

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

AUGUSTO FRANCISCO BIONDINI

**SEGUIMENTO DE TRAJETÓRIA COM DESVIO TANGENCIAL DE
OBSTÁCULOS**

VIÇOSA
2018

AUGUSTO FRANCISCO BIONDINI

**SEGUIMENTO DE TRAJETÓRIA COM DESVIO TANGENCIAL DE
OBSTÁCULOS**

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. Dr. Alexandre S. Brandão.

VIÇOSA
2018

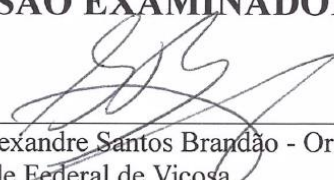
AUGUSTO FRANCISCO BIONDINI

**SEGUIMENTO DE TRAJETÓRIA COM DESVIO TANGENCIAL
DE OBSTÁCULOS**

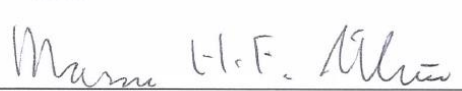
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 09 de julho de 2018.


COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Marcos Henrique Fonseca Ribeiro - Membro
Universidade Federal de Viçosa



M.Sc. Guilherme Carlos Rodrigues de Oliveira - Membro
Universidade Federal de Viçosa

"Homens realmente grandes, não nascem grandes, tornam-se grandes."

(Don Vito Corleone)

*Dedico esse trabalho à minha família, pelo suporte incondicional durante todos
esses anos de graduação.*

Agradecimentos

O autor agradece a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa (DEL UFV) pela estrutura e equipamentos disponibilizados para a realização desse experimento. Em especial, agradece ao professor orientador desse trabalho, Professor Dr. Alexandre S. Brandão, pelo suporte e conhecimento transmitidos durante esse trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta um algoritmo para segmento de trajetória com desvio de obstáculos. Para realizar essa tarefa foi adotada a estratégia de desvio tangencial, amplamente discutida na literatura. Foi utilizado um robô do tipo unicycle dotado de sensores ultrasônicos, responsáveis por detectar os obstáculos presentes na trajetória a ser percorrida. Quando detectado um obstáculo na trajetória, o robô segue um caminho temporário tangenciando-o, retornando à trajetória original pré-determinada após o desvio. Resultados experimentais são apresentados mostrando a eficiência da estratégia aplicada e as trajetórias ideais e reais percorrida pelo robô.

Abstract

This paper presents a path follower mobile autonomous robot with obstacle avoidance. To accomplish this task the tangential scape strategy was adopted, such strategy is widely discussed in the literature. To perform the experiments, a unicycle type robot with ultrasonic sensors was used, those sensors are responsible for detecting obstacles in the path that the robot must follow. When those obstacles are detected, the robot must create a tangential path to avoid the obstacle, once the obstacle is over, the robot must return to the original path. Experimental results are presented showing the efficiency of the strategy applied and the ideal and real trajectory travelled by the robot.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivo	15
1.2	Organização	15
2	Materiais e Métodos	16
2.1	Controlador.....	16
2.1.1	Modelo cinemático do robô uniclo com deslocamento “a”.....	16
2.1.2	Navegação para um ponto desejado.	17
2.2	Desvio tangencial	19
3	Resultados e Discussões.....	23
4	Conclusões.....	30
	Referências Bibliográficas	31

Lista de Figuras

Figura 1 – Robô Shakey	12
Figura 2 – Pioneer 3Dx.....	14
Figura 3 - Posição e orientação do robô móvel.	16
Figura 4 - Postura do robô móvel em relação à um ponto X_d	17
Figura 5 - Relação entre a posição do robô e ângulo α	18
Figura 6 - Obtenção do ângulo γ	19
Figura 7 - Alvo virtual determinado a partir do ângulo γ	20
Figura 8 – Trajetória percorrida sem obstáculos.	23
Figura 9 - Velocidade linear e angular da trajetória percorrida sem obstáculos.	24
Figura 10 - Obstáculos inseridos na trajetória.	24
Figura 11 - Trajetória percorrida com obstáculos (1ª volta).....	25
Figura 12 - Velocidade linear e angular trajetória percorrida com obstáculos (1ª volta).....	25
Figura 13 – Trajetória percorrida com obstáculos (2ª volta).....	26
Figura 14 – Velocidade linear e angular trajetória percorrida com obstáculos (2ª volta).	27
Figura 15 - Trajetória percorrida com obstáculos (3ª volta).....	27
Figura 16 - Velocidade linear e angular trajetória percorrida com obstáculos (3ª volta).....	28
Figura 17 - Relação entre o desvio dos obstáculos e as velocidades angular e linear do robô.	29

1 Introdução

A robótica sempre sempre foi alvo da imaginação e curiosidade dos seres humanos. Quando se fala sobre robôs, a mente humana logo se inunda de imagens advindas de filmes futurísticos de ficção científica. No entanto, a origem da robótica é datada de muitos anos no passado. Civilizações milenares como Gregos e Egípcios possuem registros de máquinas que imitavam os movimentos de seres humanos e animais. A origem da palavra robô vem da palavra Tcheca *Robota* e é datada de 1921, quando foi usado pela primeira vez pelo dramaturgo Karel Capeck em seu conto de ficção científica *Rossum's Universal Robots*. Seu significado é trabalho escravo, monótono. No entanto, esse termo ficou famoso em 1939 quando Isaac Asimov, considerado por muitos como pai da robótica, utilizou esse termo em seu livro *I, Robot* [1].

O primeiro robô móvel surgiu em 1969 (Figura 1), tratava-se de um projeto conduzido pela Artificial Intelligence Center e ficou conhecido como *Shakey*. Este robô era composto por um veículo equipado com uma câmera de TV e sensores radiocontrolados por um computador SDS-940 [2].



Figura 1 – Robô *Shakey*

Fonte: www.timetoast.com

Robôs móveis autônomos são máquinas capazes de interagir com o ambiente onde estão inseridas, realizando atividades sem a necessidade de intervenção humana, por meio de sensores e atuadores existentes no robô [3].

Com o avanço da tecnologia e, conseqüentemente, dos estudos de robótica, robôs autônomos possuem ampla aplicação em diversas áreas nos dias de hoje, como: entretenimento [4], agricultura [5], exploração espacial [6] e acessibilidade de pessoas com deficiência [7][8].

Para conseguir realizar essas tarefas sem gerar danos ao próprio robô, ou ao ambiente em que ele está inserido, o mesmo deve ser capaz de evitar possíveis colisões com obstáculos em seu caminho. Diversas estratégias foram desenvolvidas ao longo dos anos para realizar o desvio de obstáculos, por exemplo: campos potenciais [9], digrama de proximidade [10], detecção de bordas [11], planejamento de caminhos [12] [13] e desvio tangencial [14][16].

A aplicação desejada e a sua interação com o meio que está inserido depende do tipo de raciocínio do robô autônomo, que pode ser classificado como deliberativo, reativo ou híbrido. O robô com raciocínio deliberativo primeiro observa o ambiente ao seu redor e, a partir de seus sensores, planeja as ações que serão tomadas, e, posteriormente, executadas por seus atuadores. O robô de raciocínio reativo não requer um conhecimento prévio do ambiente onde ele está inserido, sendo capaz de interagir com ambientes que sofram alterações durante suas atividades. Por fim, o de raciocínio híbrido mescla funcionalidades dos dois tipos de raciocínio explicados anteriormente, a fim de minimizar as deficiências presentes em cada um deles.

Deve-se observar que ao escolher o tipo de raciocínio que será implementado no robô móvel, o ambiente em que o mesmo estará inserido deve ser levado em consideração.

Para interagir com o meio onde está inserido, o robô é dotado de sensores e atuadores, como visto anteriormente. Os sensores podem ser classificados como proprioceptivos e exteroceptivos. Sensores proprioceptivos são utilizados para medir dados referentes ao robô móvel em relação a si próprio, como por exemplo a velocidade ou aceleração de suas rodas. Sensores exteroceptivos são utilizados para monitorar o próprio robô, em caso de auto proteção, ou sua relação dinâmica com o ambiente que está inserido ou a tarefa que o mesmo está executando. Como exemplo de um sensor exteroceptivo podemos citar sensores de proximidade e sensores eletromagnéticos [16].

Na literatura encontram-se vários trabalhos que aplicam estratégias de desvio de obstáculos para robôs com controle de posicionamento [17] e alguns trabalhos com seguimento de trajetória [18]. Este trabalho implementa a estratégia de desvio tangencial com rastreamento de trajetória. Esta atividade pode ser dividida em duas atividades menores: seguimento de

trajetória e desvio de obstáculos. A primeira consiste em levar o robô de sua origem inicial até um objetivo, no entanto, esse objetivo irá assumir diferentes valores ao longo do tempo, traçando assim uma trajetória. A segunda atividade consiste em desviar de qualquer obstáculo ao longo de sua trajetória. O algoritmo utilizado para realizar essas duas tarefas funciona como um laço dentro de outro laço, onde o laço externo é responsável pelo seguimento de trajetória e o laço interno é responsável pelo desvio de obstáculos.

O trabalho utiliza o robô móvel com raciocínio reativo, Pioneer P3-DX (Figura2). Esse robô é dotado de sensores proprioceptivos e exteroceptivos. Para aplicar a estratégia de desvio de obstáculos são utilizados seus oito sensores ultrasônicos localizados na parte posterior do robô.



Figura 2 – Pioneer 3Dx

Fonte: generationrobots.com

A seguir, será delimitado o objetivo desejado para esse trabalho e como o mesmo está organizado.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a implementação da estratégia de desvio de obstáculos por desvio tangencial em um veículo terrestre não tripulado, enquanto se utiliza o seguimento de caminhos. O robô é inserido em um ambiente estruturado com obstáculos que interfiram em sua trajetória. O mesmo deve evitar esses obstáculos e retornar à sua trajetória desejada assim que transpuser esses obstáculos.

1.2 Organização

Para descrever o trabalho realizado, o capítulo 1 introduz conceitos básicos de robótica assim como aplicações comuns para a área. O capítulo 2 descreve o modelo matemático do robô utilizado, a estratégia de seguimento de trajetória e a técnica de desvio de obstáculos escolhida. O capítulo 3 apresenta os resultados obtidos nas experimentações e as discussões desse trabalho. Por fim, o capítulo 4 apresenta as conclusões obtidas e aponta propostas para trabalhos futuros.

2 Materiais e Métodos

2.1 Controlador

2.1.1 Modelo cinemático do robô uniciclo.

O modelo cinemático do robô móvel utilizado neste trabalho será agora discutido, considerando o cenário mostrado na figura 3, onde $\langle o \rangle$ é o referencial global e $\langle r \rangle$ é o referencial do robô.

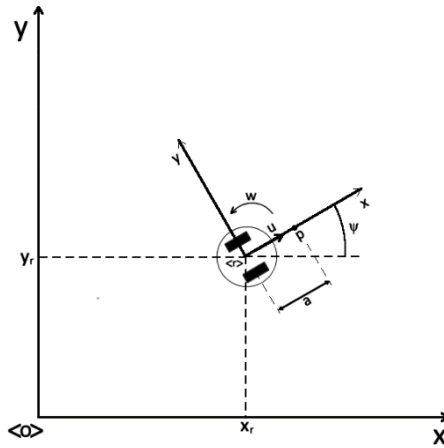


Figura 3 - Posição e orientação do robô móvel.

A posição do ponto p em relação a origem $\langle r \rangle$ do referencial do robô é dada por:

$$p^r = \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde “ a ” é a distância entre o eixo virtual que une as rodas do robô.

Por sua vez, esse mesmo ponto p , quando referenciado a origem global do sistema, possui sua posição dada por:

$$\begin{aligned} p^o &= R_r^o \cdot p^r + d_r^o \\ &= \begin{bmatrix} \text{Cos}(\psi_r) & -\text{Sen}(\psi_r) \\ \text{Sen}(\psi_r) & \text{Cos}(\psi_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Logo,

$$p^o = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r + a\text{Cos}(\psi_r) \\ y_r + a\text{Sen}(\psi_r) \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde x_r e y_r são as distâncias do robô ao referencial global e ψ_r é a orientação do mesmo em relação a esse referencial.

Para entender o comportamento do robô uniciclo ao longo do tempo, deriva-se a equação (3) em função dessa variável, dessa forma têm-se que:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_r - a\text{Sen}(\psi_r)\dot{\psi} \\ \dot{y}_r + a\text{Cos}(\psi_r)\dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pela figura 3, é possível notar que:

$$\dot{x}_r = \mu\text{Cos}(\psi) \quad (5)$$

$$\dot{y}_r = \mu\text{Sen}(\psi) \quad (6)$$

$$\dot{\psi} = w \quad (7)$$

Onde, μ é a velocidade linear e w a velocidade angular do robô uniciclo.

Por fim, ao substituir as equações (5), (6) e (7) em (4), pode se escrever o modelo cinemático do robô da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mu\text{Cos}(\psi) - a\text{Sen}(\psi_r)w \\ \mu\text{Sen}(\psi) + a\text{Cos}(\psi_r)w \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \text{Cos}(\psi) & -a\text{Sen}(\psi) \\ \text{Sen}(\psi) & a\text{Cos}(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Agora que já se consegue representar matematicamente o robô uniciclo, o próximo objetivo do trabalho é fazer que o robô consiga seguir uma trajetória.

2.1.2 Navegação para um ponto desejado.

Considerando o robô localizado a uma distância diferente do alvo, o objetivo da primeira tarefa é leva-lo o quão próximo possível do seu objetivo.

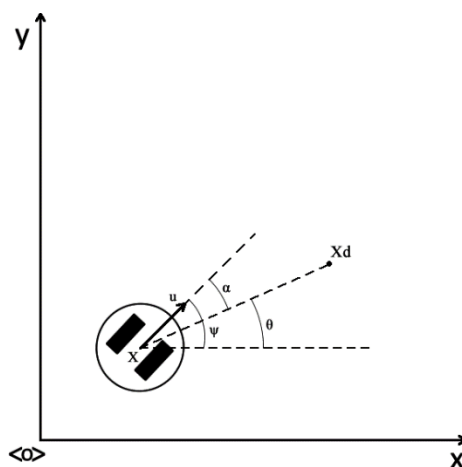


Figura 4 - Postura do robô móvel em relação à um ponto X_d .

O erro de orientação (α) é dado pela diferença entre o ângulo θ , que é medido entre a linha imaginária que liga o centro do robô ao seu alvo e o eixo x, e a orientação do robô (ψ), como pode ser observado tanto na equação (9) quanto na figura 4.

$$\alpha = \theta - \psi \quad (9)$$

O erro de posicionamento é dado pela diferença entre a posição desejada X_d e a posição atual do robô X . O objetivo do controlador é fazer o erro de posicionamento e a orientação tenderem a zero.

Além disso, nota-se pela figura 5 e pela equação (9), que se o ponto desejado está à direita do robô, $\alpha < 0$. Caso contrário, $\alpha \geq 0$.

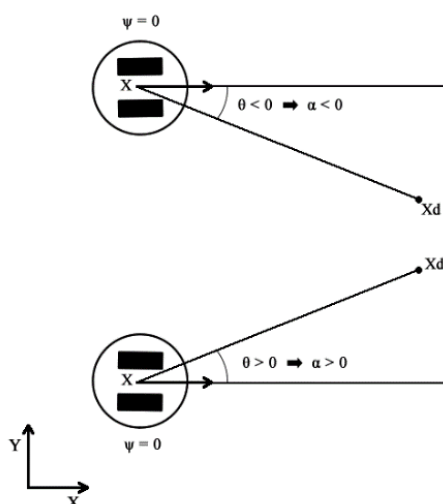


Figura 5 - Relação entre a posição do robô e ângulo α .

Agora que o robô é capaz de mover-se em direção a um ponto, pode-se definir a trajetória que o mesmo irá seguir. Para completar essa atividade deve-se parametrizar a trajetória no tempo, de forma que a cada intervalo de tempo t_s um novo ponto na trajetória seja enviado ao robô. Dessa forma pode-se dizer que um seguimento de trajetória é uma sequência de navegação para um ponto com restrição temporal.

Até esse ponto, o robô já é capaz de seguir uma trajetória em um ambiente livre de obstáculos, para completar o objetivo do trabalho, a próxima sessão irá explicar a técnica de desvio tangencial implementada no robô.

2.2 *Desvio tangencial*

A técnica desenvolvida para o desvio de obstáculos proposta por Ferreira [19] consiste em um desvio de um obstáculo traçando uma trajetória tangencial a ele. Em um primeiro momento o robô segue em direção ao seu alvo de destino, através de seu controlador. Caso o robô esteja em zona de colisão, ele deve tangenciar o obstáculo, a fim de evitá-lo e, por fim,

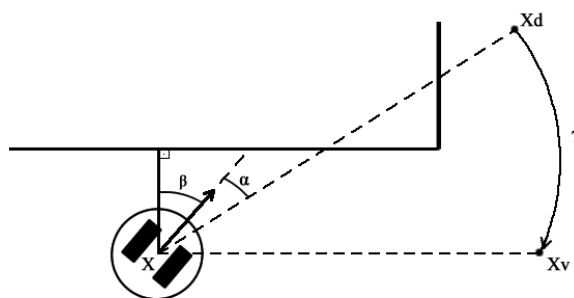


Figura 6 - Obtenção do ângulo γ .

alcançar a posição desejada. Assim que detectado esse obstáculo, o robô criará um alvo virtual, rotacionando seu alvo de destino, de forma que o mesmo percorra uma trajetória tangencial ao obstáculo, como pode ser observado na figura 6, onde γ é o ângulo de rotação da posição desejada, para se criar um destino virtual que seja tangente ao obstáculo. Pode-se observar pela figura 6 que foi detectado um obstáculo entre o robô e o ponto desejado X_d . Nota-se então que a partir do ângulo de rotação γ o robô determina um alvo virtual X_v para tangenciar o obstáculo encontrado.

Além disso, é definida uma zona de segurança ao redor do robô. Quando os sensores ultrassônicos detectam algum obstáculo dentro dessa zona, o robô utiliza o ângulo β referente a menor distância à esse obstáculo. Como o robô é equipado com oito sensores ultrassônicos localizados em sua parte posterior, posicionados nos ângulos $[-90, -50, -30, -10, 10, 30, 50, 90]$, o ângulo β é determinado pelo sensor que obtiver menor medida. Nota-se que para $\beta < 0$, tem-se valores à direita do robô e para $\beta > 0$, valores à esquerda do robô.

Tendo determinado o ângulo β , deve-se determinar o ângulo γ de rotação para definir o alvo virtual. Esse ângulo é dado pela seguinte equação:

$$\gamma = \begin{cases} 90^\circ + \alpha - \beta, & \text{se } \beta \geq 0 \\ -90^\circ + \alpha - \beta, & \text{se } \beta < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Determinado o ângulo de rotação para o alvo virtual, deve-se agora rotacionar o alvo de destino de forma a gerar as coordenadas do alvo temporário. Para determinar a posição do alvo virtual em relação ao referencial inercial, considera-se a figura a seguir:

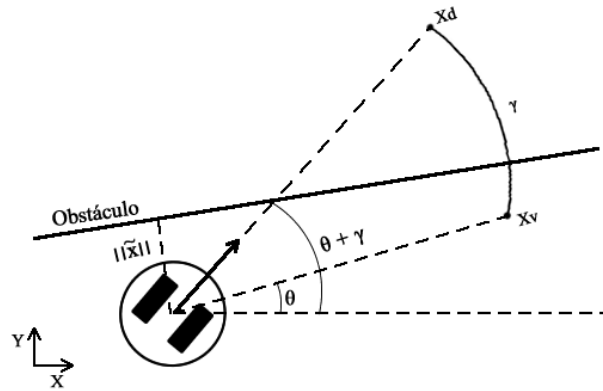


Figura 7 - Alvo virtual determinado a partir do ângulo γ .

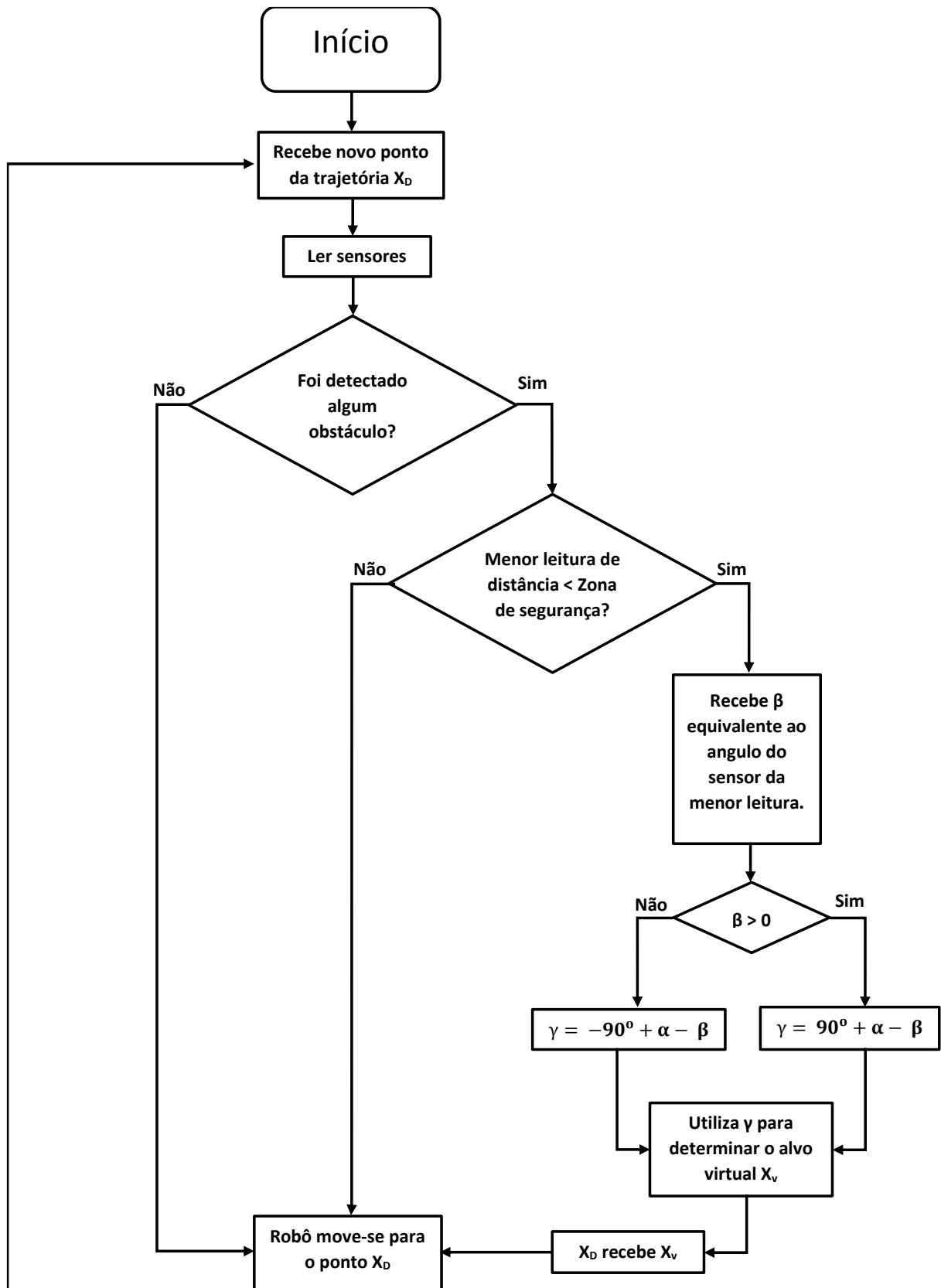
Pode ser observado por essa figura que existe um obstáculo entre o robô e o alvo desejado, sendo necessário aplicar a técnica de desvio tangencial para determinar um alvo virtual X_v que faça com que o robô desvie tangencialmente desse obstáculo. Pode-se observar também com a imagem que para determinar a posição do alvo virtual utiliza-se a norma do erro de posição entre o robô e o alvo desejado. A equação 11 representa o valor dessa norma.

$$\|\tilde{x}\| = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \quad (11)$$

Dessa forma, consegue definir a localização do alvo virtual a partir da seguinte equação:

$$\begin{aligned} X_v &= \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta + \gamma) & -\sin(\theta + \gamma) \\ \sin(\theta + \gamma) & \cos(\theta + \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\tilde{x}\| \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x + \|\tilde{x}\|\cos(\theta + \gamma) \\ y + \|\tilde{x}\|\sin(\theta + \gamma) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

O fluxograma a seguir explica de forma simplificada o funcionamento do algoritmo que implementa o desvio tangencial no robô que foi utilizado para este teste:



Resumindo o funcionamento do algoritmo, inicialmente o robô recebe o ponto da trajetória que deve se deslocar, realiza uma varredura do ambiente utilizando seus sensores e verifica se existe algum obstáculo, caso não haja nenhum obstáculo, o robô move-se em direção ao ponto desejado da trajetória. Localizando algum obstáculo, o robô deve-se verificar se o mesmo localiza-se dentro de sua zona de segurança, caso isso não ocorra, o robô desloca-se em direção ao alvo desejado. Se detectado o obstáculo e o mesmo está dentro de sua zona de segurança, o robô deve utilizar o ângulo β , referente ao ângulo do sensor que mediu a menor distância em relação ao alvo, para calcular o ângulo de rotação γ para realizar o desvio tangencial. Após determinado esse ângulo, um alvo virtual x_v será criado. Esse alvo será o novo alvo desejado do robô e o robô deve mover-se até esse alvo. Assim que alcançar o alvo o robô receberá um novo ponto na trajetória e deve repetir o ciclo descrito nesse parágrafo.

Agora que o robô já tem seu modelo matemático definido, consegue seguir uma trajetória e possui definida sua estratégia de desvio tangencial, deseja-se realizar testes para verificar a eficácia da estratégia adotada. O capítulo seguir apresentará os resultados obtidos nestes testes e as discussões levantadas por eles.

3 Resultados e Discussões

O teste discutido neste trabalho consiste na aplicação dos conceitos de navegação e de desvio tangencial discutidos anteriormente, em um robô seguidor de trajetória. Inicialmente foi definida a trajetória que o robô iria seguir e esta foi parametrizada no tempo. A cada intervalo de tempo t_s , um novo ponto dentro da trajetória será enviado ao robô e este se dirigirá a esse ponto, desde que não haja nenhum obstáculo em seu caminho. A trajetória escolhida foi uma elipse de raio de 2 metros, e a equação que a parametriza é dada por:

$$\begin{cases} x = 2 \cos\left(\frac{2\pi}{t_m} t_s\right) \\ y = 2 \sin\left(\frac{2\pi}{t_m} t_s\right) \end{cases} \quad (13)$$

onde t_m é o tempo máximo para concluir a trajetória, e t_s é o incremento de tempo do robô.

Caso não haja nenhum obstáculo na trajetória do robô, ele deverá partir da sua origem, localizada no centro da elipse, atingir a trajetória conforme planejado, e segui-la até atingir o tempo t_m . Essa trajetória pode ser observada na figura 8, onde pode ser observado o resultado final após três voltas e a trajetória percorrida pelo robô. É importante salientar que a curva inicial que se observa saindo do centro da elipse representa o fato do robô sair da posição inicial localizada no ponto $[0,0]$. As velocidades linear e angular podem ser observadas na figura 9.

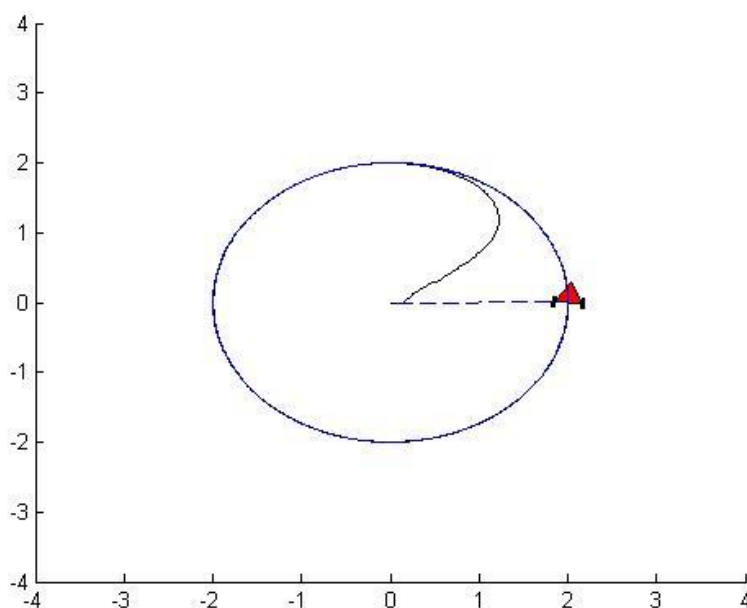


Figura 8 – Trajetória percorrida sem obstáculos.

Inicialmente, ocorre um pico em ambas velocidades, até que o robô consiga sair da posição inicial no centro da elipse e alcançar a trajetória desejada. No entanto, assim que essa trajetória é alcançada, nota-se que as velocidades se estabilizam.

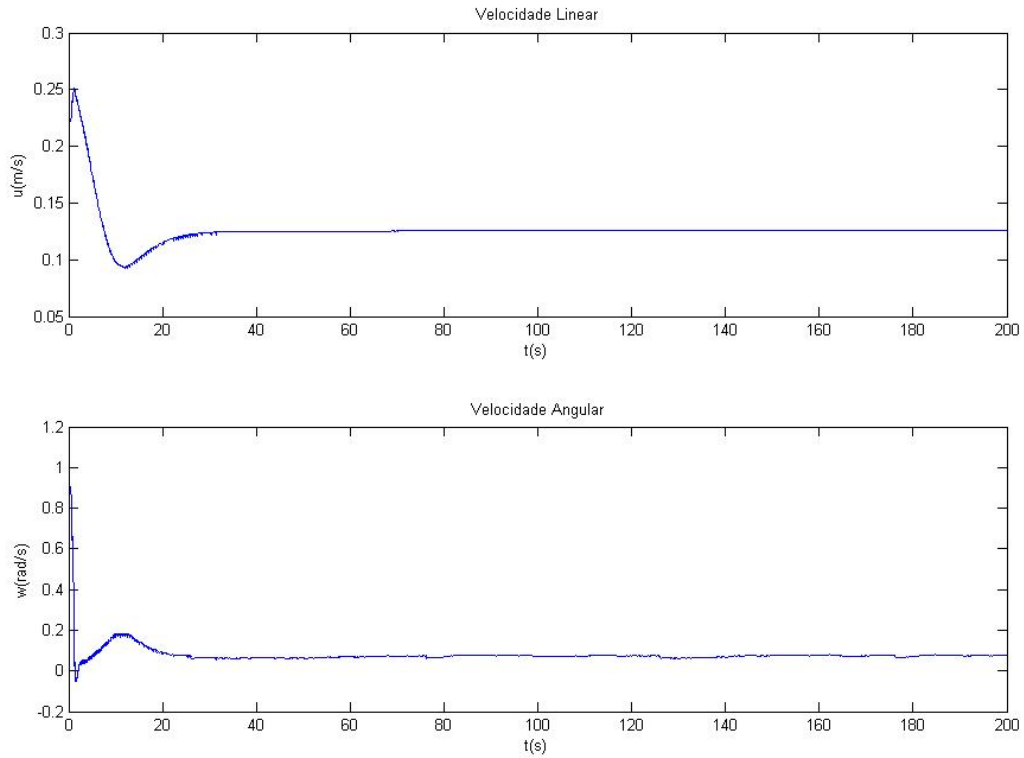


Figura 9 - Velocidade linear e angular da trajetória percorrida sem obstáculos.

Foram então adicionados obstáculos ao ambiente utilizado para realizar o experimento. Como pode ser observado na Figura 10, foram usados móveis como obstáculos para que o robô pudesse desviar.



Figura 10 - Obstáculos inseridos na trajetória.

Os resultados obtidos após adicionar os obstáculos podem ser observados na figura 11, e suas velocidades angulares e lineares podem ser observadas na figura 12.

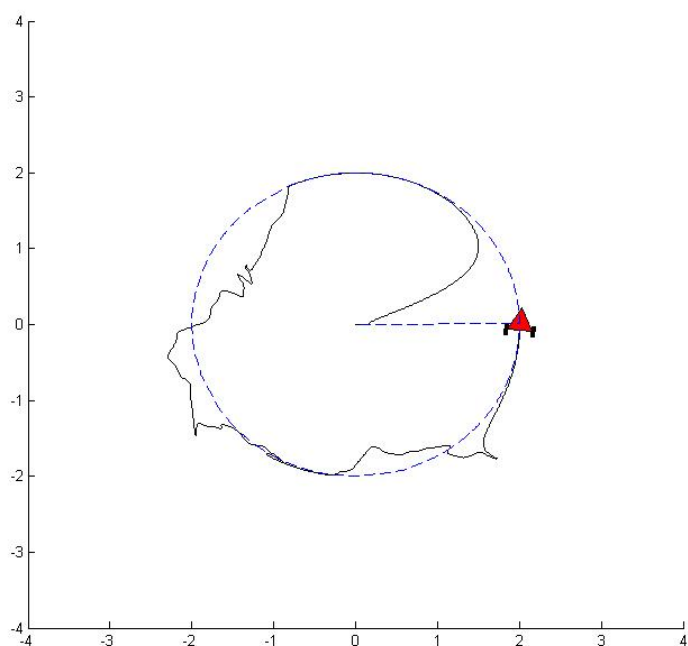


Figura 11 - Trajetória percorrida com obstáculos (1ª volta).

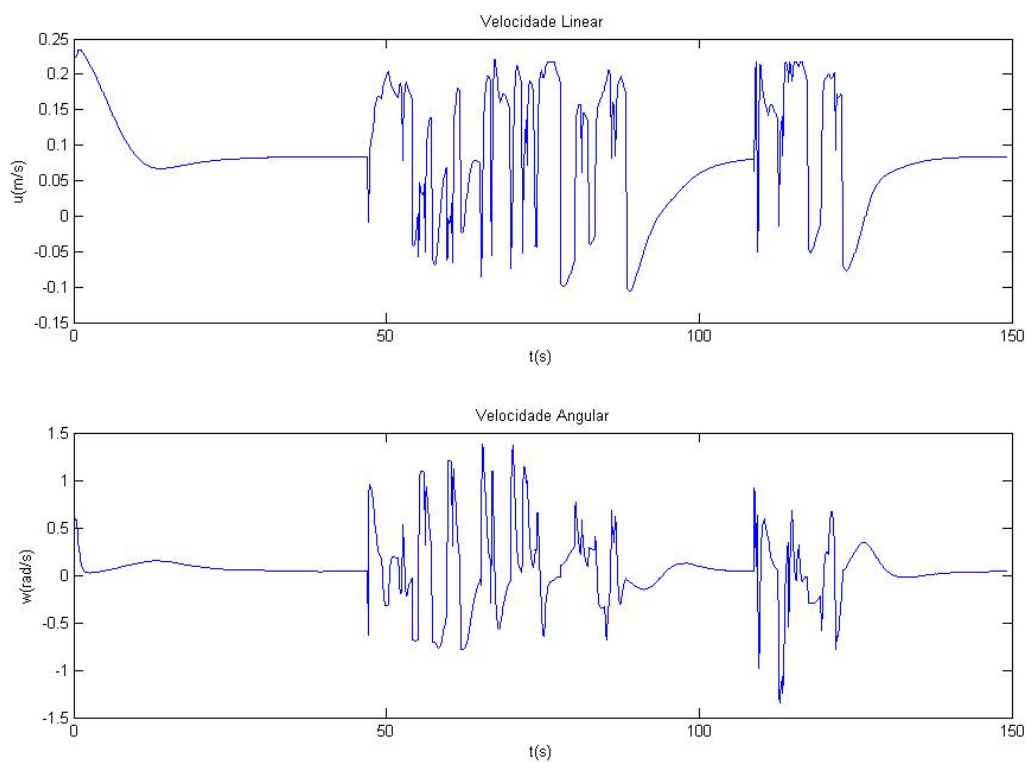


Figura 12 - Velocidade linear e angular trajetória percorrida com obstáculos (1ª volta).

A trajetória elíptica desejada que o robô percorre caso não haja nenhum obstáculo é representada graficamente pela linha pontilhada. A linha contínua representa a trajetória real percorrida pelo robô. Ao comparar a trajetória percorrida e os gráficos de velocidade, torna-se fácil observar os momentos em que o robô desvia dos obstáculos. Para os demais momentos, o comportamento do robô assemelha-se com o comportamento encontrado quando não existe nenhum obstáculo.

Por se tratar de um robô com comportamento exclusivamente reativo, foi proposto nesse experimento que o robô completasse a trajetória três vezes, para comparar os resultados obtidos durante cada volta. Os resultados da segunda e da terceira voltas podem ser observados nas figuras 13 e 15, e suas velocidades linear e angular podem ser observadas nas figuras 14 e 16.

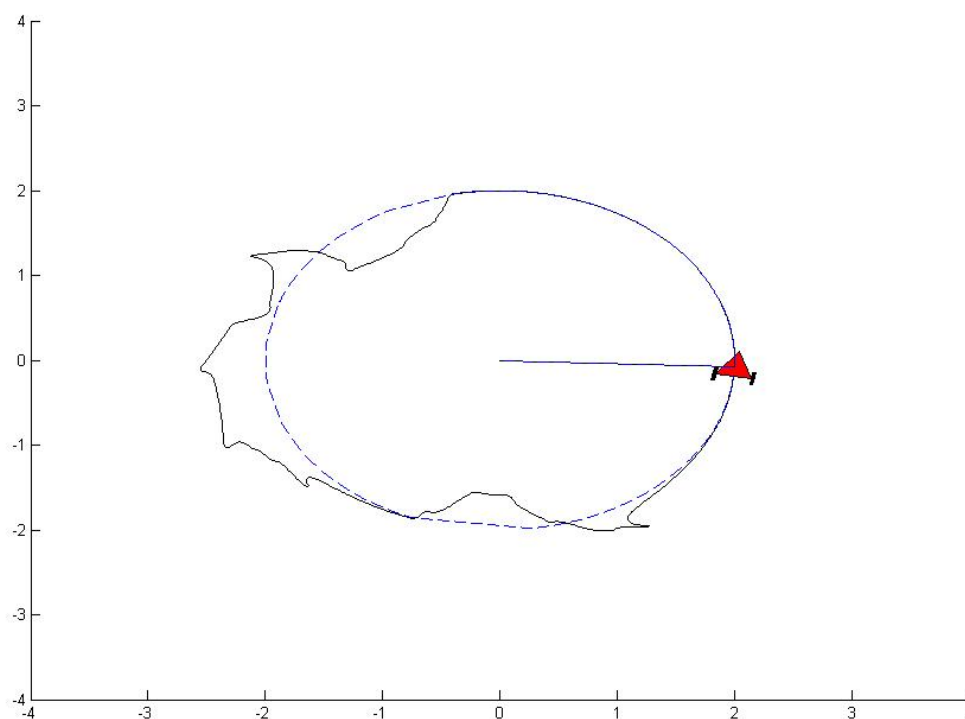


Figura 13 – Trajetória percorrida com obstáculos (2ª volta).

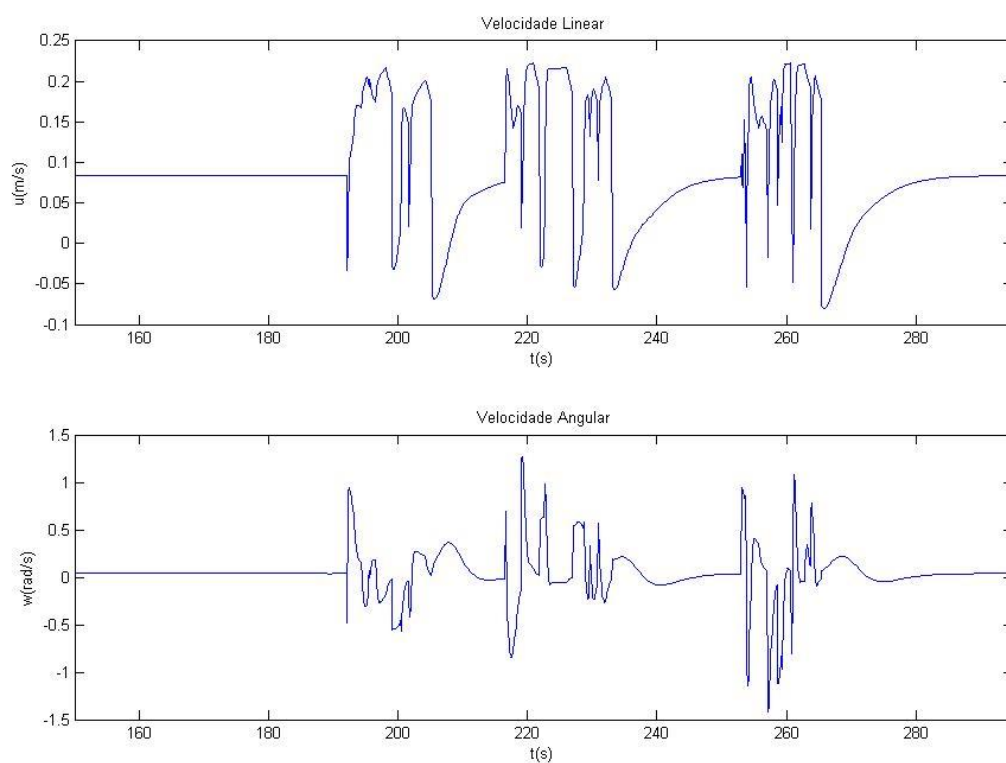


Figura 14 – Velocidade linear e ângular trajetória percorrida com obstáculos (2ª volta).

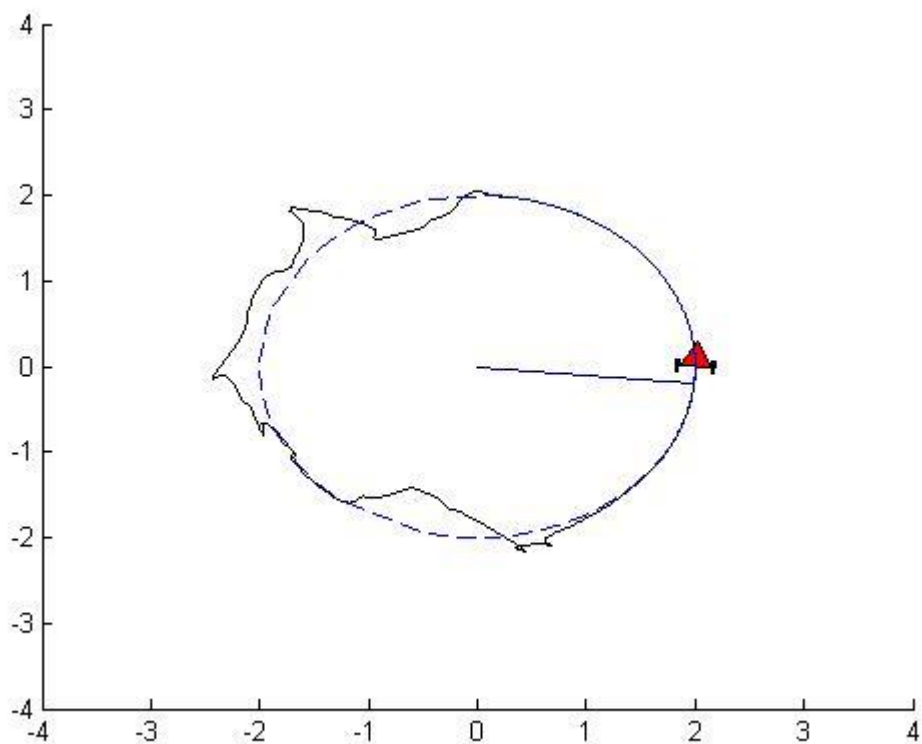


Figura 15 - Trajetória percorrida com obstáculos (3ª volta).

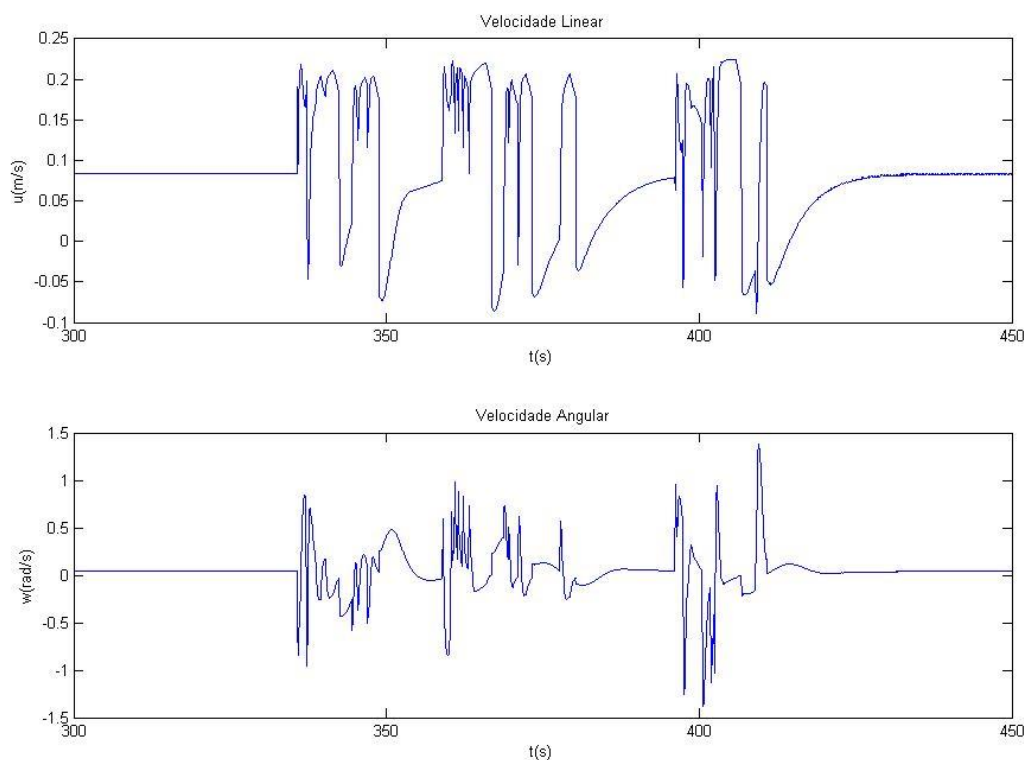


Figura 16 - Velocidade linear e angular trajetória percorrida com obstáculos (3ª volta).

Nota-se que as três trajetórias em cada uma das voltas são diferentes, isso ocorre devido ao fato de o robô possuir comportamento reativo, que faz com que se dependa de algumas variáveis para determinar o desvio, como a posição em que ele chega no alvo, o que pode provocar uma variação do ângulo onde foi medida a menor distância. Além disso, ocorre um pequeno erro de odometria nos sensores internos do robô, que somados nas três voltas pode provocar uma pequena variação na trajetória do robô.

No entanto, vale a pena ressaltar que mesmo com a variação nas trajetórias, o comportamento nas três voltas é bem semelhante, o que é esperado, visto que os obstáculos utilizados nesse experimento são estáticos, e que não houve nenhuma alteração do cenário durante os experimentos.

Um problema observado foi que ao desviar o robô do obstáculo, os sensores não o detectavam mais, e isso fazia com que o robô considerasse que não havia mais obstáculos em seu caminho, e tendesse voltar à trajetória original. Ao fazer esse movimento, o robô se deparava com o obstáculo e novamente tentava desviar repetindo o ciclo descrito. Esse problema só seria resolvido quando a trajetória se deslocasse a uma distância tal que o robô

chegaria até ela, desviando do obstáculo. Para solucionar o problema, foi proposto um intervalo de esquecimento que define um intervalo de tempo t_k onde o robô não recebe em seu controlador as posições da trajetória desejada, no caso a elipse, dessa forma o robô prossegue em direção do alvo virtual definido pela estratégia de desvio tangencial. No entanto, seus sensores continuam detectando qualquer obstáculo que por ventura possa surgir em seu caminho. A função desse intervalo de esquecimento é garantir que o robô consiga se distanciar suficientemente do obstáculo, evitando que quando o mesmo volte para a trajetória desejada, venha a se colidir com o obstáculo. Isso pode ser observado nos gráficos de trajetória apresentados anteriormente, onde o robô possui significativo desvio da trajetória para se desviar dos obstáculos.

Por fim, pode se observar pela Figura 17, que os picos de velocidade angular e linear ocorrem nos momentos onde o robô está realizando as manobras de desvio dos obstáculos. Essas alterações se devem ao fato de as equações que criam o alvo virtual deslocarem esse alvo a uma distância maior do robô, quando comparado ao ponto que seria gerado se o robô estivesse

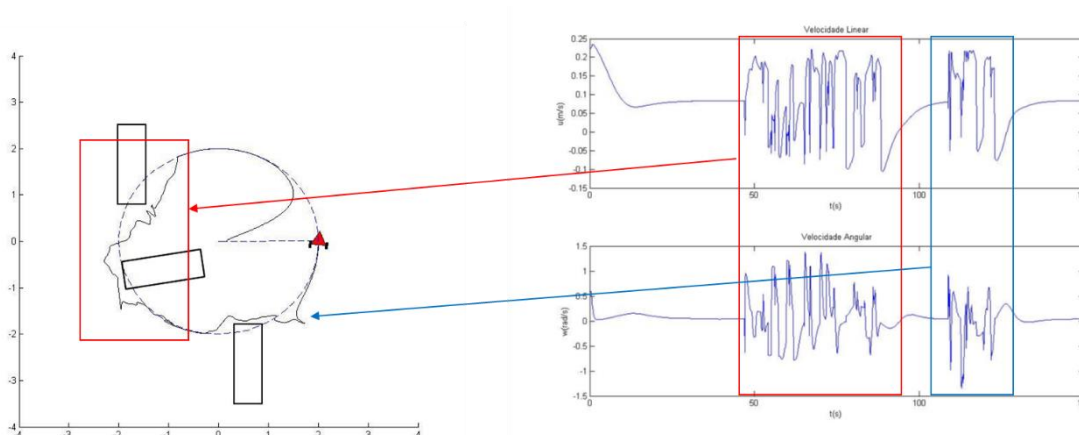


Figura 17 - Relação entre o desvio dos obstáculos e as velocidades angular e linear do robô.

seguindo a rota normalmente. Como os controladores são proporcionais à distância entre o robô e seu alvo, ocorrem alguns pontos de aceleração durante o desvio. Consegue-se ainda notar que nos demais momentos, a velocidade do robô apresenta comportamento estável, como esperado pelas equações e observado no resultado da trajetória sem obstáculos.

4 Conclusões

Esta monografia apresentou o método de desvio tangencial aplicado a um robô móvel seguidor de trajetória. Para realizar o experimento foi utilizado um motor do tipo unicycle em um ambiente semi-estruturado. Essa estratégia é amplamente discutida na literatura, no entanto, geralmente aplicada para controle de posicionamento.

Com esse trabalho pode-se observar que a estratégia de desvio de obstáculos possui a mesma efetividade para robôs com seguimento de trajetória, conseguindo completar a trajetória que foi definida e desviando dos obstáculos quando necessário.

Para aumentar a confiabilidade do teste, ele foi repetido diversas vezes e foi observado que por mais que as trajetórias não sejam sempre as mesmas, o objetivo principal do trabalho sempre foi alcançado em um grau satisfatório.

Por fim, nos experimentos não foi notada nenhuma correlação entre o número de voltas que o robô executou e a eficiência do desvio de obstáculos, isso se deve a alguns fatores: o primeiro ocorre devido ao fato do comportamento do robô ser totalmente reativo, dessa forma a forma como o robô encontra o alvo influi no ângulo que o mesmo irá determinar para realizar o desvio tangencial. Outro motivo que justifica a não relação entre o número de voltas e o resultado apresentado é o erro de odometria que existe nos sensores próprioceptivos do robô.

Para trabalhos futuros, deseja-se aumentar a estabilidade do robô durante o desvio dos obstáculos, mapeando o ambiente onde está inserido durante a trajetória e criando uma rota ideal otimizada e que desvie dos obstáculos que o mesmo já tenha observado em sua trajetória.

Referências Bibliográficas

- [01] PIERI, Edson Roberto de. Curso de Robótica Móvel. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/bayetha/curso-de-robotica-movel>>. Acesso em: 16 jul. 2018.
- [02] Nilsson, N. J. (1984). *Shakey the robot*. SRI International Menlo Park CA.
- [03] Brandao, A. S., Filho, M. S., and Filho, T. F. B. (2006). Navegação de robôs móveis com desvio de obstáculos: Implementação de desvio tangencial modificado. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI'07.
- [04] Fujita, M., and Kitano, H. (1998). Development of an autonomous quadruped robot for robot entertainment. *Autonomous Robots*, 5(1), 7-18.
- [05] Van Henten, E. J., Hemming, J., Van Tuijl, B. A. J., Kornet, J. G., Meuleman, J., Bontsema, J., and Van Os, E. A. (2002). An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 13(3), 241-258.
- [06] Yamauchi, B. (1997). A frontier-based approach for autonomous exploration. In *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997. CIRA'97., Proceedings., 1997 IEEE International Symposium on* (pp. 146-151). IEEE.
- [07] Mandel, C., Huebner, K., and Vierhuff, T. (2005). Towards an autonomous wheelchair: Cognitive aspects in service robotics. In *Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2005)* (pp. 165-172).
- [08] Baklouti, E., Amor, N. B., and Jallouli, M. (2017). Reactive control architecture for mobile robot autonomous navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 89, 9-14.
- [09] Ge, S. S., and Cui, Y. J. (2002). Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous robots*, 13(3), 207-222.
- [10] Minguez, J., and Montano, L. (2000). Nearness diagram navigation (nd): A new real time collision avoidance approach. In *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 3, pp. 2094-2100). IEEE.
- [11] Kuc, R., and Barshan, B. (1989). Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar. In *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on* (pp. 1422-1426). IEEE.
- [12] Freitas, E. J., Passos, H. A., & Pereira, G. A. DESVIO DE OBSTACULOS POR ROBÔS SEMIAUTÔNOMOS USANDO PLANEJAMENTO DE CAMINHOS.
- [13] Liang, J. H., and Lee, C. H. (2015). Efficient collision-free path-planning of multiple mobile robots system using efficient artificial bee colony algorithm. *Advances in Engineering Software*, 79, 47-56.
- [14] Secchi, H., Carelli, R., & Mut, V. (2001). Discrete stable control of mobile robots with obstacles avoidance. In *International conference on advanced robotics, ICAR* (Vol. 1, pp. 405-411).
- [15] BASTOS FILHO, Teodiano Freire. Disciplina: Oficina de Robótica: (Mestrado/Doutorado). Disponível em: <<http://docplayer.com.br/2014282-Disciplina-017-5524-oficina-de-robotica-mestrado-doutorado-prof-dr-teodiano-freire-bastos-filho.html>>. Acesso em: 16 jul. 2018.
- [16] Ferreira, A., Pereira, F. G., Bastos-Filho, T. F., Sarcinelli-Filho, M., and Carelli, R. (2006). Avoiding obstacles in mobile robot navigation: Implementing the tangential escape approach. In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* (Vol. 4, pp. 2732-2737). IEEE.
- [17] Secchi, H., Carelli, R., and Mut, V. (2003). An experience on stable control of mobile robots. *Latin American applied research*, 33(4), 379-385.
- [18] Resende, C. Z., Carelli, R., Bastos-Filho, T. F., and Sarcinelli-Filho, M. (2012). Incorporação de desvio de obstáculos ao seguimento de trajetória por robôs móveis uniciclos. In *XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012)* (pp. 993-999).
- [19] Ferreira, A., Pereira, F. G., Vassallo, R. F., Bastos Filho, T. F., and Sarcinelli Filho, M. (2008). An approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: the tangential escape. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 19(4), 395-405.