



Leticia Nicolino de Sá

Modelagem e Controle de um Veículo Omnidirecional

Modeling and Control of an Omnidirectional Vehicle

Trabalho de Graduação

Orientador: Mauro Speranza

Co-orientador: Rodrigo Neumann

Rio de Janeiro, 10 de Dezembro de 2016



Leticia Nicolino de Sá

Modelagem e Controle de um Veículo Omnidirecional

Modeling and Control of an Omnidirectional Vehicle

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Mecânica Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Prof. Mauro Speranza

Orientador

Rodrigo Neumann

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Marcelo de Andrade Dreux

Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Dezembro de 2016

“A perseverança é a mãe da boa sorte.” (Miguel de Cervantes).

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer ao meu orientador, Mauro Speranza pelo apoio no pouco tempo que lhe coube.

Também agradeço aos meus pais Andrea Nicolino e Carlos Sá, por todo o apoio durante a vida e principalmente durante a faculdade. A eles agradeço o amor incondicional que me deram e a tudo que me ajudaram durante a minha vida.

A minha irmã, Gabriela Nicolino, agradeço o apoio quando os momentos de estresse eram extremos e necessitava de uma amiga para conversar sobre momentos difíceis.

Aos meus amigos, Gabriela Paiva, João Bastos, Mariana Osborne, Marília Assad e todos os outros que me ajudaram quando os trabalhos e provas da faculdade eram demais e precisava de um tempo de distração.

Gostaria de agradecer ao Ronaldo Senfft e a Cristina Sá que apesar de não serem meus pais, conquistaram um lugar especial na família também me apoiando como pais.

Principalmente gostaria de agradecer ao Rodrigo Neumann, que me apoiou nas melhores e piores horas. Ajudou-me quando tudo estava dando errado neste trabalho e quando já estava no meu limite me incentivou a continuar estudando e me esforçando para chegar ao final.

Finalmente, agradeço a todos que me ajudaram direta ou indiretamente para alcançar meus objetivos e chegar onde estou.

Resumo

Robôs móveis são plataformas mecânicas, dotadas de um sistema de locomoção, capazes de navegar através de um determinado ambiente de trabalho. Neste trabalho o veículo utilizado é um veículo omnidirecional, ou seja, capaz de se locomover com três graus de liberdade. Para sua locomoção é necessário um controle de forma que o mesmo seja capaz seguir uma rota pré-definida.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo cinemático e dinâmico para o movimento de um robô OmniMove, o veículo omnidirecional da Kuka Robotics, e em seguida um controlador de sua posição para que o mesmo seja capaz de realizar uma rota estabelecida. Foram utilizados sete controladores PID para controle de posição e torque. Para a simulação foi utilizado as ferramentas MatLab e Simulink.

Palavras-chaves:

Robôs Móveis, veículo omnidirecional, PID, controle de trajetória.

Abstract

Mobile robots are mechanical vehicles, equipped with a locomotion system, with a navigation capability through a determined working environment path. In this work, an omnidirectional vehicle was used. The omnidirectional vehicle is able to move in three degrees of freedom and for that, it is necessary a control system that makes it able to the vehicle follow a predefined path.

In this work a kinematic and dynamic model was developed for movement of an OmniMove robot movement, the omnidirectional vehicle of Kuka Robotics, and based on this model, a controller of its positions in order to the vehicle be able to carry out a predefined path. Seven PID controllers were used for position and torque control. For the simulation, the MatLab and Simulink tools were used.

Keywords:

Mobile robots, omnidirectional vehicle, PID, trajectory control.

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	4
Abstract	5
Índice de Figura	8
Índice de Símbolos	10
Introdução	12
Objetivos	13
Objetivo Geral	13
Objetivos específicos	13
Motivação	14
Robótica Móvel	15
Veículo omnidirecional	16
Rodas de um veículo omnidirecional	17
Roda universal	18
Roda Mecanum	19
Veículo estudado	21
Modelagem	22
Dinâmica do veículo	23
Cinemática do veículo	25
Motor	27
Controle	30
Controlador PID	31
Controle do OmniMove	32
Resultados	36

Teste 1 do Modelo.....	36
Teste 2 do Modelo.....	39
Teste 3 do Modelo.....	41
Teste 1 do controle.....	43
Teste 2 do controle.....	45
Teste 3 do controle.....	47
Teste 4 do controle.....	50
Considerações finais	52
Sugestões de trabalhos futuros	53
Referência Bibliográfica.....	54
Anexo	57

Índice de Figura

Figura 1 - Veículos Omnidirecionais.....	16
Figura 2 - Roda direcional (direita) e roda rodízio (esquerda)	17
Figura 3 - Roda universal (direita) e roda mecanum (esquerda).....	18
Figura 4 - Veículos de rodas universais. Três rodas (esquerda) e quatro rodas (direita).....	18
Figura 5 - Roda mecanum.....	19
Figura 6-Veículo Omnidirecional da Kuka	20
Figura 7 - Exemplos de movimento	21
Figura 8 - Veículo OmniMove	21
Figura 9 - Eixos do veículo e suas dimensões	23
Figura 10 - Velocidade em relação ao eixo fixo.....	26
Figura 11 - Sistema de malha aberta	30
Figura 12 - Sistema de malha fechada	30
Figura 13-Controlador basico	31
Figura 14 - Diagrama de blocos do controle do torque	34
Figura 15 - Diagrama de blocos completo.....	35
Figura 16 - Deslocamento com voltagens $V_1=V_2=V_3=V_4=600V$	37
Figura 17 - Rotação do veículo	37
Figura 18 - Velocidades em x y e teta	38
Figura 19- Torque nas rodas	38
Figura 20- Deslocamento com voltagens $V_1=V_3=600V$ $V_2=V_4=-600V$	39
Figura 21 - Rotação do veículo	40
Figura 22 -Velocidade do Veículo	40
Figura 23 - Torques nas rodas	41
Figura 24- Deslocamento com voltagens $V_1=V_4=600V$ $V_2=V_3=-600V$	42
Figura 25 - Rotação do veículo	42
Figura 26 - Velocidade do veículo.....	43
Figura 27-- Deslocamento com controle	44
Figura 28- Velocidades do veículo.....	44

Figura 29- Erros de posicionamento do veículo	45
Figura 30 - Deslocamento com controle	46
Figura 31 - velocidades do veículo	46
Figura 32- Erros de posicionamento.....	47
Figura 33- Deslocamento com controle	48
Figura 34- Deslocamento de teta	48
Figura 35- Velocidades do veículo.....	49
Figura 36 - Erros de posicionamento	49
Figura 37-Deslocamento com controle	50
Figura 38-Teta em função do tempo	51
Figura 39 - Velocidades do veículo.....	51
Figura 40 - Erros de posicionamento	52

Índice de Símbolos

m - Massa do veículo

y_l - Eixo lateral do veículo

v_l - Velocidade do veículo na direção y_l

\ddot{y}_l - Aceleração do veículo na direção y_l

x_f - Eixo frontal do veículo

v_f - Velocidade do veículo na direção x_f

\ddot{x}_f - Aceleração do veículo na direção x_f

F_{x_f} - Força aplicada pelo veículo na direção x_f

F_{y_l} - Força aplicada pelo veículo na direção y_l

θ - Rotação do veículo

v_θ - Velocidade de rotação do veículo

$\ddot{\theta}$ - Aceleração de rotação do veículo

I - Momento de inercia do veículo

τ - Momento do veículo

F_{f_i} - Força no eixo x_f aplicada pela roda i

F_{l_i} - Força no eixo y_l aplicada pela roda i

l_1 - Distância entre o eixo y_l e o eixo da roda

l_2 - Distância entre o eixo x_f e o meio da roda

R - Raio da roda

T_i - Torque na roda i

ω_i - Velocidade Angular da roda i

ω_{m_i} - Velocidade angular do motor i

N - Relação de transmissão do motor

x - Eixo fixo x

y - Eixo fixo y

v_y - Velocidade do veículo na direção do eixo y

v_x - Velocidade do veículo na direção do eixo x

V_i - Voltagem do motor i

k_v - Constante torque/tensão do motor

k_ω - Constante torque/velocidade angular do motor

Introdução

Robótica é um ramo da tecnologia que engloba mecânica, eletrônica e computação, que atualmente trata de sistemas compostos por máquinas e partes mecânicas automáticas as quais são controladas por circuitos integrados, tornando sistemas mecânicos motorizados, controlados manualmente ou automaticamente por circuitos elétricos.

No início do século XX, com a necessidade de aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos, a robótica começa sua ascensão, com as primeiras aplicações do robô industrial. Na década de 1950 foi criado o braço robótico, projetado por George Devol que automatizava tarefas de uma fábrica da General Motors. Atualmente, devido aos inúmeros recursos que o sistema de microcomputadores nos oferece, a robótica atravessa uma época de contínuo desenvolvimento, possibilitando às empresas redução de custos com o operariado e um significativo aumento na produção.

Em geral, a bibliografia considera que existem três classes de robôs, os robôs industriais, os médicos e os robôs móveis.

Na área da robótica, estudos sobre robótica móvel é uma das linhas de pesquisa mais crescentes e difundidas. Sua aplicação pode ser feita em inúmeros setores tais como serviços industriais, médicos, domésticos entre outros. Os robôs móveis estão cada vez mais presentes no cotidiano, substituindo seres humanos em trabalhos que exigem destreza, segurança e precisão.

Os robôs móveis são dispositivos de transporte automático, ou seja, são plataformas mecânicas dotadas de um sistema de locomoção capazes de navegar através de um determinado ambiente de trabalho, dotados de certo nível de autonomia para sua locomoção.

O uso de robôs móveis está justificado para aplicações em que se realizam tarefas incômodas ou arriscadas para o trabalhador humano. Entre elas: o transporte de material perigoso, as escavações de minas, a limpeza industrial ou a inspeção de projetos nucleares são exemplos de onde um robô móvel pode desenvolver seu

trabalho, e evitando desnecessária exposição do trabalhador a riscos. Outro grupo de aplicações em que este tipo de robô complementa a atuação do operador está composto por trabalhos de vigilância, de inspeção ou assistência às pessoas com necessidades especiais. Além disso, em aplicações de tele operação, onde existe um atraso sensível nas comunicações, como é o caso de exploração interplanetária e submarina, o uso de robôs móveis com certo grau de autonomia se faz interessante.

Atualmente, pesquisas voltadas não somente para a operação em indústrias, mas também para veículos que possam atuar em ambientes inóspitos, complexos ou mesmo com mais agilidade e força que um ser humano, estão sendo desenvolvidas em toda a parte do mundo. Esses veículos necessitam não só de uma maneira inteligente de se locomover, mas precisam também de sensores capazes de perceber mudanças no ambiente e realizar sua localização com sucesso.

Objetivos

Objetivo Geral

Este projeto objetiva a modelagem e controle de velocidade do veículo omnidirecional OmniMove da Kuka Robotics, possibilitando assim, que o veículo faça uma rota pré-estabelecida de acordo com a capacidade do veículo modelado.

Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral proposto neste trabalho, fez-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a modelagem do veículo
- Definir o controlador a ser adotado.
- Definir qual melhor parâmetro para controle.
- Simular o movimento do veículo utilizando a ferramenta MatLab e o Simulink

Motivação

Este trabalho faz parte do escopo do projeto “Factory Futures”, projeto em parceria com a empresa Dassault Systèmes com colaboração de diversas faculdades pelo mundo, incluído a PUC-Rio, que visa a desenvolvimento de tecnologias modernas para aplicação na área aeroespacial.

Robótica Móvel

A robótica móvel é definida como área que agrupa robôs que não possuem base fixa, ou seja, que podem se locomover dentro de um espaço limitado ou não. Seu desenvolvimento envolve diversas linhas de pesquisa, que vão de modelagem e estratégias de controle, até tipos de sistemas de locomoção e técnicas de inteligência artificial. Exemplos clássicos são o traslado e coleta de materiais, as tarefas de manutenção de reatores nucleares, a manipulação de materiais explosivos, a exploração subterrânea etc. Neste trabalho foi focado na área de modelagem e estratégia de controle de um veículo.

Ao longo dos tempos a robótica móvel vem sendo aplicada a uma gama de tarefas (BRUMITT, 1998), tais como: exploração espacial (JPL-NASA), sondas de inspeção de dutos de petróleo e gás (robô G.I.R.I.N.O - Petrobrás), cirurgias (Da Vinci Surgical System - Intuitive Surgical), eletrodomésticos (robô Roomba - iRobot), entre outras.

Na área de inteligência artificial, o principal problema a ser resolvido em um robô móvel é gerar trajetórias e guiar seu movimento segundo estas, com base na informação proveniente do sistema de sensores externos (ultrassom, LASER, visão), permitindo ao veículo mover-se entre os quaisquer pontos do ambiente de trabalho de maneira segura, sem colisão.

Em geral, os robôs móveis distribuem seus sistemas de tração e direção sobre os eixos de suas rodas de acordo com as exigências de velocidade, manobrabilidade e características do terreno. A precisão e rapidez com que o robô deve alcançar seu destino fazem com que determinado sistema de tração e de direção seja adotado. A confiabilidade e a manobrabilidade que deve ter um robô móvel determinam as características do sistema de tração e direção, não apenas em relação à técnica, mas também em relação ao número, ao tipo e à disposição das rodas necessárias para constituir uma estrutura mecânica estável.

O sistema de locomoção é uma das primeiras características de um robô. Entre os robôs terrestres com rodas sua mobilidade está caracterizada por dois fatores: o tipo de rodas que possuem e sua disposição sobre uma estrutura mecânica. A

combinação dos diversos tipos de rodas permite a construção de uma grande variedade de robôs móveis que se diferenciam por seu grau de manobrabilidade.

Veículo omnidirecional

Esse tipo de robô tem máxima manobrabilidade no plano, o que significa que pode se mover em qualquer direção sem necessidade de se reorientar, podendo se movimentar em qualquer direção. O robô deve ser capaz de traçar qualquer caminho no ambiente de trabalho para atingir os pontos necessários, desta forma, ele possui 3 graus de liberdade para movimentar-se, possuindo a capacidade de transladar em duas direções e rodar em relação ao seu centro de gravidade. Assim, um veículo omnidirecional tem seu posicionamento definido por três dimensões: duas para representar a sua posição no plano e uma para a rotação em relação ao seu eixo vertical, que é ortogonal ao plano de movimentação.

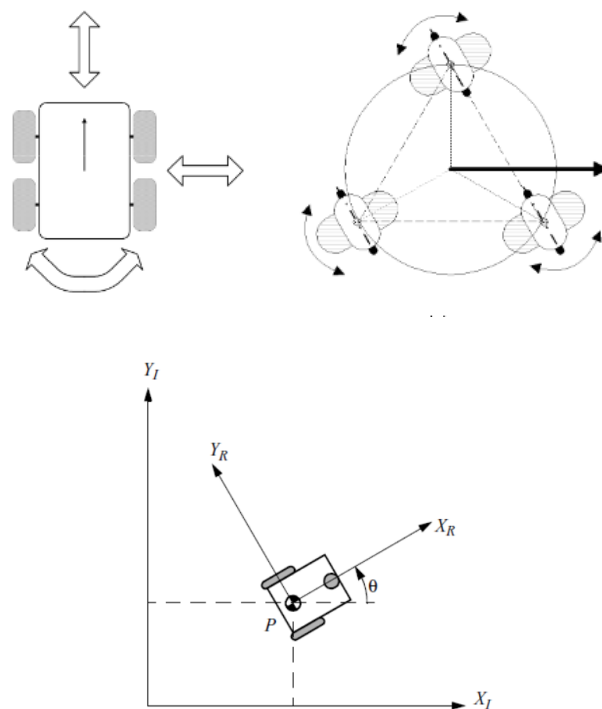


Figura 1 - Veículos Omnidirecionais

Rodas de um veículo omnidirecional

A roda é, de longe, o meio de locomoção mais utilizado nos robôs móveis. A escolha do tipo de rodas para um robô móvel está intimamente ligada à escolha do arranjo e a geometria das rodas na estrutura robótica, e é necessário levar em conta estes dois fatores no projeto do sistema de locomoção. Três características fundamentais de um robô são diretamente influenciadas por estas escolhas: estabilidade, manobrabilidade e controlabilidade.

Para a construção de um veículo omnidirecional é fundamental considerar os tipos de rodas que estarão sendo utilizadas, existindo dois tipos que permitem obter este tipo de mobilidade com rodas sem restrições, as rodas de desenho convencional e as rodas de desenho especial.

As rodas de desenho convencional com capacidade omnidirecional, mostradas na Fig. 2 são utilizadas em robôs moveis e são divididas em dois tipos: as rodas direcionais e as rodas rodízios.

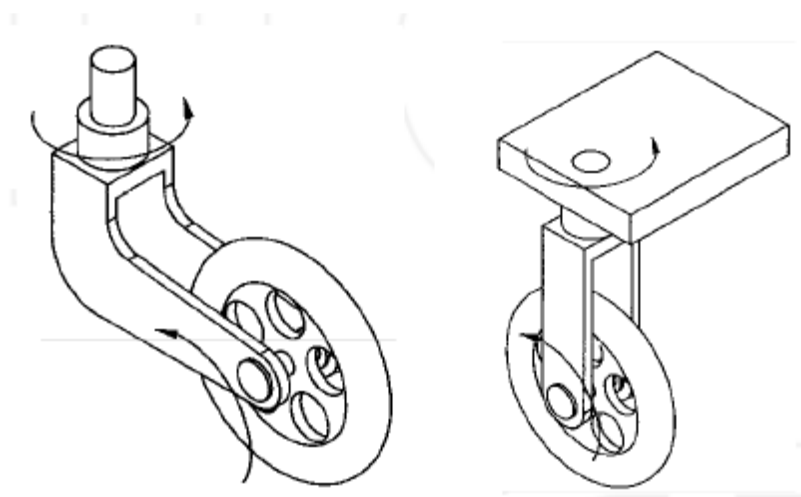


Figura 2 - Roda direcional (direita) e roda rodízio (esquerda)

Já as rodas de desenho especial, além de possuir capacidade de carga maior, também possuem maior tolerância a irregularidades de solos. São consideradas rodas de desenho especiais, aquelas que possuem tração em um sentido e movimento passivo em outro. Elas estão demonstradas na Fig. 3 e podem ser divididas em dois tipos: as universais, também conhecidas como suecas, e rodas mecanum.

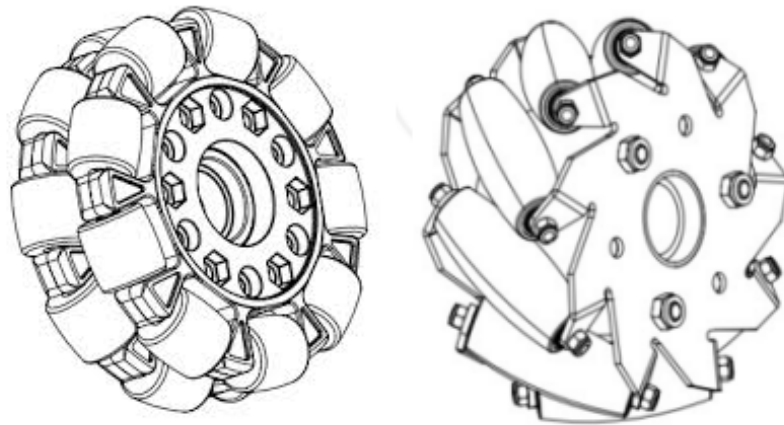


Figura 3 - Roda universal (direita) e roda mecanum (esquerda)

Roda universal

A roda universal é composta de rolos pequenos perpendiculares à roda, localizados no diâmetro interno e externo da roda, como mostrado da Fig. 3. O movimento omnidirecional é permitido pela combinação de duas ou mais rodas deste tipo, assim o movimento para frente é feito pela roda normalmente e o movimento ortogonal é feita pelos rolos.

Veículos de rodas universais, normalmente possuem duas configurações, a de três rodas e a de quatro rodas, como mostrado na Fig. 4.

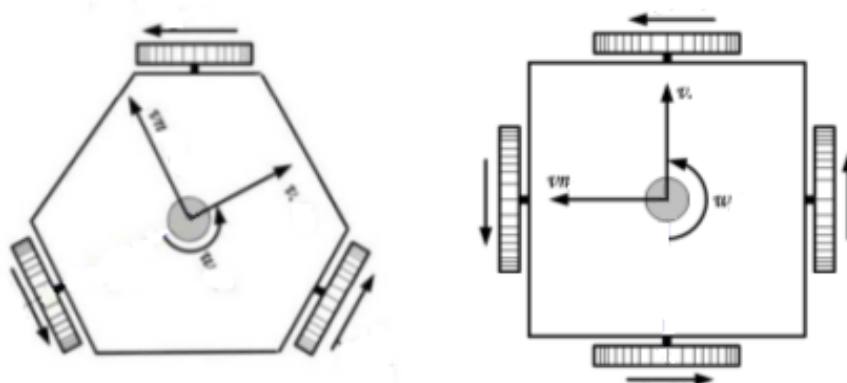


Figura 4 - Veículos de rodas universais. Três rodas (esquerda) e quatro rodas (direita)

Para o primeiro caso, o espaçamento entre as rodas é de 120° , sendo um motor conectado a cada uma delas. Quando ativados, os motores geram trações em três direções, uma em cada roda que quando somados criam uma força de translação e um torque rotacional.

No segundo caso, o espaçamento entre as rodas é de 90° , como visto na Fig. 4. A maior diferença entre o veículo de três rodas o eixo de movimento do veículo como se pode observar na Fig. 4.

Roda Mecanum

Criada em 1973 pelo inventor sueco Bengt Ilon, quando ele trabalhava como engenheiro para Mecanum AB, uma companhia sueca, as rodas mecanum também conhecida como sueca, assim como as universais, são compostas de um disco envolvido por pequenos roletes ao longo de sua circunferência. Esses roletes, em vez de colocados perpendicularmente ao eixo são colocados a um ângulo de 45° do eixo da roda, tendo seu eixo de rotação deslocado em relação ao eixo de rotação da roda. Isso faz com que a tração exercida por esta roda não seja perpendicular ao seu próprio eixo.

Deste modo a roda transmite uma força na direção de rotação e uma força na direção perpendicular do eixo de rotação dos eixos, como mostrado na Fig. 5.

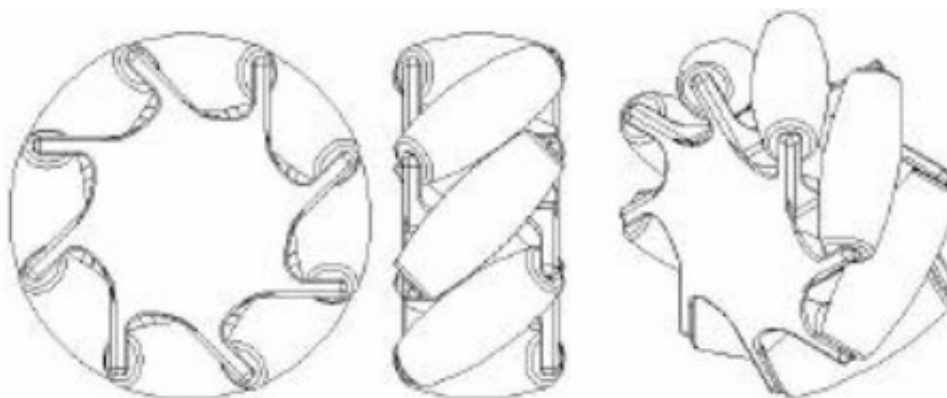


Figura 5 - Roda mecanum

Ela é adequada a espaços reduzidos devido à manobrabilidade que propicia ao veículo, por essa razão, é utilizada em máquinas transportadoras dentro de indústrias onde esse requisito existe. Veículos como o KUKA OmniMove e o Airtrax Cobrar já fazem uso desta tecnologia dentro das indústrias suprimindo o mercado de transportes de cargas industriais de maneira inovadora e reduzindo custos de logística.

Para veículos com rodas mecanum são necessários no mínimo quatro rodas posicionadas como a de um carro como na Fig. 6.

A combinação de quatro rodas montadas em um chassi retangular possibilita um movimento isolado em cada um dos dois sentidos de um plano bem como a rotação ao longo de seu próprio eixo. Assim, as rodas são posicionadas de modo que possibilite tanto o movimento de translação e de rotação.



Figura 6-Veículo Omnidirecional da Kuka

A Fig. 7 exemplifica o movimento de um veículo com rodas mecanum, mostrando diferentes movimentos possíveis do mesmo.

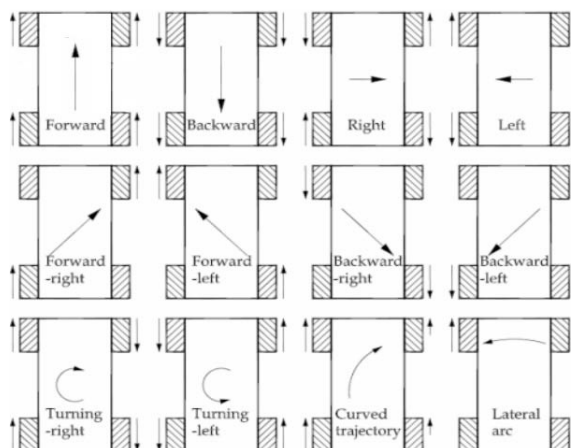


Figura 7 - Exemplos de movimento

Veículo estudado

O veículo estudado é o OmniMove da Kuka Robotics, mostrado na Fig. 8, que foi escolhido devido um projeto em parceria com a empresa Dassault Systèmes com colaboração de diversas faculdades pelo mundo, incluindo a PUC-Rio, chamado Factory Futures. Este projeto visa o projeto, modelagem e controle de um veículo omnidirecional que irá transportar e facilitar o reparo e montagem de turbinas de avião assim permitindo uma flexibilização da linha de produção.

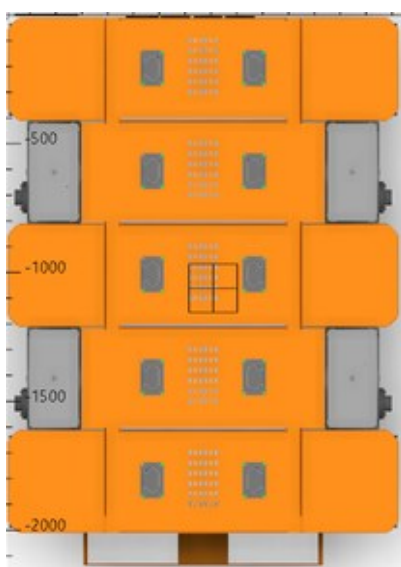


Figura 8 - Veículo OmniMove

A tabela 1 possui os dados do veículo utilizado, sendo eles todos dados fornecidos pelo projeto Factory Futures, através do programa CATIA que possibilitou as duas divisões do projeto, a criação do veículo e a automação, trocarem informações necessárias, sendo a parte de automação por estudantes da PUC-Rio.

Tabela 1 – Parâmetros do veículo

Parâmetros do veículo OmniMove			
Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valor
Momento de inercia	I	$kg.m^2$	1780.693
Massa do veículo	m	kg	4023.461
Raio das rodas	R	m	0.1795
Distância entre o eixo y_l e o eixo da roda	l_1	m	0.8
Distância entre o eixo x_f e o meio da roda	l_2	m	0.653

Modelagem

Os modelos matemáticos que existem para representar um robô móvel são muito variados. Cada modelo matemático tem características distintas, a tal ponto que representam diversas propriedades cinemáticas e dinâmicas do mesmo robô móvel. Portanto, cada um dos modelos matemáticos apresentados terá uma utilidade diferente de acordo com as propriedades ou comportamentos que o usuário necessita observar, assim, os modelos dinâmicos e cinemáticos dos robôs moveis são essenciais para o projeto de controladores.

A modelagem é a principal ferramenta para o estudo do comportamento dos mais variados sistemas de engenharia. A elaboração do modelo consiste no primeiro passo para análise de qualquer sistema de qualquer natureza e o aspecto mais importante dele deve ser a relação Simplicidade X Fidelidade.

Sistema é definido com um conjunto de componentes interconectados, que apresentam relações de causa e efeito entre si e atuam como um todo com um

determinado objetivo. Os sistemas podem ser dinâmicos, cujas propriedades variam com o tempo, ou estáticos, cujas propriedades não variam com o tempo.

O veículo estudado é representado na Fig. 9, onde os sistemas de coordenada apresentados são: o fixo (x, y), que é utilizado em relação ao espaço onde o veículo ira andar e o móvel (x_f , y_l), que é o sistema de coordenada do veículo.

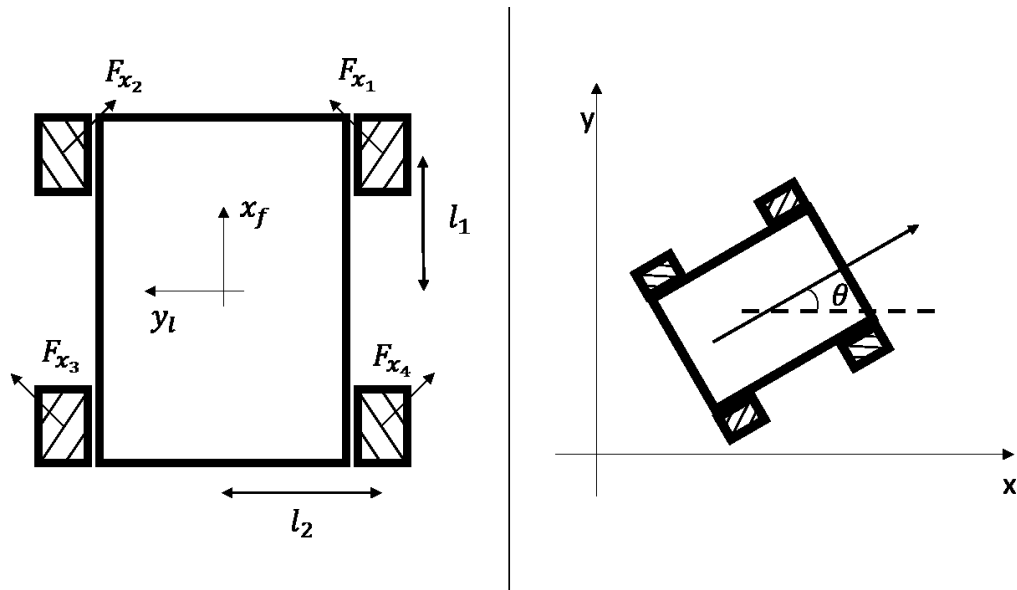


Figura 9 - Eixos do veículo e suas dimensões

Dinâmica do veículo

Dinâmica de um veículo é definida como movimentos de um corpo rígido em relação a um sistema de referência, no caso a referência dada na Fig. 9. Deste modo, o estudo da dinâmica se dá pelo entendimento dos movimentos e interações de um veículo com seus eixos de coordenadas e com o ambiente.

Para o desenvolvimento da dinâmica do veículo pode-se usar a segunda lei de Newton. Assim, uma vez que a velocidade do veículo é baixa, considerar a hipótese de que não há atrito nas rodas é válida, obtendo as equações descritas abaixo:

$$m * \ddot{x}_f = F_{x_f}$$

$$m * \ddot{y}_l = F_{y_l}$$

$$I\ddot{\theta} = \tau$$

Sendo:

m – Massa do veículo

\ddot{x}_f – Aceleração na direção frontal do veículo

\ddot{y}_l – Aceleração na direção lateral do veículo

F_{x_f} - Força aplicada pelo veículo na direção frontal

F_{y_l} – Força aplicada pelo veículo na direção lateral

I – Momento de inercia do veículo

$\ddot{\theta}$ – Aceleração da rotação do veículo

τ – Momento no veículo

Expandindo a equação temos que

$$F_{x_f} = F_{f_1} + F_{f_2} + F_{f_3} + F_{f_4}$$

$$F_{y_l} = F_{l_1} - F_{l_2} + F_{l_3} - F_{l_4}$$

$$\tau = (F_{f_1} - F_{f_2} - F_{f_3} + F_{f_4}) * l_2 + (F_{l_1} - F_{l_2} - F_{l_3} + F_{l_4}) * l_1$$

Sendo

F_{f_i} – Força na direção frontal da roda i

F_{l_i} – Força na direção lateral da roda i

l_1 – Distância entre o centro do veículo e o eixo da roda

l_2 – Distância entre o centro do veículo e o meio da roda

i - Varia de 1 a 4

E sabendo que a força na direção atua a 45° de $x_{frontal}$ então,

$$F_{f_i} = T_i * R * \text{sen } 45^\circ$$

$$F_{l_i} = T_i * R * \cos 45^\circ$$

Sendo

T_i – Torque na roda i

R - Raio da roda

É obtida a matriz de estado espaço (MEE)

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{frontal} \\ \ddot{y}_{lateral} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} \\ \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & -\frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & -\frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} \\ \frac{R \sin \frac{\pi}{4} (l_1 + l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} (l_1 - l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} (-l_1 - l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} (-l_1 + l_2)}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}$$

Cinemática do veículo

Na robótica, a cinemática desempenha um papel fundamental para definir posição, orientação e velocidade dos robôs. A equação da cinemática direta permite prever o movimento do robô sabendo a velocidade angular de cada roda.

A velocidade de rotação de cada roda é dada pela matriz cinemática (MC) abaixo:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_l \\ v_\theta \end{bmatrix}$$

Sendo

ω_i – Velocidade angular da roda i

v_f – Velocidade frontal

v_l – Velocidade lateral

v_θ – Velocidade de rotação

Uma vez que a velocidade de rotação do motor é relacionada com a velocidade de rotação das rodas pela relação de transmissão do motor N , A velocidade de rotação é dada pela equação abaixo:

$$\omega_{m_i} = \omega_i * N$$

Sendo

ω_{m_i} – Velocidade angular do motor i

N – Relação de transmissão do motor

Para saber o posicionamento em um eixo fixo dado pelo esquema na Fig. 9 é necessário primeiramente calcular a velocidade do veículo nos eixos das coordenadas x e y .

Observando a fig. 10 pode-se ver a projeção das velocidades frontal e lateral nos eixos x e y e assim foram equacionadas as velocidades v_x e v_y

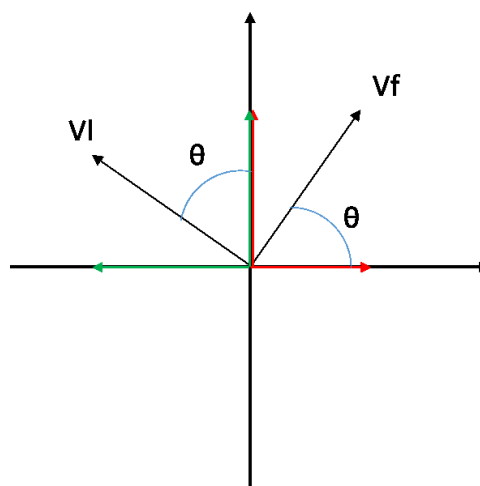


Figura 10 - Velocidade em relação ao eixo fixo

$$v_y = v_f * \text{sen } \theta + v_l * \cos \theta$$

$$v_x = v_f * \cos \theta - v_l * \text{sen } \theta$$

Sendo,

v_x – Velocidade na direção do eixo x

v_y – Velocidade na direção do eixo y

Passando para forma matricial, tem-se a matriz de rotação (MR).

$$\begin{bmatrix} v_y \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\text{sen } \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_l \end{bmatrix}$$

Integrando a velocidade é obtido o posicionamento em relação à x e y.

$$\int v_x = x + x_0$$

$$\int v_y = y + y_0$$

Motor

O motor é o principal elemento gerador do movimento do veículo. Ele é capaz de transformar energia elétrica em potência mecânica no seu eixo. Para um veículo omnidirecional são utilizados quatro servos motores elétricos de corrente continua iguais, sendo um para cada roda.

O servo motor é um atuador rotativo com alta precisão de controle para posicionamento angular. Eles são usados em várias aplicações quando se deseja movimentar algo de forma precisa e controlada, porém é utilizado principalmente em atuadores robóticos, controle numérico computacional entre outros.

Para o caso estudado foi utilizado um servo motor da marca Siemens da família S-1FK7. Como apenas estas informações foram fornecidas pelo fabricante do OmniMove, foi escolhido um servo motor que atendesse as necessidades do veículo estudado. Foi escolhido o motor SIMOTICS S-1FK7 HI (High Inertia) com numeração 1FK7103-3BF7 que suas características estão no anexo.

Para o cálculo do torque na roda é estabelecido que:

$$T_{R_i} = N * T_{m_i}$$

Sendo

T_{R_i} – Torque na roda i

T_{m_i} – Torque no motor i

O cálculo do torque disponível no eixo de um motor elétrico é realizado a partir das principais características do motor, que podem ser obtidas através dos dados do motor (ANEXO). Assim obtendo a seguinte equação para cada roda.

$$T_{m_i} = k_v * V_i - k_w * \omega_{m_i}$$

Sendo

k_v – Constante torque/tensão do motor

k_w - Constante torque/velocidade angular do motor

V_i – Voltagem no motor i

Sabendo que a relação da velocidade angular e velocidade linear de cada roda é dada por

$$\omega_i = \frac{v_i}{R}$$

Pode-se estabelecer uma relação entre a velocidade em x e y e o torque do motor para ser utilizada na simulação.

Com essas equações acima foi possível determinar os parâmetros do motor.

Sabendo que a voltagem máxima é 600V e quando o torque é máximo (36 Nm) a velocidade angular é igual a zero, obtém-se $k_v = 0.06 \text{ Nm/V}$

E ainda considerando-se que quando o torque é igual à zero a velocidade angular é máxima (3000 rpm), foi obtido $k_w = 0.012$.

Para descobrir a relação de transmissão do motor foi necessário saber a velocidade máxima do veículo, que segundo a empresa Kuka Robotics é 5 km/h. Utilizando a relação mostrada entre a velocidade e a velocidade angular mostrado anteriormente é obtido a velocidade angular máxima da roda.

E sabendo

$$\frac{\omega_{motor}}{\omega_{roda}} = N$$

É obtida a relação de transmissão $N = 387.72$.

Tabela 2 - Parâmetros do motor

Parâmetros do motor			
Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valor
Constante torque/tensão do motor	k_v	Nm/V	0.06
Constante torque/velocidade angular do motor	k_w	Nm/rad/s	0.012
Relação de transmissão	N		387.72

Pode-se perceber que a relação de transmissão é muito grande e não sendo um número inteiro como esperado. Isto se deve ao fato que, apenas alguns dados sobre o veículo real, como a velocidade máxima, foram fornecidos pelo projeto. Então foi utilizado um motor real para obtenção dos dados do motor e a relação de transmissão foi calculada de modo que o veículo chegue a esta velocidade

Controle

A engenharia de controle é baseada no princípio da realimentação e tem por objetivo o controle de variáveis de um sistema. Ela possui aplicações principalmente na engenharia elétrica, tendo também possui aplicações em engenharia química, mecânica, aeronáutica, entre outras.

A teoria do controle clássico se divide em dois tipos de sistema: o sistema de malha aberta e o sistema de malha fechada.

O sistema de malha aberta utiliza um controlador conectado em série com o processo a ser controlado, de modo que a entrada do processo deve ser tal que sua saída se comportará como desejada. A principal característica de um sistema de malha aberta é que a ação de controle independe da saída.



Figura 11 - Sistema de malha aberta

O sistema de malha fechada utiliza uma medida adicional da saída real, chamada resposta, a fim de compará-la com a resposta desejada do sistema.



Figura 12 - Sistema de malha fechada

A vantagem do sistema em malha fechada consiste no fato da realimentação tornar uma resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e variações internas dos parâmetros do sistema. Já a vantagem do sistema de malha aberta consiste na estabilidade, pois são mais robustos.

Existem diversos tipos de controladores em malha fechada, um dos mais utilizados na indústria é o PID que será utilizado para o controle de velocidade deste estudo.

Controlador PID

Os controladores PID (Proporcional, integrador e derivativo) são controladores com feedback, muito utilizados em automação industrial. Esses controladores calculam um erro entre o valor medido na saída e o valor desejado no processo. Assim o controlador tenta diminuir o erro que foi gerado pela saída, ajustando suas entradas. Ele combina as vantagens do controlador tipo P, PI e PD.

Na Fig. 13 mostra uma clássica aplicação do controlador PID em um controle de um processo dinâmico.

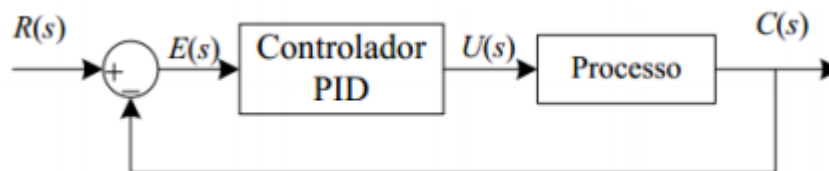


Figura 13-Controlador básico

O PID é uma combinação de três controladores combinados

Na ação P (proporcional), o sinal de erro entre a referência e a saída é proporcional ao ganho do controlador, chamado de k_p . Quanto maior o ganho, k_p , menor o erro do processo de controle, porém isto pode levar instabilidade do sistema.

$$P_{saída} = k_p * e(t)$$

A ação I (Integral) produz um sinal de saída que é proporcional a magnitude e a duração do erro. Assim, acelerando a resposta do sistema. Ele é descrito por:

$$I_{saida} = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Onde k_i é o ganho integral.

Na ação derivativa (D) é produzido um sinal que é proporcional à velocidade do erro. Ela fornece uma correção antecipada do erro, assim diminuindo o tempo de resposta do sistema e aumentando a estabilidade do mesmo. Ela é dada pela seguinte equação.

$$D_{saida} = k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Onde k_d é o ganho derivativo.

Controle do OmniMove

Para o controle do OmniMove foi escolhido o controlador PID, que foi utilizado para sete diferentes controladores que possuem como entrada o erro do torque de cada motor e os outros três possuem como entrada o erro de x , y e θ sendo a saída de todos eles a voltagem necessária para o movimento do veículo.

Como as entradas do sistema são x , y e θ , em função do tempo, para os controladores que possuem como entrada o erro do torque, foi necessário uma pré análise para transformação destas variáveis em torque. Para isto, com os três graus de liberdade em função do tempo foram possíveis derivar e saber a velocidade em função do tempo. Sabendo a relação entre v_x e v_y com v_f e v_l como mostrado abaixo, pode-se criar a relação contrária, a partir da inversa da matriz de senos e cossenos. Com esses dados definidos é possível derivar novamente e saber as acelerações dos três graus de liberdade.

$$MR = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_y \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin \theta}{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta} & \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \\ \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta} & -\frac{\sin \theta}{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

Para descobrir o torque de cada motor é necessário saber a inversa da matriz de estado espaço abaixo e multiplicar pelas acelerações que já foram calculadas.

$$MEE = \begin{bmatrix} \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} \\ \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & -\frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & \frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} & -\frac{R * \sin \frac{\pi}{4}}{m} \\ \frac{R \sin \frac{\pi}{4} (l_1 + l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} * (l_1 - l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} * (-l_1 - l_2)}{I} & \frac{R \sin \frac{\pi}{4} * (-l_1 + l_2)}{I} \end{bmatrix}$$

Porém, como pode ser observado, a matriz não é quadrada, e por isso não é possível fazer a inversa como é feita com a matriz de rotação. Para resolver este problema é utilizado a pseudo inversa de MEE.

Quando a matriz A tem dimensões $m \geq n$, como é o caso da MEE, utiliza-se o método dos mínimos quadrados para solucionar.

$$Ax = b$$

Que coincide com a única solução da equação normal

$$A^* Ax = A^* b$$

Assim a pseudo inversa é dada por

$$A^+ = (A^* A)^{-1} A^*$$

E deste modo foi feito a conta abaixo para descobrir o torque desejado que foi comparado com o torque gerado pelo controlador.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = MEE^+ * \begin{bmatrix} \ddot{x}_{frontal} \\ \ddot{y}_{lateral} \\ \theta \end{bmatrix}$$

Na Fig. 14 e Fig. 15 é possível ver um diagrama de blocos do controle do torque e o diagrama de blocos completo com a entrada e a saída sendo a velocidade de x , y e θ com o pré-processamento para determinar o torque para assim ser inserido no controlador. Ainda é possível ver a integração para descobrir o posicionamento.

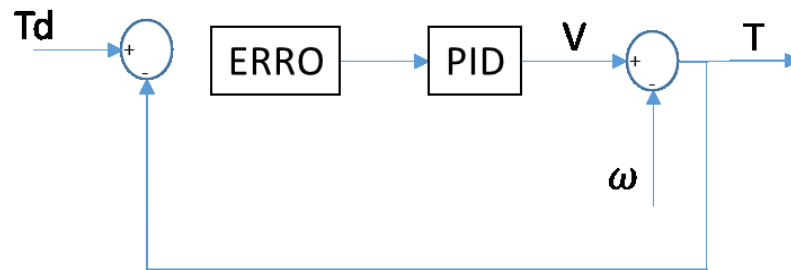


Figura 14 - Diagrama de blocos do controle do torque

Como os motores utilizados neste veículo são iguais, os ganhos K_p , K_d e K_i de cada motor podem ser considerados respectivamente iguais em cada controlador

Para os controladores que utilizam o erro de posição foi feita a conversão das posições em relação a eixo fixo para o eixo do veículo o sinal obtido de cada controlador foi multiplicado pela inversa da matriz de rotação MR^{-1} e depois para conversão em forma de torque o resultado foi multiplicado pela inversa da matriz de estado espaço MEE^+ . Depois de obtido estes sinais, os mesmos foram somados ao sinal obtido pelo controlador de torque, de modo a obter um sistema com ambos os controles, como mostrado na Fig. 15. Estes controladores possuem maior importância de que seus erros sejam pequenos, pois o objetivo principal proposto por este trabalho é controlar a posição do veículo.

Resultados

Primeiramente foi testado o modelo estabelecido anteriormente, para isto foram aplicadas diferentes voltagens no motor das rodas para se verificar a velocidade e posição do veículo estão de acordo com o esperado.

Este teste foi dividido em três partes:

- Verificação do movimento em x , para isto foram aplicadas voltagens máximas iguais em todas as rodas.
- Verificação do movimento em y , para isto foram aplicadas na roda 1 e na roda 3 voltagens máximas de 600V e na roda 2 e 4 voltagens de -600V
- Verificação do movimento em θ , para isto foram aplicadas voltagens na roda 1 e 4 de 600V e nas rodas 2 e 3 voltagens de -600V

Após a verificação do modelo, foi feito a verificação do sistema de controle proposto. Foram feitos quatro testes.

- Verificação do movimento apenas andando em x ;
- Verificação do movimento apenas andando em y ;
- Verificação do movimento apenas com rotação em θ ;
- Verificação do movimento com as três variáveis;

Teste 1 do Modelo

Este teste foi feito para verificar o movimento em x , sabendo que aplicando voltagens iguais em todas as rodas, o veículo deve andar apenas no eixo de x .

Conforme desejado, o movimento se deu apenas em x , como pode ser verificado na Fig. 16. Sabendo que as imagens dos veículos são feitas em intervalos de tempo iguais, pode-se verificar tanto na figura 16 quanto na Fig. 18 que com a voltagem máxima o veículo acelera até estabilizar em sua velocidade máxima.

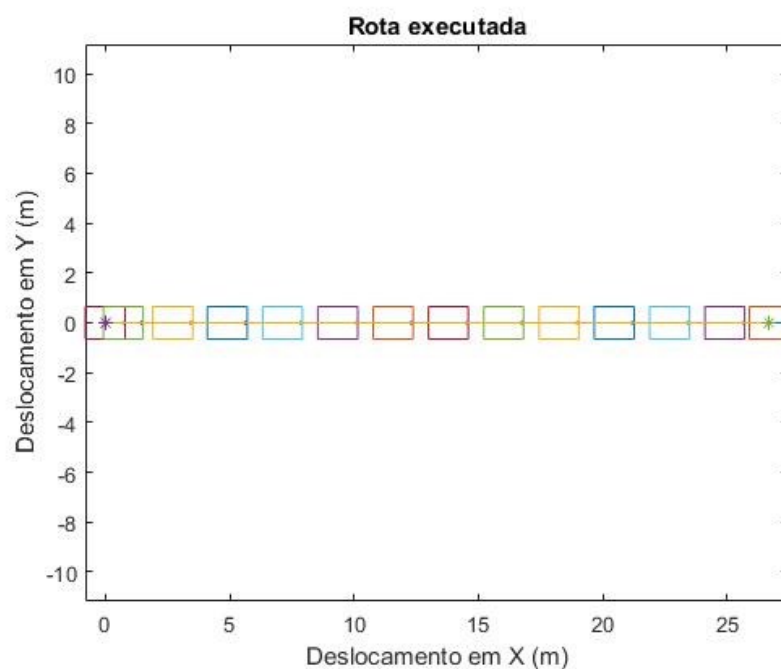


Figura 16 - Deslocamento com voltagens $V1=V2=V3=V4=600V$

Na Fig. 17 pode-se verificar que como esperado, não houve rotação do veículo.

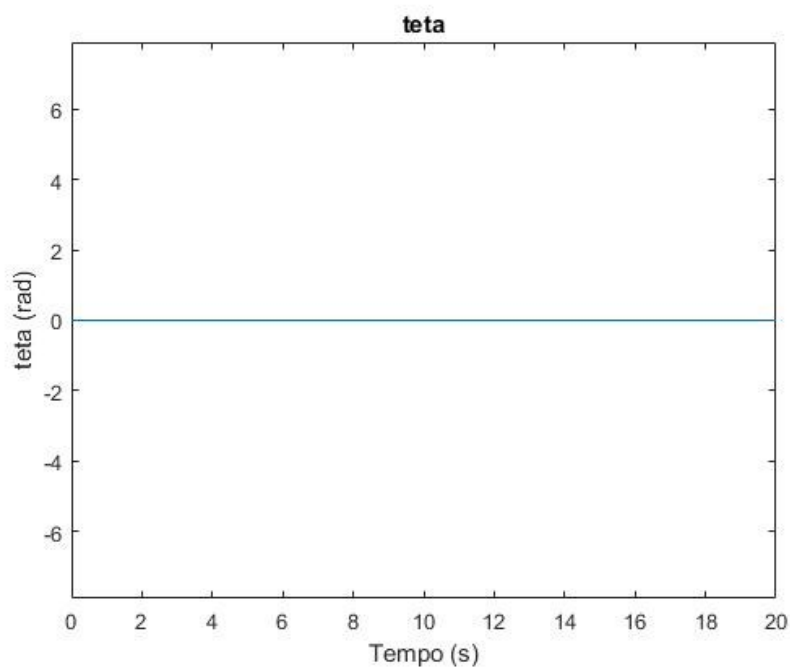


Figura 17 - Rotação do veículo

Pode-se observar na Fig. 17 que há um pequeno erro no cálculo da velocidade de y e θ . Isto se deve a erros aproximação utilizado no MatLab.

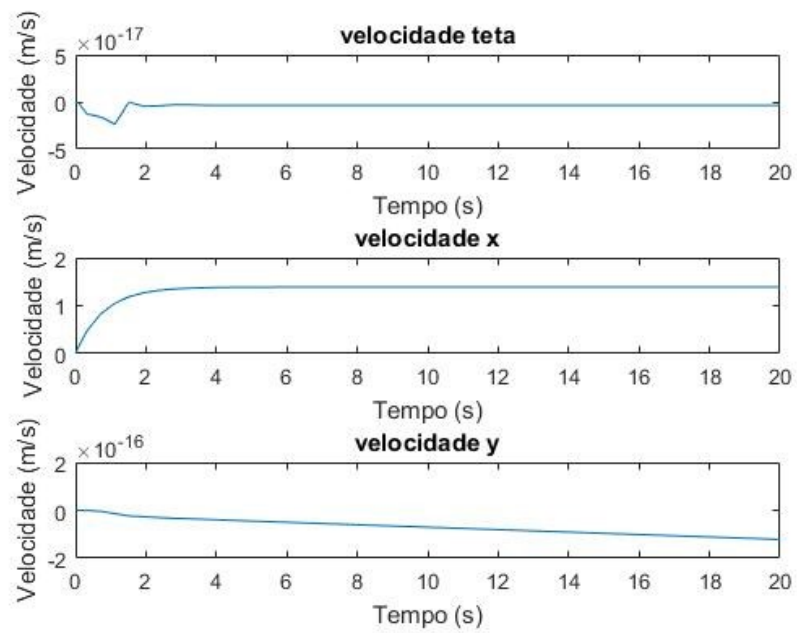


Figura 18 - Velocidades em x y e teta

Na Fig. 19 pode-se observar que quando a velocidade é máxima o torque é igual a zero e quando a velocidade é igual à zero, o torque em cada roda é máximo, quando se compara com a Fig. 18 acima.

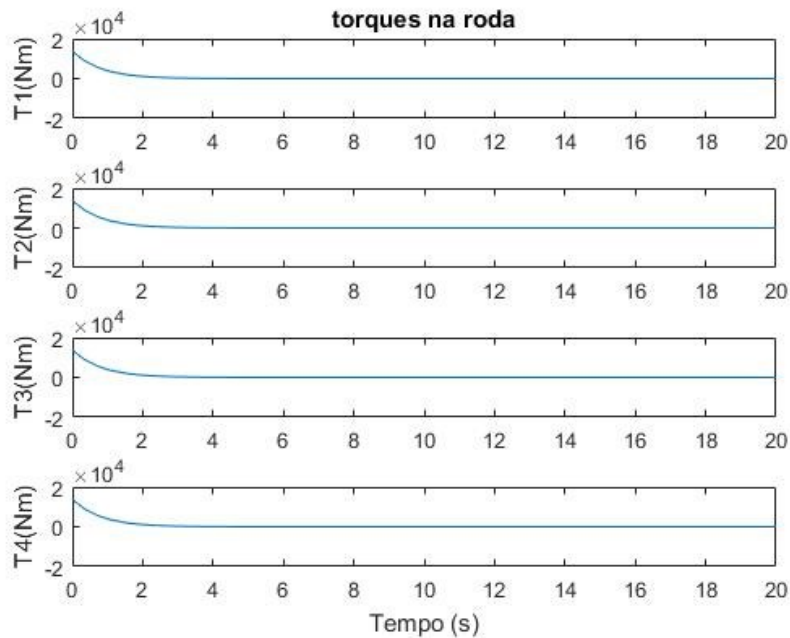


Figura 19- Torque nas rodas

Teste 2 do Modelo

Este teste foi feito para verificar o movimento em y em função do tempo, sabendo que é aplicado voltagens iguais a 600V nas rodas 1 e 3 e -600V nas rodas 2 e 4, o veículo deve andar apenas no eixo de y.

Pode-se verificar na Fig. 20 que o movimento é apenas em y, como desejado. Sabendo que as imagens dos veículos são feitas em intervalos de tempo iguais, como visto anteriormente pode-se verificar tanto na figura 20 quanto na Fig. 22 que com a voltagem máxima o veículo acelera até estabilizar em sua velocidade máxima.

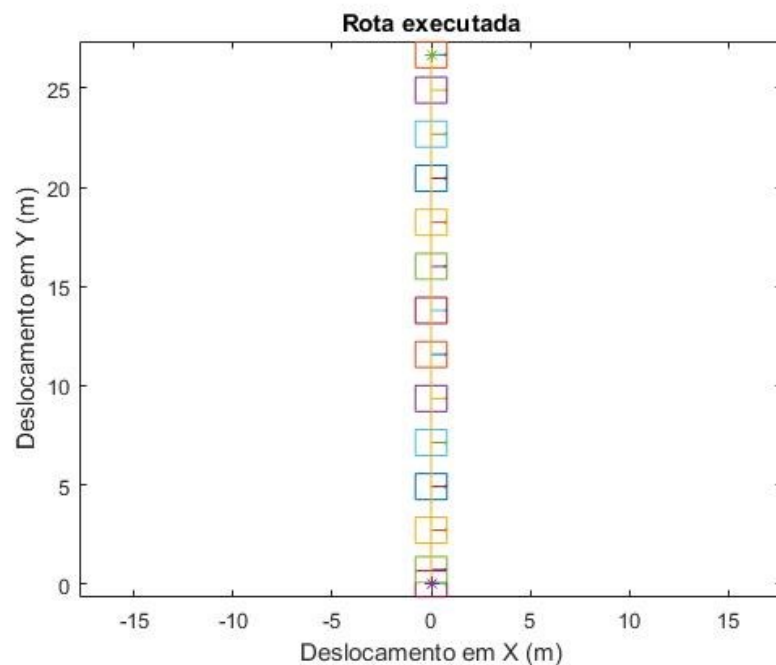


Figura 20- Deslocamento com voltagens $V1=V3=600V$ $V2=V4=-600V$

Na Fig. 21 pode-se verificar que novamente como esperado, não houve rotação do veículo.

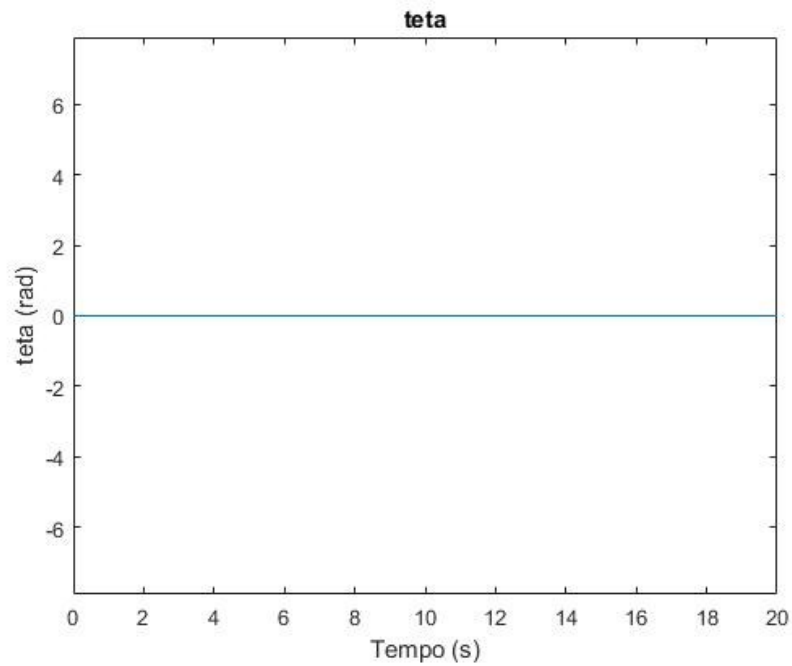


Figura 21 - Rotação do veículo

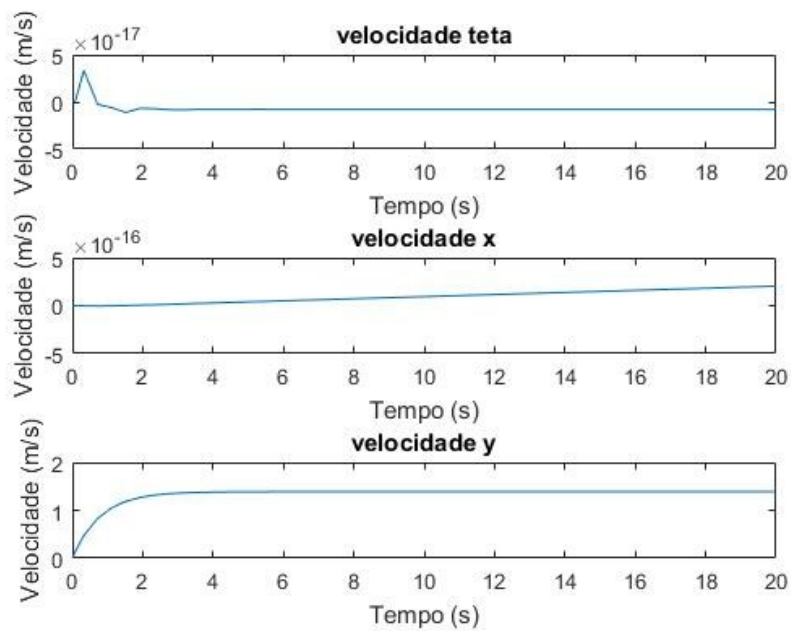


Figura 22 - Velocidade do Veículo

Na Fig. 23, comparando com a Fig. 22, pode-se observar que quando a velocidade é máxima o torque é igual à zero. Também se observa que no instante inicial o torque é máximo positivo quando a voltagem é positiva e máximo negativo quando a voltagem é negativa.

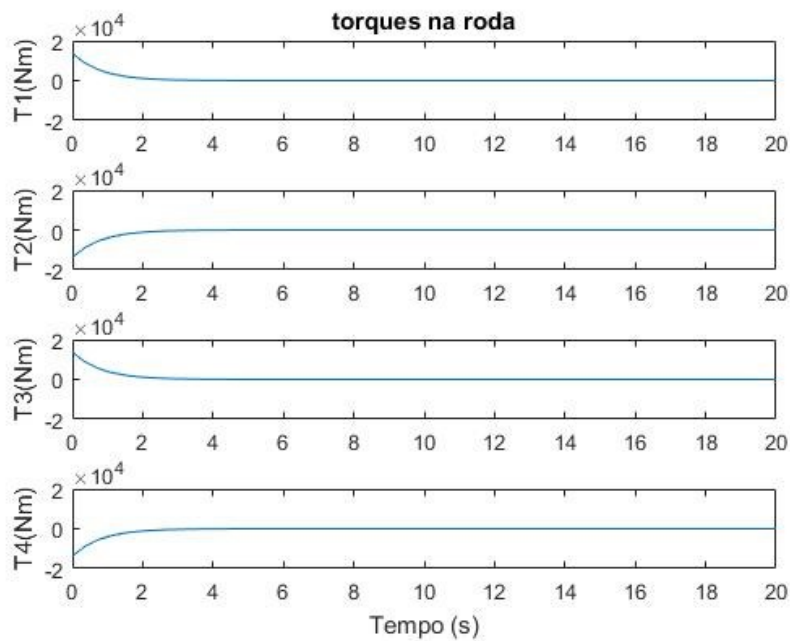


Figura 23 - Torques nas rodas

Teste 3 do Modelo

Este teste foi feito para verificar o movimento de rotação do veículo em função do tempo, sabendo que é aplicado voltagens iguais a 600V nas rodas 1 e 4 e -600V nas rodas 2 e 3, o veículo deve andar apenas rodar em volta do seu centro de massa.

Pode-se verificar na Fig. 24 que o movimento é apenas de rotação em volta do seu centro e massa, como desejado. Sabendo que as imagens dos veículos são feitas em intervalos de tempo iguais pode-se verificar tanto na figura 24 quanto na Fig. 26 que, com a voltagem máxima, o veículo acelera até estabilizar em sua velocidade máxima. Isto também pode ser visto na Fig. 25.

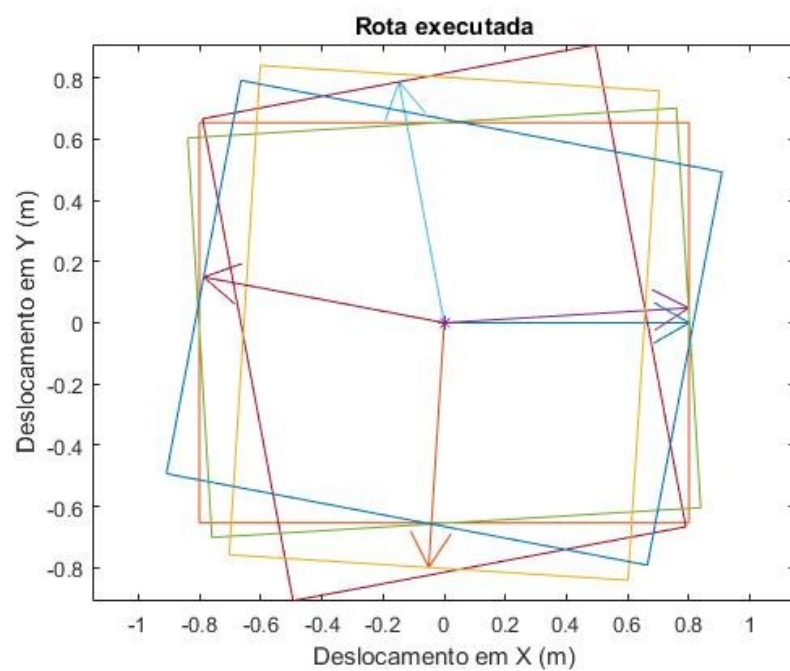


Figura 24- Deslocamento com voltagens $V1=V4=600V$ $V2=V3=-600V$

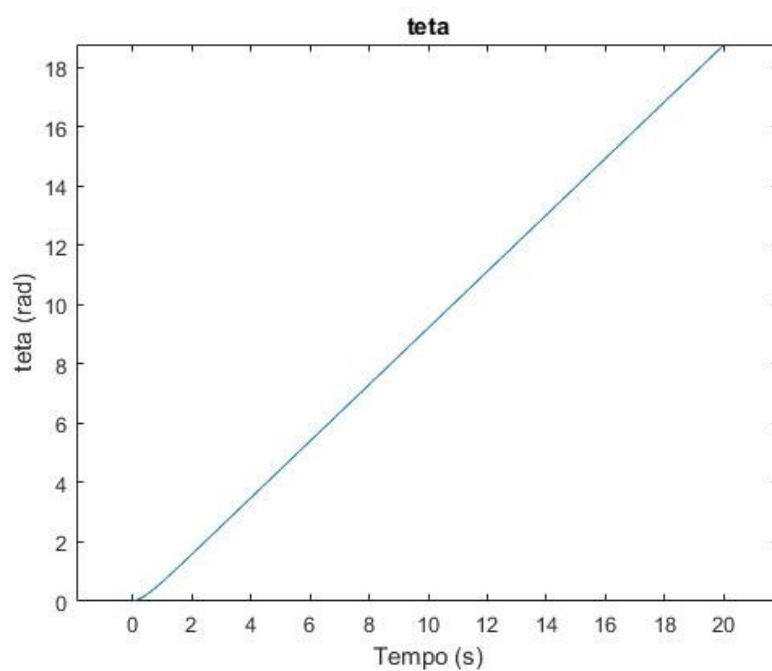


Figura 25 - Rotação do veículo

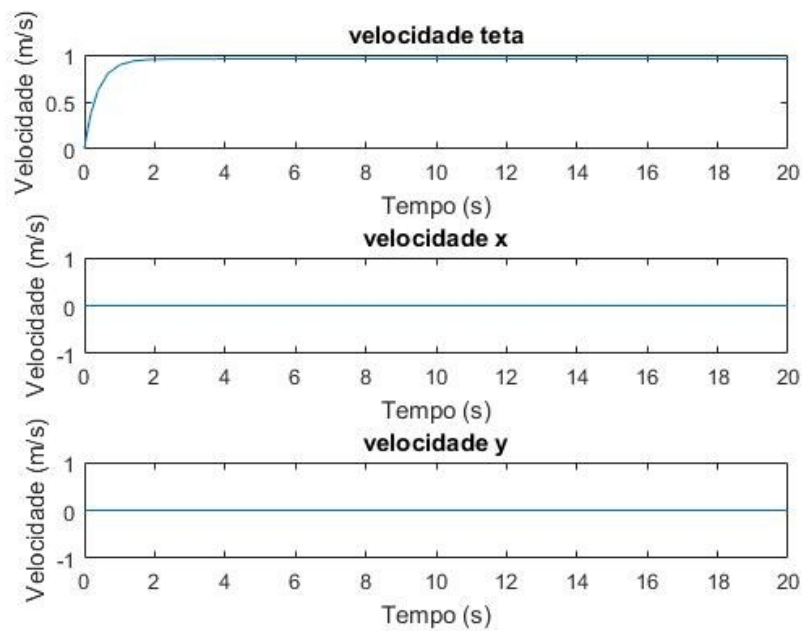


Figura 26 - Velocidade do veículo

Com estes três testes realizados e com os resultados de acordo com o esperado, pode-se considerar que os modelos dinâmico e cinemático estão adequados e assim, utiliza-los para o teste do controle de posição do veículo.

Teste 1 do controle

Para este teste foi escolhida uma rota de x em função do tempo de modo que o veículo começasse com uma velocidade igual a zero, acelerasse até uma velocidade média de movimento do veículo e depois desacelerasse até a parada total do veículo.

Sabendo que as imagens do veículo na Fig. 27 são feitas em intervalos iguais pode-se observar o movimento previamente estabelecido. Isto também pode ser observado na Fig. 28 que mostra a velocidade de x aumentando até um ponto máximo e depois diminuindo até zero.

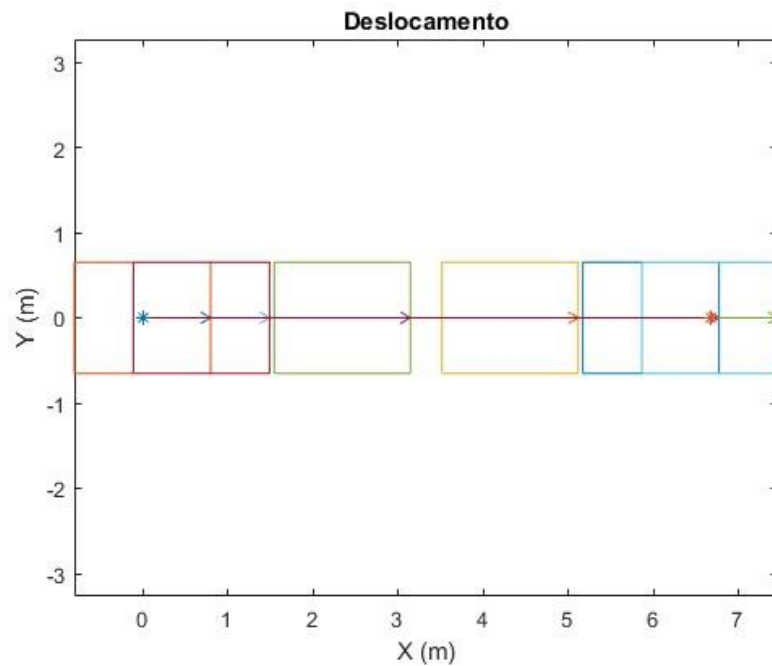


Figura 27-- Deslocamento com controle

Na Fig. 28 pode-se verificar uma desprezível diferença na velocidade, porém observando melhor na Fig. 29 onde possui os erros de posição verifica-se que esses erros são muito pequenos e pouco afetam o posicionamento do veículo.

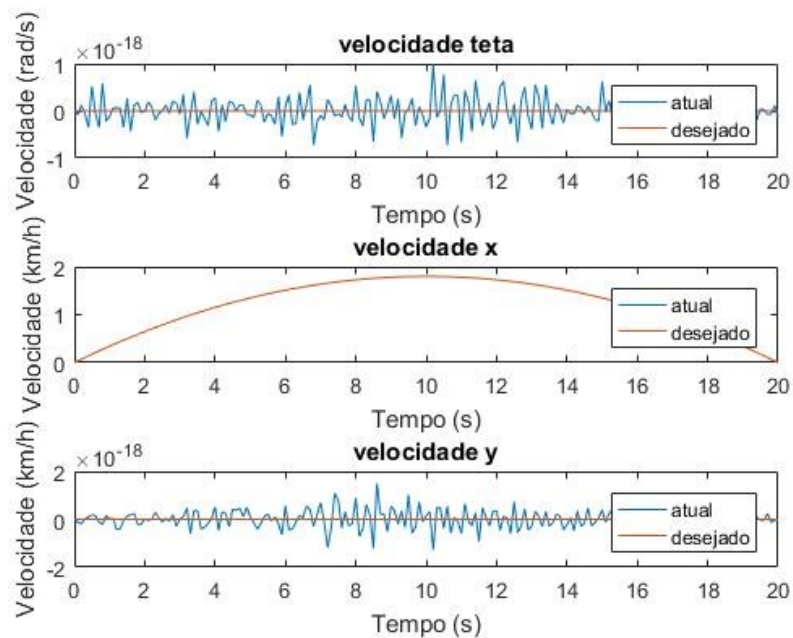


Figura 28- Velocidades do veículo

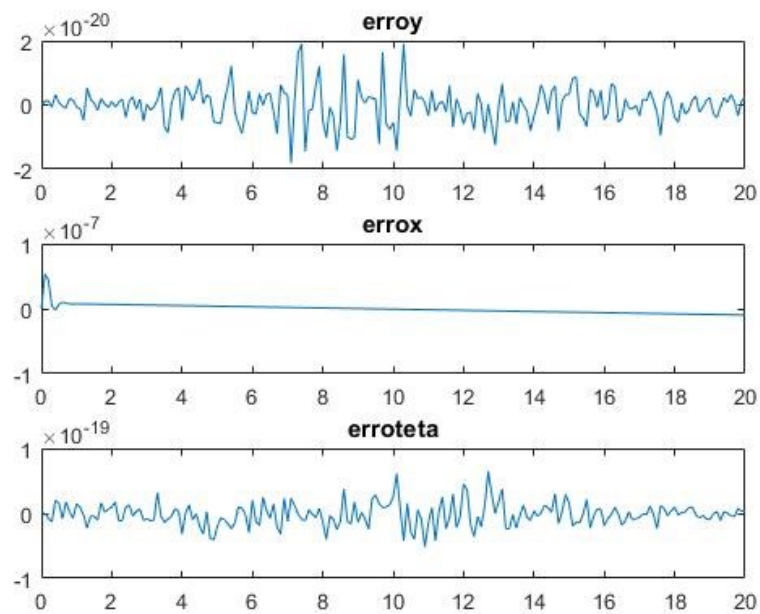


Figura 29- Erros de posicionamento do veículo

Teste dois do controle

Como no teste um, foi feita uma rota onde a velocidade começa em zero, acelera até um ponto máximo e depois desacelera até a parada total do veículo.

Na Fig. 30 pode-se observar o movimento do veículo somente em y, sem rotação. Nesta figura também é possível perceber a aceleração e desaceleração do veículo. Esta informação também pode ser vista na Fig.31, onde são mostradas as velocidades desejadas e atuais do veículo.

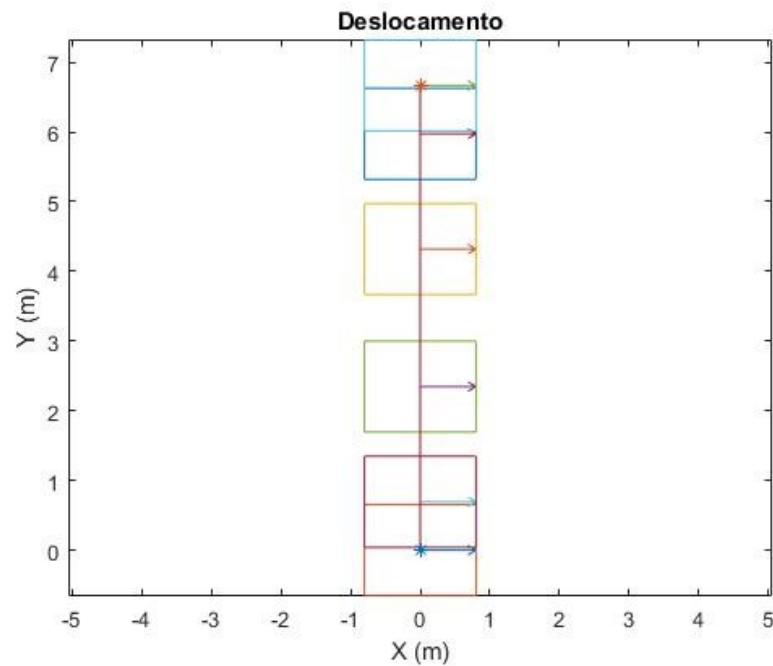


Figura 30 - Deslocamento com controle

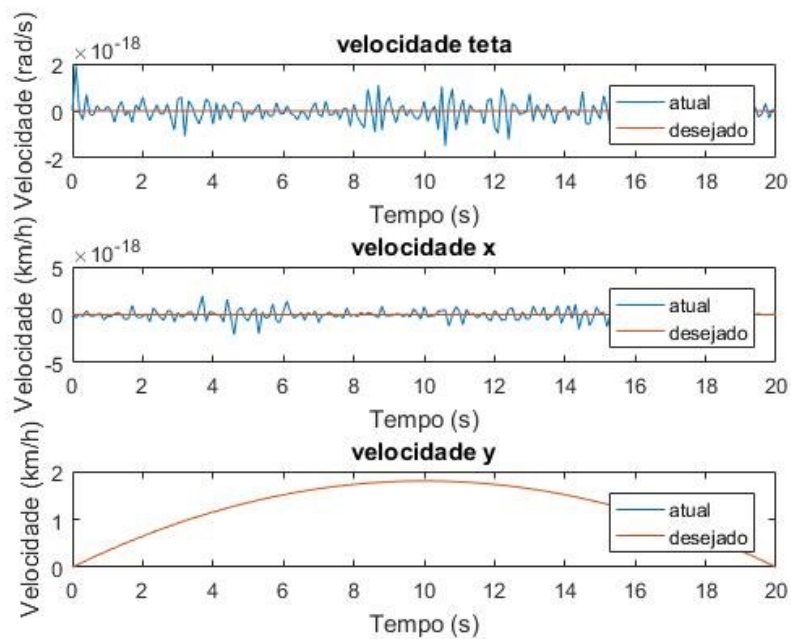


Figura 31 - velocidades do veículo

Na Fig. 32 pode-se verificar que o controle funciona com erros pequenos, ou seja, com precisão satisfatória e que os erros pequenos visto na velocidade na prejudicam o funcionamento do controlador.

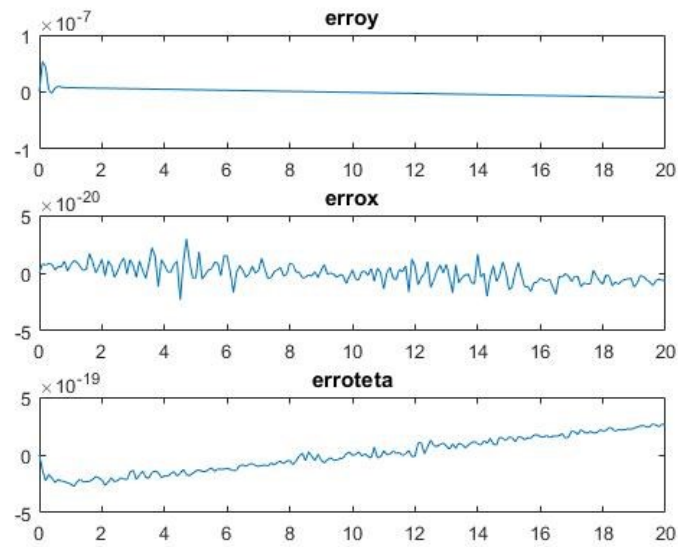


Figura 32- Erros de posicionamento

Teste três do controle

Como nos testes anteriores, foi feito uma rota onde a velocidade começa em zero, acelera até um ponto máximo e depois desacelera até a parada total do veículo.

Na Fig. 33 pode-se observar o movimento do veículo somente com rotação.

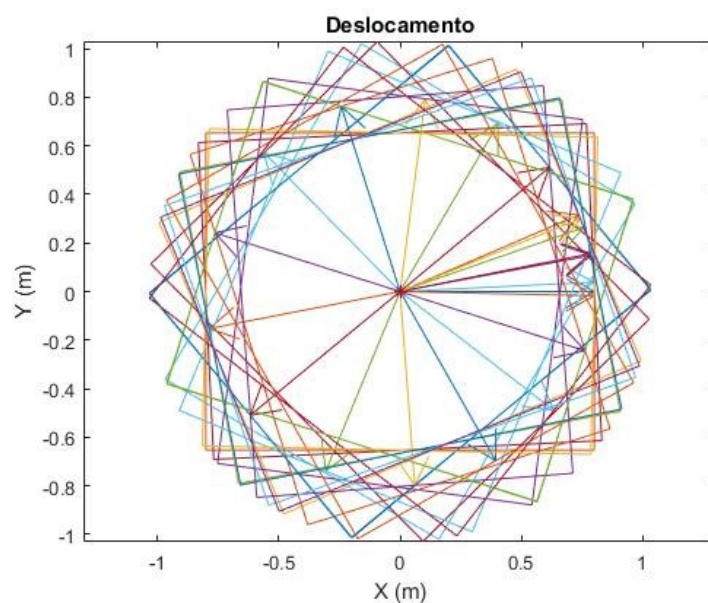


Figura 33- Deslocamento com controle

A Fig. 34 mostra com maiores detalhes o movimento de θ em função do tempo.

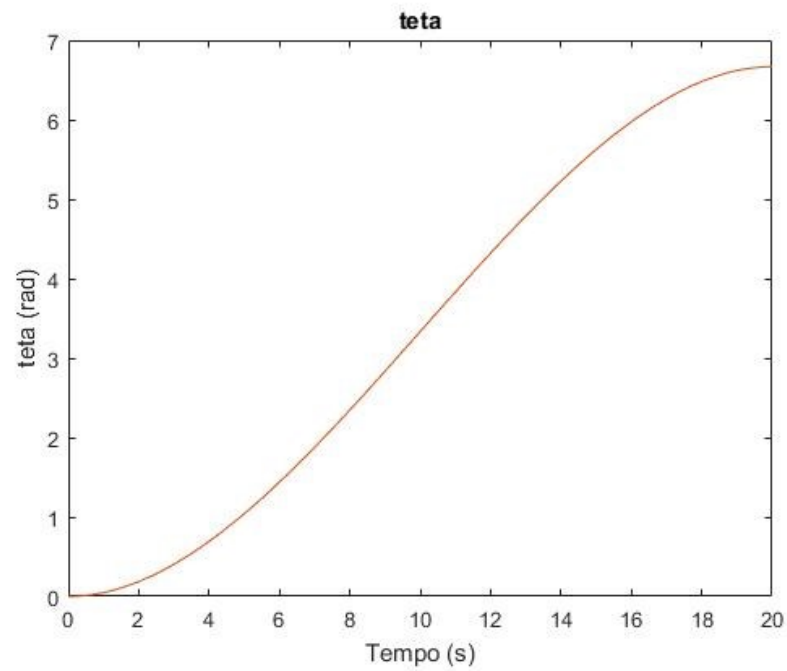


Figura 34- Deslocamento de teta

Na Fig. 35 é possível ver que a velocidade segue o planejado.

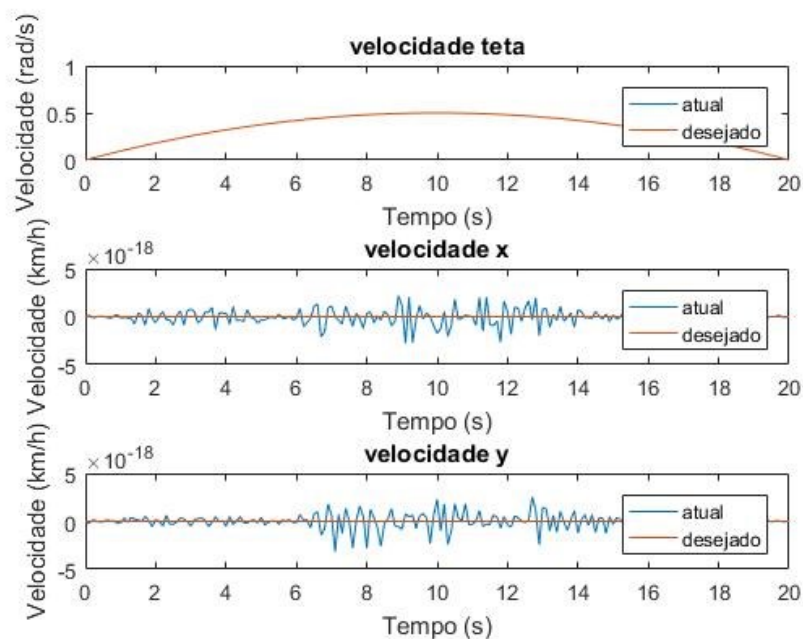


Figura 35- Velocidades do veículo

Na Fig. 36 é possível ver que controle funciona com precisão aceitável e que com os resultados dos dois primeiros testes o sistema funcionara corretamente, como será visto no teste quatro sem erros consideráveis.

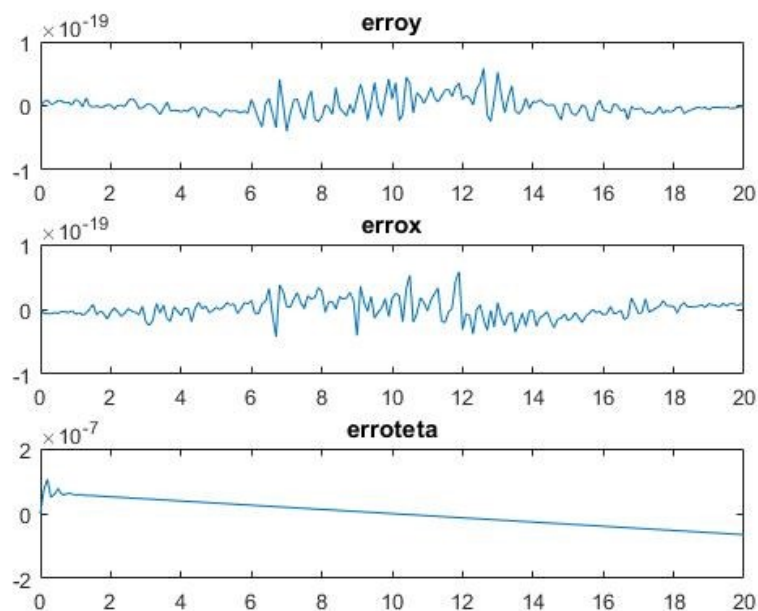


Figura 36 - Erros de posicionamento

Teste quatro do controle

Neste teste a rota desejada envolve as três variáveis. As rotas de x e y foram iguais de modo que a trajetória faça um ângulo de 45° com o eixo x . Já a trajetória de θ necessitou de uma velocidade menor para que o veículo consiga realizar os três movimentos simultaneamente.

Na Fig. 37 foi possível ver que o movimento realizado pelo veículo foi como esperado. E na Fig. 38 mostra mais detalhadamente o movimento de θ , em função do tempo.

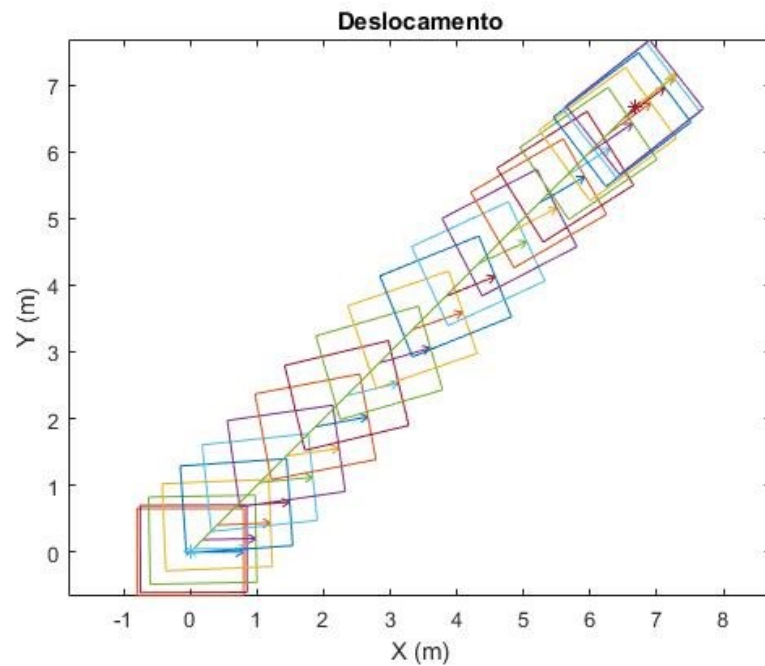


Figura 37-Deslocamento com controle

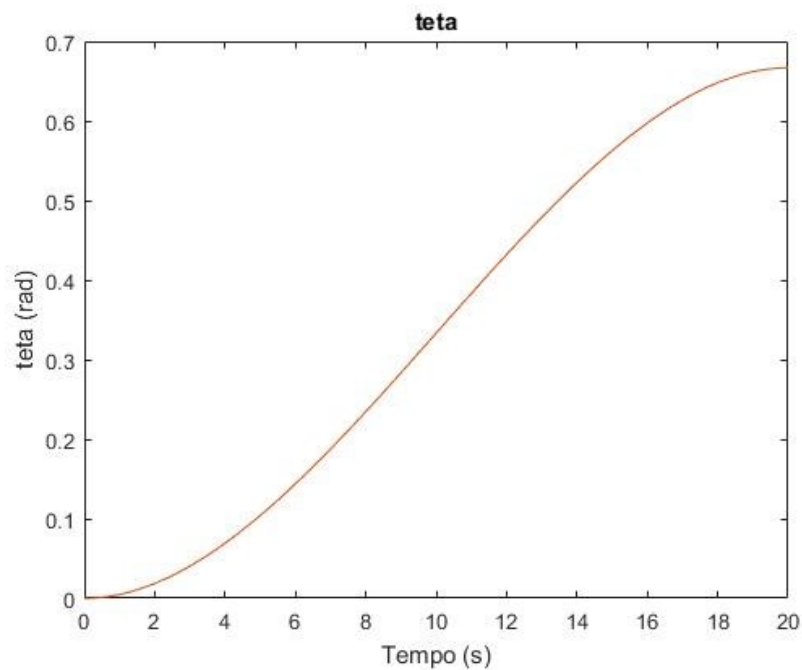


Figura 38-Teta em função do tempo

Na Fig. 39 observa-se que as velocidades de x e y são iguais e que as três velocidades começam em zero, atingem um ponto máximo e diminuem até o ponto de parada total do veículo.

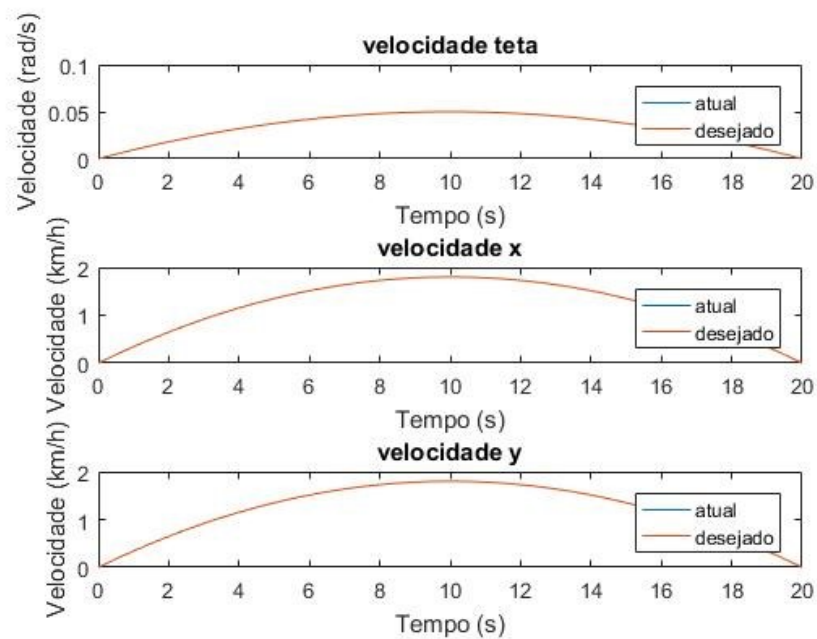


Figura 39 - Velocidades do veículo

Na Fig. 40 podem-se ver os erros de posicionamento do veículo. Nela observa-se que mesmo com movimento nos três graus de liberdade o erro entre o posicionamento desejado e o obtido é dentro do limite desejado.

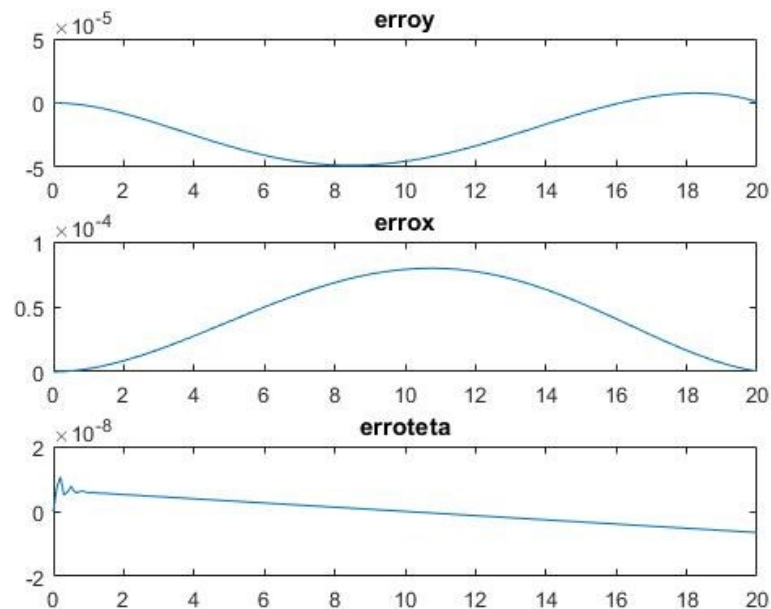


Figura 40 - Erros de posicionamento

Considerações finais

Considerando-se que o veículo estudado irá transportar e facilitar o reparo e montagem de turbinas de avião e sendo esta uma carga pesada, considerar o modelo dinâmico na lei de controle é de grande importância, já que isso permite aproveitar ao máximo a potência do sistema de tração sem perder precisão na tarefa requerida.

O veículo omnidirecional, Omnimove da Kuka Robotics, se mostrou adequado à realização das tarefas estabelecidas.

Modelos cinemáticos e dinâmicos bastante complexos podem ser obtidos considerando-se a distribuição das rodas e sua geometria.

Na modelagem foi assumido que os robôs móveis são construídos com uma estrutura rígida, equipada com rodas não deformáveis e que elas se movem sobre um

plano horizontal, existindo uma relação direta entre o movimento de rotação das rodas e o movimento de translação do robô.

Os controladores PID (Proporcional, integrador e derivativo) se mostraram bastante adequados ao estudo apresentando um desempenho robusto nas condições de funcionamento com simplicidade funcional.

A não linearidade da modelo se mostrou um desafio no momento da escolha dos ganhos dos controladores. Necessitando assim de vários testes para a obtenção do melhor.

Os testes realizados e a obtenção de resultados de acordo com o esperado permitiram considerar os modelos dinâmico e cinemático estabelecidos adequados.

Sugestões de trabalhos futuros

Em muitos casos o robô deve transportar cargas importantes, ou transporta sobre sua estrutura um manipulador para realizar alguma tarefa específica. Nestes casos, as variações de cargas ou os próprios movimentos do manipulador geram variações nos parâmetros que se apresentam como perturbações para a malha de controle. Desta forma sugere-se que trabalhos futuros incluam o controle adaptativo para diferentes massas.

Referência Bibliográfica

ADĂSCĂLIȚEI, F.; DOROFTEI, I.; **Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels - a Systematic Survey**; "Gh. Asachi" Technical University of Iasi, Mechanical Engineering Faculty, Theory of Mechanisms and Robotics Department, Iasi, Romania.

AFONSO, A. P.; **Controle de Malha Aberta versus Controle de Malha Fechada**.

BORISOV, A. V.; KILIN, A. A.; MAMAEV, I. S.; **Dynamics and Control of an Omniwheel Vehicle**; Udmurt State University, Izhevsk, Russia; Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russia; Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia; March 2, 2015.

EL-HAMID, A. S. A.; EISSA, A.H.; **Position Control of AC Servomotor Using Internal Model Control Strategy**.

FALEIROS, A. C.; **Curso de Álgebra Linear Aplicada**; Centro de Matemática, Computação e Cognição, Universidade Federal do ABC; Santo André, SP, Brasil; 6 de abril de 2009.

FUULMER, C. R.; **The Design and Fabrication of an OMNI-Directional Vehicle Platform**; University of Florida; 2003.

GOODWIN, G. C.; GRAEBE, S. F.; SALGADO, M. E.; **Classical PID Control**, Control System Design, Prentice Hall PTR.

HOELTGEBAUM, T.; **Análise de Dinâmica Longitudinal em Um Veículo de Fórmula SAE Elétrico**, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.

JAMIL, A.S.B.A; **Development of Controller Based on Fuzzy and Pid for Mecanum Wheel Robot**; Faculty of Electrical and Electronic Engineering; University Tun Hussein Onn Malaysia; June 2013.

KANJANAWANISHKUL, K.; KANTHARAWICHAI, K.; **Omni-directional wheeled mobile robots: wheel types and practical applications**; Mechatronics Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Thailand.

LIN, LC.; Hao-Yin SHIH, HY.; **Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum-Wheeled Robot**; Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University, Taichung, Chinese Taipei; February 13, 2013.

MALDENIYA, M.K.S.H.; MADURAWA, R. C.; THILAKASIRI, L. B. H. T.; THENNAKOON, T. M. S.; RAJAKARUNA, R. M. T. P.; **Remote Controlled 4WD OMNI Directional Robot Using Mecanum Wheels**; Department of Mechatronics, Faculty of Engineering, South Asian Institute of Technology and Medicine (SAITM), Sri Lanka.

MATAS, A. L.; **Sintonia de Controladores PID com Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) Aplicado a um Motor de Corrente Contínua**; Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; São Carlos, SP, Brasil; Junho, 2012.

.

MATSINOS, E.; **Modelling of the motion of a Mecanum-wheeled vehicle**; Institute of Mechatronic Systems, Zurich University of Applied Sciences (ZHAW), Winterthur, Switzerland.

NASCIMENTO, T.P.; **Controle de Trajetória de Robôs Móveis Omni-Direcionais: Uma abordagem Multivariável**; Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia; Salvador, BA, Brasil; 2009.

NISHIBE, C. A.; SIERPINSKI, J. T.; GASOTO, R. G.; SILVA, T. A.; BARANIUK, T. A. O.; **Desenvolvimento de Sistema de Controle Sem Fio Para Robô Omni-Direcional**, Departamento Acadêmico de Informática, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Curitiba, PR, Brasil; 2010.

REIS, J. W. W. R. A.; **PID Control of Continuous Processes**; Programmable Logic Controllers, Fourth Edition, Prentice Hall PTR.

SÁ, F. J. M.; **Sistema de navegação para plataforma móvel omnidirecional**; Engenharia Eletrotécnica e de Computadores; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 28 de julho de 2016.

SALIH, J.E.M.; Profesor Dr YAACOB, S.; Prof. MADYA; Dr JUHARI, M. R. M.; **Omni-Directional Mobile Robot with Mecanum Wheel**; School of Mechatronics Engineering, Kolej Universiti Kejuruteraan Utara Malaysia, Perlis, Malaysia.

SENAI; **Estruturas Básicas do Controle Automático**; Espírito Santo / Companhia Siderúrgica de Tubarão.

SIEMENS AG, **Compact Synchronous Motors for Motion Control Applications**, Industry Sector, Drive Technologies Division, Motion Control Systems; Germany; Brochure; October 2013.

TLALE, N.; VILLIERS, M.; **Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform**; Pretoria, RSA.

VIBOONCHAICHEEP, P.; SHIMADA, A.; Member, IEEE, KOSAKA, Y.; **Position Rectification Control for Mecanum Wheeled Omni-directional Vehicles**.

VILLIERS, M.; Prof. BRIGHT, G.; **Development of a Control Model for a Wheel Mecanum Vehicle**; Council for Scientific and Industrial Research; Pretoria, South Africa; University of KwaZulu Natal; Durban, South Africa.

WANG, TY.; TSAI, CC.; WANG DA.; **Dynamic Control of An Omnidirectional Mobile Platform**; Department of Electrical Engineering, Nan Kai University of

Technology; Department of Electrical Engineering, National Chung Hsing University;
Department of Mechanical Engineering, Nan Kai University of Technology.

Anexo

Dados do motor

SIMOTICS S-1FK7 servo motors, naturally cooled	Shaft height	Rated speed	Static torque	Stall current	Rated torque	Rated current	Rotor- moment of inertia without brake	Converter Rated output current	SINAMICS S120 Motor Module Booksize format *)
Type	SH	n_{rated} rpm	M_s $\Delta T = 100\text{ K}$ Nm	I_s $\Delta T = 100\text{ K}$ A	M_{rated} Nm	I_{rated} A	J kgm ²	I_{rated} A	
SIMOTICS S-1FK7 HI (High Inertia)									
1FK7042-3BK7	48	6,000	3	4.4	1.5	2.5	5.1	5	6SL3120-1TE15-0AA3
1FK7060-3BF7	63	3,000	6	4.45	4.7	3.7	12.5	5	6SL3120-1TE15-0AA3
1FK7062-3BF7	63	3,000	8.5	5.3	6	4	23.5	9	6SL3120-1TE21-0AA3
1FK7081-3BF7	80	3,000	12	8.7	8.7	6.8	49	9	6SL3120-1TE21-0AA3
1FK7084-3BC7	80	2,000	20	8.5	15	6.7	99	9	6SL3120-1TE21-0AA3
1FK7084-3BF7	80	3,000	20	12.1	10	6.5	99	18	6SL3120-1TE21-8AA3
1FK7100-3BC7	100	2,000	18	8.4	14.5	7.1	87	9	6SL3120-1TE21-0AA3
1FK7101-3BC7	100	2,000	27	12.3	20.5	9.7	127	18	6SL3120-1TE21-8AA3
1FK7101-3BF7	100	3,000	27	18.8	15.5	11.6	127	18	6SL3120-1TE21-8AA3
1FK7103-3BC7	100	2,000	36	14.4	25	11	168	18	6SL3120-1TE21-0AA3
1FK7103-3BF7	100	3,000	36	26	14	11.5	168	30	6SL3120-1TE23-0AA3
1FK7105-3BC7	100	2,000	48	20	37	16	249	30	6SL3120-1TE23-0AA3