlador, que pode ser dividido em baixo e alto nível. O controlador de baixo nível garante a execução do sinal de controle enviado ao atuador (por exemplo, um controle de tensão aplicado ao motor), enquanto o controlador de alto nível é responsável pela realização de tarefas (por exemplo, alcançar um alvo). Em aplicações práticas, sistemas de baixo nível são incorporados na maioria dos robôs que desenvolvem clássicas soluções baseadas em controle PID. De acordo com [16], outras técnicas de controle devem ser adaptadas quando o sistema lida com deslizamento, não linearidades e distúrbios. Já o controlador

de alto nível é responsável pela estratégia de controle de movimento, i.e. responsável pelo posicionamento, seguimento de trajetória ou atividades de rastreamento de trajetória. No contexto deste trabalho, algumas estratégias de controle de movimento são propostas considerando um robô do tipo *Car-Like*. Em [17] uma tarefa de rastreamento de trajetória é realizada por um algoritmo probabilístico. Já em [18] uma tarefa de seguimento de trajetória é realizada utilizando uma suave linearização por realimentação de estado para controlar a orientação do robô. Em [19] uma outra linha de pesquisa envolvendo navegação para estacionamento autônomo de veículos do tipo *Car-Like* é discutida.

## 1.1 Sistema Sensorial

Os robôs móveis autônomos se caracterizam pela sua capacidade de navegar dentro de um ambiente estruturado, semi-estruturado ou não estruturado sem a intervenção humana. Porém, para que isso seja possível, há a necessidade de que estes levem sensores a bordo, para que possam adquirir informações sobre o ambiente e tomar as decisões necessárias para a realização de uma determinada tarefa. É muito frequente a utilização de sensores *lasers*, ultra-som (sonares) e câmeras de vídeo, que permitam, mapear um ambiente, localizar objetos ou desviar de obstáculos, entre outras coisas.

Na realização deste trabalho, o sensor de varredura *laser* foi escolhido como sensor externo de proximidade, cuja função é fornecer medidas de distâncias dos objetos a sua volta e auxiliar na estratégia de desvio de obstáculo com o intuito de assegurar uma navegação segura do robô móvel. De acordo com [20], pode-se classificar este sensor laser como ativo, pois não depende de uma fonte de excitação externa para seu funcionamento, ao contrário de uma câmara CCD por exemplo, que necessita de uma excitação luminosa para fornecer informações sobre o ambiente.

O sensor aqui utilizado é da empresa Hokuyo, modelo URG-04LX-UG01, que consiste em um sensor *laser* para escaneamento de área. A fonte de luz do sensor é infra-vermelha com um comprimento de onda de 785nm com um *laser* classe 1 de segurança. Este equipamento pode escanear um semi-círculo de 240°, com um raio máximo de 4m. Possui um ângulo de inclinação de 0.36° e a saída do sensor é a medida da distância em cada ponto, sendo que o semi-círculo é dividido em 683 partes. O feixe do *laser* é menor do que 20mm a 2m, com uma divergência máxima de 40mm em 4m. O princípio do cálculo da distância é baseado no cálculo da diferença de fase, que possibilita a obtenção de uma medida mais estável e menos susceptível a interferências das cores dos objetos ou reflexão.

Tabela 1: Características do sensor Hokuyo URG-04LX-UG01

Aspectos Gerais	
Alcance Máximo	4m
Resolução Angular	0.36°
Erro estatístico	Normalmente, entre: 20mm - 1000mm : $\pm 30\text{mm}$ e entre 20mm - 4000mm : $\pm 3\%$ da medição
Método de Cálculo da Distância	Cálculo da diferença de fase.
Aspectos Elétricos	
Via de transferência de dados	USB, configurável
Taxa de transferência de dados	12Mbps
Tensão de Alimentação do Scanner e dos componentes eletrônicos	5V DC, alimentado pela própria conexão USB
Temperatura ambiente de operação	-25 a +75 °C
Aspectos Mecânicos	
Peso	Aproximadamente 160g
Material	Polycarbonato
Dimensões	50x50x70mm

A Figura 4 demonstra a área de trabalho deste dispositivo.

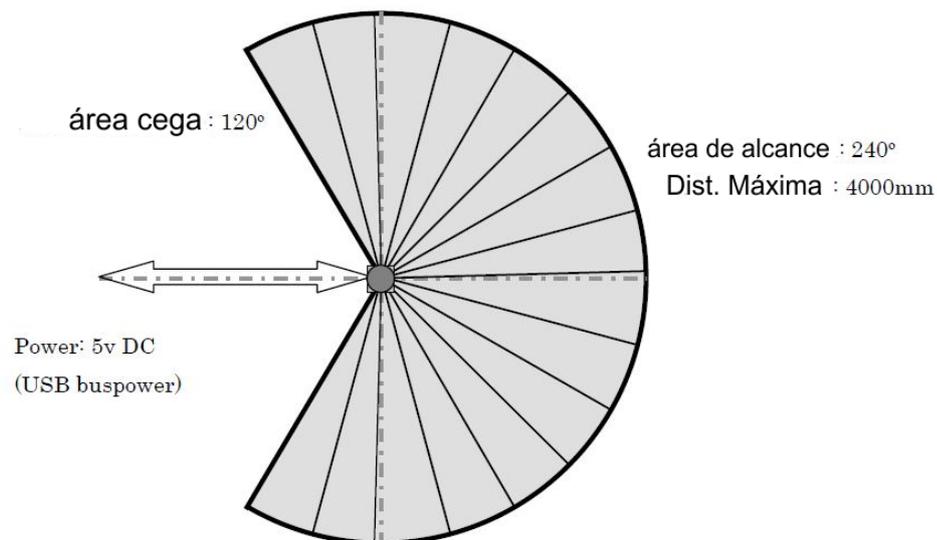


Figura 4: Área de detecção do sensor utilizado.

Na Tabela 1, verifica-se algumas características do *Laser* Hokuyo URG-04LX-UG01.

## 1.2 Robôs Móveis com Rodas

### 1.2.1 Estrutura Omnidirecional de três rodas

Robôs com esta característica normalmente utilizam uma separação angular entre suas rodas iguais a  $120^\circ$ , os robôs móveis omnidirecionais possuem como principal característica a capacidade de executar movimentos em qualquer direção do plano  $\mathbf{XY}$ . Frequentemente são dotados de rodas especiais que são demonstradas na Figura 5, que são projetadas a fim de facilitar o movimento do robô em direção perpendicular ao seu sentido de giro. O modelo cinemático deste tipo de robô é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \cos(\psi - \delta) & \frac{2}{3} \sin(\psi) \\ \frac{2}{3} \sin(\psi - \delta) & -\frac{2}{3} \sin(\psi - \delta) & -\frac{2}{3} \cos(\psi - \delta) \\ \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

onde  $[x, y, \psi]^T$  representa a postura do robô no plano de navegação e o vetor  $\dot{q}$  representa a velocidade de cada uma das rodas. A distância entre as rodas e o ponto central do robô móvel é representada por  $L$ , e supõe-se que as rodas estão equidistantes a este ponto. O ângulo  $\delta$  indica a orientação das rodas em relação ao sistema de coordenadas do robô. Vale mencionar que robôs móveis cuja configuração das rodas é omnidirecional não apresentam restrições não holonômicas. A Figura 6 ilustra um robô omnidirecional.

**Nota 1** Restrição não holonômica é aquela que limita determinadas formas de caminhos (ou trajetórias) entre duas configurações distintas do ambiente, devido, basicamente, aos aspectos intrínsecos dos robôs utilizados. A título de informação, restrição holonômica é aquela que reduz o número de configurações possíveis que um robô pode atingir no ambiente.



Figura 5: Rodas Omnidirecionais

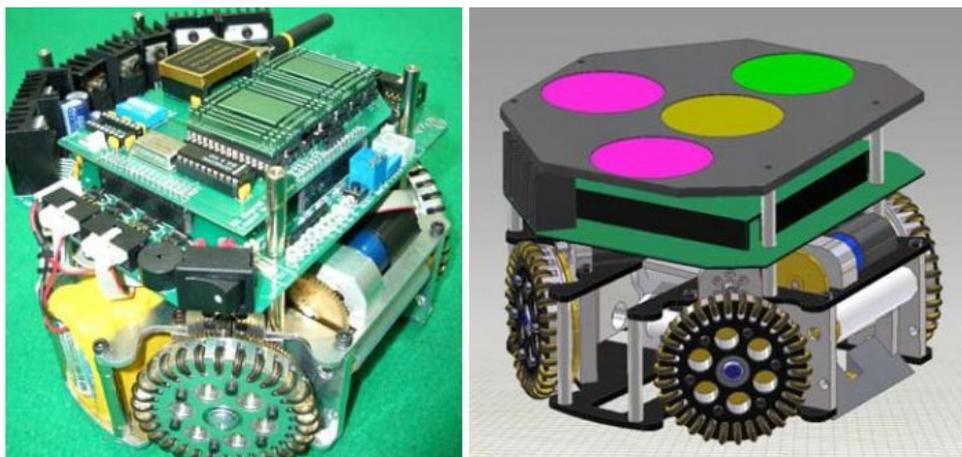


Figura 6: Imagens de um robô omnidirecional utilizado em competições de futebol de robô F-180.

### 1.2.2 Estrutura Uniciclo

Estes tipos de robôs móveis são chamados também de robôs móveis com tração diferencial, pois estes robôs possuem as rodas montadas sobre um mesmo eixo (virtual), porém elas são acionadas de forma independente. Este tipo de configuração apresenta como vantagem o fato de que nesta configuração o robô consegue girar sobre seu próprio eixo. Um modelo cinemático de um robô do tipo uniciclo pode ser dado pela equação abaixo.

$$\{\dot{x} = v \cos \psi, \dot{y} = v \sin \psi, \dot{\psi} = \omega\} \quad (1.1)$$

onde  $x$  e  $y$  são as coordenadas do ponto localizado no centro do eixo que une as rodas do robô e  $\psi$  é a orientação do veículo em relação ao eixo  $x$ . As velocidades linear e angular do robô móvel, nomeadas  $v$  e  $\omega$ , respectivamente, representam os sinais de controle. Vale ressaltar que robôs com esta configuração não podem se deslocar lateralmente, a Figura 7 representa um robô uniciclo Pioneer da empresa Mobile Robots.

### 1.2.3 Estrutura *Car-Like*

A estrutura *Car-Like* (adotada neste trabalho) se assemelha muito a uma estrutura de um automóvel convencional, esta configuração consiste em um par de rodas montadas sobre o mesmo eixo e tracionadas simultaneamente, as quais são normalmente localizadas na parte traseira do robô, e um outro par de roda localizada normalmente a frente do



Figura 7: Robô do tipo uniciclo.

robô que define a orientação ou direcionamento do veículo durante a navegação.

A estrutura de alguns veículos do tipo *Car-Like* possui como uma importante característica o fato de que ao mover o ângulo de inclinação de uma das rodas a outra roda associada move exatamente a mesma quantidade, podendo ser assim até substituída por uma roda única no seu centro geométrico. Os veículos que não possuem essa característica são denominados de Ackerman. Assim, essa característica permite realizar uma aproximação, de tal forma que o modelo cinemático do veículo passa a ser um modelo tipo bicicleta, que é demonstrado na Figura 8. Onde,  $b$  é o ponto de controle de robô,  $\psi$  é a orientação,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\delta$  é a direção,  $u$  é a velocidade linear,  $R$  é o raio de curvatura e  $L$  é o tamanho do robô considerada como a distância entre as rodas traseiras e dianteiras. Assim, o modelo cinemático deste tipo de robô é dado pela Equação 1.2.

$$\{\dot{x} = v \cos \psi, \dot{y} = v \sin \psi, \dot{\psi} = v \frac{\tan \delta}{L}, \dot{\psi} = \omega\} \quad (1.2)$$

Este tipo de configuração apresenta restrições não holonômicas que impossibilitam o movimento lateral, e, adicionalmente, para se orientar segundo um valor desejado de  $\psi$ , o robô necessita realizar movimentos de translação e rotação. Isto significa que o robô não pode girar sobre o próprio eixo. A Figura 9 representa um robô com esta configuração.

### 1.3 Controladores de Posição e de Orientação

A proposta inicial do projeto em questão consiste em realizar uma navegação segura em um ambiente semi-estruturado, utilizando uma abordagem de controle reativa e um sensor de varredura laser. A proposta é fazer com que o robô navegue entre dois pontos no ambiente evitando obstáculos. Sendo que a navegação deve ser realizada de forma estável,

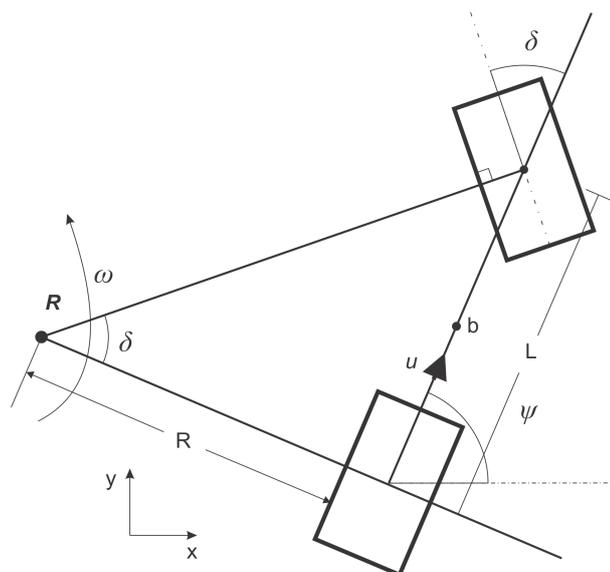


Figura 8: Modelo cinemático de um veículo do tipo *Car-Like* como um modelo bicicleta.

ou seja, o robô deve sair de suas coordenadas de origem, e atingir assintoticamente o alvo desejado e nele ficar sem oscilações. Um controlador projetado segundo este objetivo, dá-se o nome de *Controlador de Posição*. Entretanto, em algumas aplicações é desejável que o robô atinja o alvo com uma orientação pré-definida. A estes controladores dá-se o nome de *Controlador de Postura*, ou ainda *Controlador de Posição e Orientação Final*.

Este trabalho apresenta como uma de suas principais contribuições um controlador de posição para movimentos em marcha-ré, que será tratado na sequência. De acordo com [21] tem-se que, existem duas abordagens possíveis ao se tratar de controle de postura. A primeira delas entende-se por controle de posição e orientação final, onde o robô móvel, durante a navegação, atinge a posição final com a orientação final desejada,



Figura 9: Veículo do tipo *Car-Like* utilizado na realização do trabalho.

isto é, os sinais de controle enviados ao robô resultam em um caminho assintótico que o leva à postura desejada. Durante o projeto deste controlador são levadas em consideração todas as variáveis de estado que definem a postura do robô no ambiente, ou seja,  $[x \ y \ \psi]^T \rightarrow [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$  para  $t \rightarrow \infty$ . A segunda delas, entende-se por controle de posição e de orientação, cuja diferença se encontra no fato do robô atingir a posição desejada e, posteriormente, orientar-se para obter a postura desejada. Nesta abordagem, são projetados dois controladores distintos, um de posição final, que leva  $[x \ y]^T \rightarrow [x_d \ y_d]^T$  para  $t \rightarrow t_c$ , e outro de orientação final, que faz  $\psi \rightarrow \psi_d$  para  $t_c \rightarrow \infty$ , os quais comutam entre si para cumprir a tarefa proposta. O instante de tempo  $t_c$  representa o momento da comutação dos controladores. Este trabalho irá utilizar somente controlador posição que mesmo possuindo menor exigência, atende as necessidades do projeto.

### 1.3.1 Controlador de Posição

O controlador de posição descrito nesta seção é apresentado em [22], é utilizado durante a realização de todo o trabalho, sendo melhor apresentado no Capítulo 2/.

A Figura 10 ilustra os referenciais que irão descrever o controle de posição. A origem do plano absoluto, ou referencial inercial, é representado por  $\langle o \rangle$ . O sistema de coordenadas do robô móvel é dado por  $\langle a \rangle$  e o alvo desejado se encontra referenciado por  $\langle g \rangle$ . Assim, o objetivo do controle de posição é levar o robô móvel,  $\langle a \rangle$ , inicialmente localizado em  $\langle o \rangle$ , até  $\langle g \rangle$ , de forma estável

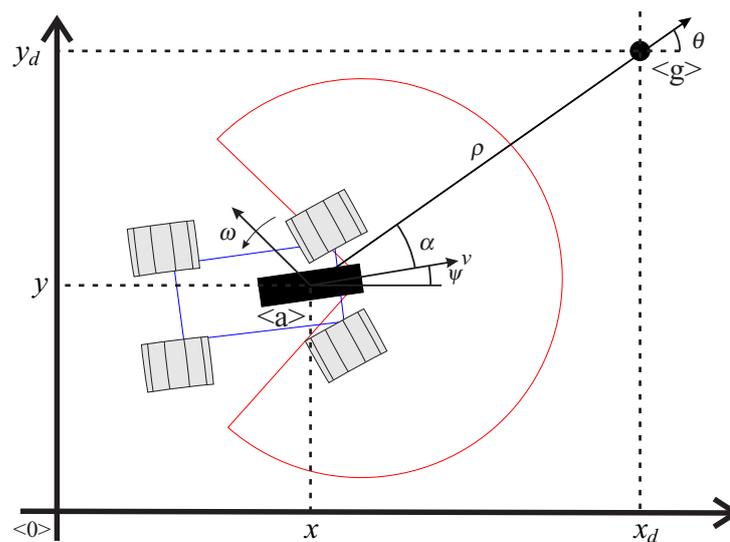


Figura 10: Sistemas de coordenadas para projeto do controlador de posição

Visualizando a Figura 10, os erros de posição podem ser definidos como

$$\{\tilde{x} = x_d - x, \quad \tilde{y} = y_d - y\}, \quad (1.3)$$

onde  $x_d$  e  $y_d$  representam as coordenadas do ponto desejado. Logo, levar os erros de posição a zero equivale dizer atingir o alvo desejado.

### 1.3.2 Controle de manobra para frente

Com o objetivo de controlar as manobras de frente, apenas as equações de posição são consideradas, i.e.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & b \sin \psi \\ \sin \psi & b \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

que também pode ser escrito como  $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{K}\mathbf{u}$ . Neste caso, o controlador deve garantir que o robô alcançará o ponto desejado ou seguir uma trajetória pré-definida, sem se preocupar com a orientação final. Em outras palavras, o objetivo do controle é encontrar um  $\mathbf{u}$  que faz  $\mathbf{h} \rightarrow \mathbf{h}_d$  quando  $t \rightarrow \infty$ , mantendo  $\psi$  limitada.

Considerando que  $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}$  representa o erro de posição, e tomando sua primeira derivada, tem-se que

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (1.5)$$

Propondo agora a função candidata de Lyapunov definida positiva  $V = \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{h}}^T\tilde{\mathbf{h}} > 0$ , tomando sua primeira derivada, e substituindo em (1.5), tem-se que

$$\dot{V} = \tilde{\mathbf{h}}^T\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \tilde{\mathbf{h}}^T(\dot{\mathbf{h}}_d - \mathbf{K}\mathbf{u}). \quad (1.6)$$

O seguinte sinal de controle é adotado  $\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}_1 \tanh \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{h}})$ , com  $\mathbf{K}_1$  e  $\mathbf{K}_2$  matrizes de ganho positivas, sabendo que  $\mathbf{K}$  é inversível. Após substituir em (1.7), tem-se que

$$\dot{V} = -\mathbf{K}_1 \tilde{\mathbf{h}} \tanh \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{h}} < 0. \quad (1.7)$$

Finalmente, conclui-se que  $\dot{V}$  é definido negativo,  $\tilde{\mathbf{h}} \in L_\infty^n \cap L_2^n$ , portanto implica que

$\tilde{\mathbf{h}} \rightarrow \mathbf{0}$  quando  $t \rightarrow \infty$ .

**Nota 2** *É importante mencionar que o propósito do controlador é ser capaz de guiar o robô durante movimentos de ré. No entanto, o controle de orientação das rodas dianteiras não é suave o bastante em todos os casos, degradando assim sua funcionalidade.*

### 1.3.3 Controle de manobra de marcha ré

Com o objetivo de compensar a fraqueza do controlador apresentado na seção anterior, será proposto nessa seção um controlador de manobra de marcha ré.

Primeiramente, adotando o erro de orientação como a diferença entre a orientação do robô e o ponto desejado, isto é,  $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ , e se for assumido que uma manobra para frente deve ser executada toda vez que  $\tilde{\psi}$  é menor que um ângulo de referência  $\tilde{\psi}_s$ , pode-se concluir que a manobra para trás será executada. Em outras palavras, se  $|\tilde{\psi}| \geq \tilde{\psi}_s$ , a estratégia de manobra de marcha ré deverá minimizar o erro de orientação até que  $|\tilde{\psi}| < \tilde{\psi}_s$ , que finalmente seleciona de volta o controle de manobra para frente.

Algumas suposições relevantes devem ser feitas em relação à manobra de marcha ré: a velocidade linear do robô é uma constante negativa e a orientação desejada deve ser constante (portanto  $\dot{\psi}_d = 0$ ). Dada a seguinte função candidata de Lyapunov  $V = \frac{1}{2}\tilde{\psi}^2 > 0$ , e tomando sua primeira derivada, e lembrando a cinemática inversa do robô, tem-se que

$$\dot{V} = \tilde{\psi}\dot{\tilde{\psi}} = -\tilde{\psi}\dot{\psi} = -\tilde{\psi}\omega = -\tilde{\psi}\frac{u}{l}\tan\delta. \quad (1.8)$$

Agora, considerando os sinais de controle  $u = \bar{u}$ , onde  $\bar{u}$  é uma constante negativa, e  $\delta = -k_{\delta 1}\tan^{-1}(k_{\delta 2}\tilde{\psi})$ , tem-se que

$$\dot{V} = -\frac{|\bar{u}|}{l}\tilde{\psi}\tan(k_{\delta 1}\tan^{-1}k_{\delta 2}\tilde{\psi}) < 0. \quad (1.9)$$

Portanto, pode-se concluir que  $\tilde{\psi} \in L_\infty \cap L_2$ , implicando que  $\tilde{\psi} \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ .

**Nota 3** *Durante a navegação, não é necessário que  $\tilde{\psi} \rightarrow 0$ , em contraste  $|\tilde{\psi}| < \tilde{\psi}_s$  é uma condição suficiente para a trocar para o controlador de frente. É importante mencionar que a zona uma zona de histerese deve ser introduzida para reduzir as condições de chaveamento. É considerado que se o controlador de frente está ligado, então  $\tilde{\psi}_s = \pi/3$ , caso contrário  $\tilde{\psi}_s = \pi/4$ .*

## 1.4 Definição do Problema

O Principal problema a ser tratado neste trabalho é a geração de uma estratégia de desvio de obstáculo aplicada em um robô-móvel do tipo *Car-Like*, em um ambiente semi-estruturado, utilizando a arquitetura de controle reativa e um sensor *laser* de varredura. A ideia principal consiste em fazer com que o robô navegue entre obstáculos evitando-os. Um sensor *laser* é usado para fazer com que o robô possa “sentir”o obstáculo mais próximo e verificar se sua presença consiste em uma situação de perigo, (que demanda a necessidade da aplicação da estratégia de desvio ou não), de tal forma que ao executar o desvio o robô consiga chegar até o ponto de destino sem nenhum tipo de colisão. Além disso, o trabalho propõe como principal contribuição, a demonstração de uma justificativa de se utilizar dois tipos diferentes de controladores para a navegação. Nesta abordagem um controlador é utilizado para movimentos para frente e um outro controlador para movimentos em marcha-ré, que são comutados dependendo da situação do ambiente, a qual leva em conta a posição do robô, a posição do ponto desejado e a posição do obstáculo mais próximo.

## 1.5 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é realizar a navegação segura de um robô móvel do tipo *Car-Like*, utilizando uma abordagem reativa de desvio de obstáculo, que deve garantir que o robô além de executar uma navegação segura, possa concluir seus objetivos e chegar ao ponto desejado de forma autônoma e mais eficiente possível. Além destas contribuições, o projeto apresenta como uma de suas principais contribuições, um controlador de marcha-ré, que é comutado pelo algoritmo criado e que tem como objetivo auxiliar a navegação do robô, quando o mesmo se encontra mal posicionado em relação ao seu objetivo e assim diminuir as restrições mecânicas impostas pela arquitetura do veículo. Vale ressaltar que toda a parte sensorial do robô móvel é realizada através de um sensor de varredura laser embarcado no veículo.

## 1.6 Estrutura do Projeto

Este projeto está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução**

Este capítulo descreve, em linhas gerais, o tema do projeto. De forma não aprofundada, o capítulo discute sobre a classificação de robôs móveis quanto à sua anatomia, estrutura de controle e tipo de raciocínio. Adicionalmente, apresenta o sistema sensorial utilizado para realizar a navegação e a forma de funcionamento de seus controladores. Para encerrar o capítulo, são apresentados os problemas a serem tratados no projeto, assim como os objetivos a serem cumpridos.

- **Capítulo 2: Controle de alto e baixo nível**

Este capítulo retrata os diferentes tipos de controladores utilizados no projeto. Explorando suas principais propriedades, e seus princípios de funcionamento. Bem como o funcionamento de seus protocolos de comunicação e de que forma os controladores de baixo- e alto-nível se comunicam entre si.

- **Capítulo 3: Estratégia de Desvio**

Este capítulo descreve, inicialmente, o algoritmo de desvio de obstáculo denominado *Desvio Tangencial*. Em seguida, são demonstrados todas as etapas para o desenvolvimento do algoritmo, demonstrando suas propriedades e seu princípio de funcionamento.

- **Capítulo 4: Resultados e Discussões**

Este capítulo demonstra os resultados de validação do projeto, obtidos tanto de forma experimental, como por exemplo a aplicação do controlador de marcha-ré para a execução de uma navegação mais otimizada, como a demonstração de resultados de simulação que tem como principal objetivo validar a estratégia de desvio de obstáculo adotada no projeto, demonstrando seu funcionamento em quatro casos principais distintos.

- **Capítulo 5: Considerações Finais**

Este capítulo ressalta as conclusões do trabalho, colocando em linhas gerais os objetivos alcançados pelo trabalho, os conhecimentos adquiridos com realização do trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 2 *Controle de Alto-Nível e de Baixo-Nível*

*“Quanto mais nos elevamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar”*

*Friedrich Nietzsche*

Este capítulo irá descrever como os controladores de alto- e baixo-nível são implementados na construção do robô, bem como demonstra a comunicação entre tais controladores. Os controladores do robô foram construídos paralelamente. Desta forma para o controle de baixo-nível, primeiramente realizou-se um estudo sobre o princípio de funcionamento de cada sensor e atuador utilizado na instrumentação do veículo, uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de cinemática e controle de um robô móvel, e finalizando com a construção da placa de circuito impresso, que continha toda a lógica de controle de baixo-nível a ser processada por um PIC 16F867A. Em contrapartida, foi realizado a construção do controlador de alto-nível, iniciando com estudos sobre os dispositivos de comunicação que seriam utilizados para realizar a troca de informações entre os dois controladores. Conjuntamente, criou-se uma plataforma de simulação gráfica, a qual têm a capacidade de reproduzir os movimentos realizados pelo robô-móvel, considerando seu modelo e seus controladores cinemáticos, e mimetizando uma navegação em um ambiente semi-estruturado, a qual se constituiu na plataforma utilizada para a validação da estratégia de desvio de obstáculo proposta.

### 2.1 **Estratégia de Controle de Baixo Nível**

A estratégia de controle de baixo-nível é utilizada para assegurar que os comandos enviados pela estratégia de alto nível sejam executados pelo robô *Car-Like* Tamiya. O sistema lógico central está localizado dentro do microcontrolador 16F876A da empresa

Microchip. Um conjunto de tarefas deve ser realizado pelo microcontrolador, como realizar a leitura do encoder e fornecer a velocidade linear do veículo, conjuntamente o controlador em questão é responsável pelo estabelecimento da comunicação entre os sistemas de baixo e alto nível.

Resumidamente, o sistema de alto nível fornece os sinais de controle do robô (velocidades lineares e angulares), enquanto o sistema de baixo-nível recebe esses sinais a fim de orientar e acionar o motor do robô móvel. A velocidade linear média do veículo é obtida por um encoder instalado em uma das rodas traseiras, que entregam informações e uma período de amostragem fixo de 100ms.

A fim de alcançar a velocidade linear desejada, fornecida pelo controlador de alto-nível, um controlador PI é implementado para acionar o motor, cuja velocidade linear esta sendo lida pelo encoder como citado anteriormente. Por outro lado, não há um controlador implementado para o servomotor, uma vez que ele possui um controlador próprio embarcado para posiciona-lo. A Figura 11 ilustra ambas estratégias de controle, onde  $SP_m$  e  $SP_s$  são o motor e o *set-point* de alto-nível do servomotor respectivamente.

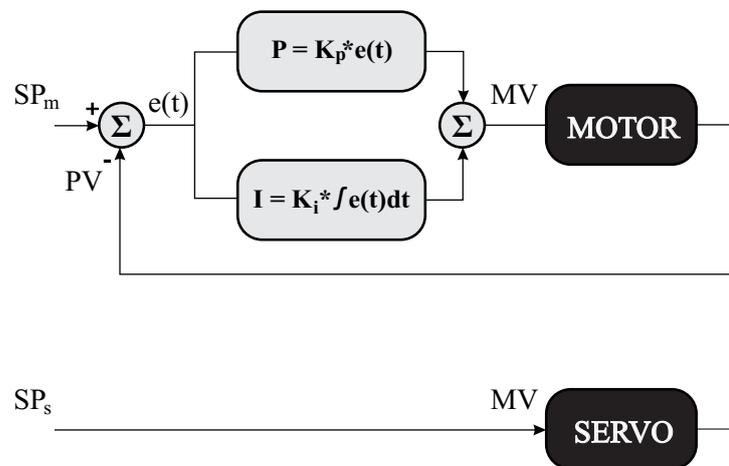


Figura 11: Estrutura do controlador de baixo-nível.

## 2.2 Sistema de comunicação entre baixo- e alto-nível

Para realizar a comunicação entre ambos sistemas, uma interface bidirecional USB, com 9600 bps, foi implementada. O sistema de alto-nível envia velocidades lineares e angulares em uma direção, e o sistema de baixo-nível, além de receber essas informações, retorna as medidas dos encoders para o controlador cinemático. É importante mencionar que um pacote de dados de 8-bits é usado para enviar e receber informações entre os níveis. Porém, existem diferenças entre a interpretação e envio de dados.

## 2.3 Protocolo de comunicação do alto-nível para baixo-nível

Como demonstra a Figura 12, o bit mais significativo  $L$  indica o motor a ser atuado. O bit seguinte  $D$ , indica o sentido de rotação das rodas. Deve-se observar que  $D$  não é usado se o servomotor é selecionado e chamado como  $L$ . Os outros seis bits restantes correspondem ao valor absoluto de *set-point* enviado pelos controladores de alto-nível.



Figura 12: Estrutura do pacote de dados recebido pelo sistema de baixo-nível do robô.

A velocidade linear desejada é definida por

$$u_d = \frac{u_t \cdot SP}{2^6 - 1} \quad (2.1)$$

Onde  $u_t$  é a velocidade máxima do veículo, neste trabalho assumida como 1m/s.

Antes de ser enviada para o controlador de baixo nível,  $u_d$  é convertido em um PWM (*Pulse Width Modulation*), com uma frequência fixa de 2KHz, acionando um sistema totalmente integrado que utiliza uma ponte-H para acionar o motor, da por

$$PWM_m = \frac{u_d}{u_{max}} \cdot 50\%, \quad (2.2)$$

Onde  $u_{max}$  é a velocidade linear máxima desenvolvida com o PWM atuando em 100%.

Finalmente, o pacote que contém a orientação das rodas dianteiras assume neste caso que,  $|\delta_d| \leq \delta_m = \frac{\pi}{9} rad$ , onde  $\delta_m$  é o ângulo que produz o menor raio de curvatura, imposto pela estrutura mecânica (limitações físicas) de um veículo do tipo *Car-Like*. A Figura 13 ilustra a orientação das rodas frontais do veículo Tamiya. Em termos de resolução,  $\delta_d$  é dado por

$$\delta_d = \frac{2 \cdot \delta_m \cdot SP}{2^6 - 2}. \quad (2.3)$$

A comunicação entre o microcontrolador e o servomotor usa um PWM com uma frequência fixa de 50Hz. O ciclo de trabalho (*duty cycle*)  $t_s$  varia em um intervalo de [1.1,

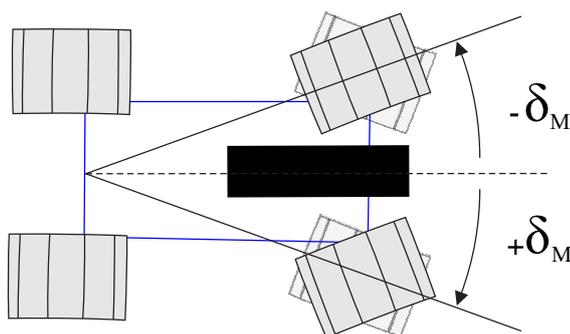


Figura 13: Orientação máxima desenvolvida pelo robô.

1.9]ms. A posição central do servomotor é alcançada com 1,5ms. Em outras palavras, o tempo em estado alto de um PWM é obtido, em milissegundos, por

$$t_s = \frac{1.9 - 1.1}{\pi} \cdot (\delta_d + \pi/2) + 1.1. \quad (2.4)$$

## 2.4 Protocolo de comunicação do baixo-nível para alto-nível

A velocidade linear do robô *Car-Like* é obtida por um sensor de efeito hall integrado, montado na roda traseira direita, que proporciona 1280 pulsos por revolução. Tal velocidade é enviada de volta para o sistema de alto-nível de acordo com protocolo demonstrado na Figura 14.

O bit mais significativo  $D$ , indica o sentido de giro da roda. Os bits restantes correspondem ao encapsulamento dos números de pulsos dados pelo encoder com uma frequência fixa de  $\frac{1}{f_s}$ . Assim,

$$N = \frac{(2^7 - 1) \cdot P \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{1280 \cdot f_s \cdot u_{\max}}, \quad (2.5)$$

Onde  $R$  é o raio da roda. Uma vez transmitida para o sistema de alto-nível, a velocidade linear corrente é dada por

$$u = \frac{u_{\max} \cdot N}{(2^7 - 1)}. \quad (2.6)$$

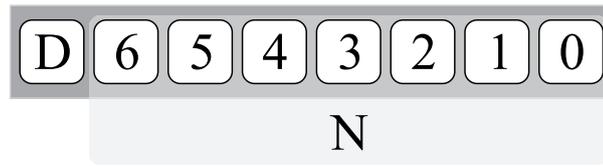


Figura 14: Estrutura do pacote de dados recebido pelo sistema de alto nível do robô.

## 2.5 Estratégia de Controle de Alto Nível e Controlador de Marcha-Ré

Tomando como base a Figura 10 e tomando que  $\mathbf{h} = [x \ y]^T$  é o vetor contendo o ponto de interesse (ponto de controle), que define a posição do robô em relação ao referencial inicial,  $\psi$  é a orientação,  $l$  é o seu comprimento, e  $b$  é a distância perpendicular de  $\mathbf{h}$  ao meio do eixo que liga as rodas de tração. Os sinais de controle,  $u$  e  $\delta$  são, respectivamente, a velocidade linear e a orientação da roda dianteira. Note também que  $\omega$  indica a velocidade angular do robô.

Sabendo que o robô Tamiya possui a mesma referencia angular das rodas da frente, diferentemente dos robôs convencionais Ackermann, esses modelos são reduzidos ao modelo bicicleta como demonstrado na Figura 15 e dado por:

$$\dot{x} = u \cos \psi - b\omega \sin \psi \quad (2.7)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + b\omega \cos \psi \quad (2.8)$$

$$\dot{\psi} = \omega = \frac{u}{l} \tan \delta, \quad (2.9)$$

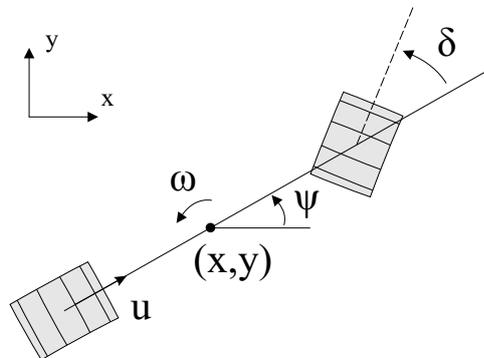


Figura 15: Modelo do tipo bicicleta utilizado.

## 3 *Desvio de Obstáculo*

*“Não existe um caminho para a felicidade.  
A felicidade é o caminho”*

*Mahatma Gandhi*

Sabe-se que durante a navegação de um robô móvel que realiza procura de um ponto alvo em um ambiente semi-estruturado, há que se considerar a hipótese de existência de obstáculos em sua rota de busca. Portanto, abordar estratégias de evasão capazes de evitar possíveis colisões é essencial para uma navegação segura. Nesse sentido há a necessidade de se criar um algoritmo com estas características, cujo principal objetivo é assegurar a integridade do robô e de seu ambiente de navegação.

### 3.1 *Desvio Tangencial*

Esta seção apresenta a estratégia de evasão denominada Desvio Tangencial. Seu fundamento é evitar obstáculos executando trajetórias tangenciais a estes. Na presença de obstáculos que obstruam a passagem e que exijam uma mudança de rota do robô móvel em sua busca pelo ponto de destino (alvo real), é gerado um alvo virtual temporário (ponto desejado temporário), que passa a ser o novo objetivo a ser atingido pelo veículo. Uma vez que os sensores externos não detectem mais a presença de obstáculos nas proximidades, o alvo real é retomado como objetivo de controle, e o robô móvel reinicia sua busca por ela. A Figura 16 ilustra a ideia da técnica de desvio tangencial.

De acordo com [21], o ângulo de rotação do alvo real para a criação do alvo virtual,  $\gamma$ , é calculado com base no conjunto de medidas provenientes do sensor de varredura laser a bordo do robô móvel. Assim, com a posse destas medidas, o sistema verifica se há alguma medida de distância entre robô e o ambiente que seja inferior a uma distância segura predefinida, ou seja,  $d_{obs} < d_{min}$ . Caso ocorra essa situação, é tomado o ângulo  $\beta$

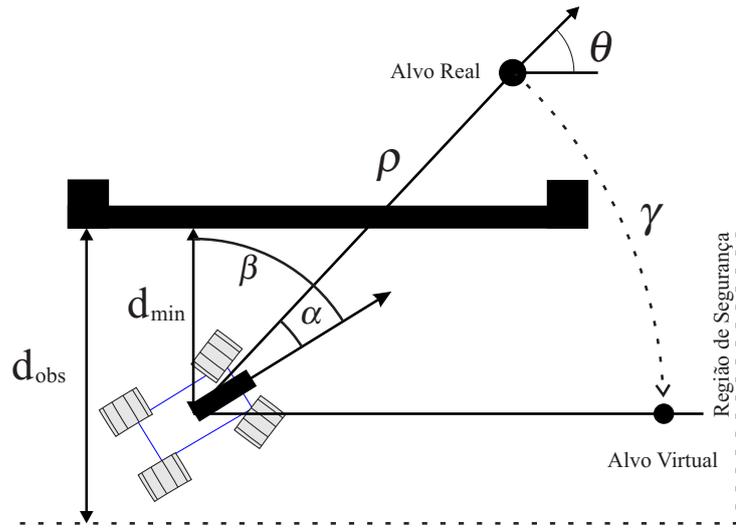


Figura 16: Desvio Tangencial - Determinação do ângulo de rotação.

correspondente à medida mínima de distância ao obstáculo, tendo em vista a orientação do robô móvel.

Durante a realização das manobras de evasão, a orientação do robô será paralela à tangente da fronteira do obstáculo, caracterizando, portanto, o desvio tangencial. Deve-se notar que o ângulo  $\gamma$  é negativo na Figura 16, o que neste caso implica em uma situação, onde a rotação do alvo real deve ocorrer em sentido anti-horário, de modo que o alvo virtual se localize à direita do robô móvel, considerando seu eixo de translação.

Lembrando que a navegação do robô móvel ocorre no plano bi-dimensional  $\mathbf{XY}$ , o ângulo  $\gamma$  é utilizado na matriz de rotação.

$$\mathbf{x}_v = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \mathbf{x}_r \quad (3.1)$$

onde  $\mathbf{x}_r$  e  $\mathbf{x}_v$  definem a posição do alvo real (desejado) e a posição do alvo virtual, respectivamente. Logo, a Equação 3.1 ilustra a rotação do alvo real para sua nova posição  $\mathbf{x}_v$ , dando origem ao alvo virtual, conforme mostrado na Figura 16. Na ausência de obstáculos, não há modificação na posição do alvo real. Isto equivale a dizer que  $\gamma = 0^\circ$ , e o robô móvel prossegue em sua busca pelo alvo real.

## 3.2 A Estratégia de Desvio Proposta

Os controladores apresentados no Capítulo 1 são capazes de guiar o robô em um ambiente com espaço livre até que o mesmo alcance sua posição desejada. Se a rota for obstruída por alguma razão, uma estratégia de desvio deve ser acionada. A estratégia aqui proposta consiste em rotacionar o ponto desejado de uma forma conveniente, a fim de gerar uma posição temporária a ser alcançada livre de colisões, de forma similar ao desvio tangencial apresentado na seção 3.1 [21].

A prioridade da estratégia de desvio de obstáculo é maior do que o controle de movimentos em marcha-ré. Assim, mesmo se o robô perceber a necessidade de executar uma manobra em marcha-ré ( $|\delta| > \delta_s$ ) e houver conjuntamente uma situação de possível colisão, o algoritmo faz com que as ações de controle provenientes do controlador de marcha-ré sejam ignoradas e a posição temporária é definida pelo controlador de movimentos para frente. Neste caso, o robô executa um movimento em marcha-ré utilizando o controlador de movimentos para a frente, que neste caso é realizado de uma forma não otimizada.

A Figura 17, ilustra a principal ideia da estratégia de desvio de obstáculo proposta. A presença de um obstáculo no caminho do robô é “sentida” pelo sensor de proximidade, nesse caso o sensor laser embarcado. Sempre que qualquer distância encontrada pelo dispositivo seja menor do que  $d_{min}$  (a mínima distância estabelecida para uma navegação segura), é assumido a existência de um obstáculo e os parâmetros mostrados na Figura 17 são computados. As variáveis  $d_a$ ,  $d_b$  e  $d_c$  representam respectivamente, a distância entre o robô e o ponto desejado, a distância entre o robô e o obstáculo mais próximo, e a distância entre o ponto desejado e o obstáculo mais próximo. O ângulo  $\beta$  é calculado através das leis dos cossenos, i.e.,

$$\beta = \cos^{-1} \frac{d_a^2 - d_b^2 - d_c^2}{2 \cdot d_c \cdot d_b} \quad (3.2)$$

Mesmo quando a distância mais próxima de um obstáculo é menor do que  $d_{min}$ , essa condição não é suficiente para que a estratégia de desvio de obstáculo seja executada. É também necessário observar  $\beta$ , se  $\beta > \pi/2$ , a estratégia de desvio é acionada, caso contrário é assumido que o robô já passou pelo obstáculo.

Após detectar uma situação de colisão, é necessário que o robô decida a forma que executará o desvio, i.e., virar para a esquerda ou para a direita, tendo em vista que uma das principais preocupações existentes na criação da estratégia de desvio, consiste além

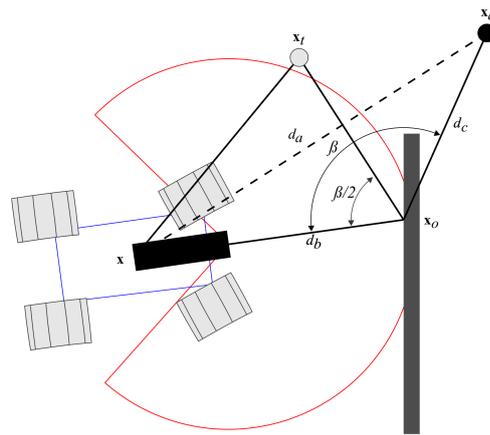


Figura 17: Encontrando a menor distância para obstáculo e calculando o ângulo  $\beta$ .

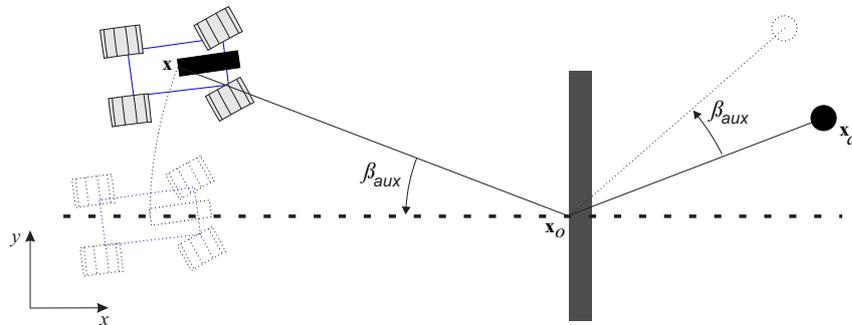


Figura 18: Decidindo a maneira de alcançar o ponto desejado.

de garantir uma navegação segura do robô móvel, garantir com que o mesmo execute a estratégia de uma forma mais eficiente possível. A Figura 18 demonstra como esse processo ocorre.

O ângulo  $\beta_{aux}$  entre o obstáculo e o robô é calculado. Em seguida, este ângulo é usado para rotacionar temporariamente a posição do robô e a posição desejada. Depois de rotacionar, se a ordenada do ponto desejado for maior do que a ordenada do obstáculo mais próximo, o robô deve virar a esquerda, caso contrário, o movimento escolhido é para a direita.

Nas figuras 19(a) e 19(b), pode-se observar uma melhor explicação sobre a estratégia utilizada, demonstrando como a análise das ordenadas dos objetos após a rotação deles em relação ao robô é realizada.

De tal forma que a situação A, sempre indica a condição inicial antes da tomada de decisão de uma ação de desvio, e caminho tracejado indica qual a opção de desvio que será adotada, por outro lado, a situação B indica a situação após o rotacionamento do objeto e do ponto desejado em  $\beta^\circ$  em torno do robô, demonstrando assim como é realizada a análise das ordenadas.

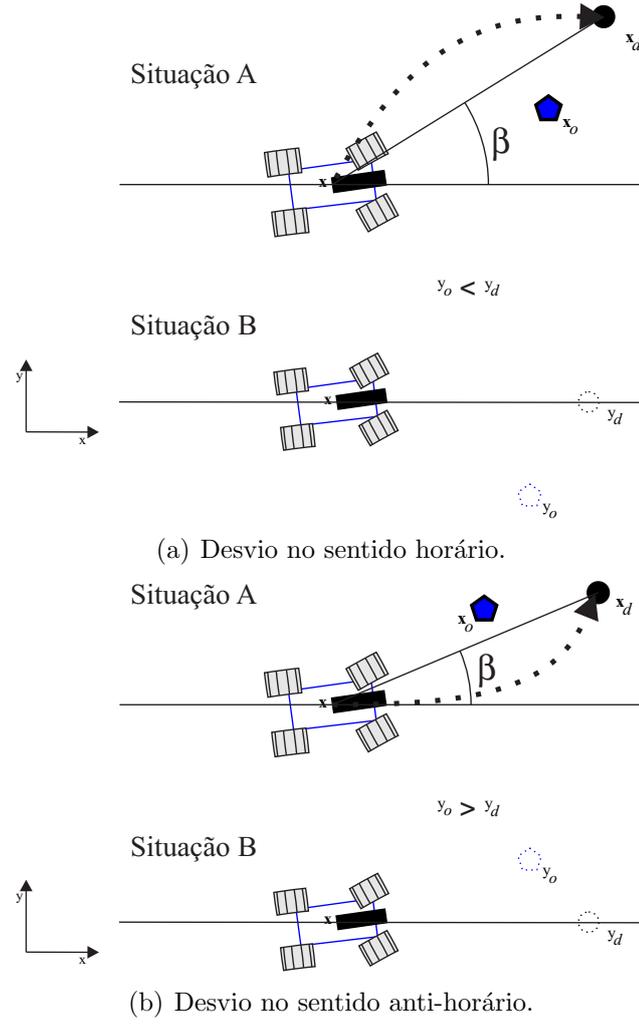


Figura 19: Demonstração da estratégia de melhor escolha de caminho de desvio.

Finalmente, a posição temporária é definida como

$$\mathbf{x}_t = \alpha \begin{bmatrix} \cos \bar{\beta} & -\sin \bar{\beta} \\ \sin \bar{\beta} & \cos \bar{\beta} \end{bmatrix} (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_o) + \mathbf{x}_o, \quad (3.3)$$

onde  $\mathbf{x}_o$  é a coordenada do ponto correspondente ao obstáculo mais próximo, e  $\bar{\beta}$  é dado por:

$$\bar{\beta} = \begin{cases} \frac{\beta}{2}, & \text{se o robô deve virar para a esquerda,} \\ -\frac{\beta}{2}, & \text{c.c.} \end{cases}$$

e  $\alpha = \frac{1}{1 + d_b}$  é o fator de proximidade.

## 4 *Resultados e Simulações*

*“A persistência é o menor caminho do êxito”*

*Charles Chaplin*

A navegação proposta foi utilizada para criar inúmeras simulações e experimentos reais, a fim de validar a estratégia de navegação do robô na busca de seu objetivo considerando movimentos para frente e em marcha-ré utilizando a estratégia de desvio de obstáculo descrita.

Os experimentos reais foram realizados utilizando o robô *Car-Like* Tamiya como demonstrado na Figura 9. Por sua vez, o desempenho da estratégia de desvio de obstáculo foi realizada através de simulações computacionais. Em cada caso, o sensor *laser* Hokuyo é simulado de forma que abranja 240° durante o processo de simulação, cobrindo a parte frontal do veículo em uma faixa de -120° a 120°.

### 4.1 **Experimento Real com Missão de Seguimento de Trajetória**

Durante o experimento real demonstrado nesta seção, o robô deve seguir uma trajetória definida por uma circunferência, com um valor de raio que era modificado dentro de um intervalo de 150s. Em outras palavras, a trajetória desejada é

$$\{x_d = r \cos wt, y_d = r \sin wt\},$$

com  $w = 0.25\text{rad/s}$  e  $r$  trocando entre  $r_i = 1.5$  e  $r_s = 2.25$  a cada 150s.

A Figura 20 ilustra o rastro da trajetória realizada pelo robô durante o processo de navegação. Deve-se notar que o robô inicia o teste no centro da circunferência e começa a realizar o seguimento da trajetória pré-definida e mantendo a tentativa de seguir o caminho

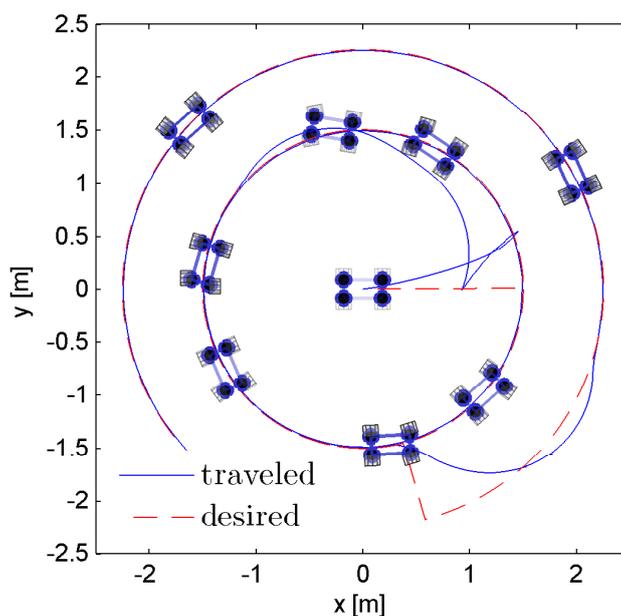


Figura 20: Trajetória Realizada pelo Robô.

mesmo quando ocorre a mudança do raio da circunferência. A trajetória executada pelo robô é demonstrada pela segmento contínuo, enquanto a trajetória desejada é definida pelo segmento tracejado.

Os erros de trajetória são apresentados na Figura 21, onde se pode notar que  $\mathbf{h}$  tende a zero durante o experimento. Pode-se observar também que esses valores aumentam quando há uma mudança no valor do raio da trajetória, conforme esperado, tendo em vista que com a mudança de raio, o ponto desejado se encontra a uma distância maior do robô, exigindo assim uma ação de controle mais significativa. Entretanto, a proposta do controlador é capaz de fazer com que esse valor decresça, assim como demonstrado na análise de estabilidade.

Finalmente, a Figura 22 demonstra os sinais de controle enviados e realizados pelo robô, para o cumprimento das tarefas designadas.

## 4.2 Resultados de simulação considerando a estratégia de desvio de obstáculo.

Para validar à estratégia de desvio de obstáculo proposta, foi desenvolvido e utilizado um ambiente de simulação gráfica, capaz de emular os movimentos de um robô móvel do tipo *Car-Like*, de acordo com seu modelo e controlador cinemático descritos no capítulo

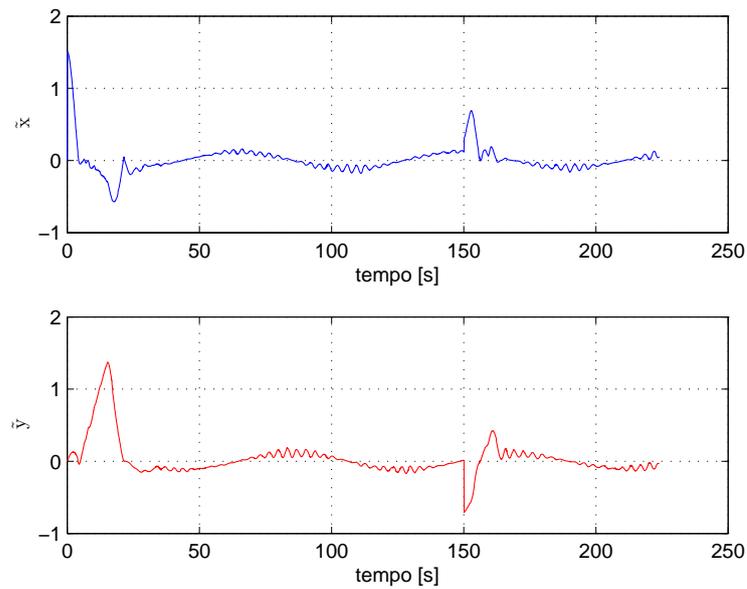


Figura 21: Erros no seguimento de trajetória.

1. A fim de verificar se o robô atende as expectativas, diferentes tipos de situações foram simulados, de tal forma que o desvio de obstáculo seja executado de uma forma específica em cada caso. Todas estas simulações são tratadas abaixo para uma melhor análise. Algumas considerações foram realizadas durante as simulações, a fim de realizar um melhor estudo, são elas:

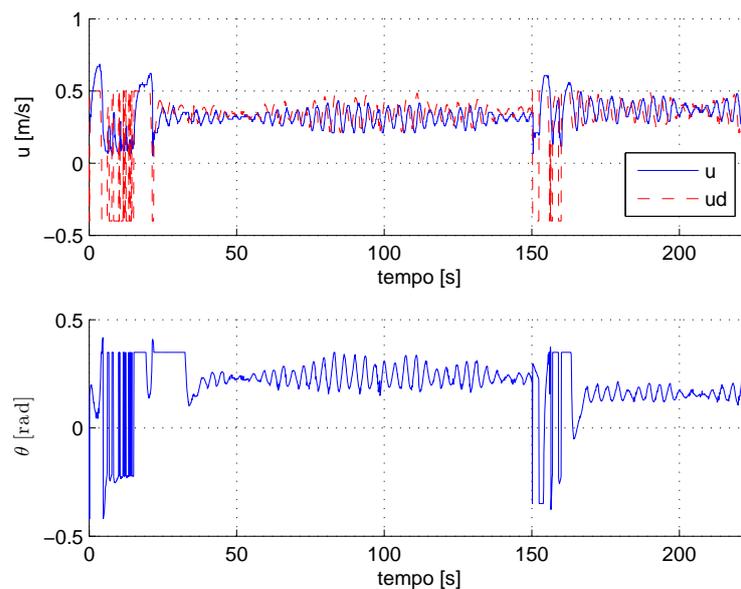


Figura 22: Sinais de Controle.

- Os obstáculos utilizados na simulação são fixos e bem definidos, a fim de melhor representar a estrutura de um ambiente.
- A rota desenvolvida pelo robô é demonstrada em um intervalo fixo de 5 segundos.
- A linha contínua representa o caminho quando o robô e obstáculos estão em um mesmo ambiente, enquanto a linha tracejada representa o caminho do robô em um ambiente livre, ou seja, sem a presença de obstáculos.

A fim de simular as principais situações que acontecem dentro de um ambiente real, quatro casos são tratados a seguir.

#### 4.2.1 Caso 1: Manobras para Frente

Esta primeira situação demonstra o desempenho do robô com a proposta de manobras de desvio de obstáculos utilizando somente o controlador para movimento para frente. O principal objetivo é demonstrar que a tarefa de desvio é realizada conforme as expectativas, ou seja, demonstrar a diferença de navegação causada pela implementação do desvio de obstáculo, ocasionando uma navegação segura. A validação do algoritmo de desvio pode ser observado na Figura 23, onde se pode visualizar as diferenças de trajetória e notar que uma ação de desvio foi realizada com sucesso.

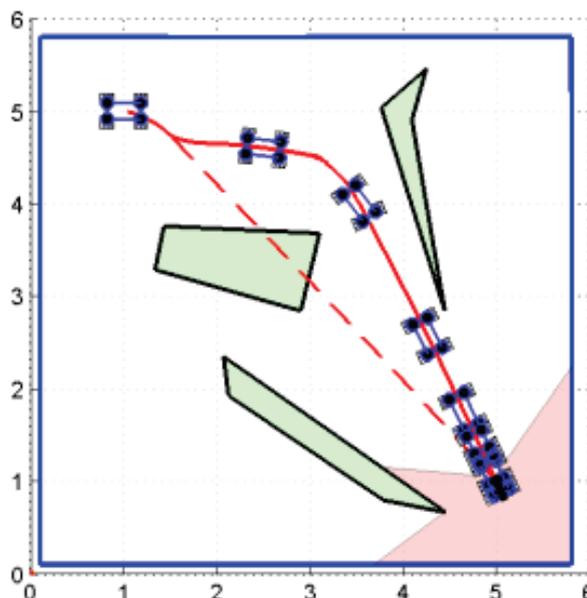


Figura 23: Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo utilizando somente movimentos para frente.

### 4.2.2 Caso 2: Manobra em Marcha-Ré Sem a Presença de Obstáculos Próximo ao Ponto de Partida

Nesta situação como descrita anteriormente, para  $\beta < 45^\circ$  um controle de marcha-ré é requerido. Deve-se ressaltar que o controlador de marcha-ré apenas executa uma manobra que alinha o robô, de maneira que o mesmo seja capaz de chegar até o local desejado utilizando o controlador de manobras para frente, e vale ressaltar que o fato do veículo andar para trás utilizando o controlador de movimentos para frente, não é otimizado conforme demonstrado especificamente no Caso 4. Sendo assim, o robô começa a manobra com o controlador de marcha-ré até que alcance a condição de comutação dos controladores, caso isto ocorra o controlador de movimentos para frente passa a assumir o controle da navegação. A Figura 24, demonstra essa situação. Deve-se ainda notar que neste caso, durante todo o processo sobre atuação do controlador de marcha-ré em nenhum momento a estratégia de desvio de obstáculo é utilizada.

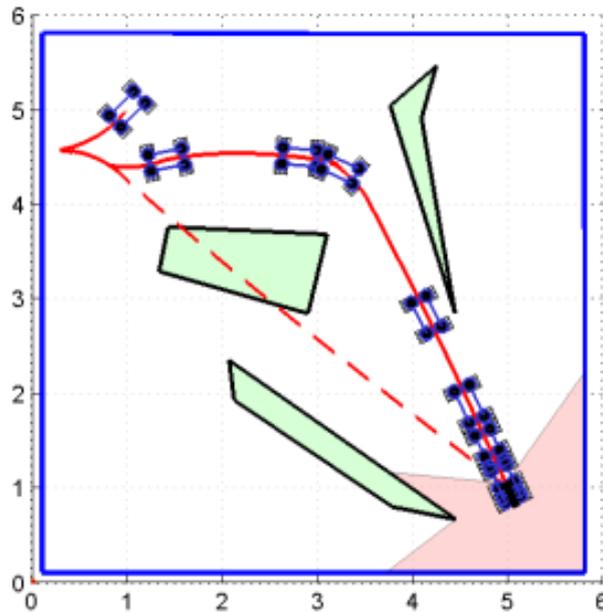


Figura 24: Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo na ausência de obstáculos usando o controlador de marcha-ré.

### 4.2.3 Caso 3: Condição de Marcha-Ré Com a Presença de Obstáculos Próximos Iniciais

Nesta situação, o ângulo  $\beta$  existente entre o robô e o ponto desejado, indica uma situação em que é necessário o uso do controlador de marcha-ré. Assim, o robô inicia sua ação de controle tentando realizar a manobra solicitada pelo controlador de alto-nível,

contudo tal ação não pode ser realizada devido a presença de um obstáculo próximo ao veículo (distância menor do que  $d_{min}$ ). Portanto, o robô primeiramente executa a ação de desvio, utilizando o controlador de manobras para frente, até que a manobra de marcha-ré possa ser executada sem o perigo de uma colisão. Isso se dá pela prioridade criada, impondo que a principal preocupação do robô é a manutenção de sua integridade e do ambiente. Mesmo que as condições do ambiente a sua volta, indiquem uma ação de controle que deve ser desenvolvida pelo controlador de marcha-ré, o veículo não executa a ação até que o mesmo tenha certeza de que possui espaço e condições suficiente para realizar a manobra sem perigo algum de colisão. A Figura 25 demonstra essa abordagem.

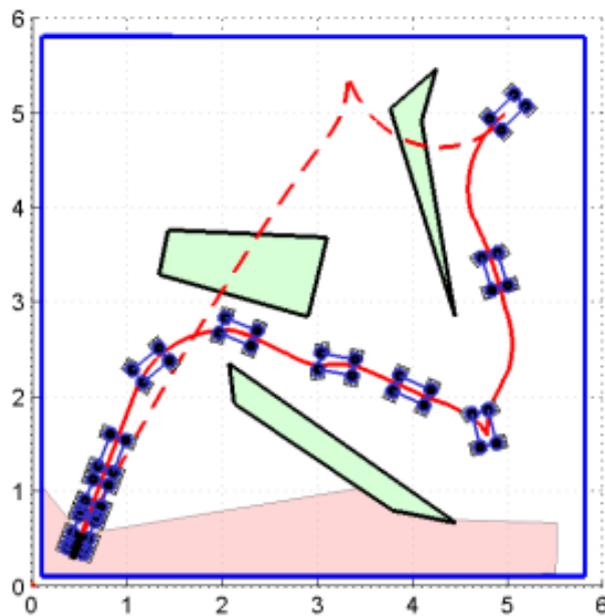


Figura 25: Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo na presença de obstáculos usando o controlador de marcha-ré.

#### 4.2.4 Caso 4: Desvio de Obstáculo Sem a Utilização do Controlador de Marcha-Ré

Esta simulação tem como principal intuito justificar a importância da implementação e utilização de um controlador marcha-ré. Como demonstrado na Figura 26, o robô não executa um movimento otimizado na realização da manobra, tendo uma grande chance de colidir com o obstáculo. Analisando a figura, é possível perceber que a colisão ocorre, primeiramente, pela realização de um movimento não otimizado que dificulta a possibilidade de se executar uma manobra de desvio, e principalmente pela limitação do sensor *laser*, tendo em vista que como o robô se movimenta somente para trás, a zona “cega” do sensor não é capaz de detectar os obstáculos próximos com eficiência.

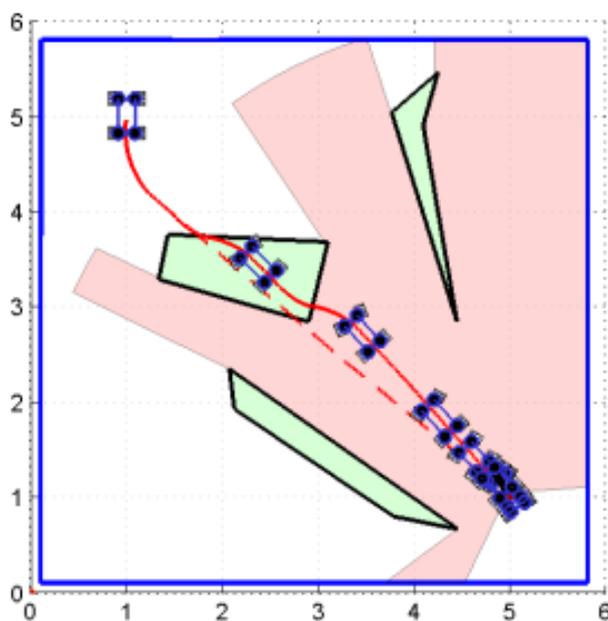


Figura 26: Resultado de simulação considerando um desvio de obstáculo sem a utilização do controlador de marcha-ré.

## 4.3 Discussões

Nessa seção será discutido algumas discussões que podem ser levadas em conta na realização da estratégia de desvio. Ressaltando primeiramente que o chaveamento do controlador é realizado por um controlador global, que tem como principal objetivo tentar manter a troca entre os controladores mais estável, e a forma encontrada para realizar isso foi feita através de um controle global por histerese, que consiste basicamente em estipular valores máximos e mínimos, para que as tomadas de ação que levam a escolha do controlador de marcha-ré ou de manobras para frente sejam executadas.

Da mesma maneira, vale ressaltar que o controlador de posição implementado no projeto, garante apenas a posição final desejada e não determina assim uma orientação final.

## 5 *Considerações Finais*

*“O mundo é como um espelho que devolve a cada pessoa o reflexo de seus próprios pensamentos. A maneira como você encara a vida é que faz toda diferença.”*

*Luís Fernando Veríssimo*

Este trabalho apresenta a arquitetura de controle de um robô móvel do tipo *Car-Like*. Controladores de baixo- e alto-nível são propostos para acionar os motores e atuadores e guiar a navegação, respectivamente. A principal contribuição é demonstrar a necessidade de um controlador de marcha-ré, quando o veículo em questão está mal orientado em relação a seu objetivo. Uma possível solução é proposta utilizando um algoritmo que comuta os controladores de marcha-ré e de movimentos para frente, analisando a situação do robô e do ambiente, a fim de diminuir os efeitos das limitações de movimento do robô, que são demonstradas através de simulações e análises experimentais. Em adição, uma estratégia reativa de desvio de obstáculo é proposta para prover o veículo de uma navegação livre e segura de colisões. Assim, a proposta aqui definida é realizar uma solução que provenha uma navegação segura de um robô móvel do tipo *Car-Like*, dentro de um ambiente semi-estruturado.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a continuação do projeto aqui implementado, são colocados algumas sugestões de trabalhos futuros, visando possíveis e significativas melhorias.

- Obtenção de resultados experimentais para validação da estratégia de desvio de obstáculo.

- Elaboração de uma estratégia adicional agregada ao desvio de obstáculo, onde há uma análise do obstáculo mais próximo e do segundo obstáculo mais próximo, considerando que quando a distância entre esses dois obstáculos for menor do que o tamanho do robô, o mesmo deve agrupar os dois obstáculos dentro de uma elipse, que possui como focos os limites do obstáculos. Após esse agrupamento o veículo deve executar o desvio da elipse como um todo.
- Aplicação da estratégia de desvio para competição de futebol de robôs autônomos da categoria F-180, que possui como principal diferença uma mudança de modelo cinemático, que nesta competição utiliza de robôs com estrutura omnidirecional.
- Melhorias na estratégia de desvio de obstáculo tangencial existente, para que o algoritmo seja capaz de reconhecer e desviar de objetos específicos, como caminhos côncavos ou com presença de quinas.

## *Referências*

- [1] BRANDAO, A. et al. Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle-avoidance. Málaga, Espanha, 2009.
- [2] SISTO, M.; GU, D. A fuzzy leader-follower approach to formation control of multiple mobile robots. Beijin, China, p. 2515–2520, 2006.
- [3] CRUZ, C. de la; CARELLI, R. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots. Paris, França, p. 3880–3885, 2006.
- [4] GAVA, C. et al. Nonlinear control techniques and omnidirectional vision for team formation on cooperative robotics. Roma, Itália, p. 2409–2414, 2007.
- [5] LAVALLE, S. *Planning Algorithms*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.
- [6] KUC, R.; BARSHAN, B. Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar. p. 1422–1426, 1989.
- [7] ELFES, A. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Journal of Robotic and Automation*, p. 249–265, 1987.
- [8] KHATIB, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, p. 90–98, 1986.
- [9] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. p. 1179–1187, 1989.
- [10] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. *The IEEE Journal of Robotics and Automation*, p. 278–288, 1991.
- [11] MINGUEZ, J.; MONTANO, L. Nearness diagram (nd) navigation: Collision avoidance in troublesome scenarios. p. 45–49, 2004.
- [12] FERREIRA, A.; SARCINELLI-FILHO, M.; BASTOS-FILHO, T. A new approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: Tangential escape. Barcelona, Spain, p. 341–346, 2005.
- [13] NAJMAEI, N.; KERMANI, M. Prediction-based reactive control strategy for human-robot interactions. p. 3434 –3439, May 2010. ISSN 1050-4729.
- [14] ZHONG, B.; ZHANG, Q.; YANG, Y. Real time reactive strategies based on potential fields for robot soccer. v. 2, p. 1052 – 1057 vol.2, October 2003.
- [15] BONIN-FONT, F.; ORTIZ, A. Building a qualitative local occupancy grid in a new vision-based reactive navigation strategy for mobile robots. p. 1 –4, September 2009. ISSN 1946-0759.

- 
- [16] TRAN, T. et al. Sliding mode-pid approach for robust low-level control of a ugv. p. 672 –677, October 2006.
- [17] GHITA, N.; KLOETZER, M.; PASTRAVANU, O. Probabilistic car-like robot path planning from temporal logic specifications. p. 1 –6, October 2011.
- [18] TEPEPA, B. Brisea ando; PALACIOS, E.; RODRIGUEZ-CORTES, H. Path following through reference points for a car-like mobile robot. p. 1 –6, October 2011.
- [19] LINI, G.; PIAZZI, A.; CONSOLINI, L. Multi-optimization of  $n^3$ -splines for autonomous parking. p. 6367 –6372, December 2011. ISSN 0743-1546.
- [20] PEREIRA, F. *Navegação e Desvio de Obstáculo Usando um Robô Móvel Dotado de Varredura Laser. Dissertação(Mestrado)*. 2006.
- [21] BRANDAO, S. *Controle Descentralizado com Desvio de Obstáculos para Uma Formação Líder-Seguidor de Robôs Móveis. Dissertação(Mestrado)*. 2008.
- [22] SECCHI, H.; CARELLI, R.; MUT, V. An experience on stable control of mobile robots. Buenos Aires, Argentina, p. 379–385, 2003.