

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Matheus Mendes

**Desenvolvimento da Modelagem Dinâmica e de um
Sistema de Controle para um veículo terrestre com
quatro rodas omnidirecionais**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Mauro Speranza Neto
Coorientador: Vivian Suzano Medeiros

Rio de Janeiro
Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador Mauro Speranza e co-orientadora Vivian Suzano pelo tempo e confiança dedicados a mim para a execução deste trabalho.

Igualmente, quero agradecer a todas as pessoas que participaram da minha vida acadêmica e fizeram de mim o que eu sou hoje. Principalmente a Pedro Roque, Daniel Carvalho e João Pedro Lima, amigos que apareceram na minha vida acadêmica e pretendo levar para o resto de minha vida

Respeitosamente, gostaria de prestar meus agradecimentos à Puc e a todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica e me passaram todo o conhecimento e maturidade necessários para a minha graduação

Em especial, vou me imensuravelmente obrigado para meus pais Marcelo Mendes e Christina Mendes por sempre me apoiarem e darem todo o suporte necessário para que eu concluísse essa etapa de minha vida e para meus irmãos Helena e João Victor Mendes por estarem sempre ao meu lado. Também quero agradecer a meus avós Carlos Kléber e Divalice Mendes, meus Tios Ana Paula, Fernando, Maurício Mendes e Lúcia Carvalho.

São muitas as pessoas que participaram da minha vida acadêmica, e cada uma delas tem um pouco de participação na conclusão deste projeto.

À todos fica meu mais sincero

Obrigado

Resumo

Desenvolvimento da Modelagem Dinâmica e de um Sistema de Controle de trajetória para um veículo terrestre com quatro rodas omnidirecionais

O controle de trajetória é um assunto bastante abordado nos dias de hoje. Cada vez mais está sendo investido em novas formas de transporte que facilitem a locomoção e requeiram menos esforço do condutor. A frequência com que notícias sobre o desenvolvimento de carros autônomos por diferentes companhias, vem crescendo a cada dia que passa, pois as grandes montadoras enxergam esse como um cenário bom para aprimorar a forma de locomoção. Este trabalho é focado no problema de movimentação autônoma de um veículo com 4 rodas omnidirecionais. Ele tem como objetivo a modelagem dinâmica e a definição de um sistema de controle de trajetória e para este veículo. Para isto será apresentada uma abordagem em espaço estado para a modelagem cinemática e dinâmica e a apresentação de uma técnica de controle para definir um controlador para este sistema. Por fim, através do SimuLink, serão testados diversos cenários para avaliar o comportamento deste veículo em diferentes à estímulos externos.

Palavras Chave: Modelagem, Controle de trajetória, Omnidirecional, 4 rodas

Abstract

Modeling and Control of a four-wheeled-Omnidirectional Vehicle

Trajectory control is a very approached subject nowadays. New investments are being applied to discover new ways of transportation that facilitates the locomotion e requires less effort from the conductor. The frequency that new articles and news about the development of autonomous cars by different companies is growing, in spite of this scenario being considered very optimistic by the great companies. This paper focuses on the motion problem of a 4-wheeled omnidirectional robot. It's main purpose is defining a trajectory and speed control system for this vehicle. The approach technique is defining it's dynamic and kinematical model in a space-state system. Then, suggesting a controller for the system. Lastly, utilizing the Simulink, several scenarios will be tested to evaluate the vehicle's behavior in different external influences.

Key Words: Modeling, Trajectory Control, Omnidirectional, four wheels

Sumário

1. Introdução	8
1.1. Objetivo	9
2. Concepção	10
2.1. Movimentação Omnidirecional	11
2.1.1. Rodas Omnidirecionais	11
2.1.2. Rodas Ilon	12
2.2. Modelos de veículos terrestres	13
2.2.1. Análise das diferentes concepções	14
2.2.2. Veículo de 2 rodas com esterçamento	15
2.2.3. Veículo de 3 rodas com esterçamento	16
2.2.4. Veículo de 3 rodas omnidirecionais	17
2.2.5. Veículos com 2 pares de rodas esterçantes	18
2.2.6. Veículo com 2 pares de rodas omni perpendiculares	19
2.2.7. Veículos com 2 pares de rodas Ilon paralelas	20
2.2.8. Veículo com esteiras	21
2.2.9. Veículos com pernas	21
2.3. Comparação entre modelos	22
3. Dinâmica do Veículo	23
3.1.1. Definição das coordenadas	23
3.1.2. Cálculo das velocidades	24
3.1.3. Cálculo das acelerações	24
3.1.4. Dinâmica do Motor	25
3.2. Espaço Estado	27
3.3. Definindo os parâmetros	28
3.4. Análise Dinâmica	28
3.4.1. Análise dos autovalores	29
3.4.2. Regime Permanente	29
4. Simulações	31
4.1. Caso 1	32
4.2. Caso 2	34
4.3. Caso 3	36
5. Sistema de Controle	38
5.1. Atuação do sistema de Controle	38
5.2. Controlador PID	38
6. Considerações Finais	39
7. Sugestões de Trabalhos Futuros	39

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de uma fábrica automatizada. As máquinas executam enorme parte do trabalho.	8
Figura 2 – Exemplificação do Sistema de direção do Model-S. Sensores determinam o que está nas proximidades permitindo que o carro calcule seu próximo movimento	8
Figura 3 – A força que o pneu faz sobre o asfalto é um exemplo de tração produzida entre o corpo e o solo	10
Figura 4 – Robô Hedghehog desenvolvido pela NASA	10
Figura 5 – As rodas esféricas são um exemplo de mecanismo de movimentação omnidirecional	11
Figura 6 – Rodas Omnidirecionais e suas possibilidades de movimento. Na roda a esquerda, o corpo principal é a parte em alumínio cinza e os corpos adjacentes são os cilindros pretos.	11
Figura 7 – Desenho da roda Ilon e uma demonstração da dinâmica desta roda, onde T_l é a força resultante da rotação da roda.	12
Figura 8 – As setas retas indicam a direção de movimento enquanto que as setas curvas indicam mudança no ângulo de ataque.	14
Figura 9 – As motocicletas são exemplo de veículos de 2 rodas com esterçamento. A roda traseira é fixa, porém ao mover o guidão a roda dianteira é esterçada	15
Figura 10 – Diferentes movimentações do veículo com 2 rodas esterçantes.	15
Figura 11 – O triciclo é um exemplo de veículo com 3 rodas. Neste caso apenas a roda dianteira é esterçante. O triciclo, embora seja estável, possui uma agilidade muito menor que a moto	16
Figura 12 – Direção do veículo com o esterçamento da roda dianteira	16
Figura 13 – O 3WD omni Robo é um exemplo de um veículo com 3 rodas omnidirecionais dispostas em triângulo.	17
Figura 14 – Resultado das diferentes permutações de movimentação entre as rodas para o veículo com 3 Rodas omni dispostas triangularmente.....	17
Figura 15 – A BMW Z-4 é um exemplo de veículo com 4 rotas, sendo 2 esterçantes. 18	
Figura 16 – Veículo com 4 rodas esterçantes. Os vetores de velocidade são similares aos do caso de 3 rodas esterçantes.	18
Figura 17 – 4WD Omnidirection Robot. Um exemplo de veículo omnidirecional com 4 rodas.....	19
Figura 18 – Movimentações do Veículo com 4 rodas omni.....	19
Figura 19 – o Robô OmniMove da Kuka é um exemplo de robô com 4 rodas Ilon em paralelo.	20
Figura 20 – Resultados das diferentes combinações de movimentação das rodas.	20
Figura 21 – Diferentes movimentações do veículo de esteira	21
Figura 22 – Stompy Hexapode. Projeto de veículo com pernas desenvolvidas pela Startup Stompy.	21
Figura 23 – Representação do Veículo no espaço XY com suas velocidades V_i e V_j . 23	
Figura 24 – Esquema do motor.....	25
Figura 25 – Servo Motor LEGO 8803 L Motor e LEGO omni-wheel.....	28
Figura 26 – Exemplo da movimentação das rodas de acordo com a voltage imposta. As setas amarelas representam o sentido da força que a roda exerce e as setas azuis indicam o sentido de giro da roda.....	30
Figura 27 – Diagrama de blocos do Simulink	31

Figura 28 – Tensões aplicadas no vaículo para o caso 1.....	32
Figura 29 – Velocidades ao longo do tempo para o caso 1.	32
Figura 30 – Deslocamento do Sistema para o caso 1.....	33
Figura 31 – Deslocamento do veículo para o caso 1	33
Figura 32 – Voltagens impostas nos 4 motores para o caso 2.....	34
Figura 33 – Resposta das velocidades do sistema para a tensão do caso 2.....	34
Figura 34 – Posição X e Y do veículo para as tensões impostas no caso 2.....	35
Figura 35 – Deslocamento do Sistema para as tensões impostas no caso 2.....	35
Figura 36 – Tensões aplicadas aos motores no caso 3.....	36
Figura 37 – Velocidade do Sistema para as tensões do caso 3.....	36
Figura 38 – Variação da posição para as tensões do caso 3	37
Figura 39 – Trajetória para as tensões do caso 3.....	37
Figura 40 – Fluxo da atuação do Sistema de controle baseado em [6]	38

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Modelos de Veículos terrestre.....	13
Tabela 2 – Avaliação dos modelos.....	22
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para as simulações	28
Tabela 4 – Autovalores e constantes do sistema.....	29
Tabela 5 – Velocidades do Sistema no regime permanente.....	30

1. Introdução

O crescente avanço tecnológico está permitindo a substituição da mão de obra humana pelo trabalho de robôs. Hoje em dia, grande parte do trabalho industrial é realizado por máquinas autônomas (Figura 1), isto é, capazes de realizar o trabalho sem ou com muito pouca intervenção humana. Esse fenômeno também é perceptível no cotidiano. A cada dia que passa, uma nova máquina é desenvolvida para realizar tarefas do dia-a-dia. Desde máquinas que lavam e passam roupas à aspiradores de pó que operam e se orientam sozinhos. Outro grande exemplo da presença de máquinas autônomas está na indústria automobilística.



Figura 1 – Exemplo de uma fábrica automatizada. As máquinas executam enorme parte do trabalho.

Carros que não precisam de motoristas já são mais que apenas uma ideia. Já existem carros que conseguem se manter com velocidade constante independente do trajeto, como é o caso dos chamados “Pilotos Automáticos”. Também existem carros capazes de “fazer baliza” sozinhos, como é o caso do Volkswagen Tiguan. E mais recentemente, a Tesla Motors anunciou o Model-S (Figura 2), que através de um sistema de GPS e de sensores que identificam as faixas no chão e objetos próximos, é capaz de navegar entre 2 pontos respeitando as leis do trânsito.

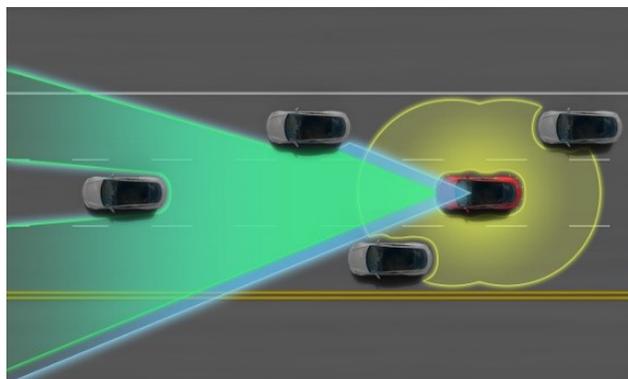


Figura 2 – Exemplificação do Sistema de direção do Model-S. Sensores determinam o que está nas proximidades permitindo que o carro calcule seu próximo movimento

O desenvolvimento destes veículos “auto-dirigidos” traz grandes benefícios para a população. Segundo um estudo da ONSV (Observatório Nacional de Segurança Viária) [1], 90% dos acidentes são causados por falha humana, e a implementação desta tecnologia reduzirá de maneira significativa este número. Além disso, uma interligação entre os sistemas de piloto automático permitirá uma “comunicação” entre os veículos, tanto antecipando uma situação de risco quanto reduzindo o tempo de resposta. Ou seja, um veículo será capaz de prever a ação do outro e com isso terá tempo para planejar suas ações e reduzir seu tempo de resposta. Conseqüentemente, haverá uma maior fluidez no trânsito, reduzindo a quantidade de engarrafamentos.

Também é importante destacar que o trânsito é um dos maiores causadores de estresse no ser humano. Segundo uma matéria do jornal o Dia [2], o carioca passa 250 horas por ano preso no tráfego. Este tempo, antes considerado perdido e estressante, pode ser melhor aproveitado com esses veículos. O motorista não precisará mais ficar focado na direção podendo usar esse tempo de deslocamento para realizar outros afazeres.

1.1. Objetivo

Com o cenário descrito anteriormente, torna-se bastante claro a crescente automatização das tarefas cotidianas e da necessidade deste fenômeno no transporte. O objetivo deste trabalho é projetar um veículo capaz de atender a essa necessidade. Isto é, que seja capaz de seguir qualquer trajetória pré-definida. Para isso serão estudados diferentes tipos de veículos terrestres, buscando aquele que melhor se adeque ao objetivo proposto, e em seguida será feita toda a análise dinâmica e definido um sistema de controle possibilitando esse ajuste de trajetória.

Este relatório será desenvolvido da seguinte forma:

- Inicialmente serão apresentadas e analisadas diversas concepções de veículos terrestres.
- Em seguida, será escolhido o modelo que melhor se adeque ao objetivo proposto.
- Será desenvolvida toda a modelagem dinâmica do modelo escolhido.
- Será simulado o comportamento dinâmico para diferentes entradas
- Será definido um sistema de controle.
- Por fim será feita uma conclusão analisando a viabilidade do projeto e o que pode ser feito em trabalhos futuros.

2. Concepção

Um veículo automotor, por definição, é todo aquele capaz de se locomover em virtude do impulso ali produzido. Logo um veículo automotor terrestre é aquele que se movimenta através da tração produzida entre seu corpo e o solo. Esta tração pode ocorrer de diversas formas, sendo o mais comum o resultado da interação entre o chão e uma roda (Figura 3).



Figura 3 – A força que o pneu faz sobre o asfalto é um exemplo de tração produzida entre o corpo e o solo

Também existem veículos que se utilizam de esteiras, pernas, ou meios inovadores, como é o caso do novo robô Hedgehog (Figura 4) desenvolvido pela NASA, que se movimenta rolando e quicando no contato com o solo. Esta seção tem como objetivo analisar diferentes tipos de veículos e escolher o que melhor se adeque ao projeto.

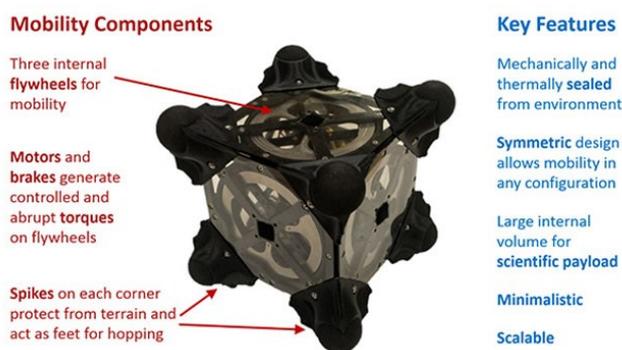


Figura 4 – Robô Hedgehog desenvolvido pela NASA

2.1. Movimentação Omnidirecional

A movimentação omnidirecional pode ser definida como a possibilidade de se movimentar para qualquer ponto em um plano cartesiano sem mudar a direção de seu ângulo de ataque. Existem diversos tipos de mecanismos que possibilitam tal movimentação (Figura 5), porém este trabalho focará nas Rodas Omnidirecionais.



Figura 5 – As rodas esféricas são um exemplo de mecanismo de movimentação omnidirecional

2.1.1. Rodas Omnidirecionais

As rodas omnidirecionais (Rodas omni) são compostas por uma roda (Corpo Principal) cuja circunferência é coberta por pequenos discos ou cilindros (Corpo adjacente) com raios paralelos e tangentes perpendiculares as do corpo principal (Figura 6). O Corpo principal funciona como uma junta ativa, enquanto que os roletes funcionam como corpos passivos.



Figura 6 – Rodas Omnidirecionais e suas possibilidades de movimento. Na roda a esquerda, o corpo principal é a parte em alumínio cinza e os corpos adjacentes são os cilindros pretos.

Esta composição permite que a roda se movimente em qualquer direção. Quando o corpo principal é rotacionado, a roda se movimentará na direção de sua tangente, e quanto o Corpo adjacente for rotacionado, a roda se movimentará em uma direção perpendicular à sua tangente. Com combinações destes 2 movimentos, é possível a movimentação em qualquer direção.

2.1.2. Rodas Ilon

As Rodas Ilon (ou Mechanum Wheel) são rodas omnidirecionais cujos corpos adjacentes possuem sua tangente em um ângulo de 45° com a tangente do corpo principal (Figura 7). Os roletes transmitem uma porção da força da direção rotacional, em uma força normal a direção da roda. Portanto, ela não se deslocará na direção de sua rotação.

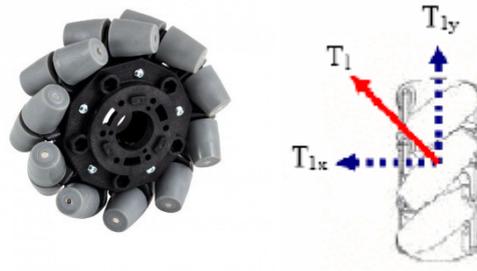


Figura 7 – Desenho da roda Ilon e uma demonstração da dinâmica desta roda, onde T_l é a força resultante da rotação da roda.

2.2. Modelos de veículos terrestres

Dentre os modelos mais comuns, estão os veículos movidos a rodas, esteiras e pernas. As demais concepções são para projetos muito específicos que não interessam a esse trabalho, portanto, a análise será voltada para estes mais comuns. Estas categorias podem ser subdividas conforme o número de partes, ou o tipo de componente. Por exemplo, os veículos que utilizam rodas, podem ser divididos entre esterçantes ou com rodas omnidirecionais.

A tabela 1 demonstra algumas das diversas combinações de componentes que causam a movimentação do veículo, sem analisar a origem da tração.

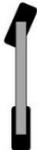
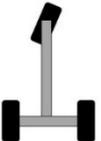
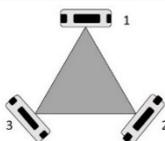
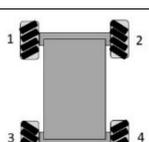
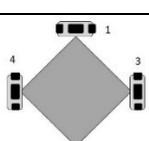
Modelo	Características	Exemplos
	2 Rodas com esterçamento	Bicicletas, Motocicletas
	3 Rodas com esterçamento	Triciclos, “Piaggio Minitruck”
	3 rodas omnidirecionais	“Tribolo”, Axebot
	4 rodas com esterçamento	Carros de Passeio, “Hyperion” (CMU),
	4 Rodas Ilon	“Uranus”(CMU)
	4 Rodas omni	4WD
	2 Esteiras	Tanques de Guerra, Tratores de Esteira
	Pernas	Robos Humanóides.

Tabela 1 – Modelos de Veículos terrestre

2.2.1. Análise das diferentes concepções

Nesta seção serão descritos e analisados os tipos de movimentos possíveis de cada modelo. Estes serão analisados de acordo com 3 fatores (Figura 8):

- Direção do movimento - A mudança de direção é a variação na posição horizontal do veículo, por exemplo, um veículo que está se deslocando no sentido sul, passar para o sentido oeste.
- Ângulo de ataque - A variação no ângulo do veículo em relação a um momento imediatamente anterior (Para onde o veículo aponta).
- Estabilidade – O veículo se manter erguido durante todo movimento

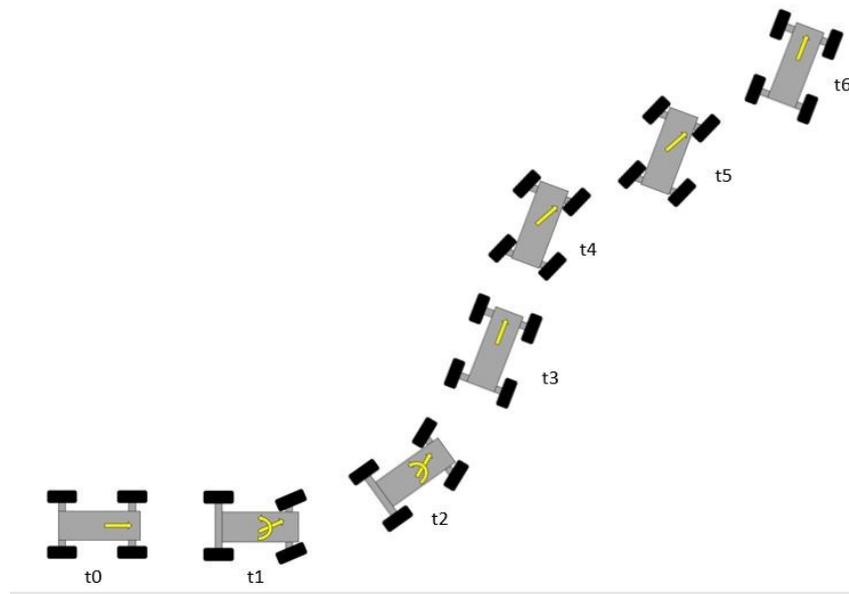


Figura 8 – As setas retas indicam a direção de movimento enquanto que as setas curvas indicam mudança no ângulo de ataque.

2.2.2. Veículo de 2 rodas com esterçamento

Essa configuração, comumente encontrada em motocicletas (Figura 9), concede ao veículo uma grande mobilidade, além da alta velocidade, permite uma rápida mudança de direção. Porém, esta é uma configuração instável, isto é, ela necessita de um sistema de equilíbrio para permanecer erguida. A direção de movimento é variada através do esterçamento da roda, podendo ser da roda dianteira, da roda traseira ou de ambas as rodas. Quanto maior for o ângulo do esterçamento, mais brusca será a mudança de direção. Uma diferença entre os ângulos da roda dianteira e traseira resulta em uma mudança no ângulo de ataque do veículo.



Figura 9 – As motocicletas são exemplo de veículos de 2 rodas com esterçamento. A roda traseira é fixa, porém ao mover o guidão a roda dianteira é esterçada

A variação no movimento das rodas, causa apenas uma mudança no sentido do movimento do veículo, logo, será considerado que as rodas sempre tenham movimento positivo. Se apenas a roda dianteira for esterçada, o veículo possuirá vetores de velocidades diferente em ambas as rodas, logo a velocidade resultante será um vetor entre estes 2. Além disso essa diferença de velocidade causa um momento no corpo, logo, uma mudança no ângulo de ataque. Se ambos os ângulo de esterçamento forem iguais, a velocidade resultante será o próprio vetor velocidade das rodas e não haverá nenhum momento. Ou seja, o corpo mudará sua direção de movimento sem alterar seu ângulo de ataque (Figura 10).

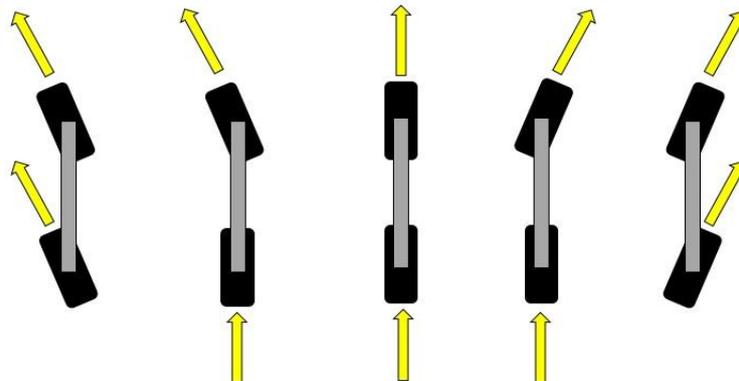


Figura 10 – Diferentes movimentações do veículo com 2 rodas esterçantes.

2.2.3. Veículo de 3 rodas com esterçamento

Um exemplo desta disposição acontece nos triciclos (Figura 11). A disposição de 2 rodas traseiras paralelas e uma dianteira livre, diferentemente da anterior, é estável. Ou seja, não é necessário um sistema de equilíbrio para mantê-la em pé). Porém, sua capacidade de mudar de direção é consideravelmente menor e ela é incapaz de realizar uma movimentação lateral devido a uma limitação do ângulo de esterçamento das rodas traseiras.



Figura 11 – O triciclo é um exemplo de veículo com 3 rodas. Neste caso apenas a roda dianteira é esterçante. O triciclo, embora seja estável, possui uma agilidade muito menor que a moto

Sua análise de movimento é similar ao caso anterior. A diferença na angulação das rodas dianteira com as traseiras resulta numa mudança de direção e ângulo de ataque, as rodas traseiras necessariamente têm que ser paralelas devido a rigidez do corpo.

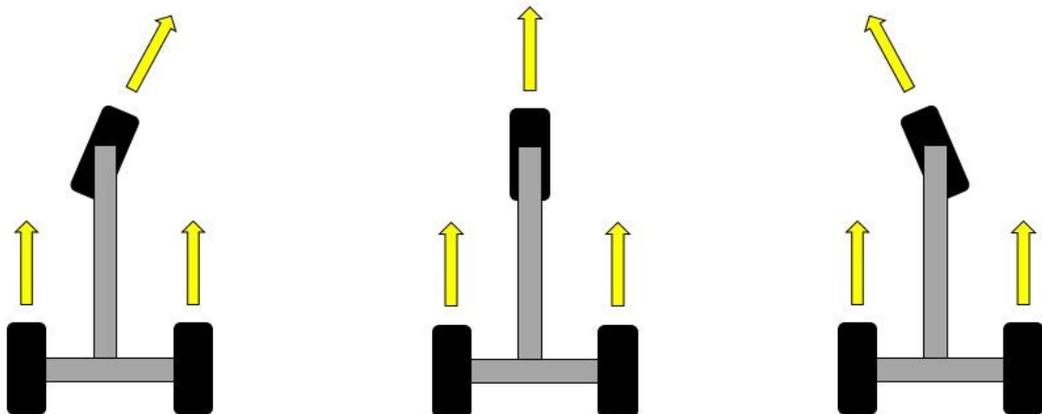


Figura 12 – Direção do veículo com o esterçamento da roda dianteira

2.2.4. Veículo de 3 rodas omnidirecionais

Os veículos com 3 rodas omnidirecionais dispostas triangularmente (Figura 13), permite movimentações em todas as direções e uma rotação em torno do próprio eixo do veículo. Essas movimentações dependem da permutação das movimentações de cada roda (Figura 14). As rodas omnidirecionais, quando se deslocam perpendicularmente à sua tangente, possuem uma menor velocidade máxima, pois o pequeno raio dos roletes vira um limitador deste parâmetro. Além disso, nessa configuração existem componentes de velocidade que se anulam, a reduzindo ainda mais e resultando num maior gasto de energia.

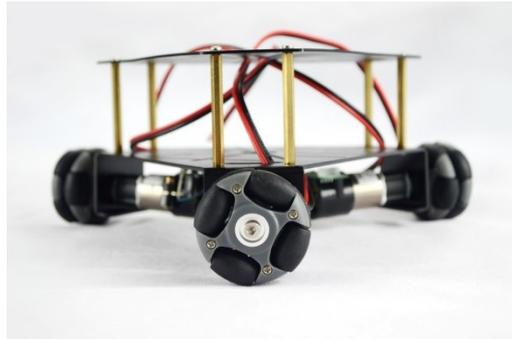


Figura 13 – O 3WD omni Robo é um exemplo de um veículo com 3 rodas omnidirecionais dispostas em triângulo.

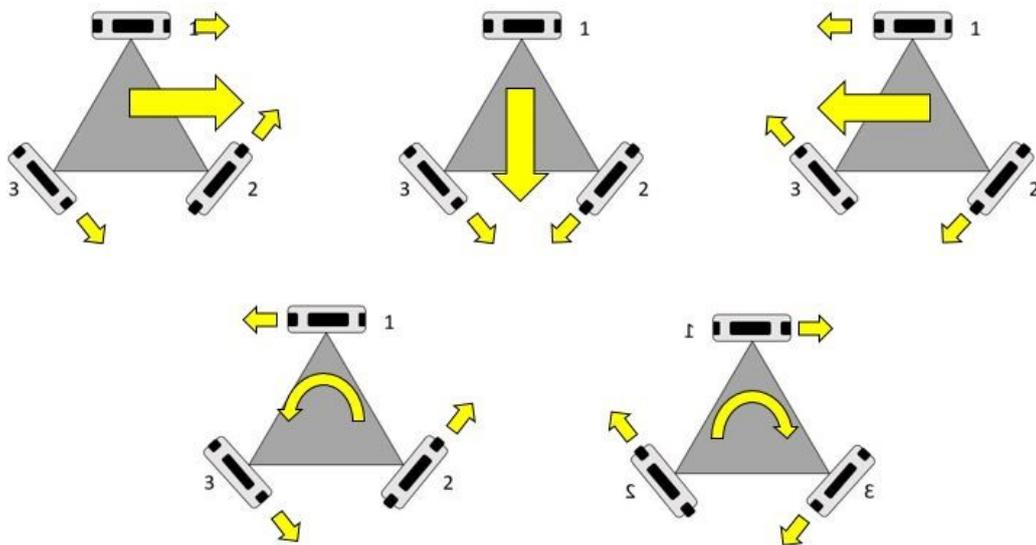


Figura 14 – Resultado das diferentes permutações de movimentação entre as rodas para o veículo com 3 Rodas omni dispostas triangularmente

2.2.5. Veículos com 2 pares de rodas esterçantes

O veículo com 4 rodas esterçantes, dispostas em 2 pares paralelos (Figura 15), possui características dinâmicas muito similares com o caso de 3 rodas esterçantes. O ângulo máximo de esterçamento impede que ocorra uma movimentação lateral deste tipo de veículo



Figura 15 – A BMW Z-4 é um exemplo de veículo com 4 rodas, sendo 2 esterçantes.

A vantagem destes veículos sobre os de 3 rodas Esterçantes está no fato de a maior quantidade de rodas exercer uma maior força de tração, conferindo assim uma maior agilidade ao veículo. Ou seja, ele consegue uma mudança mais brusca no ângulo de ataque (Figura 16).

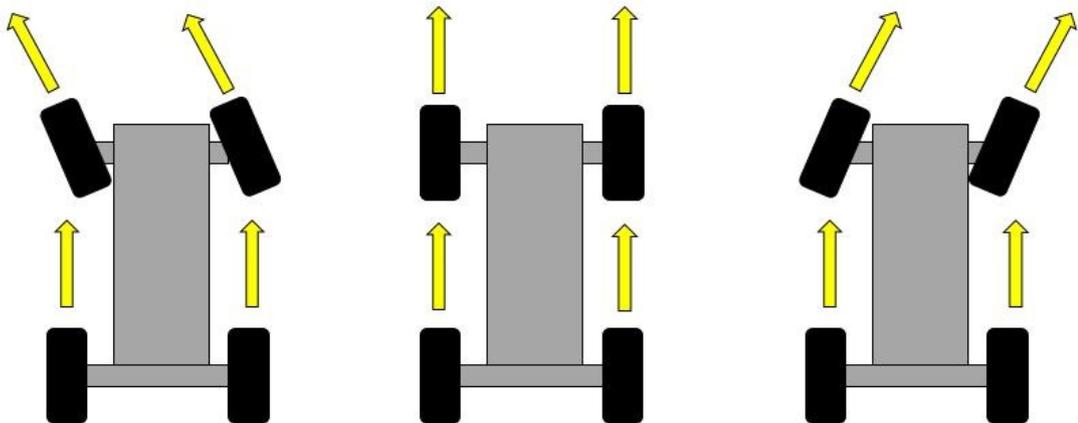


Figura 16 – Veículo com 4 rodas esterçantes. Os vetores de velocidade são similares aos do caso de 3 rodas esterçantes.

2.2.6. Veículo com 2 pares de rodas omni perpendiculares

Esse tipo de veículo é muito utilizado na robótica (Figura 17), pois permite movimentos rápidos e precisos. Esta disposição, junto com o de 3 rodas omni, é o que proporciona o maior número de movimentos, porém, ao contrário do outro modelo citado, não há componentes de velocidade que se anulam, aumentando sua eficiência.



Figura 17 – 4WD Omnidirection Robot. Um exemplo de veículo omnidirecional com 4 rodas

Além de ser capaz de se deslocar em qualquer direção, também é possível que ele gire em torno de seu próprio eixo, (Figura 18). Por utilizar rodas omni, como explicado na seção 2.1.2, este modelo possui uma velocidade máxima menor que com rodas convencionais.

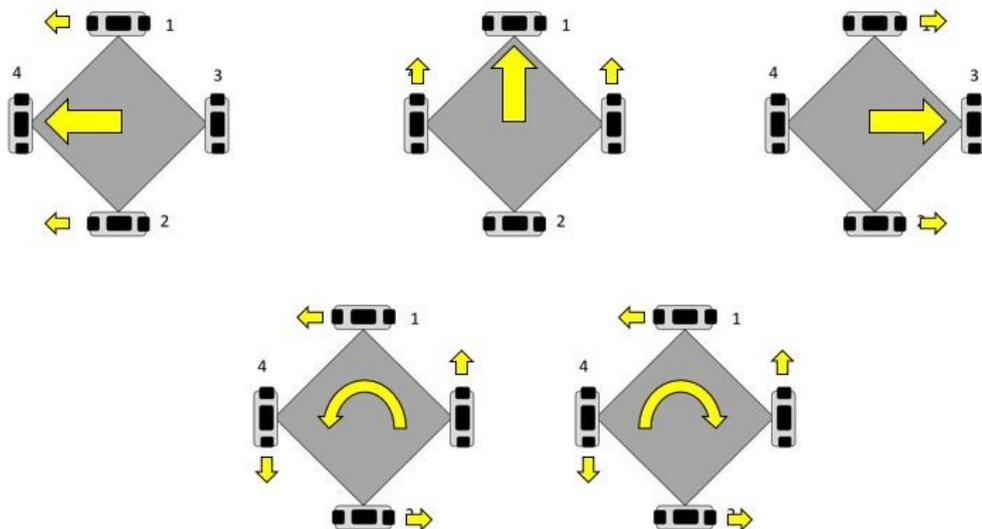


Figura 18 – Movimentações do Veículo com 4 rodas omni.

2.2.7. Veículos com 2 pares de rodas l1on paralelas

A disposiç1o de 4 rodas l1on paralelas (Figura 19), concede ao ve1culo a possibilidade de se movimentar em todas as direç1es, por1m, n1o permite que ele gire em torno de seu pr1prio eixo e uma eventual mudanç1a de 1ngulo de ataque se torna uma tarefa mais complicada que nos casos anteriores.

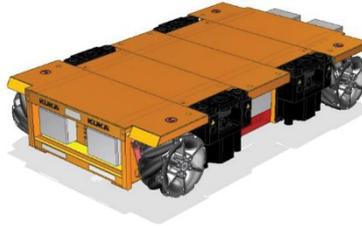


Figura 19 – o Rob1 OmniMove da Kuka 1 um exemplo de rob1 com 4 rodas l1on em paralelo.

Assim como o ve1culo com 3 rodas omnidirecionais (caso 2.1.3), as movimentaç1es laterais dependem de permutaç1es das velocidades de cada roda (Figura 10). Ou seja, novamente existem componentes de velocidade se anulando. Embora caso o ve1culo ande em linha reta, o efeito seja menor do que o de 3 rodas, continua existindo um gasto extra de energia.

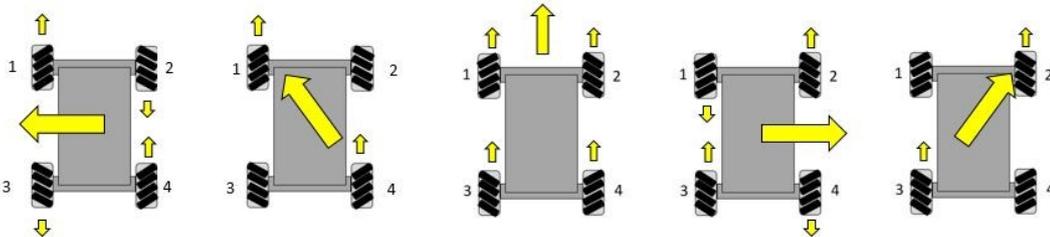


Figura 20 – Resultados das diferentes combinaç1es de movimentaç1o das rodas.

2.2.8. Veículo com esteiras

O veículo disposto de 2 esteiras paralelas, pode apenas se movimentar em uma direção paralela as esteiras e alterar seu ângulo de ataque (Figura 21), além de possuir uma velocidade máxima inferior aos veículos de rodas. A grande vantagem deste modelo é sua fácil adaptação aos terrenos.

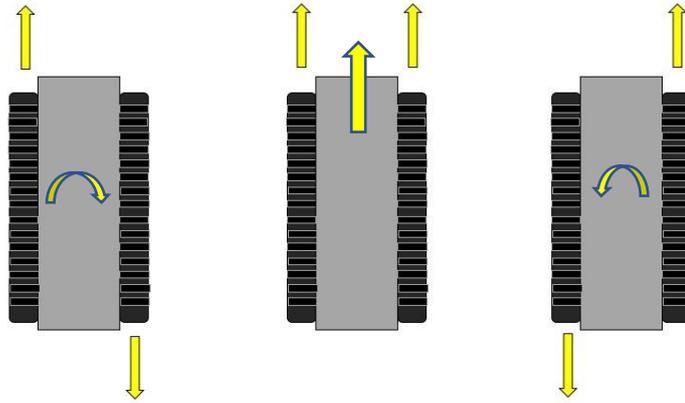


Figura 21 – Diferentes movimentações do veículo de esteira

2.2.9. Veículos com pernas

Um veículo movido por pernas (Figura 22) possui a capacidade de andar em qualquer direção e se adaptar a qualquer terreno. A grande desvantagem dessa concepção, é que devido à grande quantidade de movimentos diferentes que uma perna faz para se deslocar, sua velocidade máxima acaba sendo prejudicada e sua complexidade é altíssima.



Figura 22 – Stompy Hexapode. Projeto de veículo com pernas desenvolvidas pela Startup Stompy.

2.3. Comparação entre modelos

Nesta seção, será apresentada um resumo do que foi apresentado anteriormente. A tabela abaixo avalia cada modelo de acordo com algumas de suas características, como

- Velocidade Máxima (V) – A maior velocidade que o modelo é capaz de atingir
- Agilidade (A) – Capacidade do veículo mudar bruscamente seu sentido de deslocamento
- Rotação (R) – Capacidade do veículo de rotacionar em um espaço pequeno.
- Movimentações (M) – Quantidade de sentidos diferentes o veículo é capaz de se deslocar
- Eficiência (Ef) – Energia desperdiçada no movimento
- Equilíbrio (Eq) – Se o veículo é capaz de se manter erguido

Cada um desses critérios será avaliado com uma pontuação de 0 a 4

- 0 – O veículo não é capaz de executar esta operação
- 1 – O veículo é ineficaz para este parâmetro
- 2 – O veículo executa esta operação
- 3 – O veículo é ótimo neste parâmetro
- 4 – O veículo é ideal para este parâmetro

O total será o produto destes resultados, desta forma as pontuações baixas serão severamente penalizadas e as altas recompensadas (Tabela 2)

Modelo	V	A	R	M	Ef	Eq	Total
2 Rodas Esterçantes	4	3	2	2	4	0	0
3 Rodas Esterçantes	4	2	2	2	4	4	512
3 Rodas omnidirecionais	3	4	4	4	2	4	1536
2 Pares de Rodas Esterçantes	4	2	2	2	4	4	108
2 Pares de Rodas Ilon	3	3	1	4	3	4	432
2 Pares de Rodas Omnidirecionais	3	4	4	4	4	4	3072
Esteiras	2	1	4	1	4	4	128
Penas	1	2	4	4	1	3	96

Tabela 2 – Avaliação dos modelos

O veículo com 2 pares de rodas omnidirecionais é o modelo com maior pontuação dentro do critério definido, portanto ele foi o escolhido para ser o objeto deste trabalho.

3. Dinâmica do Veículo

Nesta seção será desenvolvida a dinâmica do veículo com 2 pares de rodas omnidirecionais. Primeiramente será feita a modelagem em um sistema de espaço estado, definidos os parâmetros do veículo e, por fim, utilizando o SimuLink, serão feitas simulações para avaliar o comportamento dinâmico deste veículo.

3.1. Modelagem Dinâmica

Nesta subseção será modelada toda a dinâmica do veículo.

3.1.1. Definição das coordenadas

Inicialmente será estabelecido um sistema de coordenadas gerais (X e Y) no qual o veículo será situado (Figura 23). Em seguida é estabelecido um outro sistema originado no Centro Geométrico do veículo (\hat{i} e \hat{j}).

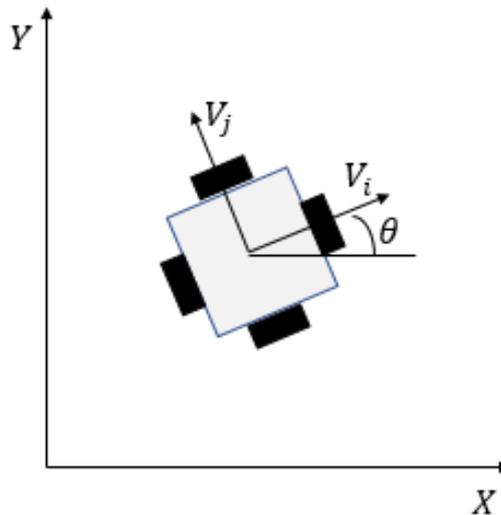


Figura 23 – Representação do Veículo no espaço XY com suas velocidades V_i e V_j

Deseja-se estudar a dinâmica desta relação, portanto é necessário calcular as velocidades desse sistema, onde:

$$\begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

3.1.2. Cálculo das velocidades

A relação entre a velocidade das rodas (v_i) e as velocidades do veículo (V_i, V_j e ω) está relacionada ao comprimento do veículo (l) e é dada pela expressão:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & l \\ -1 & 0 & l \\ 0 & -1 & l \\ 1 & 0 & l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

Logo, $v_1 = V_j + l \omega$, $v_2 = -V_i + l \omega$, $v_3 = -V_j + l \omega$, $v_4 = V_i + l \omega$. A diferença de sinal se dá por convenção,

Com isso, as velocidades do veículo podem ser escritas como um sistema de equações

$$\begin{cases} V_i = \frac{1}{2}(v_4 - v_2) \\ V_j = \frac{1}{2}(v_3 - v_1) \\ \omega = \frac{1}{4l}(v_1 + v_2 + v_3 + v_4) \end{cases} \quad (3)$$

3.1.3. Cálculo das acelerações

As equações de equilíbrio de força são uma relação entre as acelerações (derivadas da velocidade em relação ao tempo $\frac{\partial v}{\partial t}$), da massa (m), das forças geradas pelo motor (F), das forças de atrito (F_{at}) e das forças de Coulomb (F_C). Já as relações de equilíbrio de momento, são caracterizadas pelo momento de inércia (J), da aceleração angular (derivada da velocidade angular em função do tempo $\frac{\partial \omega}{\partial t}$) e dos torques (T) gerados pelas forças descritas. Como estamos tratando de um referencial móvel, que pode possuir velocidade angular, é necessário aplicar as equações de Newton-Euler.

$$\begin{cases} \sum F = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{p} \\ \sum M = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{h} \end{cases} \quad (4)$$

Onde \mathbf{p} representa a quantidade de movimento linear do corpo, $\boldsymbol{\varphi}$ é a velocidade angular e \mathbf{h} é a quantidade de movimento angular do corpo. E de acordo com [9] esse equacionamento pode ser reescrito como

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{V}_i \\ V_j \\ \dot{V}_k \end{pmatrix} = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} \sum F_i \\ \sum F_j \\ \sum F_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} qV_k - rV_j \\ rV_i - pV_k \\ pV_j - qV_i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{xy} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{xz} & J_{yz} & J_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (J_{zz} - J_{yy})rq + J_{yz}(q^2 - r^2) + (J_{xz}q - J_{yx}r)p \\ (J_{xx} - J_{zz})rp + J_{xz}(r^2 - p^2) + (J_{xy}r - J_{yz}p)q \\ (J_{yy} - J_{xx})qp + J_{xy}(p^2 - q^2) + (J_{yz}p - J_{xz}q)r \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

Como neste sistema, o deslocamento é no plano XY , temos que $V_k = 0, p = 0, q = 0$ e $r = \omega$. Dessa forma o sistema fica reduzido a

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{V}_i \\ V_j \end{pmatrix} = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} \sum F_i \\ \sum F_j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -\omega V_j \\ \omega V_i \end{pmatrix} \\ \omega = \frac{\sum M}{J} \end{cases} \quad (6)$$

As forças geradas pelo motor são definidas como

$$\begin{cases} F_i = \frac{1}{2}(f_4 - f_2) \\ F_j = \frac{1}{2}(f_3 - f_1) \\ T = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) l \end{cases} \quad (7)$$

Onde f_i é a força de tração gerada por cada roda. Essa força é resultado do torque fornecido pelo motor (T_{m_i}), dividido pelo raio da roda (r) e pela eficiência da transmissão (η)

$$f_i = \frac{T_{m_i}}{r \eta} \quad (8)$$

3.1.4. Dinâmica do Motor

O motor utilizado nesse projeto será um motor de corrente contínua com escovas (Figura 24). Este tipo de motor, oferece uma série de vantagens para sistemas de transmissão e servossistemas, tais como, a baixa fricção, baixa tensão de partida, ausências de perdas de ferro, alta eficiência, boa dissipação térmica e uma relação linear para a função Torque-Velocidade [5]

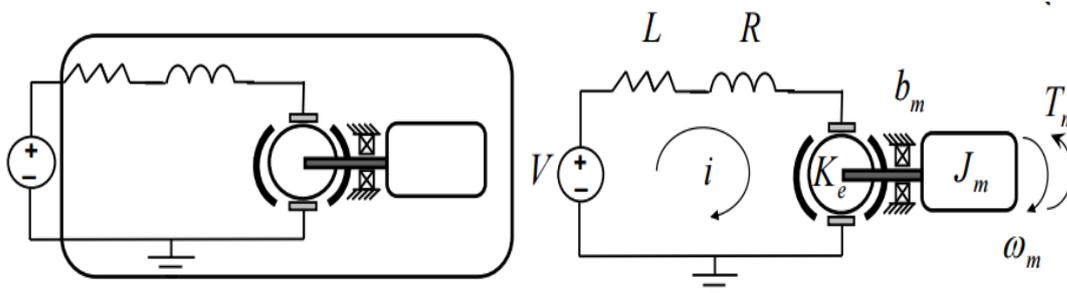


Figura 24 – Esquema do motor

De acordo com [6], este tipo de motor é regido pela equação

$$\begin{cases} L \frac{\partial i}{\partial t} = (V - Ri - K_e \omega) \\ \frac{\partial \omega_m}{\partial t} = \frac{1}{J_m} (K_e i - b_m \omega_m - T_e) \end{cases} \quad (9)$$

A indutância (L) é muito pequena em relação aos outros parâmetros, portanto a primeira equação pode ser reescrita como

$$V = Ri + K_e \omega \quad (9)$$

Portanto

$$i = \frac{(V - K_e \omega)}{R} \quad (10)$$

A transmissão do torque entre a parte elétrica e a parte mecânica sofre uma perda relativa as forças internas que atuam na movimentação, Esta perda é descrita por

$$T_{perdido} = b_m \omega_m \quad (11)$$

Com isso, o torque gerado pelo motor é descrito por:

$$T_m = T_e - b_m \omega_m \quad (12)$$

Onde

$$T_e = \frac{K_e}{R} V - \frac{K_e^2}{R} \omega_m^2 \quad (13)$$

Substituindo em (12)

$$T_m = \frac{K_e}{R} V - \frac{K_e^2}{R} \omega_m^2 - b_m \omega_m \quad (14)$$

Pode-se dizer que

$$K_v = \frac{K_e}{R} \quad (15)$$

E

$$K_\omega = \frac{R b_m + K_e^2}{R} \quad (16)$$

Com isso obtém-se uma função linear que relaciona o Torque com a velocidade angular para uma tensão constante

$$T_m = K_v V - K_\omega \omega \quad (4)$$

Por fim, o momento de inércia de cada carga (J_i) é uma função do momento de inércia da roda (J_i), do momento de inércia do motor (J_m) e do fator de redução (N_c) e é representada pela equação

$$J_i = J_c + J_m N_c^2 \quad (17)$$

Substituindo em (7)

$$\begin{cases} F_i = \frac{1}{2} \left(\frac{K_v U_4}{r} - \frac{K_\omega v_4}{r^2} - \left(\frac{K_v U_2}{r} - \frac{K_\omega v_2}{r^2} \right) \right) \\ F_j = \frac{1}{2} \left(\frac{K_v U_3}{r} - \frac{K_\omega v_3}{r^2} - \left(\frac{K_v U_1}{r} - \frac{K_\omega v_1}{r^2} \right) \right) \\ T = \left(\frac{K_v U_1}{r} - \frac{K_\omega v_1}{r^2} + \frac{K_v U_2}{r} - \frac{K_\omega v_2}{r^2} + \frac{K_v U_3}{r} - \frac{K_\omega v_3}{r^2} + \frac{K_v U_4}{r} - \frac{K_\omega v_4}{r^2} \right) l \end{cases} \quad (18)$$

3.2. Espaço Estado

A equação de Espaço-Estado (Space-State) é definida como:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (19)$$

É importante destacar que o espaço-estado só pode ser utilizado para sistemas lineares, e devido a multiplicação da velocidade angular ω pelas componentes de velocidade V_i e V_j este sistema não é linear. Porém, quando não há velocidade angular, ou as componentes de velocidade são nulas, este sistema se torna linear.

Onde $x = (V_i(t), V_j(t), \omega(t))$ e $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)$

Para evitar a confusão entre Tensão (antes representada por V) e as velocidades (V_i e V_j) a Tensão será representada pela letra “ U ” doravante. As matrizes de Estado são descritas como:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_\omega}{\pi r^2 M} - \frac{B_v}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_\omega}{\pi r^2 M} - \frac{B_v}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2d^2 K_\omega}{\pi r^2 J} - \frac{B_\omega}{J} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$B = \frac{K_v}{r} \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & \frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} & 0 & -\frac{1}{M} & 0 \\ l & l & l & l \\ \bar{J} & \bar{J} & \bar{J} & \bar{J} \end{pmatrix}$$

3.3. Definindo os parâmetros

Para fins de simulação, será suposto um veículo quadrado, com 200mm de largura que utilize as rodas LEGO-omniwheels e um servo motor LEGO 8803 L-Motor (Figura 25) e especificações na tabela 2. Os parâmetros dessas componentes podem ser encontrados em [7] e [8].



Figura 25 – Servo Motor LEGO 8803 L Motor e LEGO omni-wheel

Este servo motor possui um Torque Máximo de 45,4mNm e uma velocidade angular máxima de 380rpm. Além disso ele é alimentado por 6 pilhas AA ligadas em série [7], resultando em 9V. Como visto anteriormente,

$$T = K_v V - K_\omega \omega$$

O torque máximo acontece quando a velocidade angular for 0, e a velocidade angular máxima ocorre quando o torque for 0. Com base nessas informações. tem-se que $K_v = 0,00504$ [Nm/V] e que $K_\omega = 0,00719$ [1/Hz]. Já a roda possui 48mm de diâmetro, de acordo com [8], além disso, de acordo com [3], modelos como este pesam cerca 2.3kg, possuem um momento de inércia de $0.23m^4$ e uma distância entre o centro de massa as rodas de 200mm

Portanto a seguinte tabela com parâmetros pode ser montada

Parâmetro	Representação	Valor
Distância roda ao CM	d	0,2m
Raio da Roda	r	0,024m
Massa	M	2.3kg
Momento de Inércia	J	0.23
Constante do motor	K_ω	0,00719[1/Hz]
Constante do motor	K_v	0,00504[Nm/V]

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para as simulações

3.4. Análise Dinâmica

Nesta seção serão as matrizes do espaço-estado serão analisadas com base em seus autovalores e de operações para o regime permanente.

3.4.1. Análise dos autovalores

A matriz de Estado A é de posto 3. Portanto, ela possui 3 autovalores. Além disso ela é uma matriz diagonal, ou seja, os elementos da sua diagonal principal são seus autovalores. Substituindo as variáveis pelos valores definidos na seção 5.3.2, obtemos a seguinte matriz:

$$A = \begin{pmatrix} -1.9908 & 0 & 0 \\ 0 & -1.9908 & 0 \\ 0 & 0 & -1.4318 \end{pmatrix}$$

E esses elementos são seus autovalores. Os autovalores podem ser definidos como

$$\lambda_i = -\phi\omega_i \pm j\omega_i\sqrt{(1 - \phi^2)}$$

Ou simplificando

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_d$$

Onde ϕ representa o fator de amortecimento, ω_i representa a frequência de oscilação natural não amortecida e ω_d representa a frequência natural amortecida

Os autovalores devem ser analisados em pares, e para um par de autovalores reais negativos, a constante de tempo $\tau_i = -1/\sigma_i$ e seu tempo de estabilização T_s é aproximadamente 5 vezes maior que esse valor. Além disso, o fator de amortecimento é 1, indicando que o sistema não oscila. Os valores estão indicados na

Com isso. É possível montar a seguinte tabela indicativa

λ	τ	T_s	ϕ
-1.99; -1.99	0.5023	2.511	1
-1.43	0.6984	3.4920	1

Tabela 4 – Autovalores e constantes do sistema

Ou seja, o sistema demora cerca de 2,5 segundos para se estabilizar, e durante esse processo, não ocorrem oscilações

3.4.2. Regime Permanente

Como mostrado em (20), uma equação de espaço estado é definida por:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (20)$$

No Regime permanente, não haverá oscilações, portanto $\dot{x} = 0$. Substituindo

$$x_{reg\ perm.} = -A^{-1}Bu$$

Onde u é o vetor de entrada.

Serão simulados 6 cenários com diferentes combinações de tensões para estudar o comportamento do veículo. São eles:

- I. $U_1 = U_3 = 9V, U_4 = U_2 = 0$
- II. $U_2 = U_4 = 9V, U_3 = U_1 = 0$
- III. $U_1 = -U_3 = 9V, U_4 = U_2 = 0$
- IV. $U_1 = U_3 = 0V, U_4 = -U_2 = 9V$
- V. $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 9V$
- VI. $U_1 = U_2 = -U_3 = -U_4 = 9V$

Os resultados são conferidos na tabela abaixo:

Cenário	V_i (m/s)	V_j (m/s)	ω (rad/s)
I	0	0	2.2957
II	0	0	2.2957
III	0	0.8255	0
IV	0.8255	0	0
V	0	0	4.5914
VI	0.8255	0.8255	0

Tabela 5 – Velocidades do Sistema no regime permanente

Nos cenários I e II, são impostas voltagens iguais nos motores. Isto faz com que o veículo gire em torno do seu eixo, pois ambas as rodas estarão girando no mesmo sentido e, conseqüentemente, fornecendo velocidades de sentido contrário (Figura 26). Analogamente, podemos comparar isto a 2 relógios. Se colocamos os 2 relógios com as faces que mostram as horas encostadas, embora os 2 estejam girando no sentido horário, os ponteiros estarão se deslocando em sentido contrário. No caso III e IV o veículo andarรก com velocidade constante pois as forças geradas pelas rodas terão mesmo sentido. Além disso é possível reparar a simetria nos valores. Isto ocorre devido ao fato do veículo ter sido definido como quadrado.

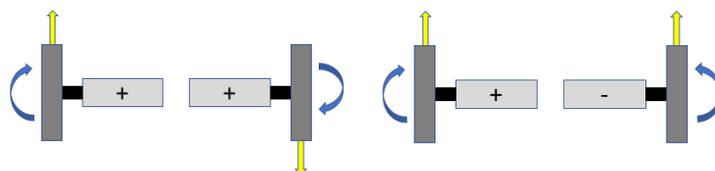


Figura 26 – Exemplo da movimentação das rodas de acordo com a voltagem imposta. As setas amarelas representam o sentido da força que a roda exerce e as setas azuis indicam o sentido de giro da roda

Estes valores confirmam que o veículo é capaz de andar em qualquer direção e rotacionar em torno do seu próprio eixo. Como dito na seção 3.3, estas relações só se aplicam quando o produto de velocidade angular com as componentes de velocidade seja 0.

4. Simulações

Nesta seção serão simulados diferentes inputs de tensões e analisados seu comportamento. As análises serão feitas da seguinte maneira: serão mostrados os inputs de tensões, em seguida as velocidades do veículo e seu deslocamento em relação a X e Y.

Inicialmente serão analisados 3 casos. O Primeiro, similar ao caso I do regime permanente, as voltagens dos motores 1 e 3 será constante e igual e de mesmo sinal. No segundo caso, as voltagens destes mesmo motores será constante, igual porém com sinais opostos. No terceiro caso, essas voltagens serão diferentes. Em todos os casos primeiramente serão demonstrados 4 gráficos. O primeiro com a variação da tensão ao longo do tempo. O segundo com a variação das velocidades ao longo do tempo. E por fim, a variação da posição. O quarto indicará a trajetória seguida pelo veículo. Embaixo de cada gráfico estará uma legenda explicando o comportamento das variáveis. As simulações foram feitas utilizando o simulink (Figura 27)

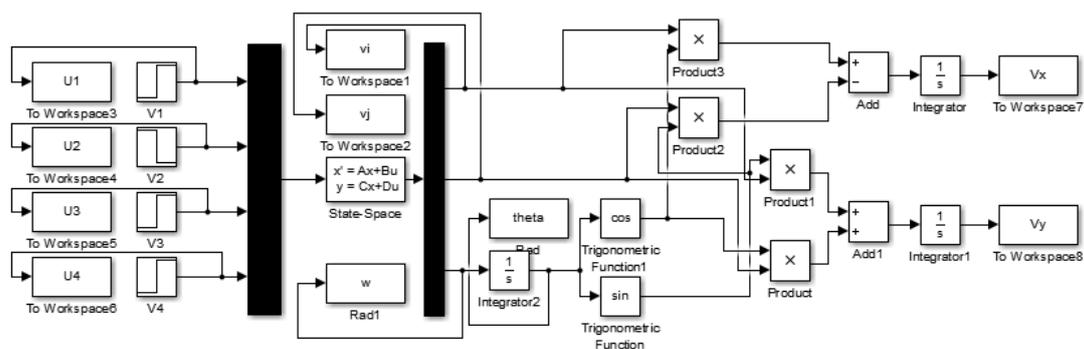


Figura 27 – Diagrama de blocos do Simulink

Esta simulação está usando espaço-estado, portanto ela só servirá para quando o produto entre as componentes de velocidade V_i e V_j com a velocidade angular ω for igual a 0. Ou seja, quando uma das duas for nula.

4.1. Caso 1

No Primeiro caso, serão impostas tensões de 9V nos motores 1 e 3. Como visto anteriormente, devido a simetria do veículo, a resposta será análoga a se tivesse sido imposta tensões de 9V nos motores 2 e 4. O input ocorrerá em $t=1s$. Desta forma estará garantido que o sistema estava em repouso (Figura 28)

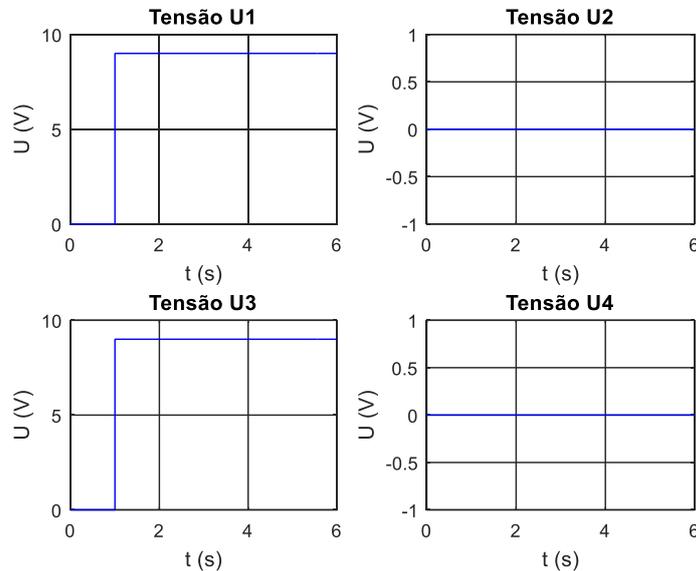


Figura 28 – Tensões aplicadas no veículo para o caso 1

Ao ser aplicada a tensão, a velocidade de cada roda irá aumentar até se estabilizar. Essa estabilização foi prevista para acontecer 2,5 segundos após a tensão ser aplicada. Como foi analisado no regime permanente, o veículo irá rodar em torno do seu eixo nesse caso.

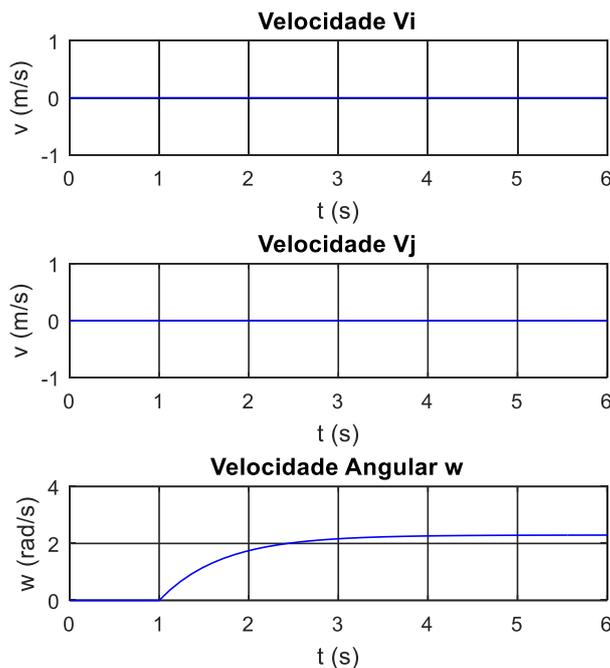


Figura 29 – Velocidades ao longo do tempo para o caso 1.

Um sistema que só tenha velocidade angular, ficará rodando em torno do seu próprio eixo, logo, ele não se deslocará nem na posição X nem na posição Y ()

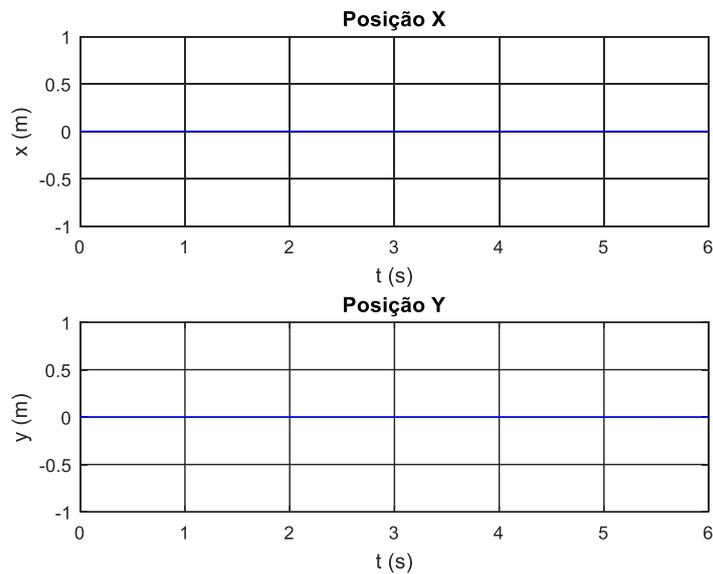


Figura 30 – Deslocamento do Sistema para o caso 1

Como não há deslocamento, a trajetória percorrida pelo sistema será um ponto na origem, ou seja, ele não saiu do lugar

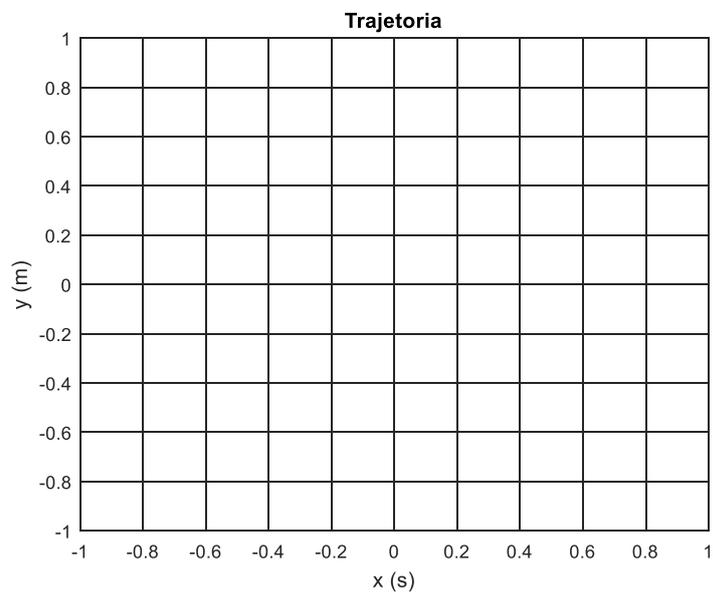


Figura 31 – Deslocamento do veículo para o caso 1

4.2. Caso 2

Neste segundo caso será estudado o efeito da imposição de uma tensão de 9V no motor 1 e de -9V no motor 3. Mais uma vez, o resultado será análogo ao se a tensão tivesse sido imposta nos motores 2 e 4.

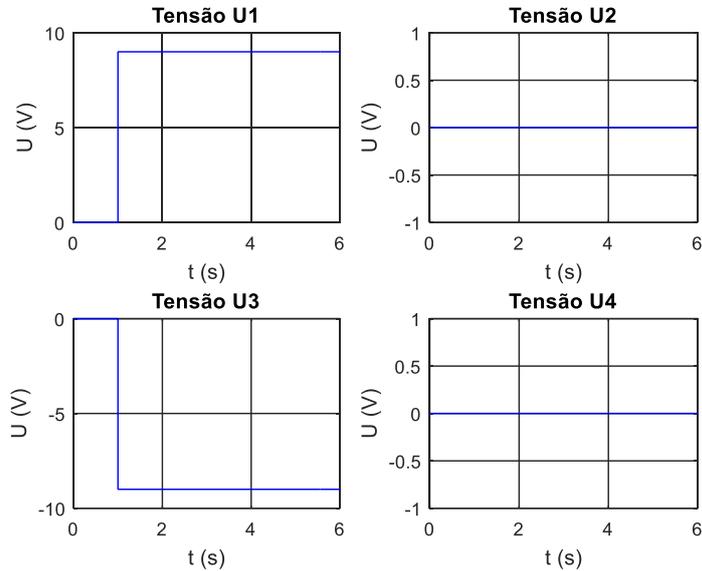


Figura 32 – Voltagens impostas nos 4 motores para o caso 2

Desta vez, ambas as rodas fornecem a mesma componente de velocidade. Como analisado no regime permanente,

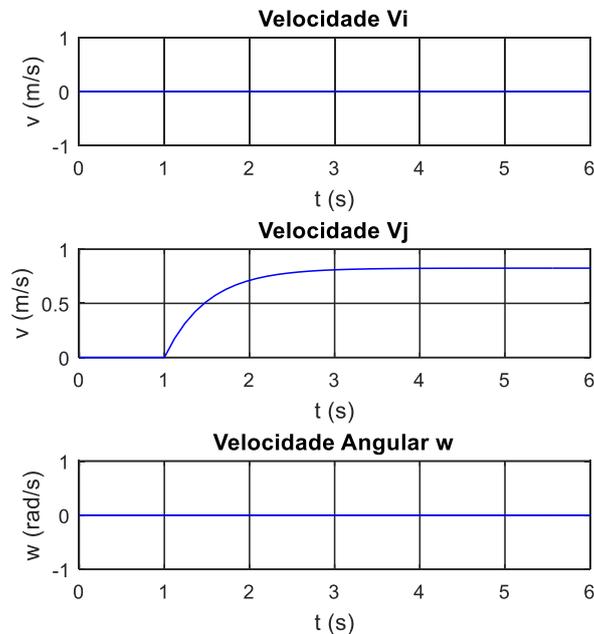


Figura 33 – Resposta das velocidades do sistema para a tensão do caso 2

Como somente a velocidade V_j é afetada, o veículo andar\á somente na dire\c\ao Y . O comportamento esperado ser\á uma par\abola at\e o sistema se estabilizar e depois disso a posi\c\ao crescer\á como uma rampa

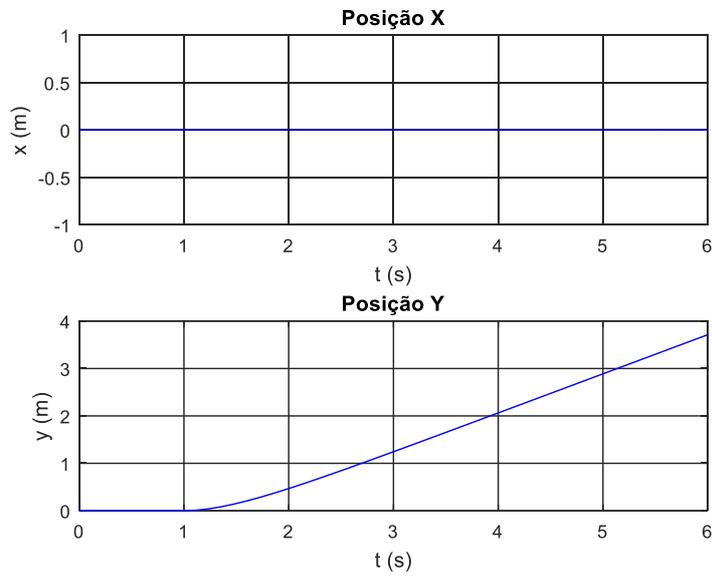


Figura 34 – Posi\c\ao X e Y do ve\iculo para as tens\oes impostas no caso 2

A Trajet\oria esperada \e uma reta paralela ao eixo Y

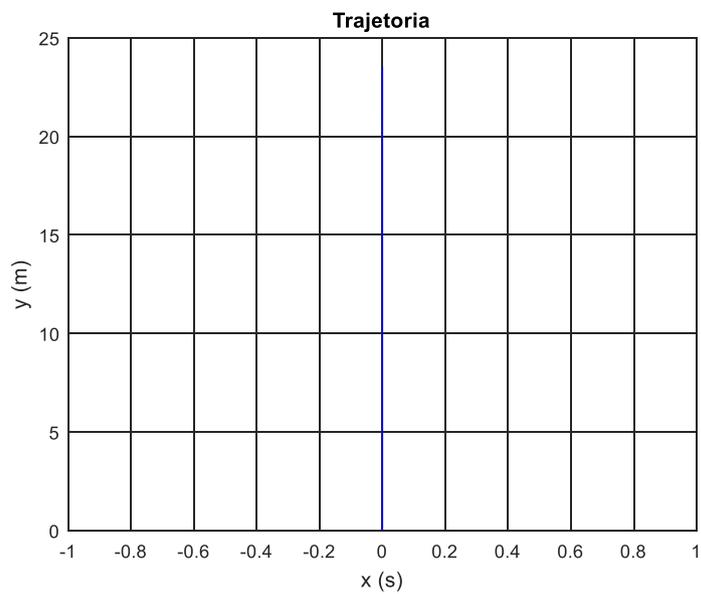


Figura 35 – Deslocamento do Sistema para as tens\oes impostas no caso 2

4.3. Caso 3

Neste Caso serão impostas tensões em forma de senóides nos motores.

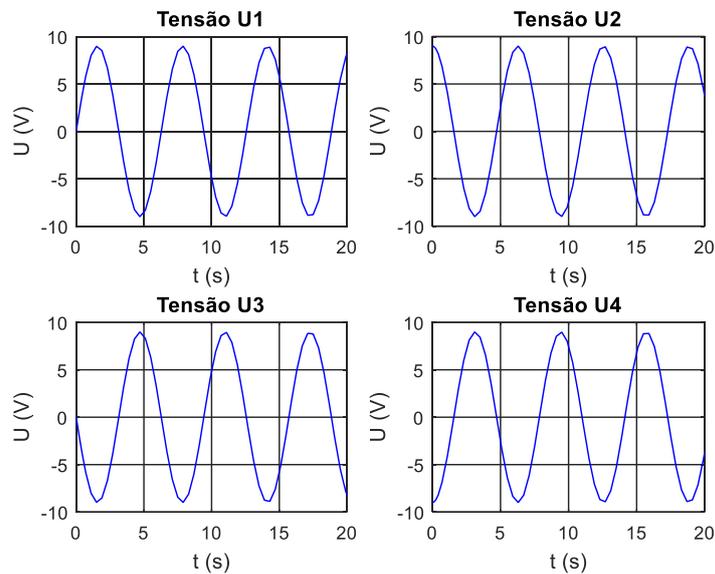


Figura 36 – Tensões aplicadas aos motores no caso 3

Essa configuração fornecerá velocidade V_i e V_j . Como as tensões dos motores 1 e 3 e dos motores 2 e 4 possuem uma defasagem de π radianos, ou seja, são opostas, a velocidade angular ω será nula. Devido a erros de aproximação, nas simulações surgem picos de velocidade angular da ordem de 10^{-16} , ou seja, desprezíveis.

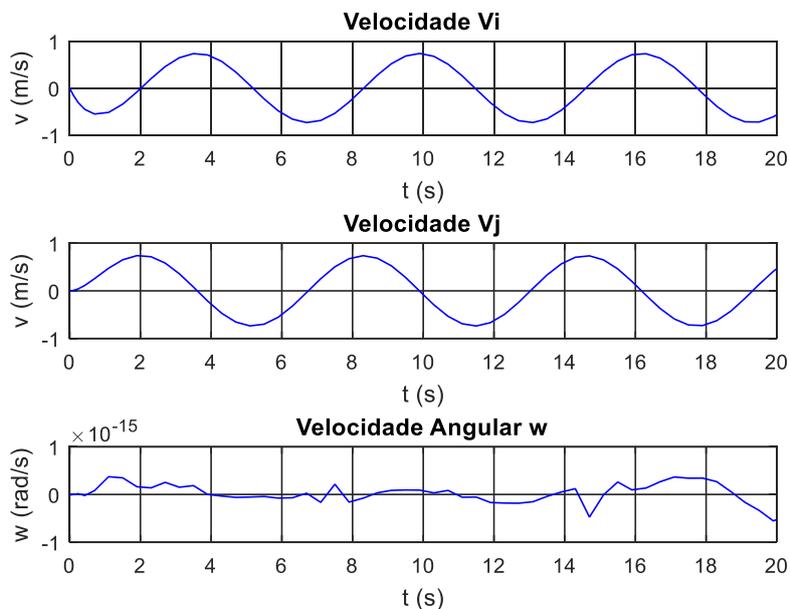


Figura 37 – Velocidade do Sistema para as tensões do caso 3

O deslocamento em X e em Y possuem relação direta com as velocidades, ou seja, acompanharam a forma das senóides.

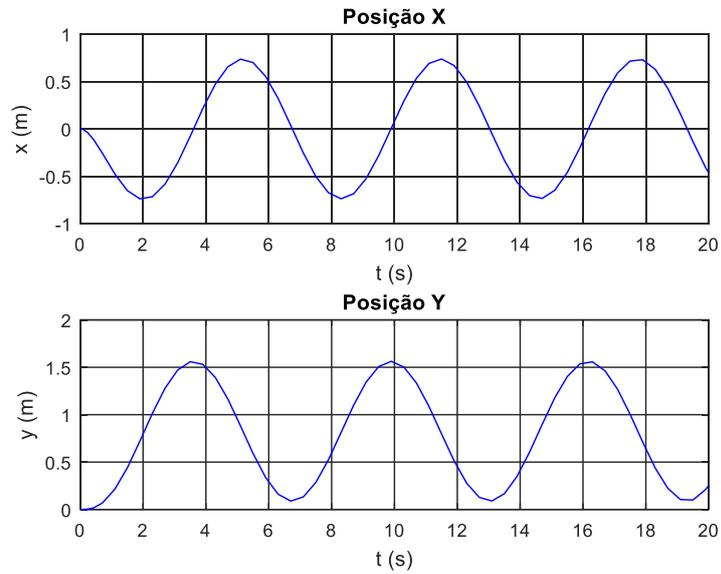


Figura 38 – Variação da posição para as tensões do caso 3

Como ambas as posições variam de maneira senoidal, é intuitivo assumir que a trajetória seja circular.

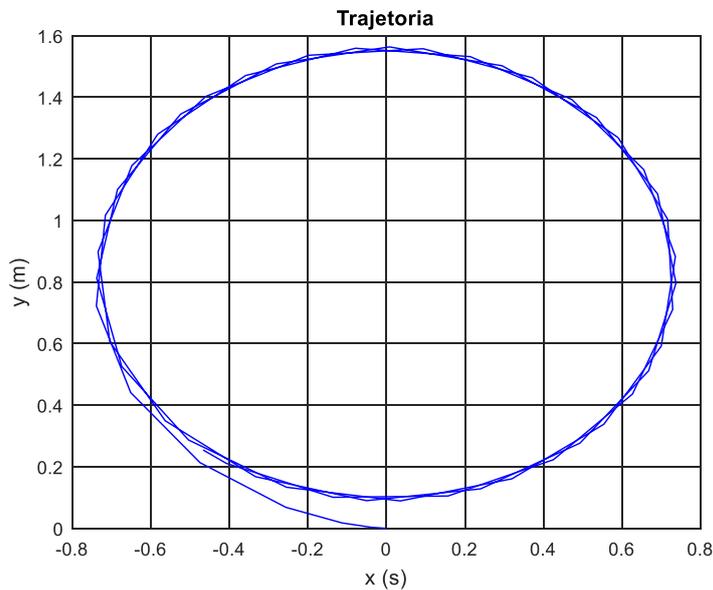


Figura 39 – Trajetória para as tensões do caso 3

5. Sistema de Controle

Nesta seção será demonstrado como um sistema de controle agirá nesse veículo. As definições de controle para um veículo terrestre são baseadas em [6].

5.1. Atuação do sistema de Controle

Um sistema de controle é utilizado para fazer com que um sistema obedeça a um comportamento desejado. No caso de um veículo terrestre, ele atua na dinâmica do veículo para ajustar seus parâmetros a fim de obter este comportamento desejado. Este controle precisa de inputs de sensores para saber quais os parâmetros que necessitam de atuação. (Figura 40)

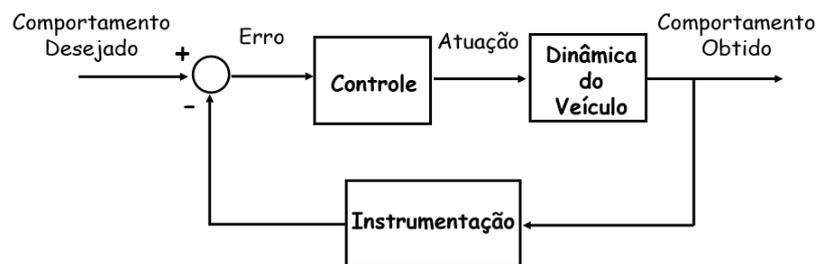


Figura 40 – Fluxo da atuação do Sistema de controle baseado em [6]

Como visto nas seções anteriores, o que determina a direção que o veículo vá seguir são as tensões aplicadas nos motores. O objetivo deste sistema de controle é fazer com que o veículo siga determinada trajetória, portanto é intuitivo assumir que o sistema de controle atuará nas tensões que serão aplicadas nos motores.

5.2. Controlador PID

O controlador PID (Proporcional, Integrativo Derivativo) é uma técnica de controle que une ações derivativa, proporcionais e integrativas, visando minimizar o erro e fazer com que o sistema obedeça aos sinais de entrada. O sistema de controle atuará na velocidade do sistema. Calculando a tensão que deve ser aplicada para corrigir esta velocidade e fazer com que o veículo siga a trajetória desejada.

6. Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentado a importância da automatização dos meios de transporte, ou seja, de nos deslocarmos de modo mais eficiente e inteligente. Hoje as grandes empresas investem pesado nessa área e vários testes bem-sucedidos são apresentados ao mundo. Além disso também foi apresentado as rodas omnidirecionais e suas grandes vantagens e aplicações.

O objetivo deste trabalho foi reunir esses dois temas e demonstrar a aplicação que um sistema de controle pode também ser utilizado em um veículo com rodas omnidirecionais. O grande foco foi na dinâmica longitudinal do veículo pois é um assunto menos estudado que o de carros de passeio convencionais.

Durante as simulações foram feitos apenas cenários em que não haveria força centrípeta, ou seja, foram simulados apenas cenários onde o produto de ωV_n fosse nulo, de maneira que pudesse ser simulado através do espaço-estado, e mesmo assim foi comprovado que este veículo é capaz de seguir qualquer trajetória. Ou seja, este veículo pode trazer grandes benefícios principalmente em relação a uma rápida mudança de direção.

No final do relatório foi apresentado rapidamente como um sistema de controle pode vir a agir no veículo e qual o controlador que pode ser utilizado.

Os resultados dinâmicos obtidos nas simulações foram de acordo com o esperado, portanto a modelagem dinâmica foi adequada.

7. Sugestões de Trabalhos Futuros

Neste relatório o sistema de controle foi apenas comentado, e as análises dinâmicas, embora possibilitassem qualquer tipo de trajetória, cobriram apenas parte da movimentação possível do veículo. Desta forma sugere-se um novo estudo focado no sistema de controle deste veículo

Referências Bibliográficas

- [1] *Observatório Nacional de Segurança Viária*. (2017, Julho 15). Retrieved from Site da ONSV: <https://www.onsv.org.br/90-dos-acidentes-sao-causados-por-falhas-humanas-alerta-observatorio/>
- [2] *Jornal o Dia*. (31 de Março de 2015). Fonte: Site do Jornal o Dia: <http://odia.ig.com.br/noticia/rio-de-janeiro/2015-03-31/carioca-perde-250-horas-por-ano-no-transito-aponta-estudo.html>
- [3] *Artigo sobre OmniWheel*. (n.d.). Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Omni_wheel
- [4] *Force Vectors Created by Mecanum Wheel*. (n.d.). Retrieved from ReserachGate: https://www.researchgate.net/figure/268326364_fig2_Figure-2-Force-vectors-created-by-Mecanum-wheel
- [5] *Motor CC com escovas*. (n.d.). Retrieved from Portescap: <http://www.portescap.com.br/produtos/motor-cc-com-escovas/entendendo-o-motor-com-escovas>
- [6] Speranza Neto, M., & Medeiros, V. S. (n.d.). *Controle de Veículos Elétricos com Propulsão através de Motores de Corrente Contínua*. Rio de Janeiro.
- [7] *Lego Omniwheel*. (n.d.). Retrieved from RobotShop: <http://www.robotshop.com/en/48mm-omniwheel-lego-nxt-servo.html>
- [8] *Motor 88003*. (n.d.). Retrieved from Site da Lego: <https://www.lego.com/en-us/powerfunctions/articles/88003-actions-39df030b09264f1887ce42e3d5c67fc>
- [9] Speranza Neto, M. (n.d.). *Dinâmica de um corpo rígido em um referencial local*. Rio de Janeiro.