



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado

ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO ROBÓTICO TRACIONADO POR ESTEIRAS

por

Alexsandro José Virgínio dos Santos

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa - Paraíba

março, 2015.

ALEXSANDRO JOSÉ VIRGÍNIO DOS SANTOS

**ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO
ROBÓTICO TRACIONADO POR ESTEIRAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Professor Simplício Arnaud da Silva

S237a Santos, Alexsandro José Virgínio dos.

Análise e controle de um veículo robótico tracionado por esteiras / Alexsandro José Virgínio dos Santos.- João Pessoa, 2015.

137f. : il.

Orientador: Simplício Arnaud da Silva

Tese (Doutorado) - UFPB/CT

1. Engenharia mecânica. 2. Robótica. 3. Dinâmica.
4. Cinemática. 5. Tração por esteiras.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

***ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO
ROBÓTICO TRACIONADO POR ESTEIRAS***
por

Alexsandro José Virgínio dos Santos

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa - Paraíba

março- 2015

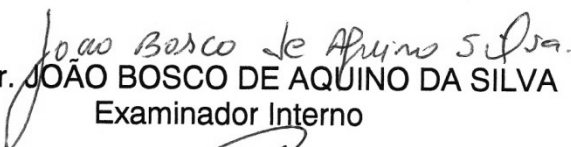
**ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO ROBÓTICO
TRACIONADO POR ESTEIRAS**
por

ALEXSANDRO JOSÉ VIRGINIO DOS SANTOS

Tese aprovada em 31 de março de 2015



Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
Orientador



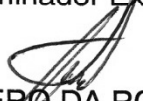
Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO DA SILVA
Examinador Interno



Prof. Dr. ISAAC SOARES DE FREITAS
Examinador Interno



Prof. Dr. JOSÉ HOMERO FEITOSA CAVALCANTI
Examinador Externo



Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva de completar mais esta etapa da vida.

Ao meu orientador professor Simplício Arnaud da Silva pela competência, dedicação ao ofício do ensino e pelo apoio neste trabalho.

Ao professor Cícero da Rocha Souto pelo grande apoio aos trabalhos de pesquisa e orientações em muitas atividades.

Aos doutorandos André Felliipe Cavalcante Silva, Renato Franklin Rangel e Samuel de Oliveira pelas discussões construtivas ao longo das atividades.

Aos professores Dr. José Homero Feitosa Cavalcanti e Dr. Everaldo Fernandes Monteiro pelas contribuições.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

À minha família, em especial aos meus pais, Elias Virgínio e Maria Orquídea.

À minha linda esposa Michele, pela compreensão e paciência desprendidas neste período.

ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO ROBÓTICO TRACIONADO POR ESTEIRAS

RESUMO

O uso de veículos não tripulados tem sido difundido nas áreas de segurança, exploração ambiental e indústria em geral, podendo ser teleoperados ou autônomos. Há ainda sistemas híbridos, em que o veículo é teleoperado, porém dotado de algoritmos inteligentes que orientam o operador e tomam decisões em situações mais críticas.

Muitos autores têm estudado a cinemática e a dinâmica dos veículos tracionados por esteira, havendo um consenso de que o modelo cinemático pode ser simplificado para a maioria das análises. Grande parte dos trabalhos que utilizam veículos tracionados por esteiras aproximam o modelo cinemático a um veículo de rodas com acionamento diferencial. Neste trabalho foi proposta uma abordagem pouco convencional, em que o modelo cinemático é tratado como um corpo flexível. Baseia-se no fato de que, em um movimento curvilíneo, há um ponto de contato equivalente a um veículo de rodas a um dado instante. O modelo dinâmico proposto neste trabalho inclui a força de arrasto lateral que as esteiras provocam em movimentos curvilíneos, considerando suas não-linearidades, bem como o forte acoplamento entre as esteiras. Ainda como contribuição deste trabalho, apresenta-se o projeto de um sistema de controle capaz de identificar as características de aderência do solo e realizar estratégias de controle para o veículo a partir da interação esteira/solo.

ANÁLISE E CONTROLE DE UM VEÍCULO DE ESTEIRAS

ABSTRACT

The use of unmanned vehicles has been widespread in the areas of safety, environmental exploitation and industry in general and can be tele-operated or autonomous. There are also hybrid systems, in which the vehicle is tele-operated, but endowed with intelligent algorithms that guide the operator and make decisions in the most critical situations.

Many authors have studied the kinematics and the dynamics of traction vehicles per mat, with a consensus that the kinematic model can be simplified to most analyzes. Most studies using vehicles pulled by mats near the kinematic model of a wheeled vehicle with differential drive. In this paper we proposed an unconventional approach, in which the kinematic model is treated as a flexible body. Is based on the fact that, in a curvilinear motion, there is a point of contact equivalent to a wheeled vehicle to a given instant. The dynamic model proposed in this work includes the lateral drag force to cause the tracks of curvilinear motions, considering its non-linearity and strong coupling between the mats. Even as contribution of this work, we present the implementation of a control system able to identify the soil adhesion characteristics and perform control strategies for the vehicle from the track/soil interaction.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1 Objetivos gerais.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3. Contribuição.....	3
1.4. Estrutura da tese	4
2. Estado da arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Aplicações de robôs	5
2.2.1 Robôs na Industrial.....	5
2.2.2 Robôs na Medicina.....	6
2.2.3 Robôs Militares	7
2.2.4 Robôs de Exploração Espacial	7
2.2.5 Mineração.....	7
2.3. Robótica Clássica.....	8
2.4. Robótica móvel.....	14
2.5. Ambientes para robôs móveis.....	17
2.5.1 Terrestre	17
2.5.2 Aéreo	18
2.5.3 Aquático	18
2.6. Sensoriamento.....	18
2.6.1 Odometria.....	19
2.6.2 Localização.....	19
2.6.3 Fusão de sensores	20
2.7. Robótica estatística e SLAM	21
2.8. Robôs tracionados por esteiras	23
2.9. Comentários e conclusões.....	24

3.	Modelamento de robôs de esteiras	25
3.1.	Introdução	25
3.2.	Modelo cinemático	26
3.2.1	Coeficiente de deslizamento.....	31
3.2.2	Determinação do Coeficiente de deslizamento	32
3.3.	Modelo Dinâmico do robô de esteiras	33
3.3.1	Modelo eletromecânico	34
3.3.2	Modelo mecânico	40
3.3.3	Energia dissipada pelo contato esteira-solo	46
3.4.	Modelo discreto	54
3.4.1	Discretização do modelo dinâmico	54
3.5.	Comentários e conclusões.....	56
4.	Estratégias de Controle.....	57
4.1.	Introdução	57
4.2.	Controladores clássicos.....	59
4.2.1	PID digital	61
4.2.2	Sintonia de controladores PID.....	65
4.2.3	Controlador PID real	67
4.3.	Controlador Fuzzy	68
4.4.	Controlador Neural	70
4.5.	Controladores híbridos.....	71
4.6.	Comentários e conclusões.....	73
5.	Modelamento computacional e Simulações.....	74
5.1.	Introdução	74
5.2.	Modelamento contínuo do veículo.....	74
5.2.1	Modelo do conjunto motor-esteira	74
5.2.2	Modelo do sistema acoplado	76
5.3.	Respostas do sistema dinâmico.....	78
5.4.	Simulação do Sistema de Controle	79
5.5.	Simulação com segurador de ordem zero	82
5.6.	Controlador PID-FUZZY	84
5.7.	Representação em equações A diferenças	85
5.8.	Comentários e conclusões.....	88

6.	Testes físicos e resultados	89
6.1.	Introdução	89
6.2.	O Robô de Esteiras	89
6.2.1	Projeto eletro-mecânico.....	89
6.2.2	Projeto eletrônico	90
6.3.	Sistema de Controle	96
6.3.1	Controle dos motores DC	96
6.3.2	Controle diferencial.....	97
6.3.3	Controlador completo.....	97
6.4.	Estimação de parâmetros de solos	99
6.4.1	Piso emborrachado	99
6.5.	Comentários e conclusões.....	102
7.	Conclusão.....	103
8.	Sugestões para trabalhos futuros	104
9.	Referências Bibliográficas	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Robô Da Vinci Si (Intuitive, 2015)	6
Figura 2.2 – Robô Curiosity, um veículo autônomo usado na exploração de Marte dotado de uma série de sensores (NASA, 2014)	7
Figura 2.3 – Veículo autônomo usado para análise geológica(Robovolc, 2015)	8
Figura 2.4– Manipuladores industriais: a) Exemplar sem acessórios (Mitsubishi, 2015) b) Linha de produção com uma série de manipuladores (Acade, 2015)	9
Figura 2.5 – Manipulador robótico e suas partes (Groover, Weiss, Nagel, & Odrey, 1986).....	10
Figura 2.6 – Representação esquemática das cinemáticas direta e inversa	11
Figura 2.7 Diagrama de sistema utilizando dinâmica inversa	12
Figura 2.8 – Níveis de atuação no controle de um robô móvel	15
Figura 2.9 – Paradigma deliberativo	15
Figura 2.10 – Paradigma reativo	16
Figura 2.11 – Robô aspirador iRobot Roomba (Roomba, 2015)	21
Figura 2.12 – Robô móvel de uso militar Qinetiq North America's TALON IV military robot (Qinetiq, 2014).....	22
Figura 3.1 – Veículo de rodas com acionamento diferencial	26
Figura 3.2 – Diagrama das dimensões de um veículo tracionado a esteiras	28
Figura 3.3 – Ilustração do Centro Instantâneo de Rotação.....	29
Figura 3.4 – Representação do Centro Instantâneo de Rotação considerando os Pontos Instantâneos de Contato.....	29
Figura 3.5 – Representação das velocidades resultantes (componentes tangenciais ao movimento) e ângulo de distorção α	30

Figura 3.6 – a) Sensor LRF. b) Robô dotado de um sensor LRF(Hokuyo, 2014)(Kntu, 2014).....	33
Figura 3.7 – Adaptado de Endo (Endo, Okada, Nagatani, & Yoshida, 2007), apresentando um arranjo usado para localização absoluta de um veículo móvel.	33
Figura 3.8 – Modelo de um motor de corrente contínua excitado separadamente.....	34
Figura 3.9 – Diagrama de blocos de um modelo de motor C.C	37
Figura 3.10 – Modelo simplicidade da geometria de um veículo com acionamento diferencial	41
Figura 3.11 – Diagrama de blocos do sistema mecânico à rodas	44
Figura 3.12 – Sistema MIMO (Múltiplas entradas, múltiplas saídas).....	45
Figura 3.13 – Representação da atuação dos diferentes tipos de atrito no sistema dinâmico	48
Figura 3.14 – Diagrama de blocos considerando as forças de atrito cinético	49
Figura 3.15 – Ângulo de giro de uma esteira	49
Figura 3.16 – Rastro produzido pela derrapagem lateral	51
Figura 4.1 - Diagrama simplificado do robô de esteiras.....	58
Figura 4.2 - Diagrama simplificado do sistema de controle do robô de esteiras.....	59
Figura 4.3 – Diagrama de blocos de um controlador PID Digital	61
Figura 4.4 – Representação do cálculo da derivada na aproximação por diferença direta	62
Figura 4.5 – Resposta à um degrau de entrada em um sistema de 1ª ordem.....	66
Figura 4.6 – Arquitetura de um controlador <i>FUZZY</i> baseado em regras.	70
Figura 4.7 – Sistema de controle híbrido PID-fuzzy	72
Figura 5.1 – Diagrama de blocos de um conjunto motor-esteira.....	75
Figura 5.2 – Modelamento do sistema de esteiras, incluindo os lados direito e esquerdo, acoplamento entre as esteiras e efeito do atrito de derrapagem lateral.	76
Figura 5.3 – Modelamento dos cálculos de velocidades linear e angular	77

Figura 5.4 – Diagrama de blocos para plotagem de gráficos de posição do veículo no plano xy	77
Figura 5.5 - Resposta do sistema com entrada em tensão elétrica (malha aberta)	78
Figura 5.6 - Resposta do sistema com entrada em tensão elétrica (malha aberta) com coeficiente de atrito de 0,8.....	79
Figura 5.7 – Resposta a um degrau unitário. Tensão de 1 Volt e saída de 0,05 m/s de velocidade linear de uma esteira.....	80
Figura 5.8 - Resposta do sistema utilizando controladores PID com ganhos: $K_p = 40$, $K_i = 2000$ e $K_d = 0,008$	81
Figura 5.9 - Resposta do sistema utilizando controladores PID com ganhos: $K_p = 40$, $K_i = 2000$ e $K_d = 0,008$ e com coeficiente de atrito de 0,8.....	81
Figura 5.10 – Modelo do robô de esteiras com segurador de ordem zero e controlador discreto.	82
Figura 5.11 - Resposta do sistema discretizado com coeficiente de atrito de 0,8	83
Figura 5.12 – Resposta do sistema discretizado com atuação do controlador PID-fuzzy	85
Figura 6.1 – <i>Modelo tridimensional chassi do robô de esteira</i>	89
Figura 6.2 – Protótipo experimental usado em testes de campo	90
Figura 6.3 – Diagrama de ligações no barramento I ² C (rede de sensores).....	91
Figura 6.4 – <i>Circuito ponte-H com transistor de efeito de campo</i>	92
Figura 6.5 – Encoder usado na detecção de movimento das esteiras. Foi utilizado um encoder em cada esteira.....	94
Figura 6.6 – Configuração para aplicação do sensor Hall ACS712 (Allegro, 2015)	95
Figura 6.7 – Resposta do Sensor Hall: Tensão de saída (V_{IOUT}) versus Corrente medida (I_p).....	95
Figura 6.8 – Sensor de corrente por Efeito Hall	96
Figura 6.9 – Acelerômetro usado para correções de odometria	96
Figura 6.10 – Percurso retilíneo. Neste gráfico é mostrado apenas o comportamento da esteira direita. Velocidade media: 0,29 m/s. Corrente elétrica media: 3,42 A.	100

Figura 6.11 – Percurso curvilíneo em piso com areia. Velocidade media de 0,27 m/s. Corrente elétrica media de 5,77 A.	101
Figura 6.12 – Percurso curvilíneo em piso com areia. Velocidade media de 0,28 m/s. Corrente elétrica media de 4,93 A.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy.	73
Tabela 5.1 – Parâmetros usados nas simulações	75
Tabela 5.2 – Parâmetros de simulação baseados no protótipo real	87
Tabela 6.1 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_P do sistema simulado.	97
Tabela 6.2 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_I do sistema simulado.	97
Tabela 6.3 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_D do sistema simulado.	98
Tabela 6.4 – Coeficientes de atrito estimados	102

LISTA DE SÍMBOLOS

$G(s)$ – Função de transferência da planta

θ – ângulo de rotação do veículo sobre o plano xy

μ_c – coeficiente de atrito cinético

ω – velocidade angular de rotação do veículo

i_r – coeficiente de deslizamento de uma esteira

v_r – velocidade real de uma esteira

v_t – velocidade teórica de uma esteira

k_p – ganho proporcional do controlador PID

k_i – ganho integral do controlador PID

k_d – ganho derivativo do controlador PID

k_p – ganho proporcional do controlador discreto

k_d – ganho derivativo do controlador discreto

k_{dd} – ganho integral do controlador discreto

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A história humana recente tem registrado grandes avanços em áreas relacionadas com tecnologias, fato que pode ser observado em todos os segmentos da engenharia. Durante séculos tem-se buscado diminuir o esforço humano na realização de tarefas corriqueiras, permitindo que as pessoas tenham tempo para realizar outras tarefas e aumentando a riqueza da sociedade. Sabe-se que este assunto levanta muitos questionamentos a respeito dos impactos negativos que a automação e outras tecnologias causam na sociedade, ao mesmo tempo em que se têm vantagens indiscutíveis; o fato é que o desenvolvimento tecnológico é inerente à humanidade e novas pesquisas ainda trarão muitos avanços em um futuro próximo.

O desenvolvimento da informática, em especial, tem promovido um suporte muito consistente para praticamente todas as atividades humanas. A versatilidade de um sistema computacional, aliado aos dispositivos de interfaces com o mundo físico, tem feito com que muitas ideias, que antes eram inviáveis, possam ser implementadas de forma sistemática e funcional. O desenvolvimento de novos materiais, aliado a novos processos de fabricação, tem impulsionado a criação de novos dispositivos e permitido o aprimoramento de utensílios já existentes.

Da mesma forma, a robótica tem apresentado grandes avanços nas últimas décadas. Apesar de muitos conceitos existirem há muito mais tempo, a viabilidade de algumas construções só tem sido possível devido ao desenvolvimento de novas técnicas de fabricações de máquinas. A robótica é uma das áreas que utilizam a informática como ferramenta para implementação de projetos, ainda concatenando elementos da mecânica, eletrônica e conceitos abstratos. Desta forma, pode-se afirmar que existe um ambiente dinâmico concomitante ao desenvolvimento de sistemas robóticos.

Efetivar o controle destes robôs ainda é um desafio em andamento. Seja no âmbito industrial, espacial ou mesmo residencial, há sempre condições que exigem novas estratégias de funcionamento. Robôs móveis, em especial, necessitam de um conhecimento das características do ambiente. Essas informações são obtidas por sensores e tratadas por microprocessadores digitais. Uma tarefa simples, como realizar um movimento de um ponto a outro, pode trazer uma série de dificuldades devido às incertezas relacionadas com o ambiente. A trajetória de deslocamento precisa ser planejada antes de ser executada e, durante o percurso, o robô precisa estar apto a interpretar os obstáculos do ambiente e tomar decisões no caso de impedimentos ou perturbações.

O planejamento de trajetórias é uma tarefa normalmente desvinculada do sistema de controle dos acionadores, ou seja, o planejamento é feito em um nível de abstração maior, enquanto os comandos enviados aos acionadores necessitam de um equacionamento mais próximo a conceitos físicos.

Controladores dinâmicos são usados para garantir a execução do movimento considerando as propriedades físicas do ambiente, do veículo de seu sistema de atuadores. Propiciar a otimização do movimento também pode ser tarefa do controlador.

Nem sempre é possível obter-se um modelo físico adequado. Neste contexto o uso de controladores inteligentes permite que a identificação dos parâmetros do ambiente seja feita pelo sistema de controle. Mesmo assim, ainda faz-se necessário um conhecimento prévio do comportamento do sistema, através de alguma investigação.

Neste trabalho, um sistema de controle é usado para identificar os parâmetros de aderência do solo e fornecer subsídios para estimação da energia necessária para a execução de uma manobra e a decisão se um determinado movimento pode ser realizado.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivos realizar o controle de um veículo tracionado por esteira, baseado na dinâmica e cinemática do mesmo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar o comportamento dinâmico e modelar matematicamente um veículo tracionado por esteiras e acionado por motores de corrente contínua, considerando suas características cinemáticas, dinâmicas e características não-lineares.
- Implementar o modelo computacional para uso em simulações.
- Simular o movimento do veículo para verificar suas características dinâmicas a partir das respostas às entradas padrões.
- Projetar, implementar e testar um sistema de controle em ambiente computacional.
- Implementar o sistema de controle em um veículo experimental para validar os resultados obtidos em simulação.

1.3. CONTRIBUIÇÃO

Muitos pesquisadores, ao utilizarem pequenos veículos tracionados a esteiras, simplificam o modelo físico do veículo devido à complexidade envolvida neste modelamento. Aproximam o modelo a um veículo tracionado por rodas e qualquer diferença de comportamento é tratada como uma perturbação ao sistema modelado.

Alguns autores têm defendido que a dinâmica de um sistema não precisa ser modelada, uma vez que controladores inteligentes são capazes de aprender o comportamento do sistema. A identificação de um sistema dinâmico é feita pela aproximação a um modelo pré-estabelecido. Quando há não-linearidades e descontinuidades, a identificação pode não ser eficiente.

Como principais contribuições deste trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático e computacional de um veículo tracionado por esteiras considerando os efeitos que o atrito cinético do arrasto lateral das esteiras provoca no movimento. Também, propôs-se um método para estimação do coeficiente de atrito cinético entre as esteiras e o solo, através do tratamento dos sinais provenientes de sensores instalados no veículo. O conhecimento do coeficiente de atrito é útil para estabelecer estratégias de controle, já que influenciam diretamente na dinâmica do sistema.

Ainda como contribuição, um sistema de controle não-linear foi proposto e construído. Um modelo experimental foi construído para validar as técnicas propostas neste trabalho. Os resultados demonstram a atuação do sistema de controle no veículo em diversos ambientes.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo I apresenta de forma sucinta um resumo da tese e os objetivos do trabalho.

O Capítulo II traz uma série de informações sobre trabalhos relacionados com esta pesquisa, traçando uma linha histórica e relacionando com trabalhos acadêmicos e tecnológicos que foram realizados pela comunidade científica.

O Capítulo III apresenta o modelamento do veículo tracionado por esteiras, mostrando as bases para o modelamento, o desenvolvimento das equações e a explanação das características específicas aplicadas a um pequeno veículo tracionado a esteiras.

O Capítulo IV apresenta algumas considerações sobre estratégias de controle, mostrando algumas técnicas já consagradas pela comunidade científica e justificando seu uso em um sistema com as particularidades descritas no Capítulo III.

O Capítulo V apresenta a concepção computacional dos modelos, simulações, implementação do sistema de controle e resultados das simulações. Neste capítulo também se demonstra os problemas existentes no uso de controladores lineares clássicos através de experimentos simulados.

O Capítulo VI apresenta o desenvolvimento do protótipo de um veículo de esteiras de pequeno porte e os resultados obtidos a partir de testes de campo em diversos tipos de solo. Apresentam-se as partes mecânicas e eletrônicas utilizadas, bem como a implementação do sistema de controle em sistemas digitais embarcados.

O Capítulo VII apresenta algumas conclusões obtidas a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados assuntos e trabalhos relacionados com robôs móveis, especialmente os baseados em veículos tracionados por esteiras.

2.2. APLICAÇÕES DE ROBÔS

Há diversas abordagens que podem ser consideradas ao estudar-se robótica. Além do ambiente industrial, podem-se citar os robôs virtuais (programas de computador usados para gerenciar serviços de busca da internet, salas de bate-papo) nano-robôs (concepções de dispositivos construídos de carbono em dimensões nanométricas), humanóides (máquinas que apresentam semelhança a humanos, usados para interagir com um público), próteses de reabilitação (substituem membros amputados) e diversas situações em que o agente é chamado de robô. O fato é que há diversas áreas que são beneficiadas pelo estudo da robótica com aplicações que vão desde diversão até pesquisas de ponta (Ohno, Kawatsuma, Okada, Takeuchi, Higashi, & Tadokoro, 2011), (Sheka, 2014), (Wang, Du, & Sun, “Kinematics Analysis for Obstacle-climbing Performance of a Rescue Robot”, 2007). A seguir são listadas algumas aplicações da robótica em algumas áreas.

2.2.1 Robôs na Industrial

Esta é a área em que a robótica está mais consolidada. Os manipuladores robóticos são também chamados de manipuladores industriais justamente por conta de sua utilização na indústria. Os manipuladores são usados para tarefas repetitivas ou insalubres, como fundição, pintura, soldagem, montagem, movimentação de cargas,

inspeção de produtos, realização de testes, entre outras tarefas (Alguirre, Pinto, Da Silva, Fernando, Campos, & Amaral, 2007).

É possível comprar sistemas robóticos completos e funcionais de diversos fabricantes. Muitos fabricantes de manipuladores industriais são, também, fabricantes de automóveis; isso ocorre por conta da necessidade que havia por parte das montadoras de ter robôs para tarefas específicas, fazendo com que houvesse desenvolvimento destes dispositivos internamente na empresa.

A indústria também tem se beneficiado pelo uso de robôs móveis, inclusive em suas linhas de produção. Geralmente os robôs móveis estão associados à área de logística, já que são usados para transporte.

2.2.2 Robôs na Medicina

Na área da saúde, robôs têm sido usados para realização de cirurgias locais e remotas. O controle ainda é feito pelo médico, ou seja, pode-se afirmar que se trata de uma ferramenta de alta tecnologia e não de um robô (Kwoh, Hou, Jonckheere, & Hayati, 1988), contudo, espera-se que muitas intervenções possam ser realizadas por robôs sem a interferência de cirurgiões em algum tempo. Apesar do alto custo, o uso de robôs nos hospitais tem crescido nos últimos anos (Einstein, 2015). Na Figura 2.1 é mostrado o sistema Da Vinci, usado em diversos hospitais no mundo.

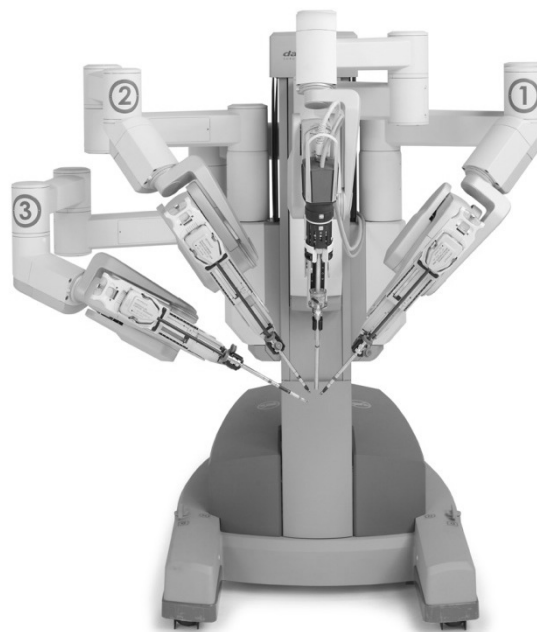


Figura 2.1 – Robô Da Vinci Si (Intuitive, 2015)

2.2.3 Robôs Militares

A utilização de robôs móveis por segmentos militares também tem sido alvo de grandes progressos tecnológicos. A substituição de soldados por máquinas sempre foi um tema abordado por obras de ficção científica, porém, hoje se pode constatar que muitas atribuições estão sendo repassadas para robôs móveis, sejam autônomos, tele-controlados ou híbridos (Arreguin, 2008), (Kudoh, Ogawara, Ruchanurucks, & Ikeuchi, 2009).

2.2.4 Robôs de Exploração Espacial

Apesar de a indústria automobilística ser a grande pioneira no uso de robôs em larga escala, destaca-se o uso de robôs móveis por agências de exploração espacial; nas aplicações espaciais, servindo de referência como Estado da Arte (Helmick, Cheng, Clouse, & Matthies, 2004). Na Figura 2.2 é apresentado um robô móvel utilizado para a exploração de Marte.



Figura 2.2 – Robô Curiosity, um veículo autônomo usado na exploração de Marte dotado de uma série de sensores (NASA, 2014)

2.2.5 Mineração

Escavar minas, transportar o minério, tratar o material e outras tarefas perigosas têm sido realizadas por máquinas com um nível muito elevado de automação. Há diversas empresas especializadas em mineração que desenvolvem robôs capazes de

executar tarefas que necessitam de uma alta capacidade de adaptação e tomada de decisões (RBR, 2015).

Alguns robôs possuem a capacidade de locomover-se em terrenos muito irregulares. Estes também são usados por geólogos e vulcanólogos quando necessitam coletar material em áreas que apresentam um risco potencial. Na Figura 2.3 é mostrado um robô usado para análises geológicas capazes de fazer um levantamento das características de uma área.



Figura 2.3 – Veículo autônomo usado para análise geológica(Robovolc, 2015)

2.3. ROBÓTICA CLÁSSICA

O conceito de robótica é muito amplo e pode ser interpretado de diferentes formas, dependendo do contexto. O termo robótica no contexto da engenharia sempre foi muito associado à robótica industrial. A expansão do uso de robôs funcionais ocorreu na indústria automobilística, tendo como principal forma a concepção de manipuladores (Niku, 2013). Na Figura 2.4 é mostrado o uso de manipuladores industriais; na Figura 2.1b os manipuladores são usados em uma linha de produção automotiva, em que o mesmo braço pode ser programado para realizar diferentes tipos de tarefas.



Figura 2.4– Manipuladores industriais: a) Exemplar sem acessórios (Mitsubishi, 2015)
b) Linha de produção com uma série de manipuladores (Acade, 2015)

O estudo de manipuladores robóticos (ou manipuladores industriais) é baseado em modelos lineares que podem se representados na forma matricial. Essas matrizes contém informações sobre dimensões e movimentos relacionados com o manipulador (Kurfess, 2005). O manipulador robótico é composto pelo braço e pulso. O braço consiste de elementos denominados elos unidos por juntas de movimento relativo, onde são acoplados os acionadores para realizarem estes movimentos individualmente, dotados de capacidade sensorial, e instruídos por um sistema de controle. O braço é fixado a base por um lado e ao pulso pelo outro. O pulso consiste de varias juntas próximas entre si, que permitem a orientação do órgão terminal nas posições que correspondem à tarefa a ser realizada. Na extremidade do pulso existe um órgão terminal (mão ou ferramenta) destinada a realizar a tarefa exigida pela aplicação (Groover, Weiss, Nagel, & Odrey, 1986), (Quigley, Salisbury, Ng, & Salisbury, 2014). Na Figura 2.5 é mostrada uma ilustração dos elementos básicos que compõem o braço de um manipulador robótico.

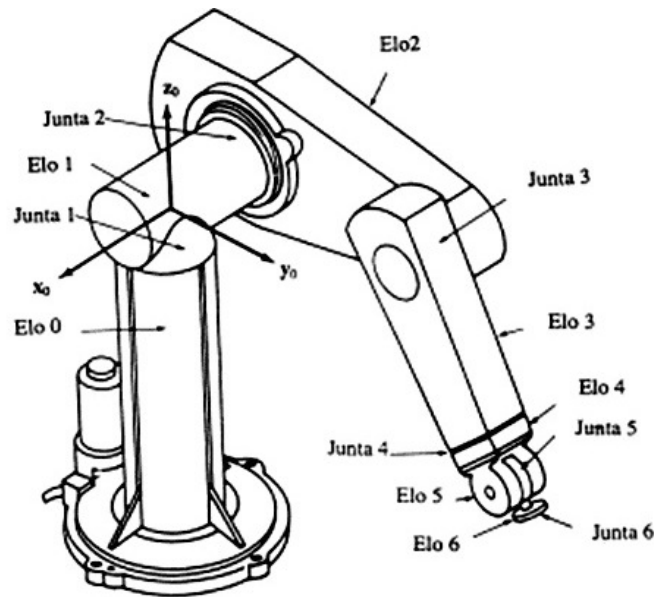


Figura 2.5 – Manipulador robótico e suas partes (Groover, Weiss, Nagel, & Odrey, 1986)

A cinemática estuda o movimento dos corpos sem a consideração das forças ou momentos que causam o movimento. Na robótica industrial, a cinemática refere-se ao estudo analítico do movimento de um robô manipulador. A formulação dos modelos cinemáticos adequados para um mecanismo robótico é muito importante para a análise do comportamento dos manipuladores industriais. Há principalmente duas abordagens diferentes, baseadas no espaço, usadas em modelagem cinemática de manipuladores, ou seja, o espaço cartesiano e espaço quatérnio. A transformação entre dois sistemas de coordenadas cartesianas pode ser decomposta em uma rotação e uma translação. Há muitas maneiras de representar a rotação, incluindo os seguintes: ângulos de Euler, vetor de Gibbs, parâmetros de Cayley-Klein, matrizes de Pauli, ângulo-eixo, matrizes ortonormais e Quatérnios de Hamilton. Dessas representações, transformações homogêneas com base em matrizes reais têm sido usadas com mais frequência em robótica.

Denavit & Hartenberg (Denavit & Hartenberg, 1955) mostraram que uma transformação geral entre duas juntas requer quatro parâmetros. Estes parâmetros conhecidos como os parâmetros Denavit-Hartenberg (DH) tornaram-se o padrão para descrever cinemática do robô. Embora quatérnios constituam uma representação elegante para rotação, eles não têm sido utilizados tanto quanto transformações homogêneas por parte da comunidade robótica. Quatérnios duplos podem apresentar

rotação e translação em uma forma compacta de transformação de vetor, simultaneamente. Enquanto a orientação de um corpo é representada por nove elementos em transformações homogêneas, os quatérnios duplos reduzem o número de elementos para quatro. Ele oferece vantagem considerável em termos de robustez computacional e de armazenamento de eficiência para lidar com a cinemática do robô cadeias (Funda, Taylor, & Paul, 1990).

A cinemática do robô pode ser dividida em cinemática direta e cinemática inversa. O problema da cinemática direta é simples e não há nenhuma complexidade ao obterem-se as equações. Deste modo, existe sempre uma solução da cinemática direta para um manipulador. A cinemática inversa é um problema muito mais difícil do que a cinemática direta. A solução do problema da cinemática inversa exige um grande esforço computacional e assume geralmente um tempo muito longo no controle em tempo real de manipuladores. Singularidades e não-linearidades tornam o problema mais difícil de resolver. Assim, apenas para uma pequena classe de manipuladores cinematicamente simples há soluções analíticas completas (Kucuk & Bingul, 2004). A relação entre a cinemática direta e a cinemática inversa é ilustrada na Figura 2.6, em que as entradas fornecidas ao sistema são os ângulos de cada articulação e as saídas são as posições no espaço cartesiano de cada articulação.

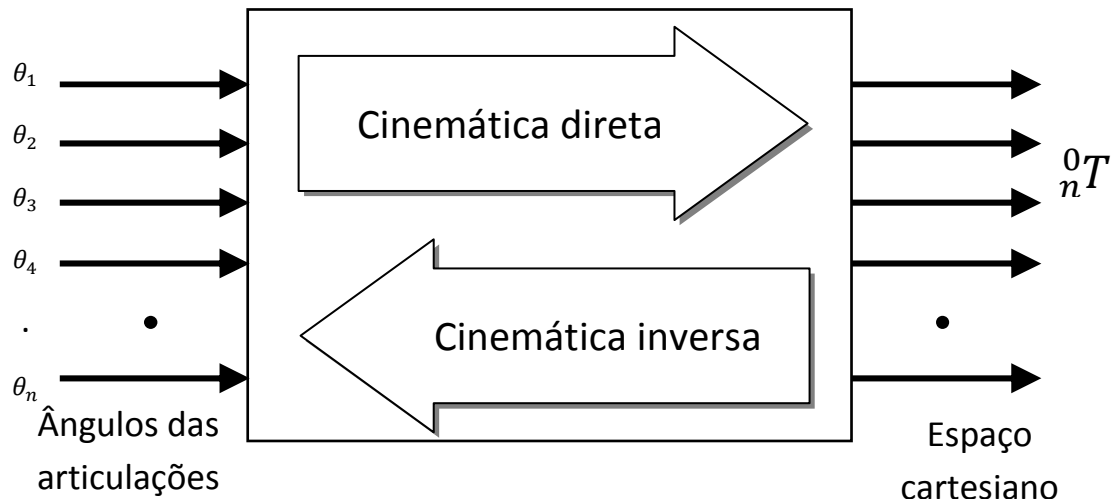


Figura 2.6 – Representação esquemática das cinemáticas direta e inversa

As duas principais técnicas de solução para o problema de cinemática inversa são os métodos analíticos e os numéricos. No primeiro tipo, as variáveis são resolvidas

analiticamente de acordo com os dados de configuração fornecidos. No segundo tipo de solução, as variáveis são obtidas com base em técnicas numéricas.

Existem duas abordagens no método analítico: soluções geométricas e algébricas. Abordagem geométrica é aplicada às estruturas robô simples, tais como manipulador planar com dois graus de liberdade ou menos, com eixos paralelos. Para os manipuladores com mais ligações e cujos braços se estendem até três dimensões ou mais, a geometria fica muito mais tediosa. Neste caso, a abordagem algébrica é mais benéfica para a solução de cinemática inversa (Cubero, 2007).

O modelo matemático (ou modelo dinâmico) do manipulador desempenha um papel preponderante na simulação do movimento, na análise da estrutura do manipulador e no projeto dos algoritmos de controle. Ele fornece uma descrição da relação entre as forças generalizadas (forças e torques) aplicadas nas juntas e o movimento do manipulador.

A dinâmica direta tem como propósito determinar o movimento resultante do manipulador (comportamento) para um tempo $t > t_0$, a partir das posições e velocidades iniciais, forças e torque no instante inicial e Leis de formação para as forças e torques envolvidos. A dinâmica direta é muito usada para simulações.

A dinâmica inversa é usada para determinar as forças e torque nas articulações do robô, a partir das posições e velocidades desejadas. A dinâmica inversa é usada para determinar as leis de controle de um sistema de controle. Na Figura 2.7 é apresentado um diagrama de um sistema que utiliza a dinâmica inversa para controlar um robô, em que os torques aplicados às articulações dependem das posições e das velocidades atuais de cada articulação.

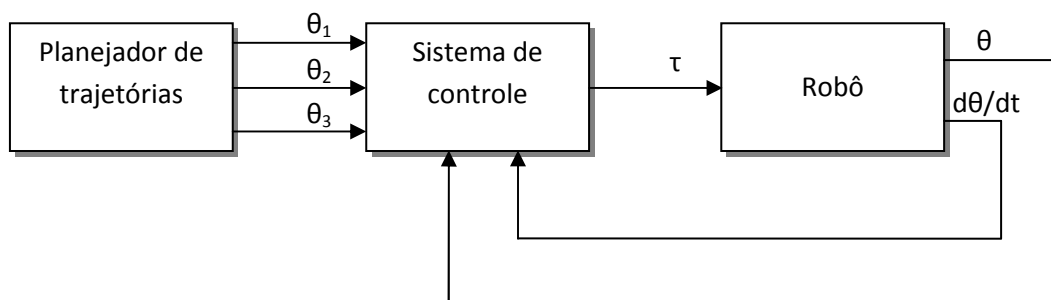


Figura 2.7 Diagrama de sistema utilizando dinâmica inversa

Alguns métodos matemáticos são usados no desenvolvimento de modelos dinâmicos, sendo os mais usados: Newton-Euler, Krane, Lagrange-Euler e as Equações Generalizadas de d'Alembert (Groover, Weiss, Nagel, & Odrey, 1986). A escolha do método mais adequado dá-se pelo tipo de aplicação.

As equações de Lagrange-Euler apresentam uma forma bem estruturada, porém são computacionalmente dispendiosas, já que utilizam equações diferenciais parciais. Neste método, o sistema é considerado por completo; forças que não produzem trabalho (forças nos mancais), não precisam ser introduzidas; o cálculo dos termos de inércia, através da derivada da energia cinética é trabalhoso em sistemas grandes. Alguns dos termos calculados, anulam-se posteriormente em simplificações.

O método de Newton-Euler é organizado em forma de equações recursivas e dificilmente são empregadas na descrição de sistemas mais complexos. De maneira geral, cada corpo rígido é considerado separadamente; quando da separação de cada corpo, as forças nos mancais precisam ser introduzidas e posteriormente eliminadas; o cálculo dos termos de inércia é feito através das acelerações.

No método de projeção de Kane (Kane & Levinson, 1985), o sistema é tratado como um todo; as forças que não produzem trabalho (forças nos mancais), não precisam ser introduzidas. Baseado no princípio das potências virtuais. Cálculo dos termos inerciais através de acelerações e produtos escalares com velocidades parciais.

As Equações Generalizadas de d'Alembert também apresentam uma forma bem estruturada, porém são computacionalmente dispendiosas.

Além dos manipuladores industriais, uma categoria de muito importante é a dos robôs móveis. A popularização de sistemas computadorizados embarcados tem impulsionado o desenvolvimento de uma grande gama de aplicações relacionadas com a robótica móvel. Alia-se a este desenvolvimento o uso de baterias de maior capacidade, o que concede maior autonomia ao robô, além de periféricos que apresentavam alto custo e agora podem ser adquiridos com maior facilidade, como câmeras, sensores e sistemas de comunicação remota. A capacidade de um robô em executar tarefas em um ambiente de características mutáveis é muito importante para reduzir ou eliminar a necessidade de interferência humana no processo. Robôs autônomos podem receber informações de seu

ambiente e tomar decisões que permitam a execução de suas funções. Essas informações são capturadas por sensores e levadas a uma unidade de processamento.

2.4. ROBÓTICA MÓVEL

Um robô móvel pode ser resumido como um veículo dotado de um sistema de locomoção (rodas, por exemplo), um sistema de percepção (sensores) e um sistema de navegação, sendo controlado por um computador embarcado ou remoto. Há vários tipos de sistemas de locomoção que se melhor adequam a um determinado meio ou tipo de tarefa; quanto ao tipo de locomoção, os robôs podem ser classificados como terrestres, aéreos, aquáticos, subaquáticos, espaciais, etc.

No caso de um robô terrestre com rodas, seu modelo cinemático pode ser facilmente encontrado nas bibliografias, considerando diversas morfologias e configurações que o robô pode assumir (Henderson, 2006).

Neste trabalho, optou-se pelo uso de um robô com esteiras. A cinemática de um robô de esteira não é definida pelos métodos tradicionais, uma vez que não existe um ponto único de contato da esteira com o chão, e sim uma série de pontos que podem assumir, por um instante, a função de ponto médio de contato. Desta forma, obtém-se um sistema que apresenta incertezas no modelo cinemático, aumentando a dificuldade de controle.

O controle de um robô autônomo dá-se em diferentes níveis. Os atuadores (motores, sistemas de rodas, por exemplo) são controlados por um sistema eletrônico, geralmente acoplado a controladores clássicos (PID). Em um nível mais elevado, o robô pode ser controlado como um conjunto, desta forma o robô pode receber comando diretos (velocidade e ângulo de deslocamento), receber comandos de trajetórias e posições ou ainda receber uma missão (tarefas mais complexas como estacionar numa vaga de garagem). Na Figura 2.8 são apresentados os níveis de atuação no controle de um robô móvel.

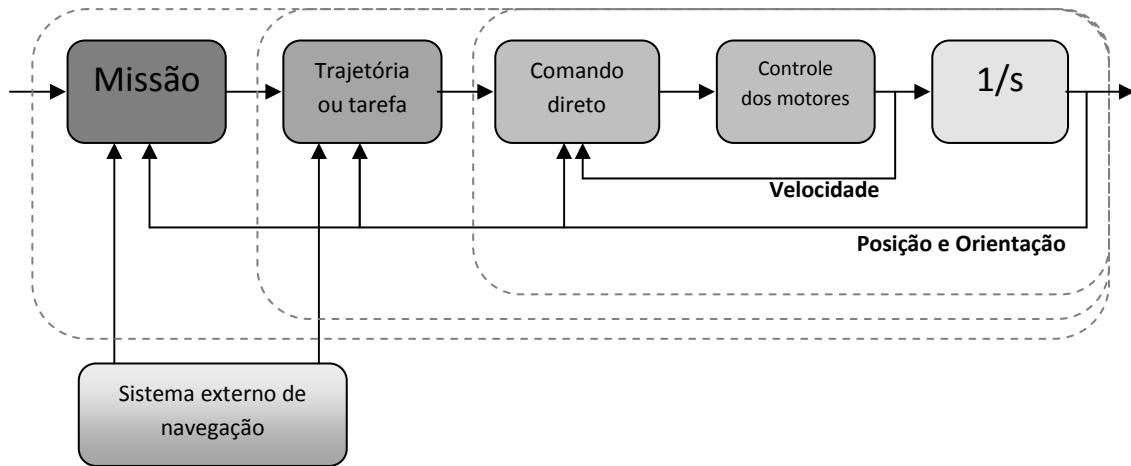


Figura 2.8 – Níveis de atuação no controle de um robô móvel

Muitos autores classificam os robôs móveis quanto à sua forma de executar suas tarefas. Há dois paradigmas básicos, sendo o Deliberativo e o Reativo (Arkin, 1998).

No paradigma deliberativo, o robô é programado para executar uma tarefa e, para isso, um planejamento prévio deve ser feito. Para cada subtarefa, o robô percebe o ambiente (lê e interpreta os sensores), modela o seu espaço, planeja a estratégia de execução e, por fim, executa a tarefa. É o método tradicional e dominante de funcionamento de robôs, para o qual devem ser construídos mapas e outros tipos de modelos detalhados, que eles utilizam para planejar seqüências de ações com precisão matemática. O lado negativo desse método é que, se algo interrompe o trajeto do robô (por exemplo, se o mapa estiver errado ou tiver poucos detalhes), o robô deve parar, fazer um novo mapa e um novo plano de ação (Dudek & Jenkin, 2000). Esse processo de replanejamento pode ser tornar custoso se repetido ao longo do tempo. Também, para assegurar a segurança do robô, programas de *backup* devem estar à disposição para abortar o plano se o robô encontrar uma rocha ou buraco não previstos que possam atrapalhar sua jornada. Na Figura 2.9 é apresentado o paradigma deliberativo.

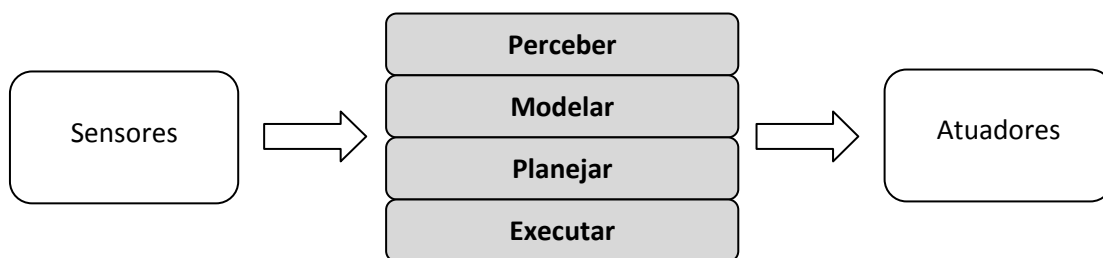


Figura 2.9 – Paradigma deliberativo

No caso reativo, por outro lado, não se cria dependência de mapas nem planos e foca-se na observação do ambiente em tempo real, como a diminuição de velocidade houver derrapagem das rodas (o robô não precisa nem saber a causa, se é chuva, óleo, buracos, etc). O "controle baseado no comportamento", o qual se fundamenta no lado reativo do espectro, permite aos robôs seguirem um plano, mas permanecendo atento ao inesperado e às características mutáveis do seu meio-ambiente. Controles baseados em comportamento dão aos robôs uma grande flexibilidade para adaptar seus planos ao seu meio-ambiente, da mesma forma que os humanos fazem. Isto apresenta um grande número de vantagens em exploração espacial, incluindo diminuir as demoras nas comunicações que resultam da operação de robôs exploradores em locais distantes da Terra. Na Figura 2.10 é apresentado o paradigma reativo.

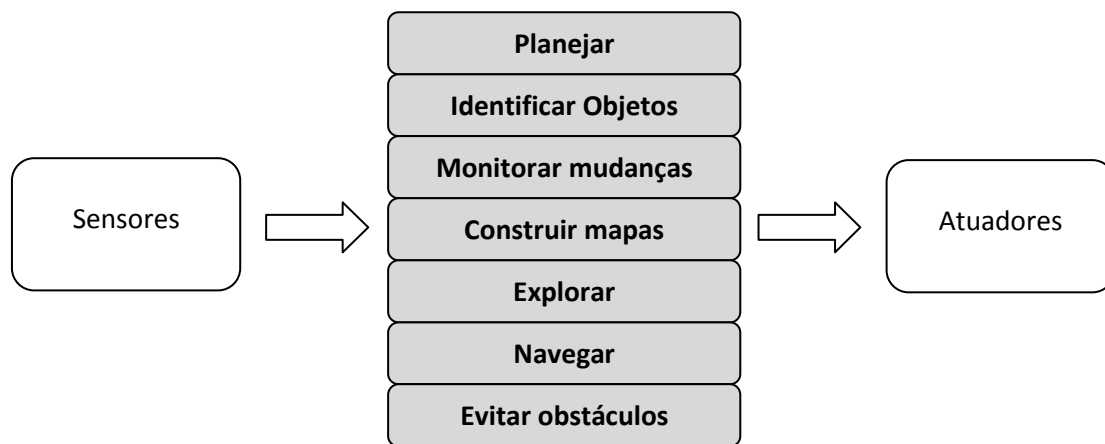


Figura 2.10 – Paradigma reativo

Há ainda modelos híbridos (que usam algumas características de cada paradigma mencionado), que podem ser implementado segundo a necessidade do projeto. Neste tipo de sistema, um módulo é responsável por executar o planejamento em longo prazo, enquanto outro tem a responsabilidade de lidar com situações de reação imediata, tais como evitar obstáculos e se manter em uma estrada. A principal dificuldade deste tipo de sistema de controle é integrar estes dois módulos e resolver os conflitos que surgem desta união. Isto geralmente requer um terceiro módulo que gerencia a comunicação entre o módulo planejador e o módulo reativo. Por este motivo estes sistemas são também chamados de sistemas de três camadas (Gat, 1992).

2.5. AMBIENTES PARA ROBÔS MÓVEIS

Um item importante quando referidos a robôs móveis é qual tipo de ambiente o robô pode se locomover. Quando um robô móvel é projetado, tem-se em mente que ele só poderá operar com algumas limitações físicas relacionadas com o ambiente (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011). Desta forma podem-se classificar os robôs móveis de acordo com o ambiente em que estes podem realizar suas tarefas, como andar em terra firme, voar, mergulhar, etc.

2.5.1 Terrestre

Os veículos terrestres são os mais comuns, já que apresentam uma menor complexidade na construção. Há diversos mecanismos que podem fazer o veículo entrar em movimento, mas, de maneira geral, o princípio físico é o mesmo: a força de reação causada por causa da tração entre o veículo e o chão, ou seja, o veículo empurra o solo para a direção contrária ao seu movimento para ser projetado na direção desejada.

Os veículos tracionados à roda são os mais comuns, apresentando diversas configurações quanto ao número de rodas e suas disposições. Como vantagens, citam-se o custo baixo, a simplicidade de construção e bom desempenho em trajetos planos. Como desvantagens, citam-se a pequena área de contato que permite a derrapagem em curvas ou dificuldade para tracionar o veículo em ambientes com baixa aderência, como arenosos, molhados, congelados, etc.

Há os veículos tracionados a esteiras, similares aos tanques de guerra. Apresentam uma grande área de contato entre o veículo e o solo, permitindo uma maior tração. Como vantagem, cita-se o fato do maior contato com o solo, fazendo com que haja menos derrapagem na direção do movimento por perda de tração, permitindo seu uso na lama, neve, áreas com pedras e outros terrenos impróprios para o uso de rodas. Como desvantagem, cita-se o grande atrito lateral produzido pelas esteiras ao realizar curvas; também se deve ressaltar a dificuldade da construção mecânica das esteiras e a problemática de uma possível manutenção.

Uma categoria muito importante na robótica móvel é a categoria dos robôs que se locomovem por pernas. Estes geralmente são bípedes, quadrúpedes ou hexápodes. Como vantagem cita-se a natural semelhança com sistemas biológicos, permitindo seu

uso em ambientes com obstáculos maiores. Como desvantagens têm-se o aumento da complexidade mecânica, o alto consumo de energia e o alto custo de desenvolvimento.

2.5.2 Aéreo

Nos últimos anos, o uso de pequenos veículos aéreos tem sido popularizado pelo advento de veículos militares não-tripulados e a comercialização em massa de pequenos quadricópteros, que podem carregar pequenas cargas, como câmeras e outros pequenos objetos.

2.5.3 Aquático

Os veículos aquáticos podem se locomover sobre a superfície da água (semelhante a embarcações) ou abaixo da superfície (semelhante a submarinos). Como vantagens citam-se que o planeta Terra é, em sua maioria, coberto por água; muitas aplicações de exploração e salvamento são realizadas em ambientes aquáticos; podem ser testados em tanques ou piscinas. Como desvantagens pode-se citar que a maioria dos componentes usados em pequenos robôs não suporta água, necessitando de um bom sistema de vedação; as formas de comunicação sem fio são limitadas; em profundidades maiores, os investimentos (custo e desenvolvimento) são muito grandes.

2.6. SENSORIAMENTO

A capacidade de locomoção de um robô móvel está atrelada à capacidade que o sistema robótico tem de reconhecer as características do ambiente. Sensores são os dispositivos capazes de detectar os estados das grandezas físicas, dando subsídios ao sistema robótico para permitir sua locomoção ou atuação.

Podem-se classificar os sensores em duas categorias para fins didáticos:

Sensores internos ou proprioceptivos: são sensores que detectam o estado do próprio robô. Basicamente estes sensores não dependem do meio ambiente para suas medidas, tornando-as mais robustas. Os sensores mais utilizados na robótica móvel que se enquadra nesta categoria são os odômetros e os sensores inerciais.

Sensores externos ou exteroceptivos: são os sensores que o robô utiliza para detectar as grandezas externas (Craig, 2005). Estes sensores podem ser ativos ou passivos. Os sensores ativos emitem energia no ambiente para excitação e realizam a leitura das respostas que o ambiente teve, como, por exemplo, um sensor ultrassônico.

Os sensores passivos apenas lêem os dados do ambiente, sem a emissão de energia no meio, como, por exemplo, medidores de temperatura.

2.6.1 Odometria

Robôs móveis, em geral, utilizam atuadores rotativos para gerar a tração necessária para o movimento. Em conjunto com as equações cinemáticas do sistema, é possível inferir o deslocamento do robô em relação ao ambiente a partir do deslocamento angular dos motores ao longo do tempo. Os dispositivos mais usados que medem a posição e a velocidade angular são os *encoders* ópticos e os *resolvers*. Os *encoders* ópticos possuem uma acurácia mais alta que os *resolvers* e são de implementação mais simples, enquanto os *resolvers* são mais robustos e duráveis. Em (Dynapar, 2015) pode-se obter as equações e os princípios de funcionamento.

A odometria visual também tem sido bastante usada como complemento ao conjunto de sensores do sistema robótico (Bradski & Kaehler, 2008).

Os sensores inerciais são constituídos de acelerômetros e girômetros. O acelerômetro mede a aceleração (translação do robô) e o girômetro mede a velocidade angular (rotação do robô). Através de cálculos integrais, é possível estimar a velocidade e a posição do robô sem depender de parâmetros externos.

2.6.2 Localização

Um problema na navegação de robôs móveis autônomos é a tarefa de localização. A partir de um conhecimento acumulado sobre o ambiente (mapa) e utilizando as leituras atuais dos sensores, o robô deve ser capaz de determinar e manter atualizada a sua posição e orientação em relação a este ambiente, mesmo que os sensores apresentem erro e/ou ruído (Beetz, et al., 2004). A seguir são apresentadas algumas definições iniciais sobre o problema da localização de robôs móveis autônomos.

Localização Local: Quando a posição inicial do robô é conhecida, a tarefa do algoritmo de localização é manter a posição conhecida com o menor erro possível, isto é chamado de localização local. Este tipo de localização utiliza uma abordagem incremental para atualizar a posição atual, desta forma, os erros de leitura acumulam-se ao longo do tempo, necessitando de recalibrações (comparações com outros métodos de localização) para reduzir o erro de leitura (Calisi, Nardi, Ohno, & Tadokoro, 2008).

Localização Global: É a habilidade de se estimar a posição do robô sem nenhum conhecimento de sua posição inicial e a habilidade do robô em se relocalizar quando este se perder no ambiente.

Localização Robusta: Muitas técnicas de localização se baseiam em um modelo estático do ambiente. Conseqüentemente, uma localização robusta em um ambiente dinâmico requer a habilidade de se estimar a posição do robô, mesmo que um número significativo de observações não possa ser encontrado no mapa.

Localização Ativa: Para aumentar a eficiência da localização pode-se optar por eliminar as ambigüidades entre as possíveis posições de forma ativa. Controlando de forma ativa a movimentação do robô para que ele se locomova em direção a objetos ou lugares que possam facilitar a quebra da ambigüidade. As frases chaves na localização ativa são: "para onde se mover" e "para onde olhar" de forma a melhor localizar o robô.

2.6.3 Fusão de sensores

De acordo com as manobras executadas, percebe-se que para cada tipo de movimento, um sensor tem mais importância que outro no momento da leitura. Mesmo tendo sua importância reduzida, a leitura de qualquer sensor tem sua relevância. Esse fato sugere que a interpretação final dos valores lidos de certa grandeza deve levar em conta o peso que cada sensor deve ter na leitura (Abidi & Gonzalez, 1992), (Jia, Balasuriya, & Challa, 2008).

Para resolver o problema de medições com ruído e limitações dos sensores, existe a possibilidade de se aplicar uma técnica chamada fusão de sensores. Ela consiste da combinação das medições do acelerômetro e do giroscópio de maneira que se aproveitem os pontos fortes dos dois sensores e no fim, obter uma resposta mais exata do ângulo comparada à utilização de somente um deles. Como o acelerômetro pode fornecer o ângulo precisamente quando não há aceleração e o giroscópio medições precisas do ângulo em espaços curtos de tempo, estas características se complementam e os dois sensores são candidatos ideais para a aplicação da fusão de sensores.

Na maioria dos casos, os sistemas baseados em navegação inercial realizam a fusão das informações dos sensores utilizando Filtro de Kalman. Alguns exemplos do uso dessa técnica podem ser encontrados em várias referências como a aplicação em (WALCHKO; MASON 2002) e (FERDINANDO ET AL., 2012).

2.7. ROBÓTICA ESTATÍSTICA E SLAM

Uma abordagem muito utilizada em robótica móvel é o SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). O termo SLAM é usado para designar a capacidade de o robô autônomo localizar-se em um ambiente a partir de um sistema de sensoramento contido no próprio aparato (Herath, "Stereo Vision Based Simultaneous Localisation and Mapping: A Human Centred Approach", 2011). As informações coletadas incrementam um mapa do ambiente que é usado pelo próprio robô como referência (Benavidez & Jamshid, 2011). Há vários tipos de sensores que podem ser usados para a construção dos mapas, como sensores ultrassônicos, lasers, térmicos, táteis, ópticos, além do uso de câmeras como parte integrante de um sistema de visão computacional (Xiong, Chen, Gong, & Wu, 2007), (Geiser, Roser, & Urtasun, 2010), (van Ginneken, Frangi, Staal, ter Haar Romeny, & Viergever, 2002), (Naroditsky, Zhou, Gallier, Roumeliotis, & Daniilidis, 2012).

Na Figura 2.11 é mostrado o Roomba (iRobot, 2014), um robô aspirador que percorre os cômodos de uma casa e, ao mesmo tempo que faz o trabalho, constroi um mapa do local, marcando as áreas já aspiradas e localiza a posição de repouso, em que fica o carregador.



Figura 2.11 – Robô aspirador iRobot Roomba (Roomba, 2015)

Muitos robôs móveis, atualmente, estão usando câmeras de vídeo para detecção de imagens do ambiente e localização. Faz-se também o uso de múltiplas câmeras para captação de profundidade. Comparando-se à natureza, há muitos animais que possuem um par de olhos localizados na parte frontal da cabeça. Essa característica é típica de caçadores como: leões, gatos, gaviões, corujas, etc. Isto é importante para sobrevivência

de sua espécie, pois esses animais precisam de uma correta percepção da distância da presa, o que representa o sucesso ou fracasso na captura da caça. Essa percepção é obtida devido à uma ligeira separação dos olhos e à capacidade do cérebro em processar as informações (Luo, Zou, & Sun, 2014). O mesmo mecanismo de percepção de profundidade pode ser implementado em um robô através do uso de duas câmeras simultâneas (Cootes, Edwards, & Taylor, "Active Appearance Models", 1998), (Cootes, Edwards, & Taylor, "Active Appearance Models", 2001). Na Figura 2.12 é apresentado um robô móvel tipo esteira utilizado para desarmar bombas, dotado de manipulador, câmeras e sistemas de comunicação (Acade, 2015). Em uma de suas versões, a percepção se baseia na visão de duas câmeras simultaneamente.



Figura 2.12 – Robô móvel de uso militar Qinetiq North America's TALON IV military robot (Qinetiq, 2014)

Associados à captura da imagem, a análise e o processamento dos sinais recebidos mostram-se necessários para utilização nas tomadas de decisões dos autônomos. Assim, diversos algoritmos e filtros podem ser usados para corrigir os erros inerentes aos sistemas de visão estéreo (Herath, Kodagoda, & Dissanayake, "Modeling Errors in Small Baseline Stereo for SLAM", 2006). Com as imagens tratadas e os erros minimizados constrói-se um modelo espacial dinâmico e a trajetória do robô pode ser traçada (Ahn, Lee, Chung, & Oh, 2007).

Há basicamente duas abordagens para se efetuar a reconstrução da informação tridimensional a partir de um par estéreo de imagens. A forma mais simples baseia-se na comparação das intensidades luminosas em cada uma das imagens do par estéreo (Kaess & Dellaert, 2010). A segunda baseia-se na determinação de certas características, tais

como bordas, curvas ou vértices, para, em uma segunda etapa, buscar o casamento destas características no par estéreo (Bekey, 2005), (Araujo, Lima, & Santos, 2009).

O mecanismo de visão é apenas uma parte de um sistema robótico. Não basta saber onde estão localizados os alvos e os obstáculos, também é necessário ter procedimentos coerentes de locomoção. Um controlador deve ser aplicado ao sistema robótico para que seu sistema de locomoção possa ser capaz de realizar manobras de forma satisfatória. No caso de veículos terrestres com rodas, seu modelo matemático (cinemático) já foi bastante estudado; no caso de um robô com esteiras, seu modelo apresenta muitas incertezas na realização de manobras e, portanto, um controlador inteligente deve ser aplicado com o intuito de corrigir ou minimizar os problemas de não-linearidade do sistema de locomoção.

2.8. ROBÔS TRACIONADOS POR ESTEIRAS

Veículos tracionados por esteiras são muito usados como veículos militares (tanques de guerra), em ferramentas de campo (tratores agrícolas, extração de madeira) e construção civil. A grande área de contato que a esteira faz com o solo promove uma grande tração, que, em caso de solos arenos, lamacentos, com neves ou pedras, torna-se uma vantagem que exclui outros tipos de veículos.

Conduzir um veículo de esteiras não é uma tarefa trivial, especialmente em manobras que exijam uma maior exatidão de movimentos. O alto grau de incerteza envolvido com o tipo de solo faz com que alguns movimentos sejam feitos sob derrapagem, exigindo uma maior habilidade do operador.

No caso de veículos autônomos, não é possível guiar um veículo de esteiras usando técnicas determinísticas (Yamauchi, Noyori, Nagatani, & Yoshida, 2014) (Dong, 2012), (Burke, 2012), (Thrun, Bugard, & Fox, 2005). Além disso, o controle das esteiras, em conjunto com a dinâmica do veículo, eleva o grau de complexidade do sistema (Zhang, Li, Ma, & Gao, 2012), (Yang, Moallem, & Patel, 2005), fazendo com que muitos autores simplesmente irrelevem o modelamento deste tipo de veículo (Cheah, Liu, & E., 2006), (Chen & Zhang, 2010) ou realizem aproximações (Martínez, Mandow, Morales, Pedraza, & García-Cerezo, 2005), (Marquardt, Alvarez, & von Ellenrieder, 2014), (Rastan, Lanteigne, & Fahim, 2014), (Shijing, Qunli, Enyong, Dawei, Jing, & Xie, 2008).

Muitas plataformas robóticas computacionais usadas para a implantação de sistemas robóticos aplicados à indústria e desenvolvimento tecnológico possuem em suas bibliotecas modelos dinâmicos e cinemáticos de diversos tipos de robôs (ROS, 2014), (MS Robotics Studio, 2014), mas há praticamente nenhuma disponibilidade de modelos de robôs de esteiras para simulação. Esta dificuldade em modelar os veículos tracionados por esteiras traz uma escassez de trabalhos relacionados com simulação destes tipos de veículos inclusive em aplicações comerciais.

2.9. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O uso de sistemas robóticos em diversas áreas da atividade humana sinaliza a importância do estudo e desenvolvimento de novas técnicas e aplicações na área de robótica. Ainda há muitas atividades que podem ser contempladas e, para isso, deve haver uma constante sistemização dos projetos e aplicações da robótica.

Robôs autônomos estão em pleno desenvolvimento, surgindo novos empregos e aperfeiçoamento de outras aplicações a cada dia. O estudo de técnicas de controle pode ser aprimorado com o aprofundamento dos modelos físicos.

No caso de veículos tracionados por esteiras, há uma lacuna relacionada a estudos que façam a ligação entre as simulações computacionais e os modelos reais.

CAPÍTULO III

3. MODELAMENTO DE ROBÔS DE ESTEIRAS

3.1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi fundamento no controle de um tipo específico de veículo móvel: os tracionados por esteiras. Por conta desta peculiaridade, será mostrado o modelamento deste tipo de veículo, apresentando-se suas características mais relevantes para o contexto deste trabalho.

Os veículos tracionados por esteiras, ou simplesmente veículos de esteiras, apresentam modelos cinemáticos e dinâmicos que dependem muito das características físicas do solo. Há dois fenômenos, em especial, que fazem parte da interação entre as esteiras e o solo, devendo ser estudados e levados em consideração mesmo em situações mais simples; são eles: a derrapagem e o deslizamento.

O deslizamento (ou escorregamento) é definido pela diferença entre a velocidade esperada e a velocidade real, medido de forma independente para cada esteira (Helmick, Cheng, Clouse, & Matthies, 2004).

A derrapagem, no contexto dos veículos de esteiras, está relacionada com o movimento do objeto com atrito dinâmico no sentido lateral que ocorre ao longo da esteira; a derrapagem lateral ocorre quando o veículo executa uma manobra curvilínea e provoca o arrasto da esteira, já que a esteira tem o formato de uma linha reta percorrendo uma linha curva.

O modelo cinemático dos veículos de esteira para pequenos veículos, como robôs de exploração, pode ser aproximada à cinemática dos veículos tracionados por rodas com acionamento diferencial, já que o movimento resultante é semelhante. Esta simplificação permite a rápida implementação de pequenas manobras de forma bem semelhante. No caso de manobras com curvas mais fechadas, como o giro em torno de

si mesmo, procede-se uma maior incidência de derrapagem lateral, aumentando os efeitos das forças de atrito e aumentando o grau de incerteza do movimento.

Interações com o solo, a dinâmica e características inerentes do veículo também são fatores de perturbação do modelo do veículo. O simples fato de o veículo fazer uma curva causa derrapagem nas esteiras. No caso da execução de uma manobra curva, pode existir contato entre o solo e a esteira ao longo de toda sua extensão; pode-se também achar um ponto de contato equivalente, para validar o modelo cinemático. Nos modelos simplificados, utiliza-se um ponto de contato fixo para determinar a equivalência entre os modelos reais e o simplificado, contudo, o modelo simplificado não é suficiente para muitas aplicações.

O deslizamento pode ser medido e o coeficiente de deslizamento (coeficiente que relaciona o grau de deslizamento) pode ser calculado a partir da medição de dois deslocamentos: o movimento de cada esteira, feito através de *encoders* ópticos instalados diretamente no sistema mecânico, e um sistema de localização, que determina o movimento real do veículo em relação ao solo.

3.2. MODELO CINEMÁTICO

O modelo cinemático de um veículo com acionamento diferencial é apresentado a seguir. O veículo possui duas rodas montadas no mesmo eixo. As duas rodas são independentes. A posição global do veículo no plano $\{X, O, Y\}$ é apresentada na Figura 3.1

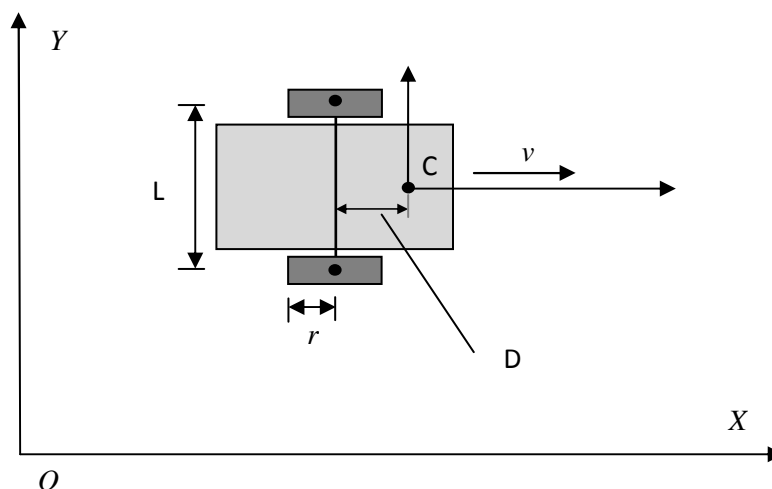


Figura 3.1 – Veículo de rodas com acionamento diferencial

As equações cinemáticas para um veículo de duas rodas são:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

e

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2L} & -\frac{r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Em que x e y são as coordenadas do centro do robô móvel, θ é o ângulo que representa a orientação do veículo, v e ω são as velocidades linear e angular do veículo, ω_D e ω_E são as velocidades angulares das rodas direita e esquerda, r é o raio da roda L é a largura do veículo.

Combinando as equações (3.1) e (3.2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cdot \cos(\theta)}{2} & \frac{r \cdot \cos(\theta)}{2} \\ \frac{r \cdot \sin(\theta)}{2} & \frac{r \cdot \sin(\theta)}{2} \\ \frac{r}{2L} & -\frac{r}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

As entradas do modelo cinemático do robô móvel são as velocidades angulares das rodas direita e esquerda ω_D e ω_E .

Supondo que as rodas não derrapem lateralmente, tem-se a seguinte restrição de movimento:

$$\dot{x} \sin \theta + \dot{y} \cos \theta = D \dot{\theta} \quad (3.4)$$

Muitos veículos robóticos apresentam um modelo cinemático similar. No caso do veículo de esteiras, o modelo cinemático pode ser aproximado para o modelo do veículo de duas rodas. No movimento das esteiras existe um ponto de contato que pode ser tratado como o ponto equivalente de contato. Como simplificação, o ponto médio da esteira é usado como este ponto, como apresentado na Figura 3.2. Observa-se, contudo,

que em uma manobra qualquer, o ponto de contato equivalente pode ser deslocado ao longo da esteira em diferentes instantes de tempo. Este ponto pode assumir qualquer posição e depende de fatores como a interação com o solo, distribuição de carga do veículo, características mecânicas ou mesmo da dinâmica do veículo. Considerando-se o deslocamento do ponto de contato, pode-se incluir este fato no modelo cinemático.

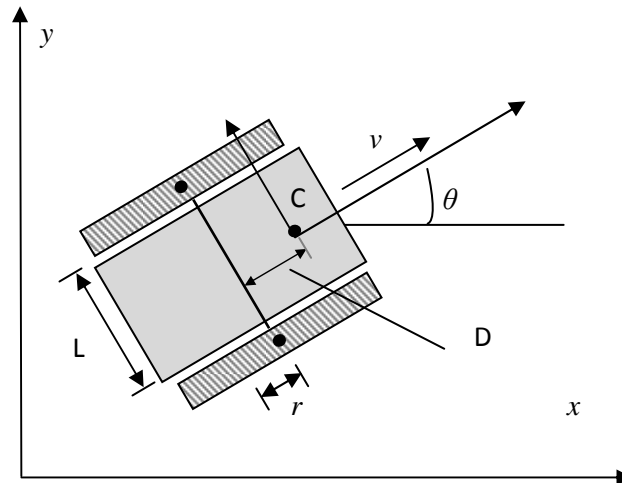


Figura 3.2 – Diagrama das dimensões de um veículo tracionado a esteiras

Uma definição muito importante na compreensão do movimento do veículo é o Centro Instantâneo de Rotação (CIR) (Iossaqui, Camino, & Zampieri, 2001), (Jian & Shilong, 2014), (Li, Wang, Wu, & Du, 2014), (Low, 2014). Está relacionado com a rotação do veículo e baseia-se que, em um intervalo muito pequeno de tempo, o veículo comporta-se como se estivesse realizando um movimento circular e uniforme em torno de um ponto fixo. Nos instantes seguintes este ponto central pode ser deslocado, mas o conceito permanece. Na Figura 3.3 apresenta-se uma representação simplificada do Centro Instantâneo de Rotação.

Alguns trabalhos se utilizam de métodos experimentais para o modelamento do veículo, porém o modelo obtido é apenas válido para um único tipo de interação com o solo. Caso o tipo de solo mude suas características, o modelo pode deixar de ser válido.

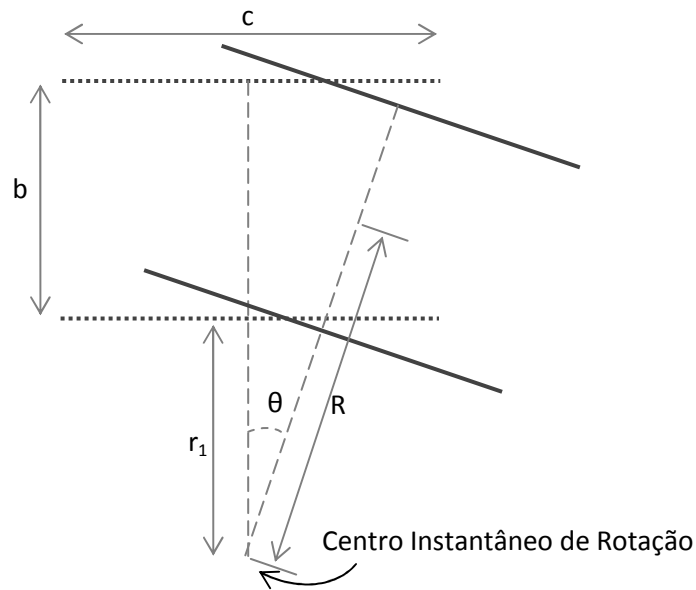


Figura 3.3 – Ilustração do Centro Instantâneo de Rotação

Havendo o deslocamento do ponto de contato equivalente, outra configuração para a obtenção do Centro Instantâneo de Rotação pode ser feita. Na Figura 3.4 apresenta-se esta nova configuração. Nesta figura incluem-se duas novas variáveis, o Δe_1 e o Δe_2 , que representam a distância entre o ponto de contato central e o Ponto Instantâneo de Contato (PIC). Essas variáveis são rearranjadas no modelo cinemático que relaciona as velocidades das esteiras e o movimento do veículo.

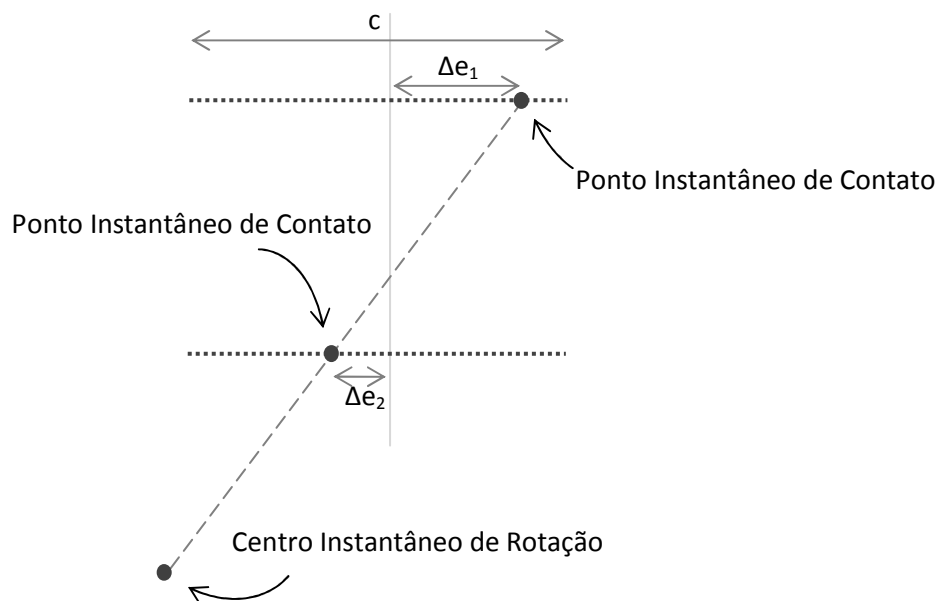


Figura 3.4 – Representação do Centro Instantâneo de Rotação considerando os Pontos Instantâneos de Contato

No caso da existência de pontos de contatos variáveis, a cinemática torna-se variável no tempo. As componentes de velocidade linear das esteiras são reduzidas por conta do desvio causado pelo deslocamento dos pontos de contato. As novas velocidades são tangenciais ao movimento curvilíneo, mas não necessariamente longitudinais ao movimento das esteiras. Esta distorção é representada pelo ângulo α , mostrado na Figura 3.5.

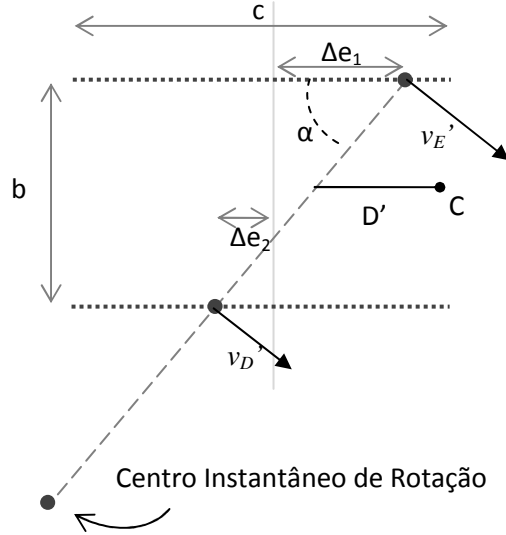


Figura 3.5 – Representação das velocidades resultantes (componentes tangenciais ao movimento) e ângulo de distorção α .

O ângulo α pode ser obtido por:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{b}{(\Delta e_1 - \Delta e_2)} \quad (3.5)$$

E a nova distância entre a projeção do movimento e o ponto de referência do veículo é dada por D' , que pode ser obtido por:

$$D' = D - \frac{\Delta e_1 + \Delta e_2}{2} \quad (3.6)$$

As novas velocidades lineares no veículo são agora dadas por:

$$v'_D = v_D \sin \alpha \quad (3.7)$$

$$v'_E = v_E \sin \alpha \quad (3.8)$$

E a largura equivalente do veículo é dada como:

$$L' = \frac{L}{\sin \alpha} \quad (3.9)$$

Na equação (3.10) são apresentados os parâmetros do modelo cinemático proposto:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\alpha)}{2} & \frac{r \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\alpha)}{2} \\ \frac{r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha)}{2} & \frac{r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha)}{2} \\ \frac{r}{2L} \sin(\alpha) & -\frac{r}{2L} \sin(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos considerando os efeitos da derrapagem em veículos de pequeno porte, especialmente os que utilizam esteira como mecanismos de locomoção (Wang, Zhou, Du, & Sun, 2008), (Li, Zhou, Li, & Zhang, 2012).

Alguns tipos de sensores são comumente usados para detecção do deslocamento do veículo, como sensores inerciais, sensores laser e mesmo sistemas de odometria visual. Cada aparato apresenta características singulares e, em geral, pode-se combinar mais de um tipo de sensor para melhorar a confiabilidade dos dados obtidos.

3.2.1 Coeficiente de deslizamento

Por cada esteira, o coeficiente de deslizamento (Milliken & Milliken, 1995) é definido pela da equação:

$$i_r = \frac{V_t - V_r}{V_t} = 1 - \frac{V_r}{V_t} \quad (3.11)$$

Em que,

i_r é o coeficiente de deslizamento
 v_r é a velocidade real da esteira
 v_t é a velocidade teórica.

Analisando-se o movimento de um veículo de esteira, especialmente em uma manobra curva, observa-se que em um dado instante de tempo o contato com o solo é feito com apenas um ponto da esteira; os demais pontos sofrem derrapagem lateral. Não existe movimento curvo sem a produção de derrapagem em um veículo de esteira (o que provoca um alto consumo de energia para realização de movimentos).

No caso do fenômeno da derrapagem lateral, sua existência fica em evidência quando o veículo realiza um movimento circular. Está em constante variação e inclui fatores que podem ser modelado por processos estocásticos, especialmente relacionados com características de aderência do solo e da própria esteira.

A maioria das referências citadas assume restrições não-holonômicas para o controle do veículo (Dar & Longoria, 2010), (Fang, Li, Wang, Lee, & Chien, 2012). Isso significa que o veículo não pode realizar certas manobras ou movimentos por restrições físicas, como por exemplo, transladar-se lateralmente.

3.2.2 Determinação do Coeficiente de deslizamento

A determinação do Coeficiente de Deslizamento de cada esteira é feita pela medida das velocidades lineares da esteiras (velocidades teóricas) e das velocidades dos deslocamentos das esteiras em relação ao solo (velocidades reais).

Experimentalmente, a velocidade linear de cada esteira pode ser obtida por sensores ópticos (*encoders*) instalados no mecanismo. Neste caso, a velocidade é indicada pelas relações de tempo entre as transições de estado dos *encoders*.

A velocidade real apresenta um pouco mais de dificuldade para ser medida e pode ser obtida de diversas formas, citando-se como exemplos, o uso de sensores laser (medição de distância em relação a pontos de referências fixos), sensores inerciais (acelerômetros, giroscópios), sistemas de visão artificial (câmeras), sonares (transdutores ultrassônicos), ou mesmo com o uso de aparatos mecânicos auxiliares, semelhantes à técnica do mecanismo da “quinta roda”.

Moosavian (Moosavian, 2008) utilizou um método de localização com varredura a laser. Um LRF (Laser Range Finder) foi instalado no veículo, configurado para realizar umas varreduras com 10 Hz taxa de atualização. A velocidade real de cada esteira é calculada a partir da posição (localização e orientação) do robô em relação à posição feita na medida anterior. Sensores laser possuem uma resolução alta, porém os ruídos obtidos em cada varredura precisam ser tratados adequadamente para não causarem erros grosseiros ao sistema robótico. Na Figura 3.6 observam-se o sensor LRF e um esquema simplificado de sua utilização.



Figura 3.6 – a) Sensor LRF. b) Robô dotado de um sensor LRF(Hokuyo, 2014)(Kntu, 2014)

Endo (Endo, Okada, Nagatani, & Yoshida, 2007) utilizou um sistema de localização composto de câmeras instaladas no teto e fusão de dados com um giroscópio. As câmeras fornecem uma posição absoluta do veículo sobre uma área restrita do plano xy. O arranjo é mostrado na Figura 3.7.

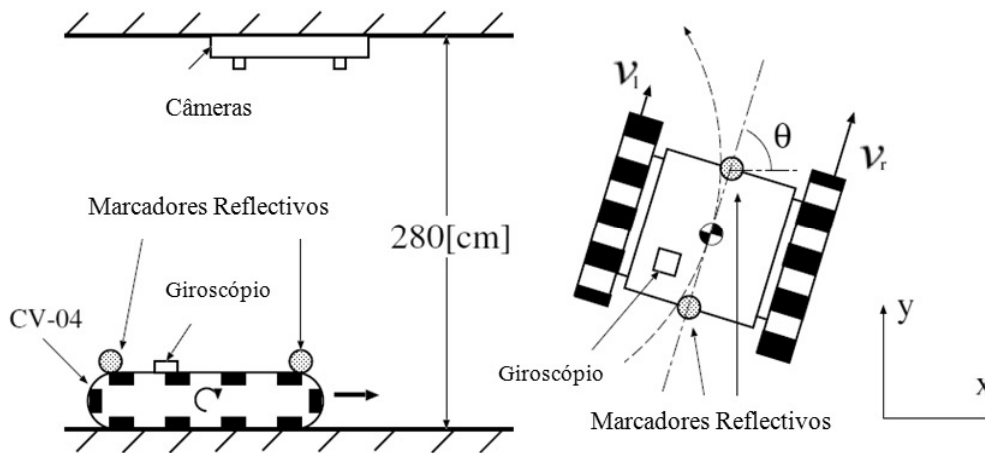


Figura 3.7 – Adaptado de Endo (Endo, Okada, Nagatani, & Yoshida, 2007), apresentando um arranjo usado para localização absoluta de um veículo móvel.

3.3. MODELO DINÂMICO DO ROBÔ DE ESTEIRAS

A construção de modelo dinâmico de um veículo a esteiras apresenta uma série de dificuldades, uma vez que a interação da esteira com o solo nem sempre tem um comportamento adequado. Alguns pesquisadores utilizam modelos dinâmicos experimentais, obtidos por técnicas de identificação de sistemas (Santos, 2001).

Os métodos analíticos para criação de modelos cinemáticos são úteis para o desenvolvimento dos sistemas robóticos, tanto para o controle. Neste caso, a fidelidade do modelo em relação à realidade, em geral, depende do uso de muitas restrições.

Os modelos dinâmicos usados nas simulações foram feitos a partir do modelo de um veículo com rodas.

3.3.1 Modelo eletromecânico

O motor de corrente contínua básico, consistindo de uma armadura, escovas e enrolamentos são usados largamente em aplicações de robótica móvel pelo fato dos veículos serem alimentados por baterias de corrente contínua. O custo relativamente baixo de motores deste tipo, especialmente os que possuem ímã permanente, associado ao desenvolvimento de acionadores a estado sólido, popularizaram o uso em pequenos veículos, como por exemplo, cadeiras de rodas para deficientes, bicicletas motorizadas, *segways* e praticamente a totalidade de robôs móveis terrestres usados por pesquisadores acadêmicos (Nguyen, Morrell, Mullens, & Burmeister, 2004).

O projeto de controladores apropriados requer um modelo matemático adequado para todos os componentes do sistema. A seguir será visto o modelamento de um motor de corrente contínua, tendo a tensão de armadura e o torque de carga como variável de entrada e a velocidade ou a posição do eixo do motor como variável de saída.

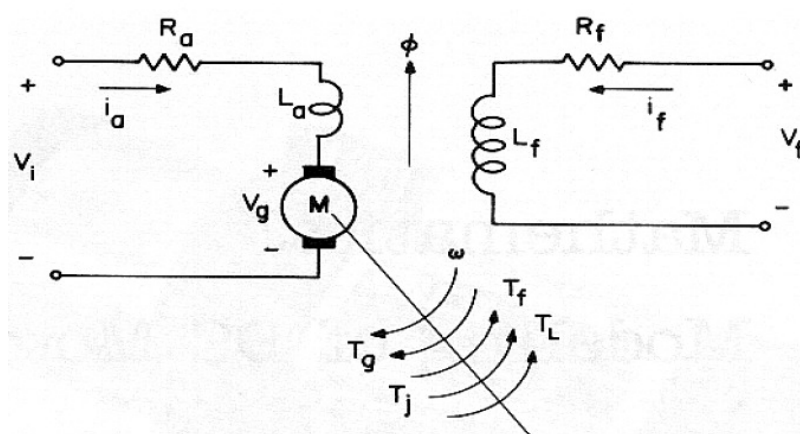


Figura 3.8 – Modelo de um motor de corrente contínua excitado separadamente

Os componentes significativos de um motor de corrente contínua excitado separadamente são modelados como mostra a Figura 3.8. A armadura é modelada como tendo uma resistência constante R_a em série com uma indutância de corrente constante L_a , representando a indutância do enrolamento da armadura, e uma fonte de tensão v_g

representando a tensão gerada na armadura. O enrolamento de campo é representado por uma resistência constante R_f e uma indutância constante L_f , com o fluxo de campo líquido do entreferro sendo designado por ϕ . A velocidade do eixo da armadura é representada por ω e o torque gerado, torque de atrito do motor, torque de inércia do motor, e o torque da carga (no eixo do motor) é indicado por T_g, T_f, T_J e T_L , respectivamente.

A primeira de uma série de equações básicas que modelam o motor de corrente contínua é obtida escrevendo uma equação de tensão na malha da armadura.

$$v_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + v_g(t) \quad (3.12)$$

O termo de tensão $v_g(t)$ na Eq. (3.12) é uma tensão gerada, que resulta quando os condutores da armadura se movem através do fluxo de campo estabelecido pela corrente de campo i_f . De acordo com Faraday, uma tensão é induzida nos terminais de uma espira condutora que gira imersa num campo magnético constante. Essa tensão é dada por:

$$v(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (3.13)$$

Onde $\lambda(t)$ representa o *fluxo magnético concatenado* pela espira e t , é o tempo. Em uma máquina rotativa com comutador, cada trajeto fechado do condutor do rotor tem, nos seus terminais, uma tensão dada pela Eq. (3.13) acima, onde $d\lambda(t)/dt$ é proporcional ao fluxo magnético no entreferro de ar e a velocidade angular $\omega(t)$, ou:

$$v_g(t) = K\phi(t)\omega(t) \quad (3.14)$$

Finalmente, supondo a corrente de campo como sendo constante e ignorando as mudanças no fluxo de campo devido à reação da armadura e outros efeitos secundários, o fluxo de campo torna-se constante, e a Eq. (3.14) torna-se:

$$v_g(t) = K_e \omega(t) \quad (3.15)$$

Uma força é exercida nos condutores onde flui corrente no rotor, na presença de fluxo de campo perpendicular à espira do condutor. O valor desta força é proporcional ao valor da corrente nos condutores, da intensidade do campo magnético, e do

comprimento dos condutores. Cada um dos condutores no campo magnético contribui com um componente da força total, e esse vetor de força multiplicado pelo raio, determinado pela construção do rotor, produz o torque eletromagnético líquido desenvolvido pelo motor, que, supondo que o fluxo de campo permaneça constante, é proporcional à corrente da armadura:

$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (3.16)$$

Onde K_t é a constante do torque do motor.

A potência mecânica desenvolvida no rotor é o produto do torque e da velocidade angular desenvolvidos:

$$P_g(t) = T_g \omega(t) \quad (3.17)$$

Naturalmente, nem toda a potência mecânica desenvolvida no rotor é entregue à carga mecânica conectada ao eixo. Parte da potência desenvolvida é perdida através da resistência do enrolamento do rotor e atrito e por histerese e perdas por correntes de Foucault no ferro do rotor, daqui em diante chamadas de *perdas por atrito*, e parte da energia desenvolvida é armazenada como energia cinética na massa girante do rotor. O torque necessário para superar as perdas por atrito é designado por $T_f(t)$ e o torque necessário para acelerar a inércia é $T_j(t)$. Em todo instante de tempo, o torque desenvolvido deve ser igual e oposto à soma dos torques necessários para superar o atrito, a inércia, e o torque da carga. Assim:

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Onde o torque inercial é representado pelo produto do momento da inércia J e a aceleração angular $d\omega(t)/dt$, e J é o momento de inércia total do rotor e da carga em relação ao eixo do motor. O componente do torque total de atrito do eixo do motor que é uma função linear da velocidade angular do rotor é chamado componente *viscoso* do atrito ou componente de *amortecimento viscoso* e é, geralmente, separado de todos os outros termos restantes do atrito, como mostra a seguinte equação:

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (3.19)$$

Onde B é o coeficiente de atrito viscoso que representa todo atrito viscoso sobre motor e da carga em relação ao eixo do motor, e $T_f(t)$ é a soma de todo atrito do motor e da carga, arrasto de enrolamento, e de termos de perda no ferro em relação ao eixo do motor, excluindo o atrito viscoso. As equações (3.12), (3.15), (3.16) e (3.19), constituem um conjunto básico de equações que modelam o motor C.C. e a partir das quais são obtidas as *funções de transferência* para o motor C.C. operando em vários modos. Tornando a *transformada de Laplace* de ambos os lados do conjunto básico de equações e rearranjando-as, tem-se:

$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a)I_a(s) \quad (3.20)$$

$$V_g(t) = K_e \Omega(s) \quad (3.21)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (3.22)$$

$$T_g(s) - T_f(s) - T_L(s) = (B + sJ)\Omega(s) \quad (3.23)$$

A representação dessas equações básicas em diagramas de blocos é mostrada na Figura 3.9.

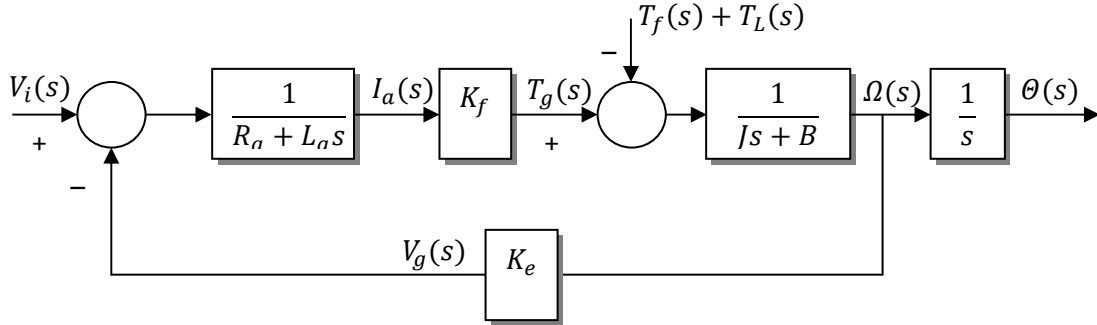


Figura 3.9 – Diagrama de blocos de um modelo de motor C.C

Antes de continuar com a função de transferência para o motor C.C. é apropriado dar uma pausa para diversas observações. Primeiramente, supõe-se que a tensão aplicada ao circuito da armadura do motor é *constante* e que o motor atingiu um ponto de operação em *regime permanente* com uma carga constante aplicada. A potência mecânica desenvolvida pelo rotor é dada pela versão constante em regime permanente da Eq. (3.17) e, considerando a Eq. (3.16), tem-se:

$$P_g = T_g \omega = K_t I_a \omega \quad (3.24)$$

Onde todos os elementos da equação (3.24) são constantes devido à condição de regime permanente. A potência elétrica absorvida pela armadura é o produto da tensão pela corrente da armadura. Assim,

$$P_g = V_g I_a = K_e \omega I_a \quad (3.25)$$

Então, uma vez que a potência mecânica desenvolvida deve ser igual à potência elétrica absorvida no rotor, no sistema MKS, $K_t = K_e$.

Até o momento é aparente que o conjunto de equações básicas não contém nenhuma referência à corrente de campo nem aos parâmetros da bobina de campo (resistência e indutância). A suposição de fluxo constante de campo é uma consequência direta da suposição da corrente de campo constante; assim, o modelo a ser derivado deste conjunto básico também representa um motor a ímã-permanente, onde o fluxo de campo é constante em virtude da estrutura do campo do ímã-permanente.

O diagrama de blocos da Figura 3.9 representa um sistema de duas entradas com a saída sendo a velocidade angular ω , a posição angular θ ou ambas. Da Figura 3.9 a velocidade de saída do sistema é descrita como

$$\Omega(s) = G_1(s)V_i(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_L(s)] \quad (3.26)$$

onde

$$G_1(s) = \left. \frac{\Omega(s)}{V_i(s)} \right|_{T_f(s)+T_L(s)=0} \quad (3.27)$$

$$G_2(s) = \left. \frac{\Omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \right|_{V_i(s)=0} \quad (3.28)$$

A função de transferência tensão-velocidade $G_1(s)$ é

$$G_1(s) = \frac{\Omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J_s + B) + K_t K_e} \quad (3.29)$$

$$= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (3.30)$$

Onde

$$K_m = \frac{K_f}{R_a B + K_f K_e} \quad (3.31)$$

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_f K_e} \quad (3.32)$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_f K_e} \quad (3.33)$$

A Eq. (3.29) define a função de transferência de segunda ordem para a tensão para o motor C.C. Considerando que T_f e T_L são nulos. A Eq. (3.29) também pode ser expressa como:

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e} \quad (3.34)$$

Onde

$$\tau_e = L_a / R_a = \text{constante de tempo elétrica e}$$

$$\tau_m = J / B = \text{constante de tempo mecânica.}$$

Se a indutância de armadura é muito pequena, a constante de tempo elétrica pode ser desprezada frente à constante de tempo mecânica e a eq. (3.29) torna-se:

$$G_V(s) = \frac{\Omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{R_a(J_s + B) + K_t K_e} \quad (3.35)$$

$$G_V(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad (3.36)$$

Em que:

$$\tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e} \quad (3.37)$$

Na Eq. (3.30) a constante K_m é chamada de *constante do motor*. A função de transferência para o torque da carga $G_2(s)$ é dada por:

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{-\frac{1}{J_s + B}}{1 + \frac{K_t K_e}{(L_a s + R_a)(J_s + B)}} \quad (3.38)$$

$$G_2(s) = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m \left(\frac{L_a}{R_a} s + 1 \right)}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (3.39)$$

A qual, se a indutância de armadura é desprezível, reduz-se a

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m}{\tau s + 1} \quad (3.40)$$

3.3.2 Modelo mecânico

O modelo mecânico do robô móvel é obtido a partir do conhecimento das interações das forças e dos fluxos de energias mecânicas envolvidas no veículo. O modelo do robô de esteiras é semelhante ao robô com rodas diferenciais em muitos aspectos. As diferenças são acentuadas quando o raio de curvatura reduz-se, fazendo com que haja derrapagem lateral nas esteiras e produzindo uma força de resistência por conta do atrito (Koh, Hyun, & Kim, 2009), (Ma & Wang, 2013), (Kim & Woo, 2013).

A seguir é apresentado, inicialmente, o modelo de um veículo de rodas, por razões didáticas. A partir do modelo do veículo de rodas, o modelo será modificado para atender os requisitos do veículo de esteiras. Na Figura 3.10 é apresentado um modelo simplificado de um veículo com acionamento diferencial.

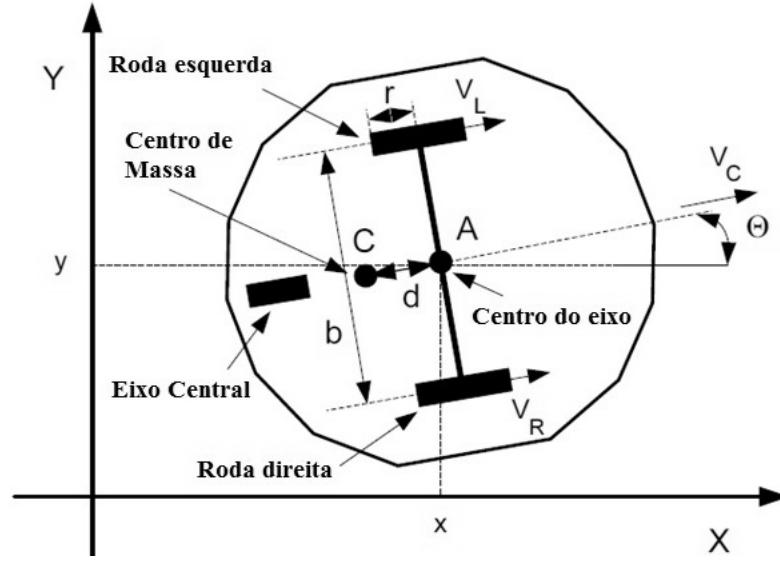


Figura 3.10 – Modelo simplicidade da geometria de um veículo com acionamento diferencial

O equacionamento do movimento pode ser obtido usando-se a formulação de Euler-Lagrange (Velagic, Lacevic, & Osmic, 2008):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.41)$$

Assume-se que o robô móvel move-se apenas em uma superfície plana, logo a energia potencial é zero ($U = 0$) e faz-se necessário apenas encontrar as energias cinéticas do robô. A energia cinética da estrutura inteira é dada pela equação (3.42):

$$E = E_t + E_r + E_e \quad (3.42)$$

Em que E_t é a energia cinética translacional do robô, E_r é a energia cinética rotacional do robô e E_e é a energia cinética do sistema rodas e rotores do motor de corrente contínua, tudo em kgm^2/s^2 . Os valores das energias apresentadas são expressos por:

$$E_t = \frac{1}{2} m v_c^2 = \frac{1}{2} m (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) \quad (3.43)$$

$$E_r = \frac{1}{2} I_A \dot{\theta}^2 \quad (3.44)$$

$$E_e = \frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_D^2 + \frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}_E^2 \quad (3.45)$$

Em que m é a massa total do robô móvel (kg), v_c é a velocidade linear do centro de massa C do robô (m/s), I_A é o momento de inércia do corpo robô inteiro em relação ao ponto A ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), θ é a orientação do robô (rad) em relação à sua referência cartesiana, $\dot{\theta}$ é a velocidade rotacional do robô (rad/s), I_0 é o momento de inércia da combinação do rotor de cada motor e de cada roda ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), $\dot{\theta}_D$ e $\dot{\theta}_E$ são as velocidade angulares das rodas direita e esquerda, respectivamente (rad/s).

As componentes de velocidade do ponto A podem ser expressas em termos de $\dot{\theta}_D$ e $\dot{\theta}_E$:

$$\dot{x}_A = \frac{r}{2} (\dot{\theta}_D + \dot{\theta}_E) \cos(\theta) \quad (3.46)$$

$$\dot{y}_A = \frac{r}{2} (\dot{\theta}_D + \dot{\theta}_E) \sin(\theta) \quad (3.47)$$

$$\theta = \frac{r(\dot{\theta}_D - \dot{\theta}_E)}{b} \quad (3.48)$$

Em que $\dot{x}_A$ representa a velocidade do ponto A em direção do eixo-X (m/s), e $\dot{y}_A$ representa a velocidade do ponto A em direção do eixo-Y (m/s).

Os componentes da velocidade do ponto C considerando a velocidade do ponto A são agora:

$$\dot{x}_C = \dot{x}_A + d\dot{\theta}\sin\theta \quad (3.49)$$

$$\dot{y}_C = \dot{y}_A + d\dot{\theta}\cos\theta \quad (3.50)$$

Em que d é a distância entre os pontos A e C (em metros), $\dot{x}_C$ representa a velocidade do ponto C em direção do eixo-X (m/s) e $\dot{y}_C$ representa a velocidade do ponto C em direção do eixo-Y (m/s).

A energia cinética total do robô móvel pode ser calculada em termo de $\dot{\theta}_D$ e $\dot{\theta}_E$:

$$\begin{aligned}
E(\dot{\theta}_D, \dot{\theta}_E) = & \left(\frac{mr^2}{8} + \frac{(I_A + md^2)r^2}{2b^2} + \frac{I_O}{2} \right) \dot{\theta}_D^2 \\
& + \left(\frac{mr^2}{8} + \frac{(I_A + md^2)r^2}{2b^2} + \frac{I_O}{2} \right) \dot{\theta}_E^2 \\
& + \left(\frac{mr^2}{4} - \frac{(I_A + md^2)r^2}{b^2} \right) \dot{\theta}_D \dot{\theta}_E
\end{aligned} \tag{3.51}$$

Agora, as equações de Lagrange são aplicadas:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_D} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_D} = M_D - K \dot{\theta}_D \tag{3.52}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_E} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_E} = M_E - K \dot{\theta}_E \tag{3.53}$$

Em que M_D e M_E representam a atuação dos torques direito e esquerdo ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$), $K \dot{\theta}_D$ e $K \dot{\theta}_E$ são os valores do atrito viscoso dos sistemas motor-roda direito e esquerdo, respectivamente ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$). Finalmente, as equações dinâmicas do movimento podem ser expressas como:

$$A \ddot{\theta}_D + B \ddot{\theta}_E = M_D - K \dot{\theta}_D \tag{3.54}$$

$$B \ddot{\theta}_D + A \ddot{\theta}_E = M_E - K \dot{\theta}_E \tag{3.55}$$

$$A = \left(\frac{mr^2}{4} + \frac{(I_A + md^2)r^2}{b^2} + I_O \right) \tag{3.56}$$

$$B = \left(\frac{mr^2}{4} - \frac{(I_A + md^2)r^2}{b^2} \right) \tag{3.57}$$

Aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$s^2 A \theta_D + s^2 B \theta_E = M_D - s K \theta_D \tag{3.58}$$

$$s^2 B \theta_D + s^2 A \theta_E = M_E - s K \theta_E \quad (3.59)$$

Rearranjando, tem-se:

$$s^2 A \theta_D + s K \theta_D = M_D - s^2 B \theta_E \quad (3.60)$$

$$\theta_D (s^2 A + s K) = M_D - s^2 B \theta_E \quad (3.61)$$

$$\theta_D = \frac{M_D - s^2 B \theta_E}{s^2 A + s K} \quad (3.62)$$

e

$$\theta_E = \frac{M_E - s^2 B \theta_D}{s^2 A + s K} \quad (3.63)$$

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.11. Percebe-se que existe um derivador duplo no diagrama, o que deve ser evitado nas simulações, pois podem ocorrer instabilidades (mesmo em simulações) caso algum ruído seja inserido.

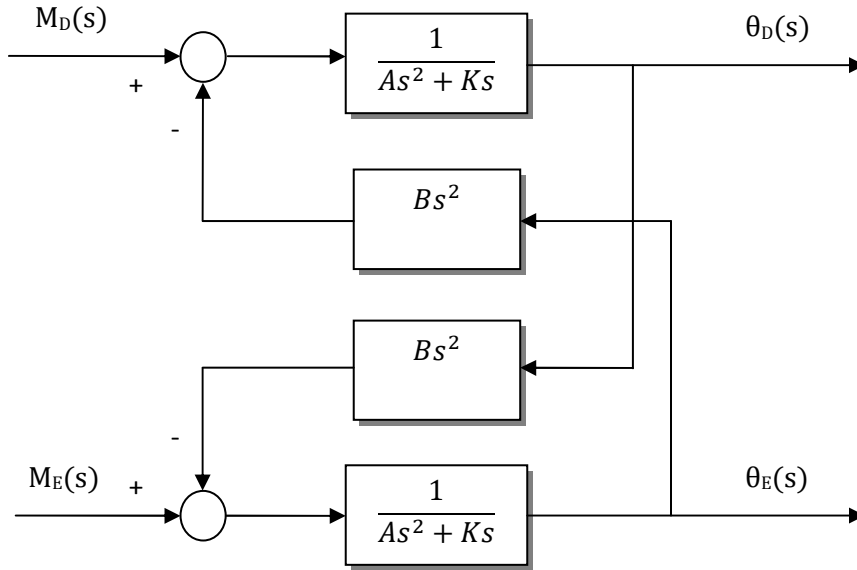


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do sistema mecânico à rodas

O sistema dinâmico apresentado possui duas entradas e duas saídas com acoplamento. Na Figura 3.12 é apresentada uma representação do sistema com suas entradas e saídas.

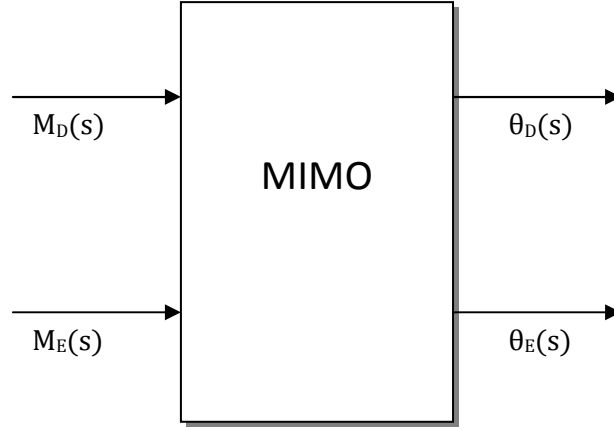


Figura 3.12 – Sistema MIMO (Múltiplas entradas, múltiplas saídas)

O sistema pode ser ainda, representado na forma:

$$Y(s) = G(s)R(s) \quad (3.64)$$

Em que $Y(s)$ representa a matriz de saída, $G(s)$ representa o vetor de transferência e $R(s)$ o vetor de entrada.

$$R(s) = [R_1(s) \quad R_2(s)]^T \quad (3.65)$$

$$Y(s) = [Y_1(s) \quad Y_2(s)]^T \quad (3.66)$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Sendo:

$$G_{ij}(s) = \frac{Y_i(s)}{R_j(s)} \quad (3.68)$$

Considerando as variáveis do veículo móvel, em que recebe o torque proveniente dos motores como entrada e apresenta como saída a velocidade de cada roda, tem-se:

$$R(s) = [M_D(s) \quad M_E(s)]^T \quad (3.69)$$

$$Y(s) = [\theta_D(s) \quad \theta_E(s)]^T \quad (3.70)$$

Construindo-se a matriz de transferência:

$$G_{11}(s) = \frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{M_D(s)}{\theta_D(s)} = \frac{As^2 + Ks}{(As^2 + Ks)^2 - (Bs^2)^2} \quad (3.71)$$

$$G_{22}(s) = \frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{M_E(s)}{\theta_E(s)} = \frac{As^2 + Ks}{(As^2 + Ks)^2 - (Bs^2)^2} \quad (3.72)$$

$$G_{12}(s) = \frac{Y_1(s)}{R_2(s)} = \frac{M_D(s)}{\theta_E(s)} = \frac{Bs^2}{(As^2 + Ks)^2 + (Bs^2)^2} \quad (3.73)$$

$$G_{21}(s) = \frac{Y_2(s)}{R_1(s)} = \frac{M_E(s)}{\theta_D(s)} = \frac{Bs^2}{(As^2 + Ks)^2 + (Bs^2)^2} \quad (3.74)$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{As^2 + Ks}{(As^2 + Ks)^2 - (Bs^2)^2} & \frac{Bs^2}{(As^2 + Ks)^2 + (Bs^2)^2} \\ \frac{Bs^2}{(As^2 + Ks)^2 + (Bs^2)^2} & \frac{As^2 + Ks}{(As^2 + Ks)^2 - (Bs^2)^2} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

O desenvolvimento feito até aqui está relacionado com o veículo tracionado por rodas. A seguir serão feitas algumas considerações para o modelamento das esteiras e, então, apresentado um modelo para o veículo tracionado às esteiras.

3.3.3 Energia dissipada pelo contato esteira-solo

As características dinâmicas do robô tracionado por esteiras são afetadas por diversos fatores, especialmente associados à inércia, geometria, distribuição de massa, qualidade de construção e as propriedades físicas do solo. Comparando-se a um veículo tracionado por rodas com acionamento diferencial, o veículo a esteiras apresenta uma diferença bastante relevante: o atrito causado pelo arrasto lateral das esteiras em movimentos curvilíneos.

O efeito do arrasto lateral são perdas por atrito entre a esteira e o solo; também existe o aumento da carga atribuída aos motores de corrente contínua, alterando seu ponto de operação e aumentando as perdas por efeito Joule. Quanto mais aderente for o sistema esteira-solo, maiores serão as perdas por atrito em movimentos curvilíneos (Youn, Tchamna, Lee, Uddin, Lyu, & Tomizuka, 2014). Este efeito é

totalmente desprezado no modelamento de veículos tracionados por rodas porque a superfície de contato entre a roda e o solo é muito pequena, aproximando-se a um ponto nos modelos mais usados.

As perdas pelo arrasto lateral são modeladas a partir da suposição de que o atrito cinético ocorre ao longo da esteira e que o deslocamento lateral altera-se por cada ponto ao longo da esteira.

Sabe-se que, se as velocidades das duas esteiras forem iguais, o veículo não apresenta derrapagem lateral. Quando há uma diferença entre as velocidades, a derrapagem ocorre, surgindo a ação de forças de atrito. Considerando o veículo como corpo rígido, as forças de atrito não dependem da velocidade, apenas do peso e do coeficiente de atrito entre esteira e solo.

No movimento de translação de um corpo rígido, existe a ação de uma única força resultante. Havendo a ação do atrito, a força pode ser determinada pela equação (3.76):

$$F_a = \mu_c N = \mu_c mg \quad (3.76)$$

Em que F_a é a força de atrito (N) e μ_c é o coeficiente de atrito cinético (adimensional).

Desta forma, o coeficiente de atrito pode ser obtido experimentalmente através de um aparato para arrastar lateralmente o veículo e um arranjo com um dinamômetro.

No caso do veículo em movimento, existe a composição de uma translação e uma rotação. No caso da rotação, consideram-se os torques de atrito:

$$dM_r = \mu dN x \quad (3.77)$$

Agora, as equações de Lagrange são aplicadas:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_D} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_D} = M_D - K \dot{\theta}_D - M_{acD} \quad (3.78)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_E} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_E} = M_E - K \dot{\theta}_E - M_{acE} \quad (3.79)$$

Em que M_{acD} é o torque causado pela ação do atrito no sistema de tração da esteira direita e M_{acE} é o torque causado pela ação do atrito no sistema de tração da esteira esquerda. Os valores assumidos por M_{acD} e M_{acE} estão associados com a existência ou não da derrapagem lateral, logo, relacionar as forças de atrito torna-se uma tarefa complexa na medida em que promove uma descontinuidade nas forças existentes do sistema dinâmico. O atrito consiste geralmente de três partes – atrito estático, atrito cinético (atrito de Coulomb) e o atrito Viscoso – como mostrado na Figura 3.13. Nota-se que as coordenadas são atrito versus velocidade. Quando o trajeto é retilíneo e deseja-se realizar uma curva, precisa-se de certa quantidade de força para vencer o atrito estático e iniciar o movimento curvilíneo. Uma vez que a curva começa a ser realizada, passa a atuar o atrito constante, chamado de atrito de Coulomb, que é independente da velocidade absoluta.

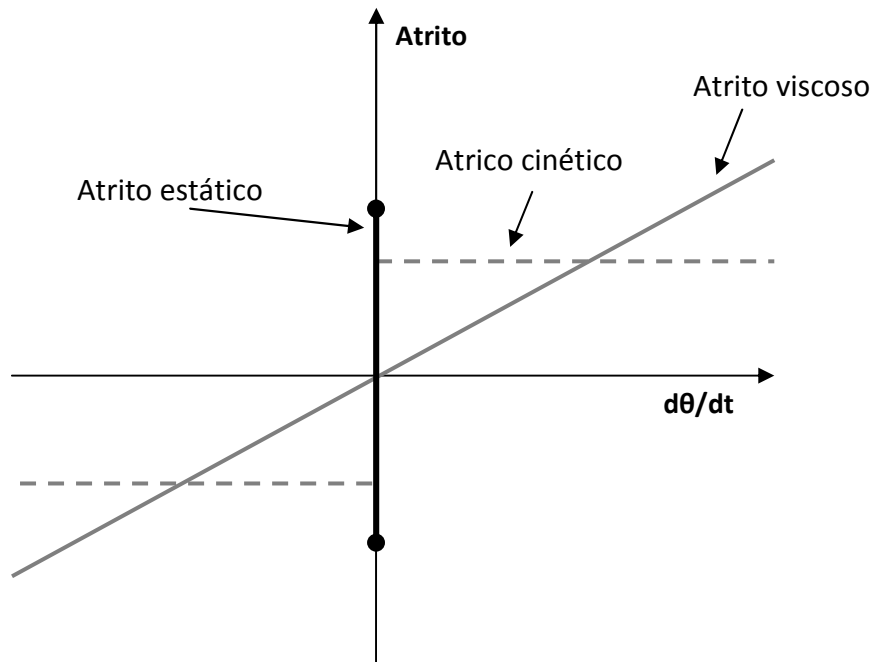


Figura 3.13 – Representação da atuação dos diferentes tipos de atrito no sistema dinâmico

Na Figura 3.14 é apresentado o diagrama de blocos incluindo um bloco para as forças de atrito cinético.

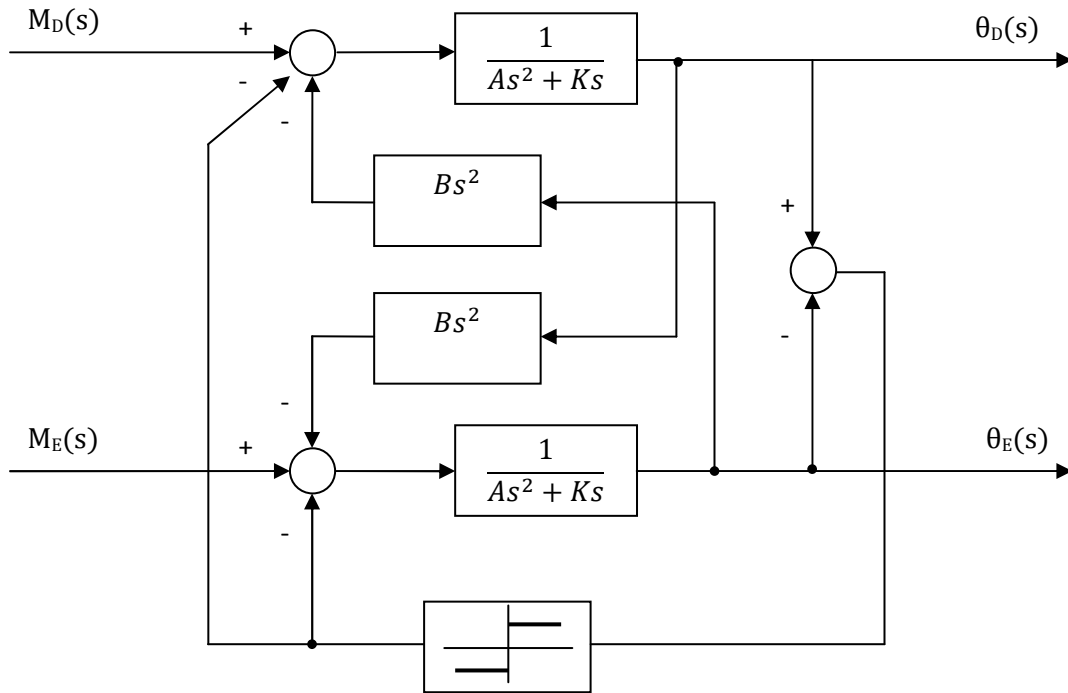


Figura 3.14 – Diagrama de blocos considerando as forças de atrito cinético

Devido à descontinuidade oferecida pelo modelo da Figura 3.14, uma abordagem mais efetiva é relacionar as energias envolvidas no sistema dinâmico (tratar a energia como integral da força), lembrando que a energia dissipada pelo atrito é uma energia não-conservativa.

A quantidade de energia dissipada por conta da derrapagem pode ser estimada a partir da comparação da energia usada para realizar um percurso retilíneo e um percurso curvilíneo, mantendo-se a mesma velocidade linear (Beer, Jr, & Russell, 2012).

Na Figura 3.15 é apresentado um arranjo para ilustrar o cálculo da energia dissipada pelo atrito em um movimento rotacional.

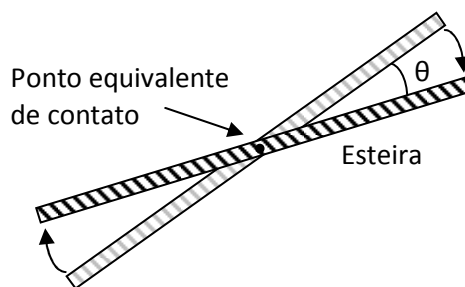


Figura 3.15 – Ângulo de giro de uma esteira

Quando uma força F é aplicada em um corpo rígido em torno de um eixo fixo passando por O , perpendicular ao plano do diagrama. Quando o corpo gira de um pequeno ângulo $d\theta$, o ponto P percorre uma distância $ds=r d\theta$ e o trabalho realizado pela força F é:

$$W = \int F_S ds = \int F_S r d\theta \quad (3.80)$$

Mas $F_S r$ é o momento Γ da força em relação ao eixo. Se diversas forças atuam sobre o corpo, o trabalho é igual ao trabalho do torque resultante (Halliday & Resnick, 2013), de modo que:

$$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Gamma d\theta \quad (3.81)$$

Logo, considerando a energia dissipada como o trabalho de um momento para realizar uma rotação de ângulo θ , tem-se:

$$E_a = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \mu_c m g \frac{c}{2} d\theta \quad (3.82)$$

$$E_a = \mu_c m g \frac{c}{2} \theta \quad (3.83)$$

Outra forma de encontrar a energia de atrito dissipada pela interação entre esteiras e solo é fazendo-se uma analogia entre a energia dissipada numa translação e a área deixada pelo rastro do movimento (Hai-bo & Hong-wei, 2014), (Hutangkabodee, Zweiri, Seneviratne, & Althoefer, 2006). A Figura 3.16 mostra o rastro produzido por uma esteira em um movimento curvilíneo, considerando-se um ângulo pequeno. E energia dissipada está relacionada com a área produzida por este arrasto.

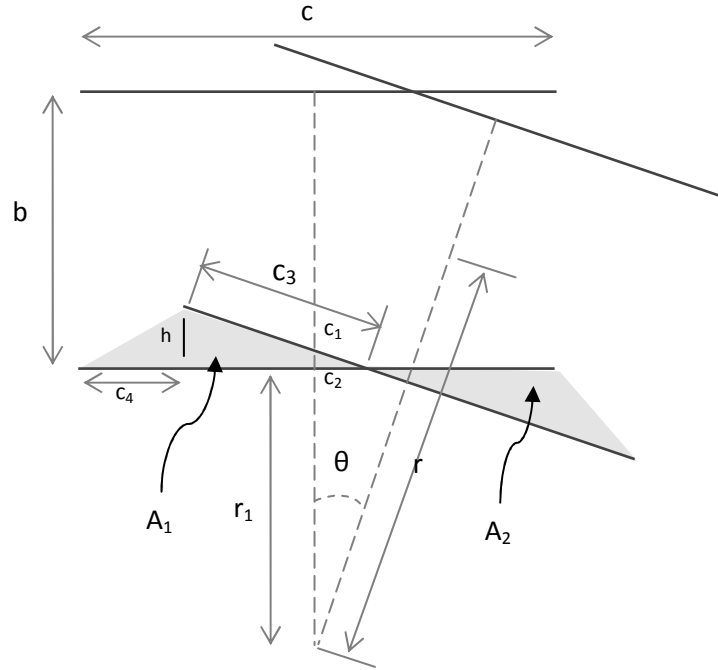


Figura 3.16 – Rastro produzido pela derrapagem lateral

Em um sistema discretizado, os ângulos relacionados à rotação do veículo tendem a ser pequenos, supondo que o período de amostragem seja pequeno. Considerando os ângulos pequenos, pode-se aproximar o seno do ângulo pelo próprio valor absoluto do ângulo, em radianos. Assim:

$$\sin \theta \cong \theta \quad (3.84)$$

$$c_2 \cong c_1 \cong \frac{\theta}{2} r_1 \quad (3.85)$$

$$c_3 = \frac{c}{2} - c_2 \quad (3.86)$$

$$c_4 \cong \frac{c}{2} + c_2 - c_3 \quad (3.87)$$

$$c_4 \cong 2c_2 \quad (3.88)$$

$$h = \theta c_3 \quad (3.89)$$

A área A1 pode ser calculada como:

$$A_1 = \frac{\left(\frac{c}{2} + c_2\right)(\theta c_3)}{2} \quad (3.90)$$

Substituindo:

$$A_1 = \frac{\theta}{8} \left(c^2 + \theta^2 \left(r - \frac{b}{2} \right)^2 \right) \quad (3.91)$$

$$A_1 + A_2 = \frac{\theta}{4} \left(c^2 + \theta^2 \left(r - \frac{b}{2} \right)^2 \right) \quad (3.92)$$

A área total será:

$$A = \frac{\theta}{4} \left(c^2 + \theta^2 \left(r - \frac{b}{2} \right)^2 \right) + \frac{\theta}{4} \left(c^2 + \theta^2 \left(r + \frac{b}{2} \right)^2 \right) \quad (3.93)$$

$$A = \frac{\theta}{4} \left(c^2 + \theta^2 \left(r - \frac{b}{2} \right)^2 + c^2 + \theta^2 \left(r + \frac{b}{2} \right)^2 \right) \quad (3.94)$$

$$A = \frac{\theta c^2}{2} + \frac{\theta^3}{2} \left(r^2 + \frac{b^2}{4} \right) \quad (3.95)$$

Sabe-se que θ apresenta um valor pequeno devido a taxa de amostragem suficientemente alta, tem-se que $\theta^3 \cong 0$. Desta forma, por aproximação, obtém-se a área formada pelo rastro das esteiras:

$$A = \frac{\theta \cdot c^2}{2} \quad (3.96)$$

A energia dissipada em um movimento translacional lateral pode ser expressa por:

$$E_a = \mu_c N d \quad (3.97)$$

Em que d é o deslocamento do corpo. A área deixada pelo rastro neste movimento é:

$$A = d \cdot c \quad (3.98)$$

Comparando-se a equação (3.96),

$$\frac{\theta \cdot c^2}{2} = d \cdot c \quad (3.99)$$

$$d = \frac{\theta \cdot c}{2} \quad (3.100)$$

$$E_a = \mu_c N \frac{\theta \cdot c}{2} \quad (3.101)$$

$$E_a = \mu_c m g \frac{c}{2} \theta \quad (3.102)$$

A energia elétrica extra que é necessária para realizar um movimento curvilíneo é dissipada em forma de energia de atrito entre a esteira e o solo e dissipada em perdas nas resistências. Considerando o sistema discretizado, em um intervalo Δt , sabe-se que o deslocamento em uma unidade de tempo é dado por (3.103):

$$\theta = \frac{(v_D - v_E)}{b} \Delta t \quad (3.103)$$

A energia extra fornecida pela fonte de tensão:

$$\Delta E_E = (\Delta V_{MD} \Delta I_{MD} + \Delta V_{ME} \Delta I_{ME}) \cdot \Delta t \quad (3.104)$$

Relacionando a energia extra fornecida pelas baterias com a energia dissipada pelo atrito (desprezando-se a energia extra que é perdida por aquecimento do sistema elétrico):

$$(\Delta V_{MD} \Delta I_{MD} + \Delta V_{ME} \Delta I_{ME}) \Delta t = \mu_c m g \frac{c}{2} \frac{(v_D - v_E)}{b} \Delta t \quad (3.105)$$

Logo, pode-se estimar o atrito cinético através da equação:

$$\mu_c = \frac{(\Delta V_{MD} \Delta I_{MD} + \Delta V_{ME} \Delta I_{ME})}{mg \frac{c}{2} \frac{(v_D - v_E)}{b}} \quad (3.106)$$

Em que:

μ_c : coeficiente de atrito cinético entre solo e esteiras

$\Delta V_{MD}, \Delta V_{ME}$: acréscimos de tensões aplicadas nos motores direito e esquerdo, respectivamente

$\Delta I_{MD}, \Delta I_{ME}$: incrementos de corrente aplicadas aos motores direito e esquerdo, respectivamente

m : massa do veículo

g : aceleração da gravidade

c : comprimento da esteira relacionada à parte que faz contato com o solo

v_D, v_E : velocidade das esteiras direita e esquerda, respectivamente

b : distância entre as esteiras (largura do veículo)

3.4. MODELO DISCRETO

Os modelos matemáticos contínuos são bastante úteis e permitem uma análise ampla sobre o comportamento do sistema modelado. Quando o modelo é realizado em um ambiente computacional, faz-se necessário discretizar tal modelo.

Na implementação física do veículo, tem-se ainda a limitação dos sensores que apresentam uma taxa de atualização limitada, forçando o projeto de controladores também discretos.

3.4.1 Discretização do modelo dinâmico

Os modelos dinâmicos do sistema físico representados por equações diferenciais e também em transformada de Laplace podem ser discretizados de forma rápida através da transformada Z. A transformada Z é o método de análise de sistema discreto análogo a transformada de Laplace para sistemas contínuos. A designação transformada z se deve a Ragazzini e Zodeh, em 1952 (Lathi, 2004). Quanto ao seu aspecto qualitativo, pode-se dizer que a transformada z transforma uma sequência de números em uma função de variável complexa z.

Uma forma de abordar a transformada Z é mapear o plano s em um plano correspondente z através da relação:

$$z = e^{sT_a} \quad (3.107)$$

Em que T_a é o período de amostragem.

A transformação inversa pode ser obtida por:

$$s = \frac{1}{T_a} \ln z \quad (3.108)$$

Fazendo a expansão em série, pode-se chegar a aproximação de Tustin (Oppenheim & Schafer, 1988), como mostra a equação (3.110)

$$s \approx \frac{2}{T_a} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (3.109)$$

Discretizando a equação (3.75) (matriz de transferência de veículos tracionados a roda), tem-se:

$$\theta_D(z) = \frac{(M_D - M_{acD}) - s^2 B \theta_E}{s^2 A + sK} = \frac{(M_D - M_{acD})}{s(sA + K)} - \frac{s^2 B \theta_E}{(sA + K)} \quad (3.110)$$

$$\theta_D(z) = \frac{(M_D - M_{acD})}{A} \frac{z}{(z - 1)} \frac{(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a})}{\left(z - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)} - \frac{\theta_E B}{A} \frac{(z - 1)^2}{z \left(z - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)} \quad (3.111)$$

Encontra-se também a equação relacionada com $\theta_E(z)$:

$$\theta_E(z) = \frac{(M_E - M_{acE})}{A} \frac{z}{(z - 1)} \frac{(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a})}{\left(z - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)} - \frac{\theta_D B}{A} \frac{(z - 1)^2}{z \left(z - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)} \quad (3.112)$$

A definição do período de amostragem T_a deve ser feita de acordo com os requisitos do projeto. De maneira geral, deve-se escolher um valor para T_a pelo menos 20 vezes menor que a menor constante de tempo do sistema (Nise, 2015).

Utilizando as propriedades da transformada z , pode-se chegar às equações a diferenças, que é uma representação discreta das equações diferenciais (Lathi, 2004) e que pode ser mais facilmente implementado em sistemas computacionais mais simples, como microcontroladores.

Este resultado será utilizado no Capítulo V, referente às simulações do sistema dinâmico.

3.5.COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O modelamento de um veículo tracionado por esteiras permite fornecer subsídios para o projetista investigar qual a melhor estratégia para desenvolver o sistema de controle. O modelo matemático também é usado para realização de simulações e para antever comportamentos em um sistema real.

CAPÍTULO IV

4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

4.1. INTRODUÇÃO

As técnicas clássicas de controle são muito úteis quando inseridas em um sistema linear e que possa ser modelado por equações diferenciais ordinárias ou por equações a diferenças, no caso discreto (Ogata, 1994). No caso de plantas não-lineares, pode-se optar por técnicas de linearização, que geralmente limitam a atuação da planta, ou pelo uso de controladores não-lineares.

Os modelos cinemáticos e dinâmicos, apresentados no Capítulo III, são úteis na investigação de quais técnicas podem ser usadas no projeto de sistemas de controle do veículo. Há inúmeras estratégias de controle que podem ser adotadas no robô de esteiras. De maneira geral, usa-se a velocidade e a posição como referências, podendo-se utilizar algum outro parâmetro para otimização.

Intuitivamente é mais fácil interpretar o movimento de um robô móvel como os carros de passeio, isto é, impor uma velocidade e ajustar a direção de acordo com o valor desejado. O modelo clássico é definido pela Geometria de Ackerman (Milliken & Milliken, 1995). Já no caso do veículo à esteira, o modelo foi reduzido a um veículo com acionamento diferencial, porém o movimento do veículo pode ser interpretado da mesma forma: impor uma referência de velocidade e ajustar a direção de acordo com o valor desejado.

Na Figura 4.1 é mostrada uma representação simplificada do veículo de esteiras, em que a entrada pode ser expressa como as velocidades desejadas e a saída representa o valor medido pelos sensores.

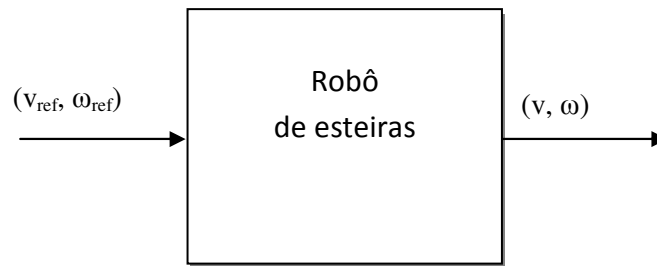


Figura 4.1 - Diagrama simplificado do robô de esteiras

Neste trabalho, parte-se do princípio que a velocidade linear (velocidade no sentido longitudinal) do veículo pode ser comprometida, mas a trajetória deve ser mantida. Os erros de velocidade linear são toleráveis por causa da natureza física do veículo, uma vez que, em solos com baixa aderência, não é fisicamente possível estabelecer velocidades altas. Para manter a trajetória, o Centro Instantâneo de Rotação (CIR) deve ser observado. O CIR é obtido a partir da diferença entre as velocidades das esteiras direita e esquerda, logo se pode presumir que é mais relevante controlar a diferença entre as velocidades do que a velocidade absoluta de cada esteira.

O sistema de controle pode, então, ser dividido em dois problemas de controle: controle de velocidade e diferencial.

Controle de Velocidade, garantindo que cada esteira apresente a velocidade desejada individualmente. Este controle pode ser feito diretamente nos motores de corrente contínua, utilizando controladores mais simples, como um Proporcional. Mesmo que haja um erro na velocidade obtida, este erro alimenta outro bloco do sistema de controle, que verifica a diferença entre as velocidades das esteiras.

Controle Diferencial, fazendo com que seja garantido que a diferença entre as esteiras seja controlada para garantir que o percurso seja feito. Caso alguma das esteiras não consiga efetuar a velocidade de referência, um controlador pode corrigir o percurso através da compensação de velocidade pela outra esteira. Quando há diferença entre as velocidades, ou seja, o veículo executa uma curva, existe mais atrito lateral, que depende ainda da velocidade linear do veículo. Como se trata de um fenômeno não-linear, utiliza-se controladores mais adequados para este tipo de dinâmica, como controladores neurais, *Fuzzy*, ou até mesmo PID's modificados.

Na Figura 4.2 é apresentado um diagrama de como um sistema de controle pode ser implementado:

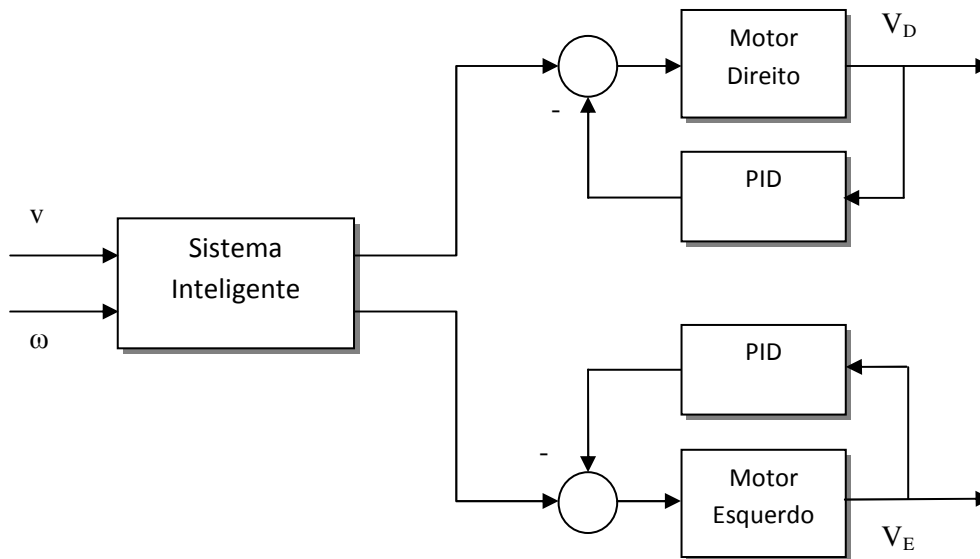


Figura 4.2 - Diagrama simplificado do sistema de controle do robô de esteiras

Exemplificando o uso de um controlador diferencial, tem-se a seguinte situação fictícia: Um veículo percorrendo uma trajetória retilínea à velocidade constante é submetido a um percurso em que a estrada não é uniforme. Uma das esteiras passa a percorrer sobre uma área arenosa enquanto a outra fica sobre solo asfaltado. Ao impor uma velocidade maior, a esteira submetida à areia perde aderência e começa a derrapar. Ao detectar a derrapagem, o sistema de controle impõe a esta esteira mais energia para compensar a perda. Este procedimento pode não ser eficaz, fazendo com que o veículo saia de sua trajetória. Neste caso, mesmo um controlador robusto não será capaz de estabelecer uma velocidade grande a uma esteira se, fisicamente, não é possível. Uma estratégia para manter a trajetória retilínea é diminuir a velocidade da outra esteira, fazendo com que as forças de tração estejam dentro dos limites estabelecidos pelo atrito estático entre solo e esteira, ou seja, para manter a trajetória, a diferença entre as velocidades foi efetuada, mesmo comprometendo a velocidade linear do veículo.

4.2. CONTROLADORES CLÁSSICOS

O controlador PID possui até três formas de atuação (que podem ser combinada) cada uma com um efeito diferente ao sistema, pode-se generalizar esses efeitos da seguinte forma:

- A ação proporcional (P) irá prover uma resposta mais rápida do sistema sob uma variação no sinal de entrada (estado desejado);
- A ação integral (I) tem por objetivo cancelar um fenômeno conhecido por erro de estado estacionário, de forma que ao atingir um estado estável esse valor seja o desejado no sinal de entrada;
- A ação derivativa (D) possui um efeito de antecipação da correção do valor de saída do sistema de forma que ela também melhora a rapidez de resposta do sistema e reduz o valor de sobre-sinal (valor que refere – se à quantidade em que o sinal de saída está acima do desejado).

A combinação da quantidade de cada uma dessas três ações irá fazer com que o controlador em conjunto com a planta (forma comum de se referir ao sistema em controle) forneça uma resposta adequada a uma determinada variação na entrada. Dessa forma pode-se escrever o estado de saída do controlador PID contínuo em função de sua entrada pela equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.1)$$

K_p, Coeficiente da ação proporcional;

K_i, Coeficiente da ação integral;

K_d, Coeficiente da ação derivativa

t, Instante do estado a ser processado;

u(t), Sinal de saída do sistema no instante t;

e(t), Sinal de erro na entrada do controlador no instante t.

4.2.1 PID digital

Na sua versão digital, o controlador PID tem uma estrutura como mostrado na Figura 4.3.

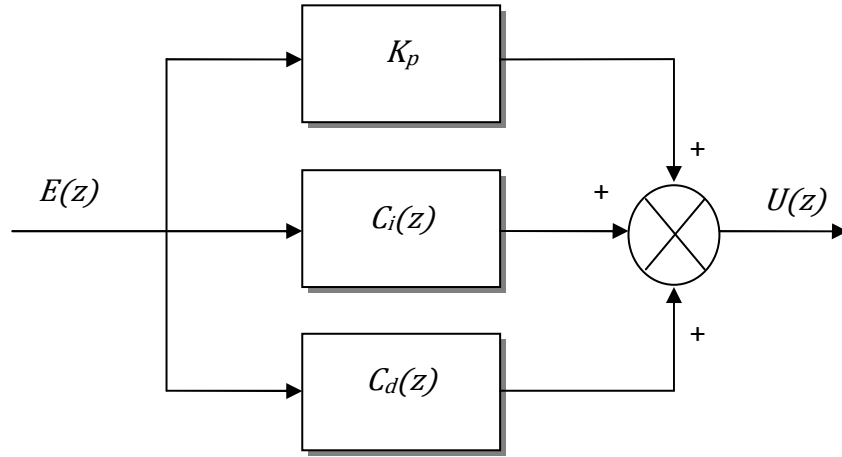


Figura 4.3 – Diagrama de blocos de um controlador PID Digital

Ou seja, tem-se:

$$C(z) = K_p + C_i(z) + C_d(z) \quad (4.2)$$

Dependendo da aproximação utilizada para a integral e a derivada, $C_i(z)$ e $C_d(z)$ podem assumir várias formas diferentes. Em sistemas discretizados, não é possível obter uma derivada em um ponto porque o sinal não é contínuo. Neste caso a derivada é calculada a partir da comparação entre dois pontos consecutivos, fazendo-se uma diferença destes pontos e dividindo-se pelo período de amostragem.

Aproximação por diferença direta:

Nesta aproximação, a derivada é calculada usando-se o valor posterior ao ponto de interesse.

$$\dot{y}(kT) = \frac{y(k+1) - y(k)}{T} \quad (4.3)$$

Na Figura 4.4 está a representação gráfica da derivada no ponto $y(k)$.

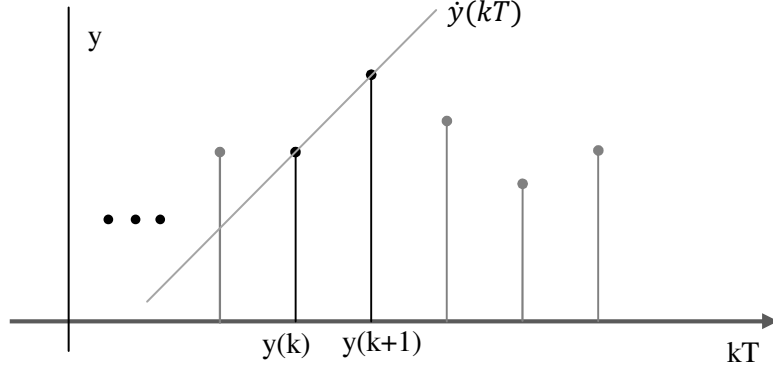


Figura 4.4 – Representação do cálculo da derivada na aproximação por diferença direta

Utilizando a transformada z , pode-se chegar às equações que compõem o controlador PID. A componente integral é apresentada na equação(4.4):

$$C_i(z) = K_i \frac{T}{z-1} = K_p \frac{T}{T_i(z-1)} = K_p \frac{1}{\tau_i(z-1)} \text{ com } \tau_i = \frac{T_i}{T} \quad (4.4)$$

A componente derivativa é apresentada na equação (4.5):

$$C_d(z) = K_d \frac{z-1}{T} = K_p T_d \frac{(z-1)}{T} = K_p \tau_d (z-1) \text{ com } \tau_d = \frac{T_d}{T} \quad (4.5)$$

O controlador completo pode ser representado como:

$$C(z) = K_p + K_p \frac{T}{T_i(z-1)} + K_p \tau_d (z-1) \quad (4.6)$$

Rearranjando a equação (4.6), obtem-se a equação (4.7):

$$C(z) = K_p \tau_p \frac{z^2 + \left(\frac{1}{\tau_d} - 2\right)z + \frac{\tau_i \tau_d - \tau_i + 1}{\tau_i \tau_d}}{z-1} \quad (4.7)$$

A função de transferência possui dois zeros reais ou complexos e um polo em $z = 1$. Como a função de transferência possui mais zeros finitos do que polos finitos a sua implementação é problemática. Assim, é preferível utilizar as outras aproximações que não apresentam esse problema.

Aproximação por diferença reversa:

Nesta aproximação, também chamada de Método de Euler, a derivada é calculada usando-se o valor anterior ao ponto de interesse.

$$\dot{y}(kT) = \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad (4.8)$$

Utilizando a transformada z , pode-se chegar às equações que compõem o controlador PID. A componente integral é apresentada na equação (4.9):

$$C_i(z) = K_i \frac{Tz}{z-1} = K_p \frac{Tz}{T_i(z-1)} = K_p \frac{z}{\tau_i(z-1)} \quad (4.9)$$

A componente derivativa é apresentada na equação (4.10):

$$C_d(z) = K_d \frac{z-1}{Tz} = K_p T_d \frac{(z-1)}{Tz} = K_p \tau_d \left(\frac{z-1}{z} \right) \quad (4.10)$$

O controlador completo pode ser representado como:

$$C(z) = K_p + K_p \frac{z}{\tau_i(z-1)} + K_p \tau_d \left(\frac{z-1}{z} \right) \quad (4.11)$$

Rearranjando a equação, obtem-se a equação:

$$= K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i} + \tau_d \right) \frac{\frac{1+2\tau_d}{1+\frac{1}{\tau_i}+\tau_d} z + \frac{\tau_d}{1+\frac{1}{\tau_i}+\tau_d}}{z(z-1)} \quad (4.12)$$

A função de transferência possui dois zeros reais ou complexos, um polo em $z = 0$ e um polo em $z = 1$.

Aproximação bilinear:

Nesta aproximação, também chamada de Método de Tustin ou aproximação trapezoidal, a derivada é calculada usando-se o valor anterior ao ponto de interesse.

$$\frac{\dot{y}(k) + \dot{y}(k-1)}{2} = \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad (4.13)$$

Utilizando a transformada z , pode-se chegar às equações que compõem o controlador PID. A componente integral é apresentada na equação:

$$C_i(z) = K_i \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} = K_p \frac{T}{2T_i} \frac{z+1}{(z-1)} = K_p \frac{1}{2\tau_i} \frac{z+1}{(z-1)} \quad (4.14)$$

A componente derivativa é apresentada na equação:

$$C_d(z) = K_d \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = K_p T_d \frac{2}{T} \frac{(z-1)}{z+1} = K_p \tau_d 2 \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (4.15)$$

O controlador completo pode ser representado como:

$$C(z) = K_p + K_p \frac{1}{2\tau_i} \frac{z+1}{(z-1)} + K_p \tau_d 2 \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (4.16)$$

Rearranjando a equação, obtem-se a:

$$C(z) = K_p \left(1 + \frac{1}{2\tau_i} + 2\tau_d \right) \frac{z^2 + \frac{\frac{1}{\tau_i} + 4\tau_d}{1 + \frac{1}{2\tau_i} + 2\tau_d} z + \frac{\frac{1}{2\tau_i} + 2\tau_d - 1}{1 + \frac{1}{2\tau_i} + 2\tau_d}}{(z+1)(z-1)} \quad (4.17)$$

A função de transferência possui dois zeros reais ou complexos, um polo em $z = 1$ e um polo em $z = -1$. Assim, o controlador PID apresenta dois polos e dois zeros. As posições dos polos são determinadas pela aproximação utilizada, para *backward differences* tem-se polos em $z = 0$ e $z = 1$ e para aproximação bilinear tem-se polos em $z = 1$ e $z = -1$. As posições dos dois zeros são determinadas pelos parâmetros do controlador.

4.2.2 Sintonia de controladores PID

O projeto e o ajuste de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) parece ser conceitualmente intuitivo, porém pode ser difícil, na prática, se múltiplos (e muitas vezes conflitantes) objetivos, tais como curta resposta transitória e alta estabilidade devem ser atingidos (Takahashi, Peres, & Ferreira, 1997).

Normalmente os projetos iniciais obtidos por todos os meios precisam ser ajustados repetidamente através de simulações de computador até que o sistema de circuito fechado execute como desejado. Isso estimula o desenvolvimento de ferramentas "inteligentes" que podem ajudar a alcançar o melhor controle PID para aplicações específicas e gerais.

Se não for conhecida a função de transferência da planta, esta poderá ser obtida através da curva de reação do processo, isto é da resposta em malha aberta ao degrau. O método de Ziegler-Nichols é um dos mais antigos e amplamente utilizados nos projetos de controladores PID (K. J. Aström, 2004), (Valério & Da Costa, 2006).

Discretizando a equação do algoritmo PID de posição:

$$m(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.18)$$

Obtém-se o sinal de controle discreto, m_k , a partir de:

$$m_k = K_p e_k + K_i S_k + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (4.19)$$

Em que:

$$S_k = S_{k-1} + e_k \quad (4.20)$$

e os novos parâmetros estão relacionados com os analógicos da seguinte forma:

$$K_p = k_c \quad (4.21)$$

$$K_i = k_c \frac{\Delta T}{T_i} \quad (4.22)$$

$$K_d = k_c \frac{T_d}{\Delta T} \quad (4.23)$$

Pode-se também derivar o algoritmo de velocidade a partir de:

$$\Delta m_k = m_k - m_{k-1} \quad (4.24)$$

Este tem como saída o incremento (ou decremento) no valor da variável manipulada em cada instante (Δm_k) e não o valor absoluto desta variável (m_k):

$$\Delta m_k = e_k (K_p + K_i + K_d) - e_{k-1} (K_p + 2K_d) + e_{k-2} K_d \quad (4.25)$$

Para processos de 1ª ordem, a curva de reação do processo segue o padrão:

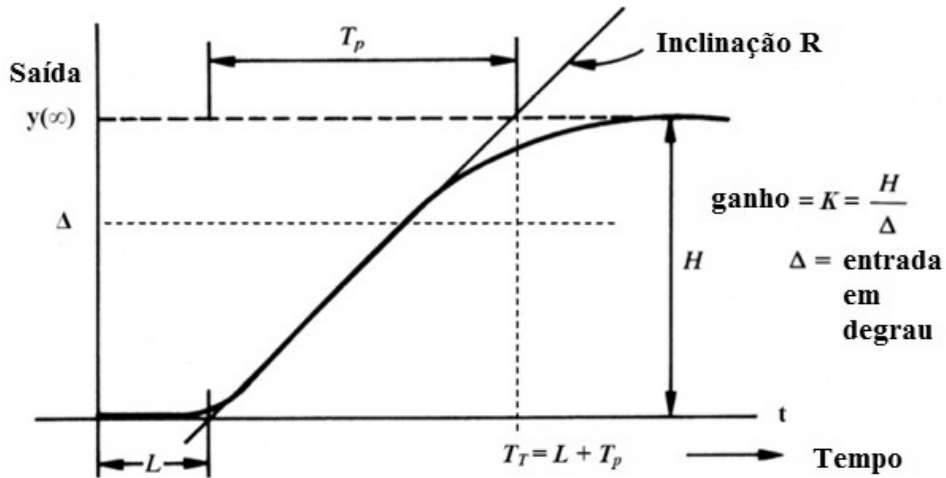


Figura 4.5 – Resposta à um degrau de entrada em um sistema de 1ª ordem

A sintonia do PID pela regras de Ziegler-Nichols é dada por:

$$K_c = \frac{1.2}{RL} \quad (4.26)$$

$$T_i = 2L \quad (4.27)$$

$$T_d = 0.5L \quad (4.28)$$

e de acordo com Goff (Goff, 1966):

$$T_s = 0.3L \quad (4.29)$$

Usando a transformação para parâmetros digitais, Takahashi (Takahashi, 1997) propôs a seguinte regra:

$$K_p = \frac{1.2}{R(L + T_s)} \quad (4.30)$$

$$K_{ci} = \frac{0.6T_s}{R(L + T_s/2)^2} \quad (4.31)$$

$$\frac{0.5}{RT_s} \leq K_d \leq \frac{0.6}{RT_s} \quad (4.32)$$

A descrição de como sintonizar um controlador PID digital através do método de Ziegler-Nichols é usada para implementar os procedimentos experimentais para sintonia dos controladores no veículo protótipo de testes apresentado no Capítulo VI deste trabalho.

4.2.3 Controlador PID real

Utilizando a aproximação *backward differences*, a expressão do controlador PID na forma discreta é:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{i=0}^k e(i) + K_d \frac{1}{T} (e(k) - e(k-1)) \quad (4.33)$$

E considerando (4.34) atrasado de um período de amostragem tem-se:

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i T \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_d \frac{1}{T} (e(k-1) - e(k-2)) \quad (4.34)$$

e

$$\begin{aligned} u(k) - u(k-1) &= K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i T e(k) \\ &\quad + K_d \frac{1}{T} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned} \quad (4.35)$$

ou

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i T e(k) + K_d \frac{1}{T} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (4.36)$$

que é uma forma mais conveniente de ser utilizada por evitar problemas de estouro (*overflow*) devido ao somatório. Adicionalmente, na presença de saturação, basta corrigir o valor de $u(k-1)$ para o valor saturado para evitar o problema conhecido por *windup* (Microchip, 2014).

4.3. CONTROLADOR FUZZY

A lógica *fuzzy* pode ser vista como uma forma de se realizar uma interface com processos analógicos, que permite o tratamento gradual de sinais contínuos e sinais discretos manipulados por máquinas digitais. A teoria de controladores *fuzzy* fornece subsídios para a identificação e controle de uma planta não linear sem que haja um modelo matemático exato, através do uso de aprendizado e adaptação, ou mesmo pela extração do conhecimento de um especialista no controle do processo (Silva, 2012).

Lotfi Zadeh, o introdutor da lógica *fuzzy*, afirmou que muitos conjuntos do mundo que nos rodeia são definidos por um limite não distinto. Zadeh decidiu estender a lógica de dois valores, definida pelo par binário $\{0, 1\}$, para todo o intervalo contínuo $[0, 1]$, introduzindo assim uma transição gradual do falso ao verdadeiro (Natsheh, 2010).

Controle *fuzzy* é um método de controle baseado em lógica *fuzzy*. Assim como a lógica *fuzzy* pode ser descrito simplesmente como "computação com palavras em vez de números"; controle *fuzzy* pode ser descrito simplesmente como "controle com frases em vez de equações". Um controlador *fuzzy* pode incluir regras empíricas, e que é especialmente útil em instalações controladas pelo operador. Uma revisão abrangente do design clássico e implementação do controlador de lógica *fuzzy* pode ser encontrado na literatura (Lee, 1990). Um sistema *fuzzy* baseado em regras (se-então) é constituído pelos seguintes módulos (Isermann, 1998), (Yager, 1994):

- Fuzzificação,

- Inferência,
- Base de regras e
- Defuzzificação.

A fuzzificação representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real, que usa números reais (valores mensurados nos sensores), para o domínio *fuzzy*, que usa números *fuzzy*.

Após essa transformação um conjunto de inferências é utilizado para as tomadas de decisões, invocando as regras apropriadas e gerando os resultados para cada uma, depois combina os resultados das regras.

A função da base de regras é representar de maneira estruturada a ação de controle, baseado em um conhecimento prévio do sistema, em termos linguísticos do tipo:

se <condições> ***então*** <execução>

A parcela *se* de uma regra, contém uma ou mais condições relacionadas ao estado do processo chamadas antecedentes, formando uma premissa. A parcela *então* contém uma ou mais ações de controle chamadas consequente.

A defuzzificação é a etapa no qual as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema. Esta etapa corresponde a ligação funcional entre as regiões Fuzzy e o valor esperado. Dentre os diversos tipos de técnicas de defuzzificação destaca-se: Centróide, First-of-Maxima, Middle-of-Maxima e Critério Máximo (Tanaka, 1996).

A arquitetura do controlador *fuzzy* é apresentada na Figura 4.6

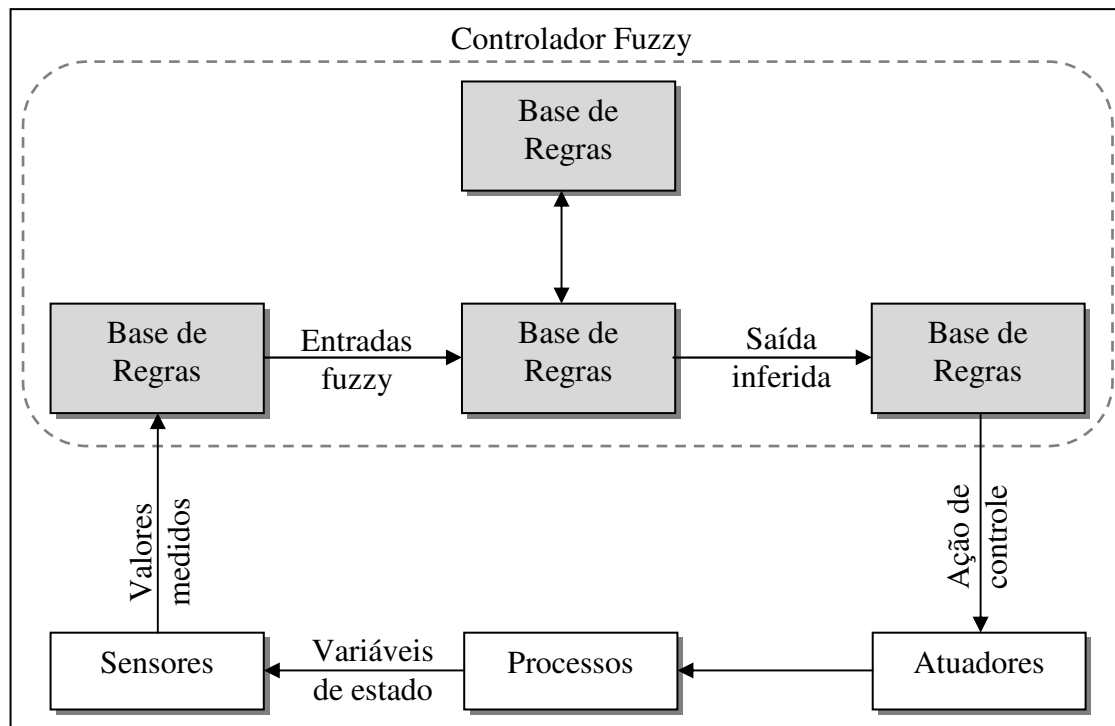


Figura 4.6 – Arquitetura de um controlador *FUZZY* baseado em regras.

4.4. CONTROLADOR NEURAL

O controlador neural é uma aplicação da teoria das Redes Neurais Artificiais. Os controladores neurais têm sido cada vez mais usados por se mostrarem capazes de resolver problemas não-lineares, justamente porque uma das características mais significante das redes neurais está em sua habilidade de aproximar qualquer função contínua não-linear para um grau de correção desejado.

Um neurônio artificial pode receber sinais de um grande número de outros neurônios conectados a ele, sendo cada sinal multiplicado pelo peso da ligação correspondente e todos serão então somados (McCulloch & Pitts, 1943). A esta soma pode ainda ser acrescido um valor de bias. Cada neurônio tem uma única saída que é função da soma das entradas e do bias. Esta função é chamada de função de ativação, que relaciona as entradas do neurônio com sua saída (Murphy, 2002), (Russel & Norvig, 2002).

De maneira geral, o controle neural envolve duas etapas: a identificação do sistema e o controle. Na etapa de identificação, a rede deve ser ajustada para satisfazer as condições desejadas, normalmente minimizando os erros; o ajuste da rede recebe o

nome de treinamento. Na etapa de controle a rede funciona como um controlador convencional, e pode ser inserida de formas diversas na planta.

Muitos pesquisadores têm utilizado as Redes Neurais Artificiais para resolver problemas de controle em sistemas não-lineares, inclusive em veículos tracionados por esteiras (Zhu & Yang, 2007), (Braga, 2007).

4.5. CONTROLADORES HÍBRIDOS

A teoria de controle tem se fundamentado a cada dia em suas bases matemáticas, abrangendo diversas áreas de especialização, das quais se pode destacar o controle clássico, controle preditivo, controle adaptativo, controle robusto, controle multivariável, controle ótimo, entre outros (Fernandez de Canete, Gonzalez-Perez, & del Saz-Orozco, 2008), (Haykin, 2001). Algumas vezes é possível combinar as melhores (ou mais convenientes) características de alguns tipos de controladores e utilizá-las para a criação de um controlador híbrido (Fainekos, Kress-Gazit, & Pappas, 2005).

Neste trabalho foi utilizada a junção de controladores clássicos e controladores fuzzy. Os controladores PID não apresentam bom desempenho em sistemas não-lineares. Os controladores Fuzzy dependem de regras fornecidas pelo projetista e que podem não refletir a dinâmica da planta (Hossain, Rahman, & Mohiuddin, 2011), (Jun, Xuelin, Yujin, & Chenggang, 2006), (Maaref & Barret, 2000), (Wang & Liu, 2007). Unir os pontos fortes de cada controlador permite o projeto de um sistema de controle híbrido.

A escolha destas duas técnicas foi feita baseando-se no fato que, para certas condições de operação, o controlador PID permite um ajuste satisfatório e obtido por ensaios padronizados (e factíveis), inclusive baseando-se no desempenho de algum parâmetro específico.

Alterando-se as condições, o ajuste deve (ou deveria) ser refeito, porém esta tarefa pode ser inviável. Um sistema fuzzy, neste caso, pode realizar o gerenciamento do ajuste, bastando haver apenas ajustes em alguns pontos de operação.

Há algumas abordagens diferentes ao projetar-se um híbrido PID-fuzzy. Brehm (Bhehm & S., 1994) desenvolveu um controlador fuzzy que imita o comportamento de

um controlador PID. Naturalmente todas as desvantagens inerentes de um PID são transferidas para o fuzzy nesta abordagem.

Jeng (Yaug-Fea, Bao-Jie, Lin, & Kun-Li, 2012) apresentou uma abordagem em que um sistema fuzzy é usado para sintonizar os ganhos do controlador PID no controle de um motor síncrono com ímã permanente. O sistema fuzzy era responsável pelo gerenciamento dos ganhos do controlador. Na Figura 4.7 é apresentado um diagrama de um sistema controlador por um controlador híbrido PID-fuzzy, em que os valores das constantes K_P , K_I e K_D do controlador PID são determinados pelas regras de inferência Fuzzy.

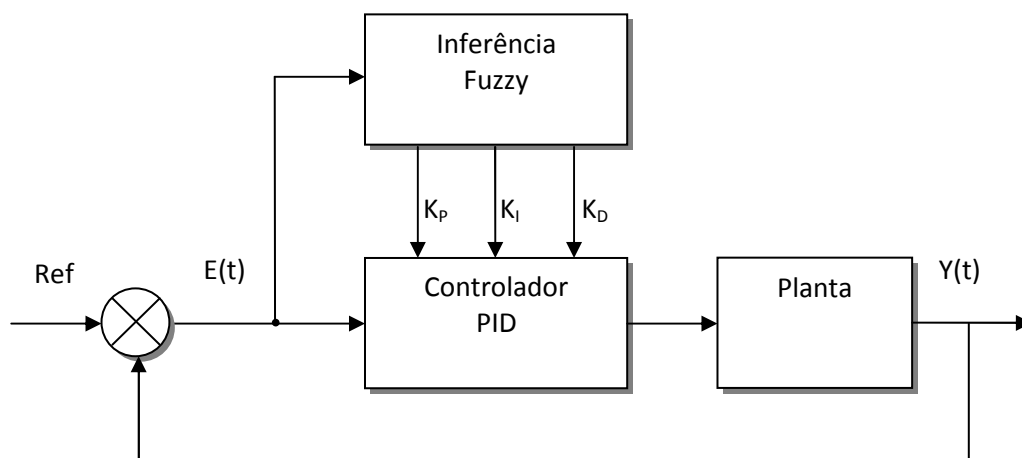


Figura 4.7 – Sistema de controle híbrido PID-fuzzy

Para o projeto do sistema fuzzy se tomou como variáveis de entrada do sistema o atrito, (At) e a velocidade angular do veículo (ω) . Como variáveis de saída foram adotados os ganhos K_P , K_I e K_D , que deverão ser multiplexados para gerar as interpolações dos ganhos.

Assumiu-se para que os conjuntos fuzzy para as variáveis de atrito (At) e velocidade angular do veículo (ω) são representadas por três qualificadores linguísticos ZE – zero, PE – pequeno e GR – grande. Para as variáveis de saída do sistema fuzzy, K_P , K_I e K_D , assumiu-se cinco termos lingüísticos, são eles: C1 – conjunto de parâmetros sintonizados com o veículo em movimento retilíneo, C2 – conjunto de parâmetros sintonizados com o veículo em movimento curvilíneo em baixa velocidade angular e pouco atrito, C3 – veículo em movimento curvilíneo em baixa velocidade angular e alto atrito, C4 – conjunto de parâmetros sintonizados com o veículo em movimento curvilíneo em alta velocidade angular e pouco atrito, C5 – veículo em

movimento curvilíneo em alta velocidade angular e alto atrito, totalizando nove possíveis combinações. Tais combinações resultam na formação da base de regras que pode ser visualizada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy.

K_p		Atrito (A_t)		
		ZE	PE	GR
Velocidade angular (ω)	ZE	C_1	C_1	C_1
	PE	C_1	C_2	C_3
	GR	C_1	C_4	C_5

As funções de pertinência do sistema de controle fuzzy representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribuem valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (Simões & Shaw, 2007). Faz-se necessário definir o formato de cada função de pertinência para cada variável do sistema, levando-se em conta o contexto em que serão utilizadas na representação das variáveis linguísticas.

4.6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados de forma sucinta o conceito de alguns controladores e algumas observações sobre o projeto e funcionamento de arquiteturas que podem ser usadas para o controle de sistemas não-lineares. Os conceitos teóricos explanados foram usados nas fases de simulação e coleta de resultados experimentais dos Capítulos V e VI deste trabalho.

CAPÍTULO V

5. MODELAMENTO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÕES

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados as simulações e os projetos de controladores em ambiente computacional utilizados neste trabalho de pesquisa. Também são apresentadas as diferenças entre o modelo contínuo e o discreto, destacando a necessidade de controladores não-lineares para a realização do controle no sistema discretizado.

5.2. MODELAMENTO CONTÍNUO DO VEÍCULO

A simulação do modelo contínuo foi obtida a partir da concepção do modelo matemático adaptado descrito no Capítulo III.

5.2.1 Modelo do conjunto motor-esteira

O Matlab® foi utilizado para simular o sistema robótico a partir dos modelos matemáticos, com parâmetros similares ao veículo usado nos testes experimentais, de forma similar a XU e GAO (Xu & Gao, 2014). Na Figura 5.1 é apresentado o diagrama de blocos usado na simulação de um único conjunto de motor-esteira. No modelo observa-se que há duas entradas e três saídas. Uma entrada é a tensão do motor de corrente contínua e a outra é o torque oriundo dos distúrbios externos, como o efeito das forças de atrito da esteira no motor. Como saídas observa-se que há a velocidade da esteira, a posição da esteira (deslocamento linear) e a corrente do motor.

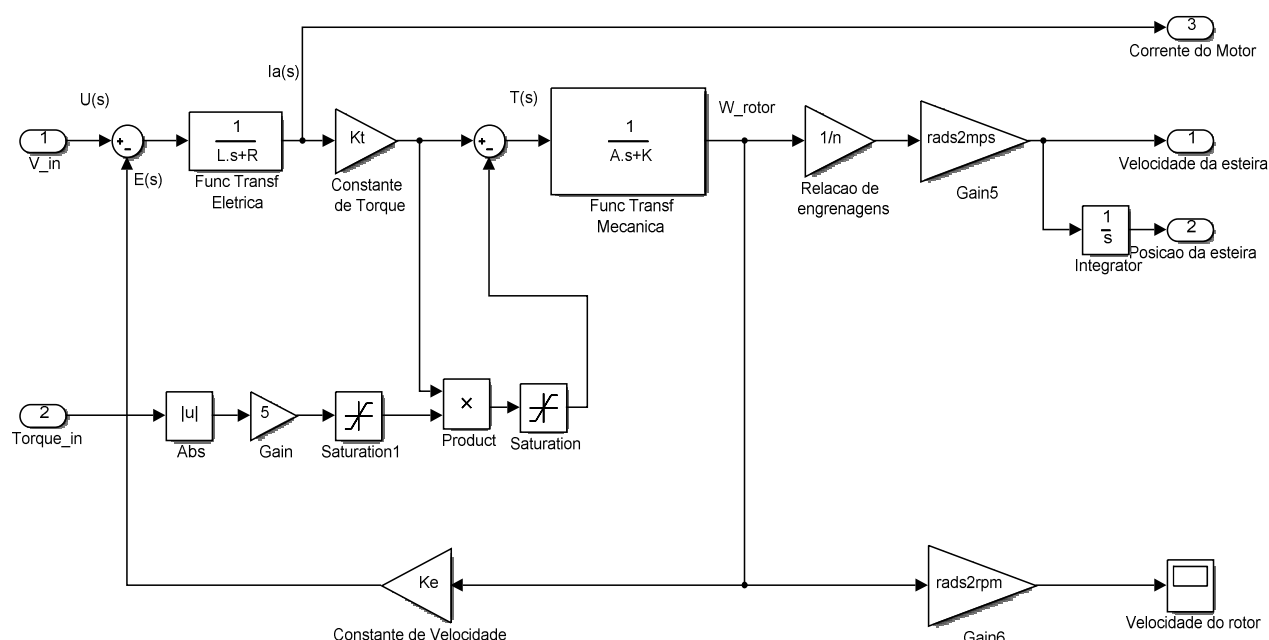


Figura 5.1 – Diagrama de blocos de um conjunto motor-esteira

Os parâmetros usados nas simulações são compatíveis com o protótipo experimental, sendo obtidos através de ensaios, ajustes empíricos ou obtidos por especificações do fabricante. Na Tabela 5.1 apresentam-se os parâmetros usados nas simulações, sendo os mesmos parâmetros do veículo robótico.

Tabela 5.1 – Parâmetros usados nas simulações

Variável	Valor	Descrição do parâmetro
b	0,295	Largura do veículo (m)
c	0,375	Comprimento de cada esteira em (m)
μ	0,300	Coefficiente de atrito cinético entre a esteira e o solo
g	9,810	Aceleração da gravidade (m/s ²)
m	5,260	Massa do veículo, incluindo baterias, sensores (Kg)
r	1,100	Resistência (Ω)
l	10e-6;	Indutância (H)
km	0,01	Constante de torque (Nm/A)
ke	11.15e-3*60/(2*pi);	EMF constant (V/rads)
jrot	2.7e-7;	Rotor – inércia (Kg/m ²)
brot	0,03	Rotor – atrito
jwheel	1.013e-3+0.5;	Roda – inércia (Kg/m ²)
bwheel	0	Atrito na engrenagem de saída - roda
ro	1	Desempenho – relação de transmissão
n	16	Transmissão – relação de redução
rwheel	0.065/2	Raio das polias principais (m)
rad2rpm	60/(2*pi);	Conversão
rad2rpm	Rwheel*(2*pi)/(2*pi)	Conversão

5.2.2 Modelo do sistema acoplado

No tópic 5.1 é apresentado o modelo do conjunto motor-esteira. No modelo do veículo, são usados dois conjunto motor-esteira e são acoplados de acordo com os modelos do Capítulo III.

Na Figura 5.2 é apresentado o modelo completo do veículo, incluindo as duas esteiras. Observa-se que existe uma entrada auxiliar “*omega*” que é a velocidade angular do veículo que é usada para inclusão do atrito cinético como carga das esteiras. Observa-se também que as entradas de tensão possuem um limitador de amplitude; isso faz-se necessário para garantir uma melhor correspondência com o modelo real, em que a fonte de tensão possui valor limitado de amplitude.

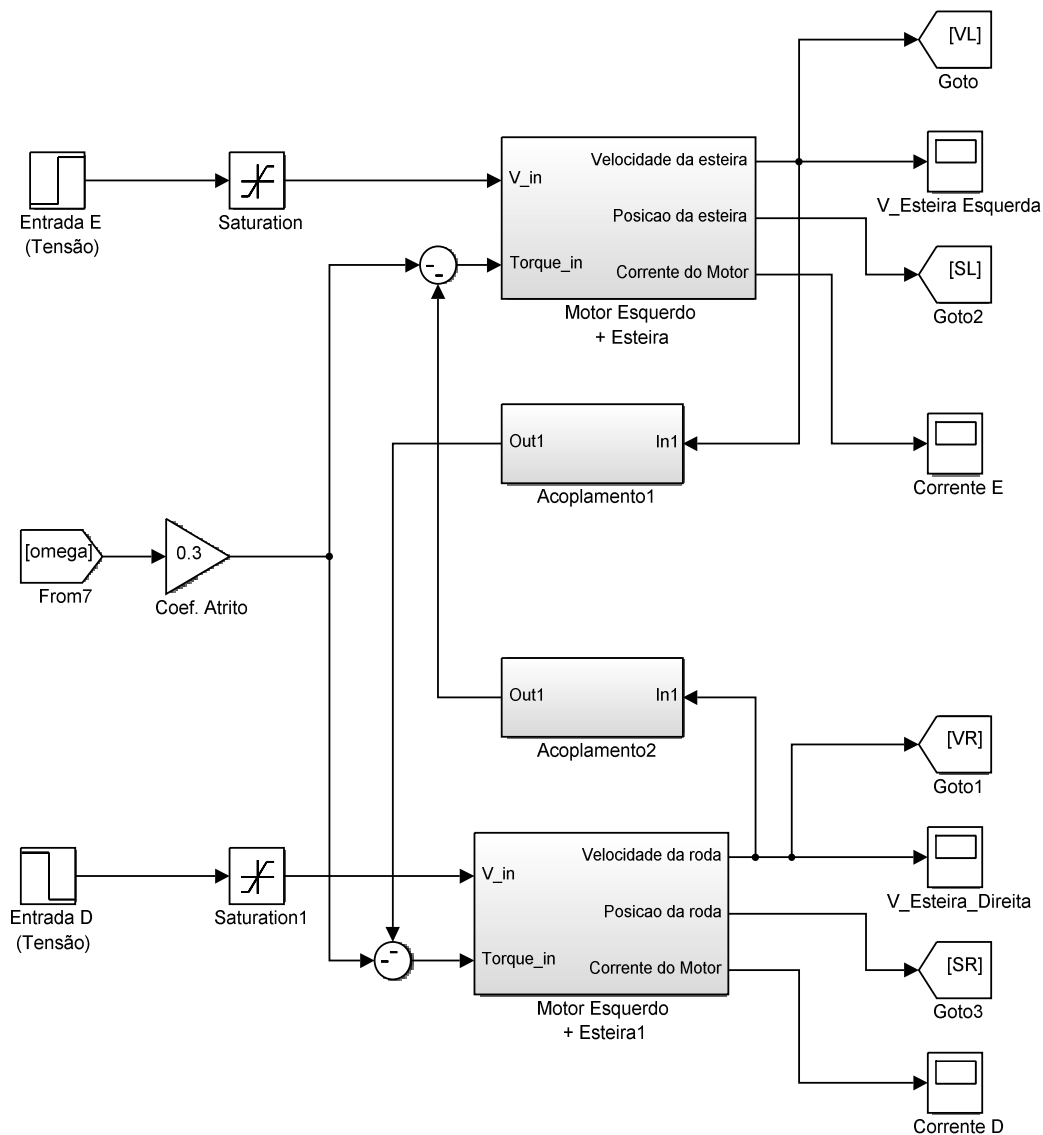


Figura 5.2 – Modelamento do sistema de esteiras, incluindo os lados direito e esquerdo, acoplamento entre as esteiras e efeito do atrito de derrapagem lateral.

Na Figura 5.3 é mostrado o bloco cinemático do veículo, em que são calculadas grandezas como velocidade linear, velocidade angular e deslocamento do veículo, além do raio de curvatura para os movimentos curvilíneos.

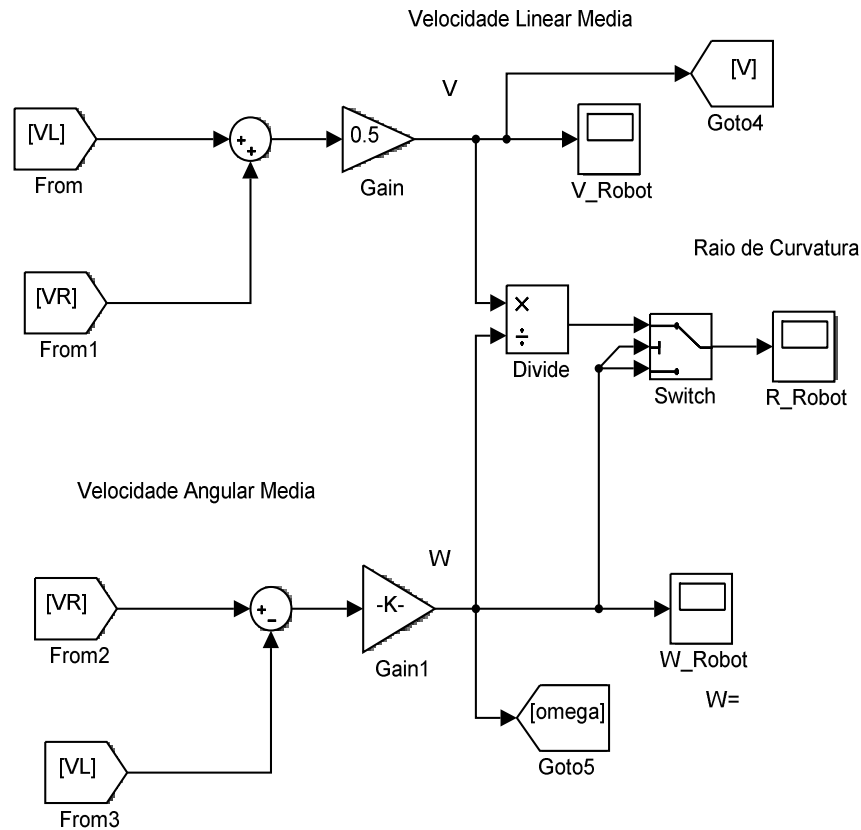


Figura 5.3 – Modelamento dos cálculos de velocidades linear e angular

Na Figura 5.4 apresentado um complemento do bloco cinemático em que a posição global é calculada. O bloco “XY Graph” é usado para visualizar o movimento do veículo em um plano xy.

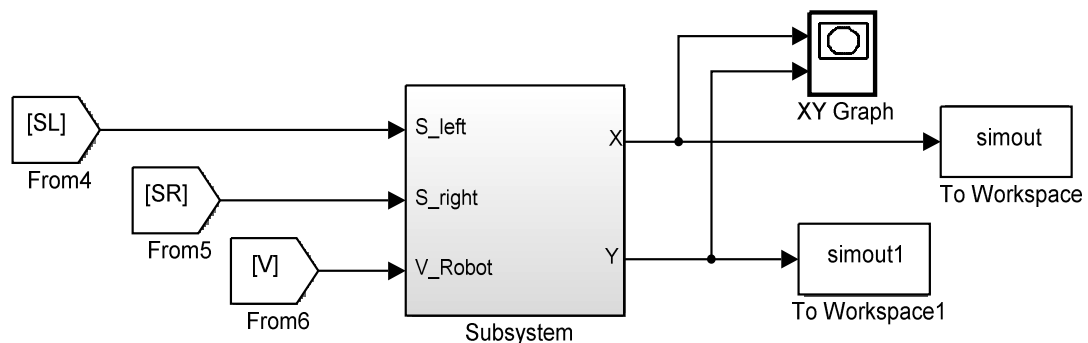


Figura 5.4 – Diagrama de blocos para plotagem de gráficos de posição do veículo no plano xy.

5.3. RESPOSTAS DO SISTEMA DINÂMICO

Na Figura 5.5 e na Figura 5.6 são apresentadas as respostas do sistema em malha aberta. Observa-se que, com a inserção do atrito, a corrente nos motores aumenta e a velocidade diminui, considerando a mesma entrada. Para manter a mesma velocidade, seria necessário aumentar a tensão de entrada como compensação (uso de controlador), aumentando ainda mais a corrente dos motores.

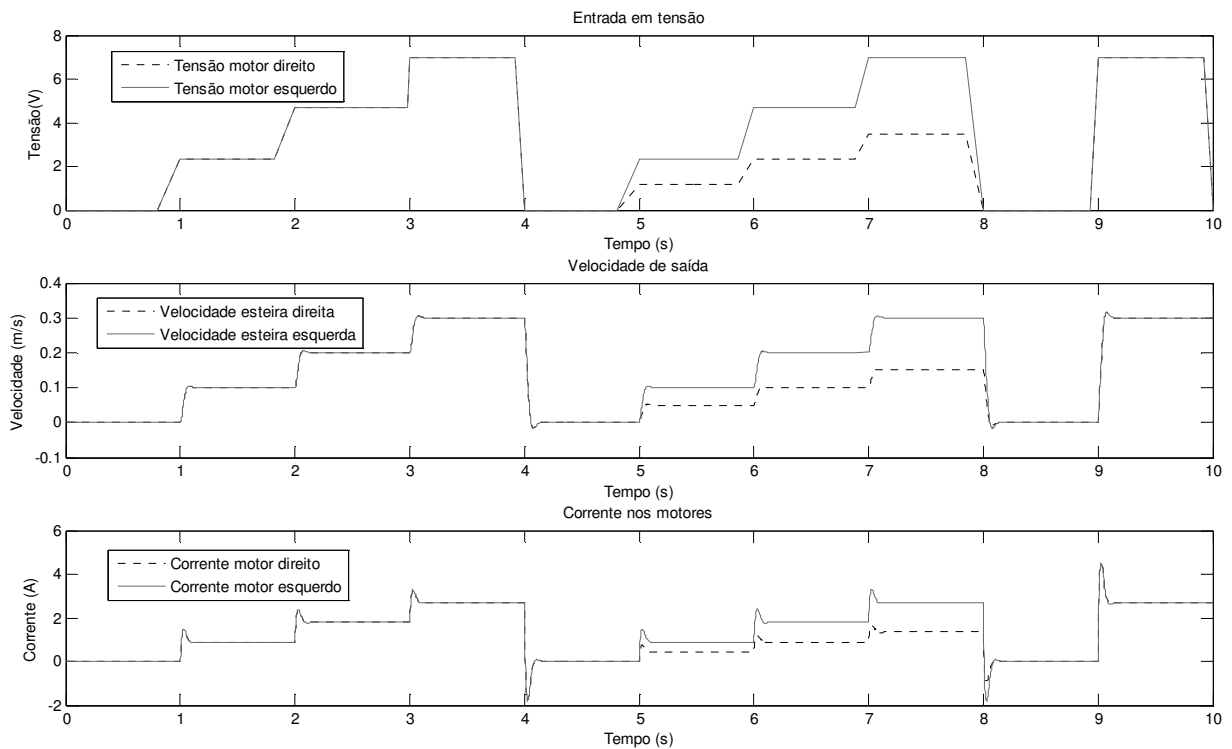


Figura 5.5 - Resposta do sistema com entrada em tensão elétrica (malha aberta)

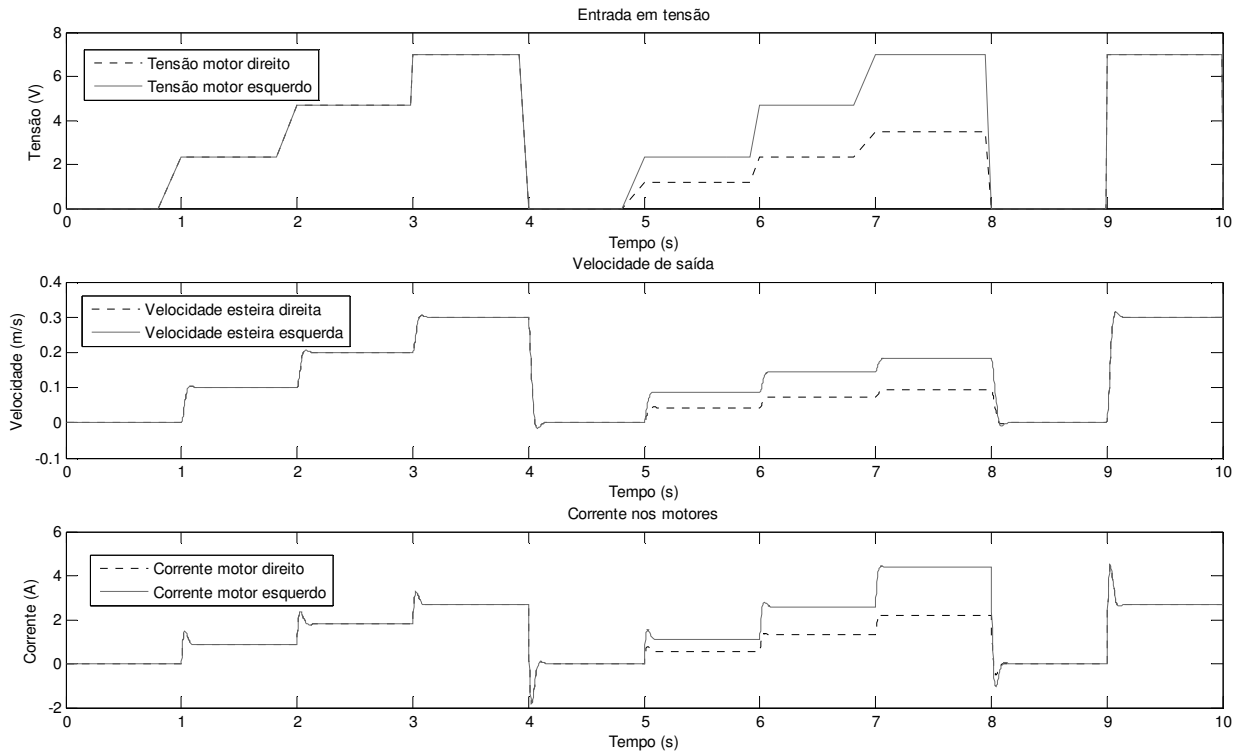


Figura 5.6 - Resposta do sistema com entrada em tensão elétrica (malha aberta) com coeficiente de atrito de 0,8.

5.4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

O modelo dinâmico de uma única esteira pode ser representado pela seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{K_t}{R + Ls} \cdot \frac{1}{As + K} \quad (5.1)$$

Em que $G(s)$ é a função de transferência considerando a entrada como uma tensão (em Volt) e a saída é a velocidade linear da esteira (em m/s). Substituindo os valores dos parâmetros usados nos testes:

$$G(s) = \frac{240 \cdot 10^3}{(s + 14,4 \cdot 10^3)(s + 333)} \quad (5.2)$$

Este modelo de sistema dinâmico pode ser inserido no Matlab®, traçando um gráfico correspondente à resposta do sistema à uma entrada degrau unitário. O gráfico pode se observado na Figura 5.7.

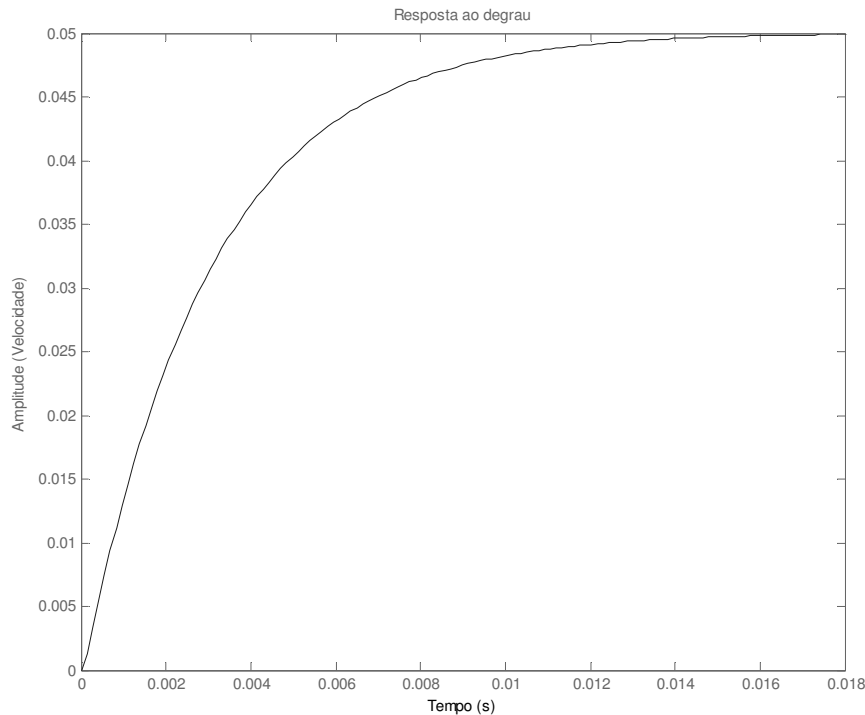


Figura 5.7 – Resposta a um degrau unitário. Tensão de 1 Volt e saída de 0,05 m/s de velocidade linear de uma esteira.

O Matlab ® possui é um conjunto de ferramentas que podem ser usadas para projeto de controladores PID, tanto contínuos como discretos, permitindo uma rápida sintonia de forma interativa. No exemplo, usou-se um critério de 2% de sobre-sinal. Neste caso, foram obtidos os seguintes ganhos para um controlador PID:

- $K_p = 16,1$
- $K_i = 7394$
- $K_d = 0,00876$

Este controlador foi sintonizado supondo a atuação apenas de uma esteira sem o efeito da outra esteira, o que, na prática, só poderia ser obtido se não houvesse atrito da outra esteira (nenhuma força atuando). Além disso, o sistema de controle é contínuo, supondo, então, o uso de controladores e sensores compatíveis. Após a inserção dos controladores, a resposta do veículo simulado a uma referência de velocidade é apresentada na Figura 5.8. Na Figura 5.9 o atrito foi inserido e os controladores apresentaram uma pequena redução de desempenho, porém a velocidade de referência é atingida ainda de forma rápida.

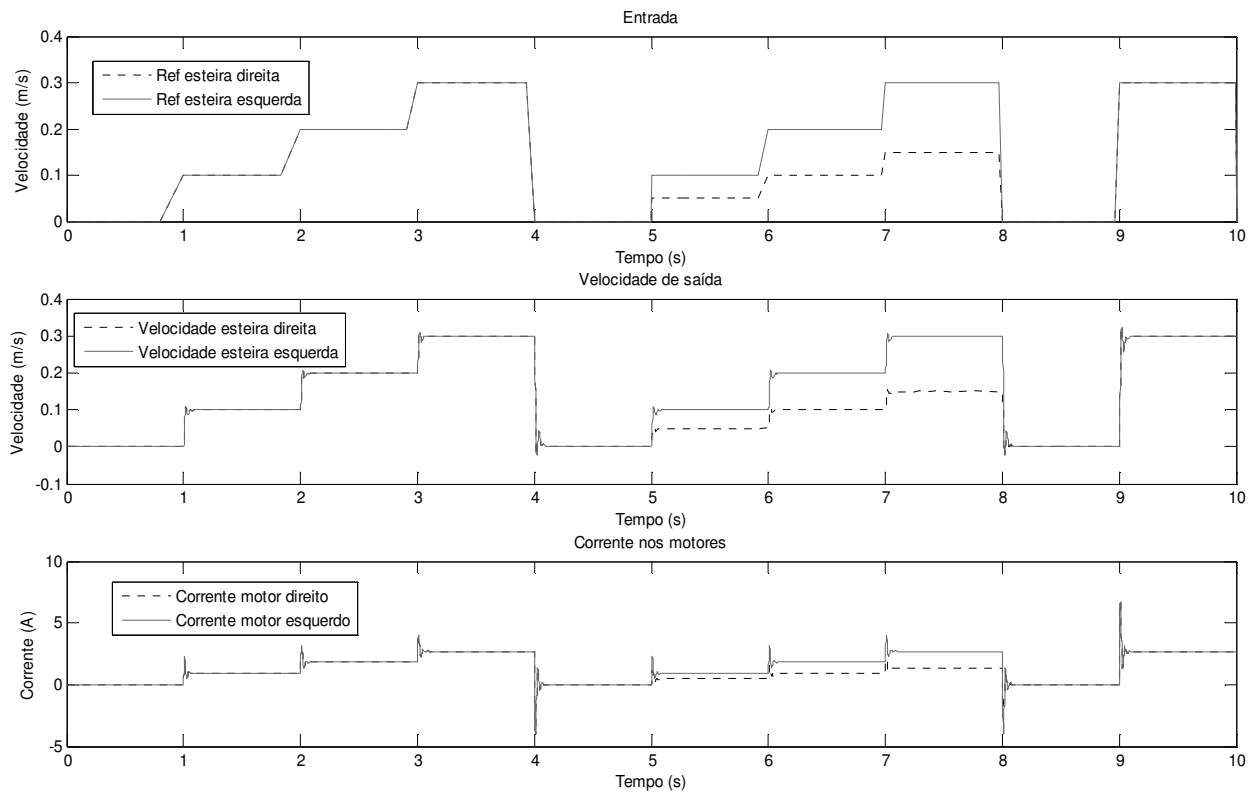


Figura 5.8 - Resposta do sistema utilizando controladores PID com ganhos: $K_p = 40$, $K_i = 2000$ e $K_d = 0,008$

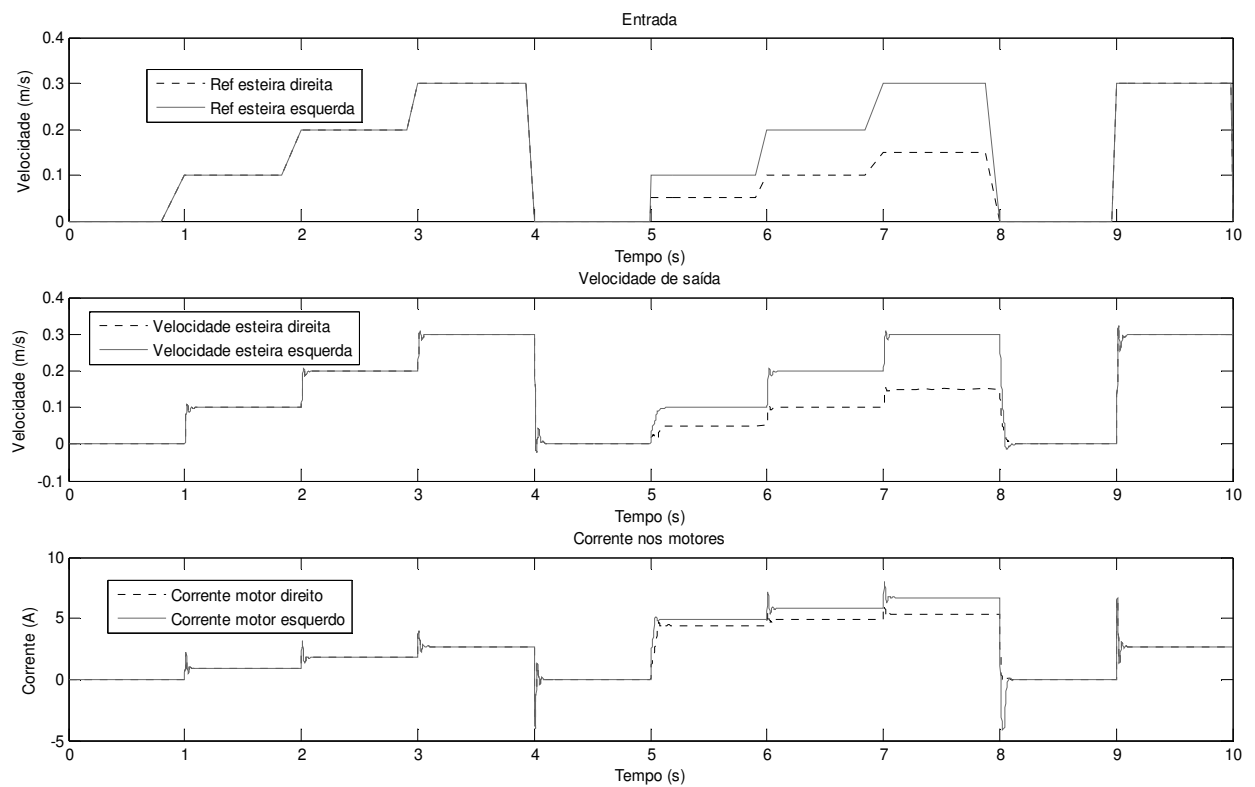


Figura 5.9 - Resposta do sistema utilizando controladores PID com ganhos: $K_p = 40$, $K_i = 2000$ e $K_d = 0,008$ e com coeficiente de atrito de 0,8.

5.5. SIMULAÇÃO COM SEGURADOR DE ORDEM ZERO

Os ganhos dos controladores PID não podem ser usados em uma malha de controle real sem a observação de todos os elementos que compõem o sistema. Isso acontece por que os sensores apresentam um atraso na resposta (atraso de transporte) e podem, ainda, ter sua saída discretizadas no tempo (apresentam taxa de atualização).

Na Figura 5.10 é apresentado um modelo que inclui os atrasos dos sensores através do uso de seguradores de ordem zero, configurados para manter o último valor lido por um tempo de 30 ms, ou seja, mesmo que haja variações nas grandezas, este bloco irá simular o comportamento de um sensor real. O valor de 30 ms foi obtido a partir das taxas de atualização dos sensores do veículo experimental.

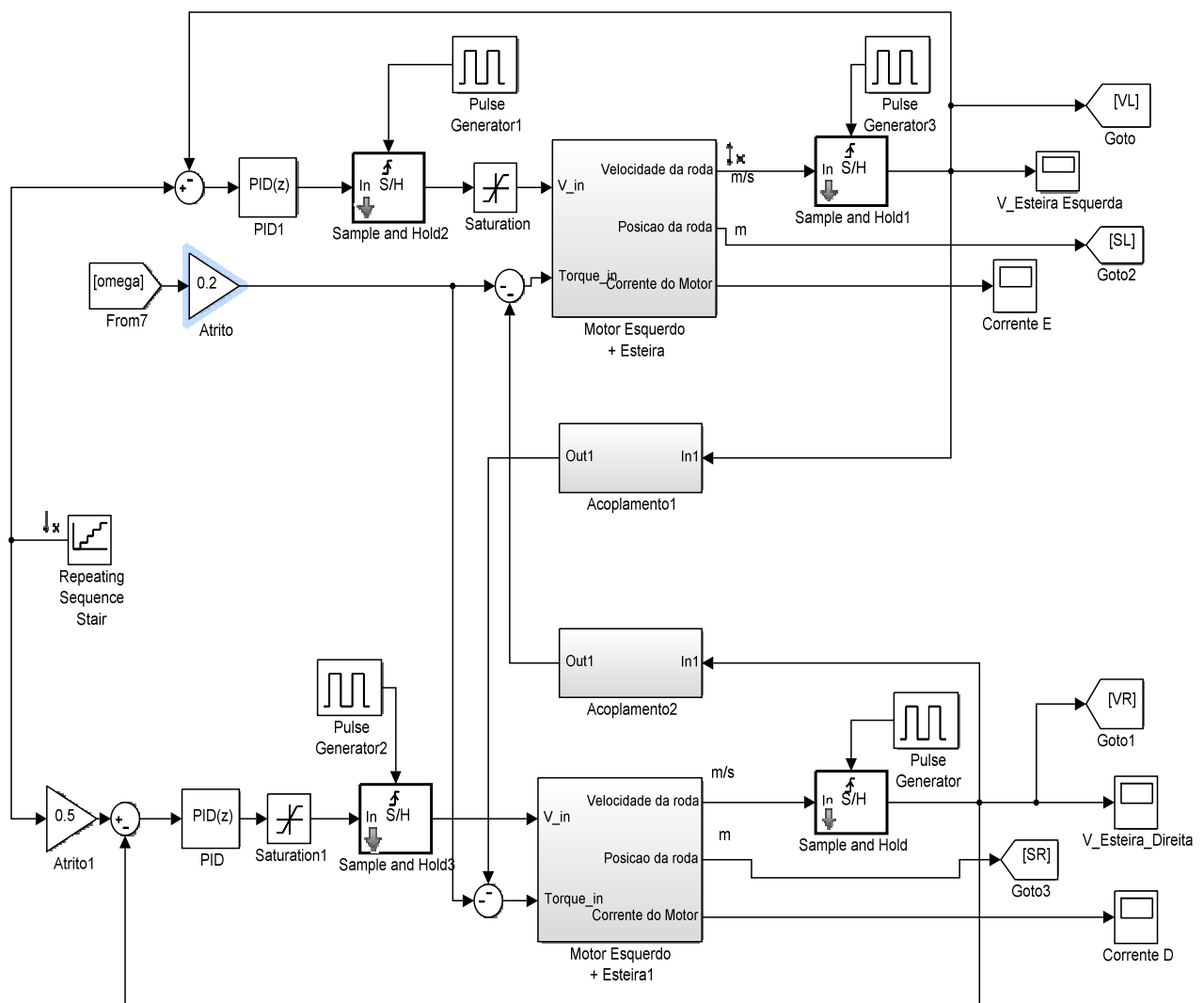


Figura 5.10 – Modelo do robô de esteiras com segurador de ordem zero e controlador discreto.

Os atrasos inerentes dos sensores e do processamento dos controladores não causam muito problemas desde que o tempo de reação da planta seja maior que o tempo de resposta do sistema de controle. O atrito cinético, entretanto, quando começa a atuar, causa descontinuidades, o que pode causar pequenas respostas oscilatórias no veículo, o que pode ser observado na Figura 5.11.

Uma nova sintonia pode ser feita para o controlador atuar com este coeficiente de atrito, porém esta sintonia não é adequada para outros pontos de operação. Este ponto de operação depende diretamente do atrito envolvido na interação esteira-solo. Este atrito pode ser estimado pelo acréscimo de energia que o motor fornece ao sistema, através do aumento de corrente e da tensão. A corrente é medida por sensores de corrente; a tensão é lida na saída do controlador. No protótipo experimental, a tensão enviada é o produto da tensão na bateria e pelo valor modulado na saída do controlador (PWM).

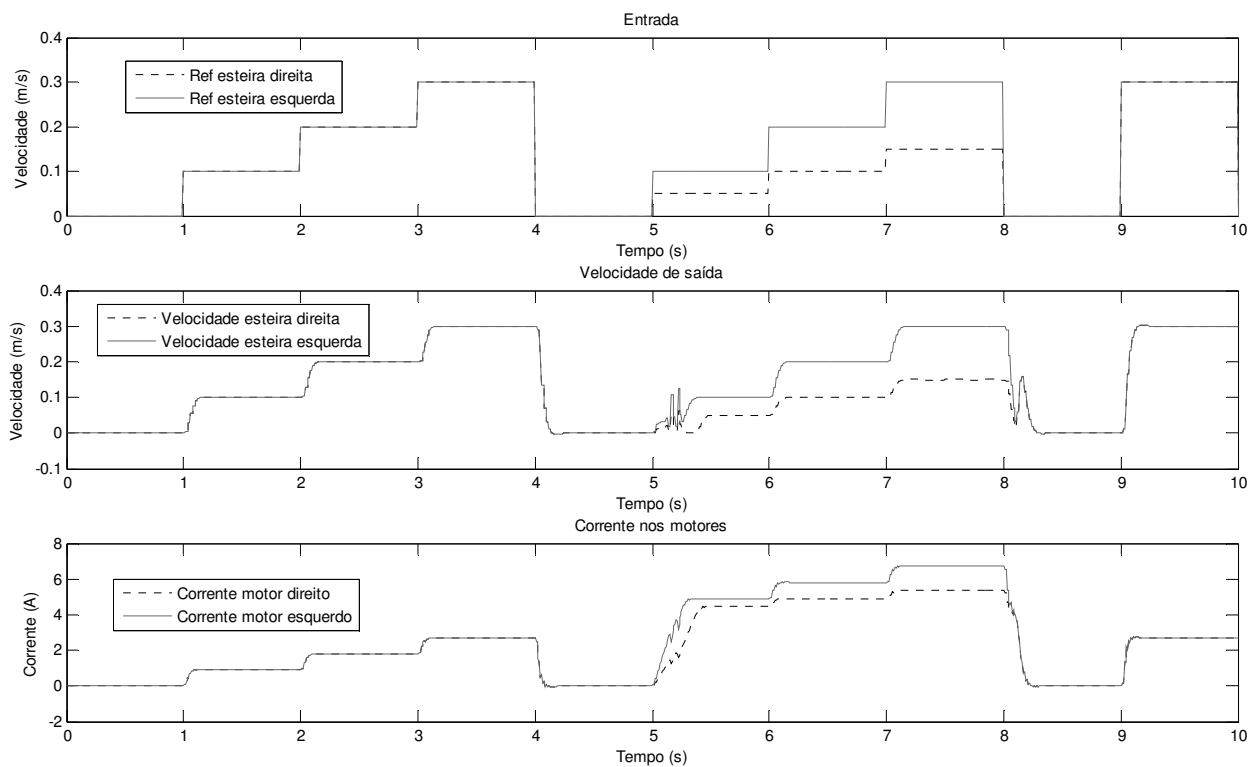


Figura 5.11 - Resposta do sistema discretizado com coeficiente de atrito de 0,8

De fato, os sensores adotados no protótipo experimental (que será descrito no Capítulo VI) apresentam uma taxa de atualização de posição na ordem de 30 a 100 amostras por segundo. Outros tipos de sensores podem apresentar taxas de atualização

ainda mais baixas para a mesma grandeza física: pode-se citar sensores baseados em odometria visual dependem do tempo de captura da imagem e do processamento, ou mesmo de sensores baseados em triangulação, como o exemplo do GPS, que apresenta taxas típicas de 1 amostra por segundo.

Além da demora para atualizar os estados do robô, o processador leva uma fração de tempo para organizar os valores de entrada e estabelecer um sinal de saída, geralmente limitando-se ao sensor mais lento.

No intuito de simular o comportamento mais próximo da realidade, adiciona-se à simulação elementos que sustentam os valores dos sinais por um pequeno período, imitando o comportamento dos sensores. Um controlador discreto também é inserido no sistema.

5.6. CONTROLADOR PID-FUZZY

A configuração usada nos testes simulados utiliza um sistema fuzzy para multiplexar os ganhos de controladores PID sintonizados para condições específicas. Foram sintonizados três controladores, seguindo as seguintes condições:

- C_1 : Sintonizado para movimentos retilíneos
- C_2 : Sintonizado para movimento curvilíneo com raio de curvatura zero, com baixo coeficiente de atrito
- C_3 : Sintonizado para movimento curvilíneo com raio de curvatura zero, com alto coeficiente de atrito.

Normaliza-se o raio de curvatura, obtendo-se a variável $R(t)$, que assume valores dentro do intervalo (0, 1). Normaliza-se o coeficiente de atrito, obtendo-se a variável $A(t)$, que assume valores dentro do intervalo (0, 1). A saída final do controlador fica da seguinte forma:

$$C(t) = (1 - R(t))C_1 + R(t)[A(t)C_2 + (1 - A(t))C_3] \quad (5.3)$$

A simulação deste sistema de controle é mostrada na Figura 5.12. O desempenho do sistema de controle é melhorado por múltiplos ajustes dos controladores e com valores interpolados por um conjunto de regras *fuzzy*.

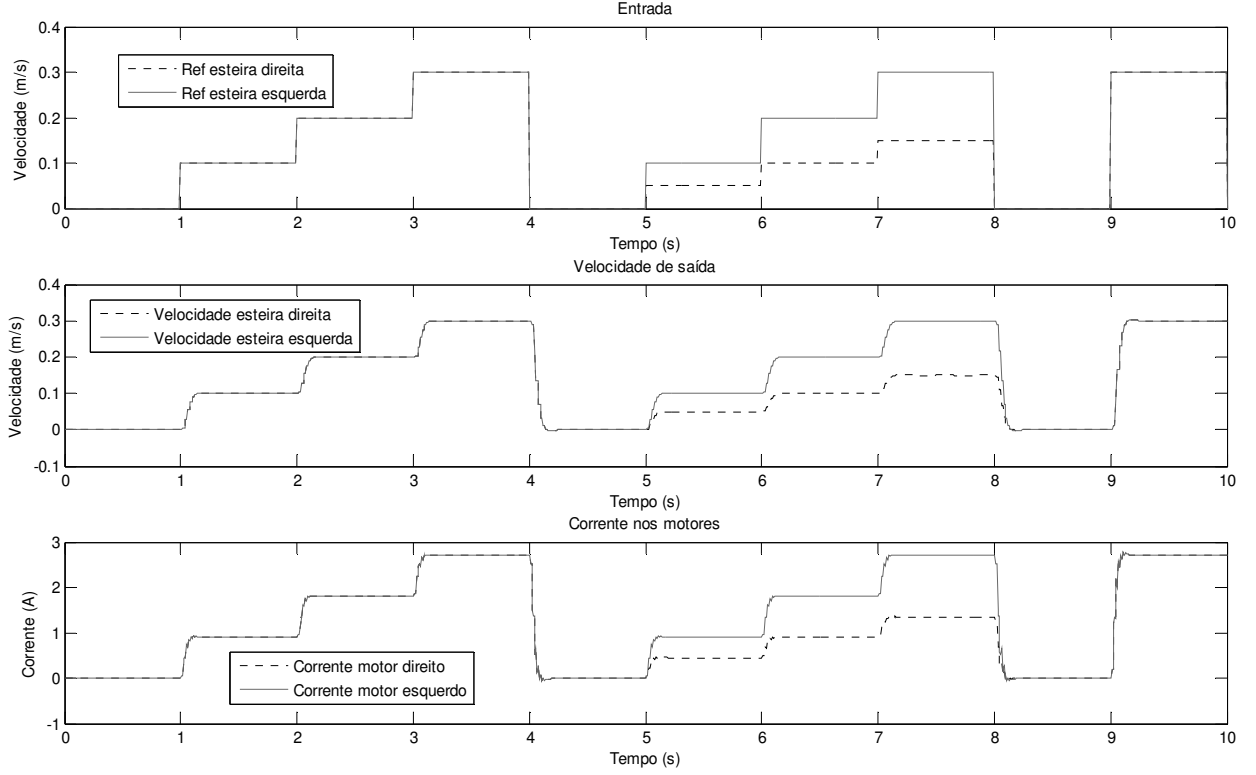


Figura 5.12 – Resposta do sistema discretizado com atuação do controlador PID-fuzzy

5.7. REPRESENTAÇÃO EM EQUAÇÕES A DIFERENÇAS

As simulações realizadas no Matlab® apresentam um bom desempenho, considerando os erros obtidos entre o modelo contínuo e o modelo simulado. Para que os valores das variáveis converjam para os valores corretos (ou o mais aproximado) pode-se consumir muito tempo de processamento, dependendo do método numérico envolvido (Chapra & Canale, 2008).

Uma abordagem que permite uma simulação mais rápida é considerar sua realização em tempo discreto, como mostrado no Capítulo III.

$$\theta_D(z) = \frac{(M_D - M_{acD})}{A} \frac{z}{(z-1)} \frac{(1 - e^{-\frac{K_{Ta}}{A}})}{\left(z - e^{-\frac{K_{Ta}}{A}}\right)} - \frac{\theta_E B}{A} \frac{(z-1)^2}{z \left(z - e^{-\frac{K_{Ta}}{A}}\right)} \quad (5.4)$$

A implementação do modelo do robô de esteiras em linha de código pode ser feita a partir da transformada z inversa.

Manipulando a equação (5.4), tem-se:

$$\theta_D(z) = \frac{(M_D - M_{acD})z^2 \left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) - \theta_E B(z-1)^3}{A \cdot z(z-1) \left(z - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)} \quad (5.5)$$

Rearranjando-se para organizar em forma polinomial:

$$\theta_D(z) = \frac{(M_D - M_{acD})z^2 \left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) - \theta_E B(z^3 - 3z^2 + 3z - 1)}{z^3 - z^2 \left(1 + e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) + z \cdot e^{-\frac{K}{A}T_a}} \quad (5.6)$$

Organizando para eliminar as potências positivas:

$$\begin{aligned} \theta_D(z)(1 - z^{-1} \left(1 + e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) + z^{-2} \cdot e^{-\frac{K}{A}T_a}) \\ = (M_D - M_{acD})z^{-1} \left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) - \theta_E B(1 - 3z^{-1} \\ + 3z^{-2} - z^{-3}) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Utilizando da propriedade da translação (Lathi, 2004):

$$\begin{aligned} \theta_D(k) - \theta_D(k-1) \left(1 + e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) + \theta_D(k-2)e^{-\frac{K}{A}T_a} \\ = (M_D(k-1) - M_{acD}(k-1)) \frac{\left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)}{A} - \theta_E(k) \frac{B}{A} \\ - \theta_E(k-1) \frac{3B}{A} + \theta_E(k-2) \frac{3B}{A} - \theta_E(k-3) \frac{B}{A} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Finalmente chega-se à seguinte equação:

$$\begin{aligned} \theta_D(k) = \theta_D(k-1) \left(1 + e^{-\frac{K}{A}T_a}\right) - \theta_D(k-2)e^{-\frac{K}{A}T_a} \\ + (M_D(k-1) - M_{acD}(k-1)) \frac{\left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a}\right)}{A} - \theta_E(k) \frac{B}{A} \\ - \theta_E(k-1) \frac{3B}{A} + \theta_E(k-2) \frac{3B}{A} - \theta_E(k-3) \frac{B}{A} \end{aligned} \quad (5.9)$$

De semelhante modo, chega-se à equação referente à esteira esquerda:

$$\begin{aligned}
\theta_E(k) = & \theta_E(k-1) \left(1 + e^{-\frac{K}{A}T_a} \right) - \theta_E(k-2) e^{-\frac{K}{A}T_a} \\
& + (M_E(k-1) - M_{acE}(k-1)) \frac{\left(1 - e^{-\frac{K}{A}T_a} \right)}{A} - \theta_D(k) \frac{B}{A} \\
& - \theta_D(k-1) \frac{3B}{A} + \theta_D(k-2) \frac{3B}{A} - \theta_D(k-3) \frac{B}{A}
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Substituindo as equações acima com os valores experimentais da Tabela 5.2, obtem-se:

Tabela 5.2 – Parâmetros de simulação baseados no protótipo real

Parâmetro	Valor
A	$69,5 \times 10^{-6}$
B	$0,69 \times 10^{-6}$
K	0,003
T_a	0,03
$(K/A)T_a$	1,2954

$$\begin{aligned}
\theta_D(k) = & 1,273 \cdot \theta_D(k-1) - 0,273 \cdot \theta_D(k-2) \\
& + 10450(M_D(k-1) - M_{acD}(k-1)) - 0,1 \cdot \theta_E(k) \\
& - 0,3 \cdot \theta_E(k-1) + 0,3 \cdot \theta_E(k-2) - 0,1 \cdot \theta_E(k-3)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}
\theta_E(k) = & 1,273 \cdot \theta_E(k-1) - 0,273 \cdot \theta_E(k-2) \\
& + 10450(M_E(k-1) - M_{acE}(k-1)) - 0,1 \cdot \theta_D(k) \\
& - 0,3 \cdot \theta_D(k-1) + 0,3 \cdot \theta_D(k-2) - 0,1 \cdot \theta_D(k-3)
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Deve-se lembrar que o veículo experimental utiliza um sistema microcontrolado para gerenciar os movimentos do robô. As ações de controle dependem dos estados das diferentes grandezas físicas fornecidas pelos sensores. Os sensores fornecem as informações em intervalos de tempo, de forma não contínua. É muito importante que este fato seja relevado no projeto de sistemas em que a taxa de atualização dos sensores não seja muito maior que as constantes de tempo do sistema dinâmico, caso contrário, se os estado não forem atualizados a tempo, o sistema pode apresentar mau funcionamento ou mesmo apresentar instabilidades.

5.8. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

As simulações computacionais são boas ferramentas para análise do comportamento dinâmico de um sistema físico. Apresenta a grande vantagem de permitir rápidas alterações e testes em diversas condições, que poderiam ser inviáveis em um protótipo real.

Muitas considerações precisam ser feitas em um sistema simulado, gerando limitações ao modelo. Se estas limitações forem desprezíveis, o uso de modelos computacionais pode acelerar o desenvolvimento de projetos que envolvam sistemas dinâmicos.

Os resultados apresentados neste capítulo serviram de base para o projeto dos controladores usado no protótipo experimental, apresentado no Capítulo VI.

CAPITULO VI

6. TESTES FÍSICOS E RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Como forma de validar os modelos propostos, houve a construção de um protótipo de um pequeno veículo com locomoção por esteiras, com parâmetros similares aos usados na simulação.

6.2. O ROBÔ DE ESTEIRAS

6.2.1 Projeto eletro-mecânico

Um modelo do robô de esteira foi desenhado e construído para ser usado nos testes do sistema robótico. Na Figura 6.1 é apresentado um esboço do modelo do chassi do robô em CAD 3D.

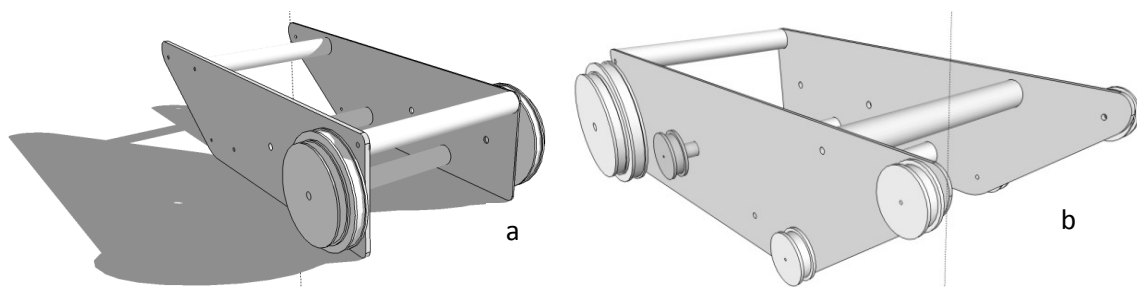


Figura 6.1 –*Modelo tridimensional chassi do robô de esteira.*

A tração do veículo é proveniente de dois motores de corrente contínua. Os motores são acoplados em redutores de velocidade que ampliam o torque. A transmissão é feita por um sistema de polias e correias.

O veículo é alimentado por um conjunto de baterias elétrica de 12V, recarregáveis, que permite uma autonomia de aproximadamente 1 hora, considerando o consumo máximo. Na Figura 6.2 é mostrado o veículo usado nos testes experimentais.

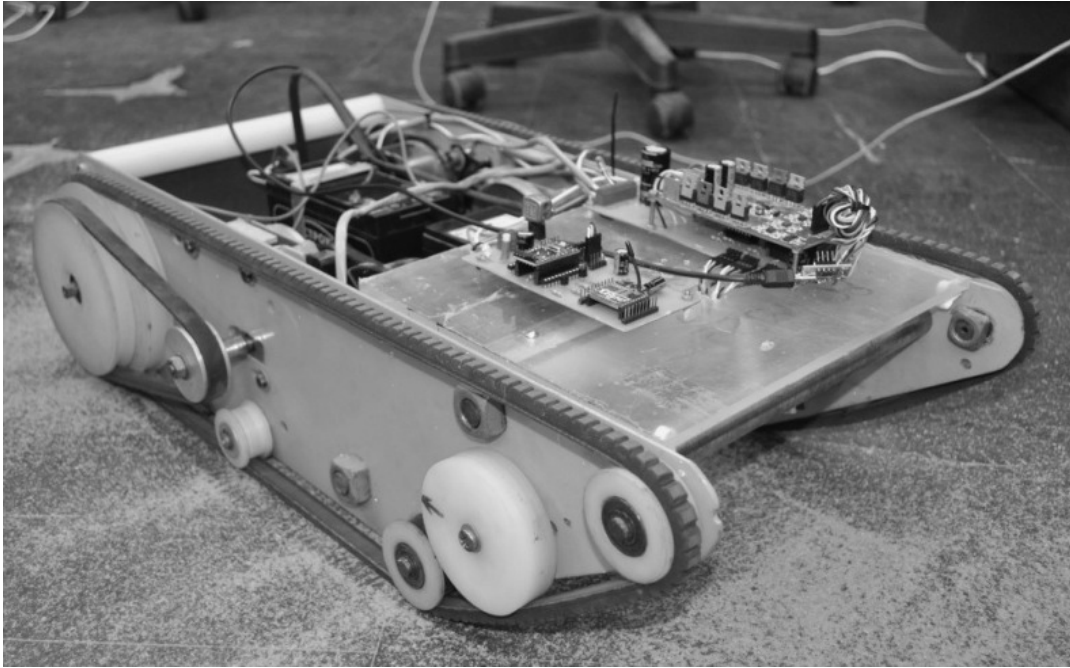


Figura 6.2 – Protótipo experimental usado em testes de campo

6.2.2 Projeto eletrônico

O projeto eletrônico está baseado no uso de microcontroladores, sendo um microcontrolador usado para centralizar a comunicação com o computador remoto, receber os dados dos sensores e enviar os dados para os atuadores (neste trabalho, os motores).

A comunicação entre sensores, atuadores e central de processamento é feita por um barramento de comunicação padrão I²C (Inter-Integrated Circuit). Este barramento permite que dezenas de dispositivos possam transmitir e enviar pacotes de dados através de um par de fios.

O barramento I²C possibilita a utilização de grande quantidade de componentes padronizados, os quais podem realizar diversas funções, além de possibilitar a troca eficaz de informações entre eles. Facilita a integração de circuitos de caráter final de aplicação, como por exemplo, sensores e atuadores, com um sistema de controle, de modo que eles possam trabalhar com seus sinais de maneira direta.

Utilizar uma rede de sensores é muito importante em projetos experimentais, pois permite a rápida inserção de novos componentes sem a necessidade de alteração de *hardware*. Na Figura 6.3 apresenta-se um diagrama dos sensores e atuadores usados no protótipo experimental. Cada elemento conectado à rede I²C possui um

microcontrolador próprio usado para tratar o sinal do periférico e gerenciar sua interface com a rede.

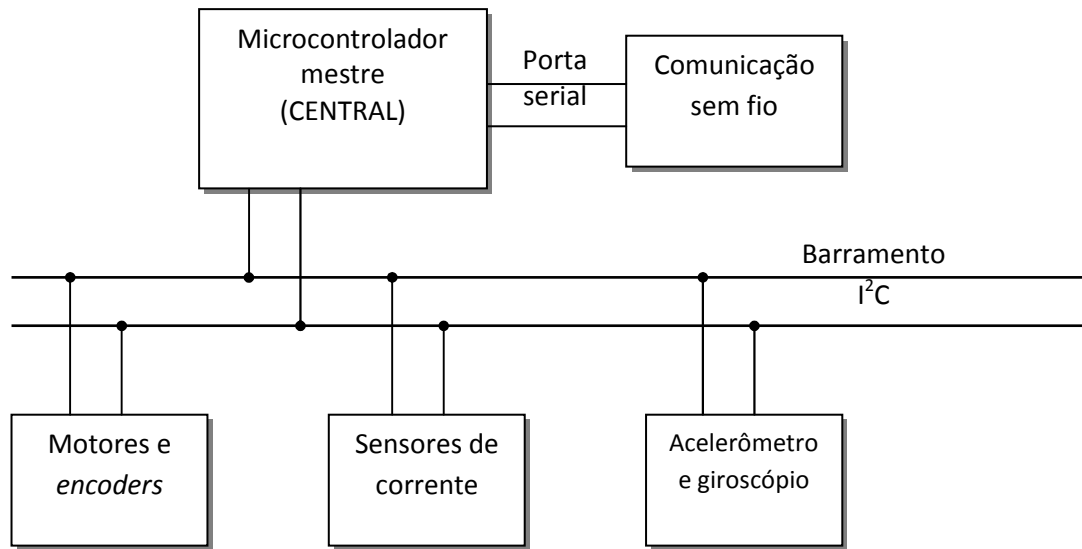


Figura 6.3 – Diagrama de ligações no barramento I²C (rede de sensores)

O robô de esteira foi projetado para ser alimentado por baterias de 12V, movido por dois motores de corrente contínua, controlados por drivers que recebem sinal PWM (Pulse Width Modulation). A corrente drenada pelos motores é da ordem de 5 ampéres cada um. A versão inicial do circuito eletrônico utilizava transistores bipolares, em configuração *Darlington* (Sedra & Smith, 2009), em um circuito ponte-H. O circuito baseado em transistores bipolares já havia sido usado em outros veículos de menor porte e não apresentou problemas. Nesta versão, a corrente consumida pelos motores elevou a tensão V_{CE} a um nível muito alto (mais de 3 volts) e, atrelado à alta corrente, produziu uma potência dissipada muito elevada. O circuito ponte-H foi reprojetoado, desta vez usando transistores de efeito de campo, o que reduziu bastante as perdas no circuito de chaveamento, conforme é apresentado na Figura 6.4.

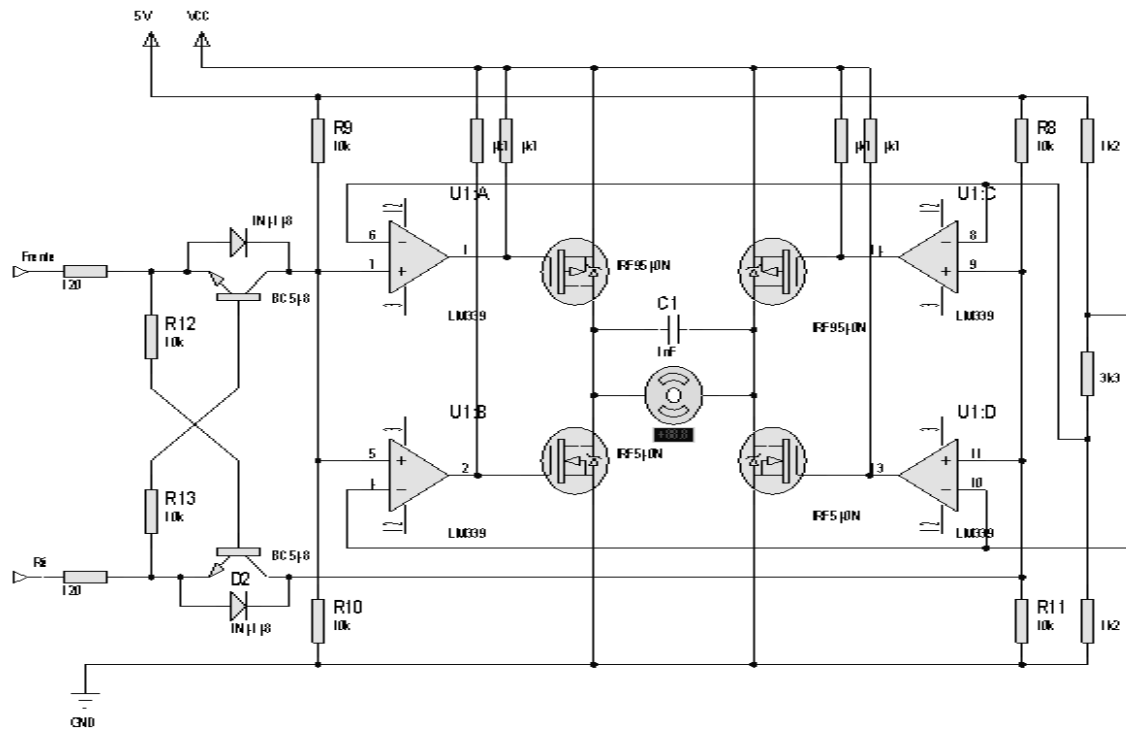


Figura 6.4 – Circuito ponte-H com transistor de efeito de campo

A comunicação entre o robô e a estação remota é feita por uma conexão via rádio. Utilizou-se um rádio que opera em microondas, utilizando modulação em espalhamento espectral.

O Xbee é um módulo *zigbee* fabricado pela MaxStream (Xbee, 2015) que permita a criação de redes de sensores sem fio. Como principais características, destacam-se ao alcance até 1600 metros, taxa de dados de 250kbps, tensão de alimentação de 3,3 Volts e dimensões reduzidas. As funcionalidades de rede incluem rede multiponto e em malha, permitindo redundância de conexões, aumentando a robustez do sistema de comunicação.

A rede ZigBee permite comunicações robustas e opera na frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical) e não requer licença para funcionamento. As redes ZigBee oferecem uma excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa rede (mais que 65.000), com taxas de transferências de dados variando entre 20Kbps a 250Kbps. O Protocolo ZigBee é destinado a aplicações industriais, portanto, o fator velocidade não é crítico numa implementação ZigBee.

A instalação de uma rede Zigbee permite que muitos dispositivos sejam conectados ao sistema robótico, além de facilitar a confiabilidade da rede, uma vez que os dados enviados são tratados e protegidos com um nível de segurança maior que um sistema de rádio simples.

Neste trabalho foi configurada uma rede simples, baseada na ligação entre robô e estação remota, porém a inserção de novos robôs é possível sem adição de dispositivos extras.

O deslocamento do veículo é medido por sistema de odometria. Neste contexto, chama-se de sistema por se tratar de um conjunto de sensores que realizam leituras relacionadas ao deslocamento, sendo essas informações tratadas por filtros para obtenção de um dado com menos incertezas. A odometria é feita pelo uso de um *encoder* instalado diretamente no mecanismo de cada esteira e um sensor inercial, composto por um acelerômetro e um giroscópio.

Em condições ideais, os *encoders* instalados das esteiras forneceriam uma informação com alta resolução e baixa variância sobre o posicionamento do veículo. Havendo derrapagem longitudinal (escorregamento), o encoder irá detectar o deslocamento da esteira, porém não irá detectar se houve falha de tração esteira-solo ou algum tipo de obstrução.

O uso de sensores inerciais é útil para detectar o movimento a partir da variação de velocidades. Acelerômetros são usados para detecção de movimentos translacionais e giroscópios usados para detecção de movimentos rotacionais. Em teoria, tendo-se a informação da aceleração, pode-se integrar este dado duas vezes para obtenção da variação de posição, porém as informações provenientes deste tipo de sensores apresentam um nível considerável de ruído, além do acúmulo de erro devido à resolução finita do sinal.

Cada tipo de sensor traz uma informação relevante, porém não completa. Além disso, para cada tipo de situação, os sensores apresentam desempenho melhor ou pior. No caso de pequenos movimentos, os sensores inerciais não apresentam bons resultados, pois as medições de aceleração são mascaradas pelo ruído do sensor. Em variações de maior magnitude, os acelerômetros são mais confiáveis. O inverso ocorre

com os *encoder*, já que em altas velocidades, a probabilidade de ocorrer escorregamento é maior.

Para obterem-se dados mais confiáveis sobre a odometria, utilizou um filtro de Kalman para realizar a fusão dos sensores. Este filtro foi introduzido diretamente no microcontrolador responsável pela odometria, partindo da premissa que em velocidades baixas, os dados provenientes dos sensores inerciais possuem baixa confiabilidade.

Na Figura 6.5 é apresentado o encoder usado no conjunto motor-esteira. Este modelo apresenta uma resolução de 256 partes por revolução. Uma polia foi usada para o acoplamento; esta polia foi projetada para ter uma circunferência de 256 mm, assegurando uma resolução de 1 mm para o odômetro de cada esteira.



Figura 6.5 – Encoder usado na detecção de movimento das esteiras. Foi utilizado um encoder em cada esteira.

Como parte essencial deste trabalho, incluiu-se a medição das correntes elétricas de cada motor. Foram usados dois sensores de efeito Hall. O efeito Hall é uma propriedade que se manifesta em um condutor quando um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente é aplicado sobre ele. Quando isso ocorre, uma diferença de potencial no condutor é gerada, chamada de Tensão de Hall. Esta tensão possui direção perpendicular ao campo magnético e à corrente, e é proporcional à densidade de fluxo magnético e à corrente. A amplitude da tensão de Hall varia com a corrente e o campo magnético. A tensão de Hall pode ser medida por um circuito externo ou ainda ser utilizada para efeitos de sensoriamento, pois ela é proporcional à intensidade do campo que cria.

O sinal de saída dos sensores analógicos (lineares) é gerado diretamente a partir da saída do amplificador operacional com a tensão de saída sendo diretamente proporcional ao campo magnético que passa pelo sensor Hall.

Os sensores lineares analógicos fornecem uma tensão de saída que aumenta com um campo magnético forte e diminui com um campo magnético fraco. Em sensores de efeito Hall de saída linear, à medida que a força do campo magnético aumenta o sinal de saída do amplificador também irá aumentar até que ele comece a saturar devido ao limites impostos pela fonte de alimentação. Qualquer aumento adicional no campo magnético não terá qualquer efeito sobre a saída, mas irá dirigi-lo mais rápido para a saturação.

Neste trabalho foi utilizado o sensor ACS712-05 apresentado na Figura 6.6. Este sensor tem um alcance nominal de 5 A (positivo e negativo), com uma resolução de 185mV por ampere. Tem a vantagem de suportar até 5 vezes a corrente nominal, permitindo suportar surtos de corrente.

A saída do sensor apresenta uma rampa positiva quando há um incremento da corrente dos pinos 1 e 2 para os pinos 3 e 4, os quais são usados como caminho para amostragem do sinal. A resistência deste caminho é tipicamente de 1,2mΩ, provendo uma baixa perda de potência. A resposta é mostrada na Figura 6.7.

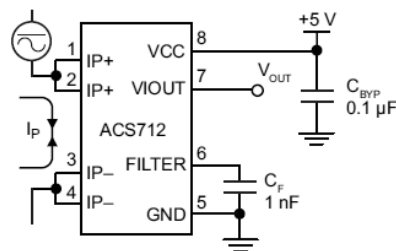


Figura 6.6 – Configuração para aplicação do sensor Hall ACS712 (Allegro, 2015)

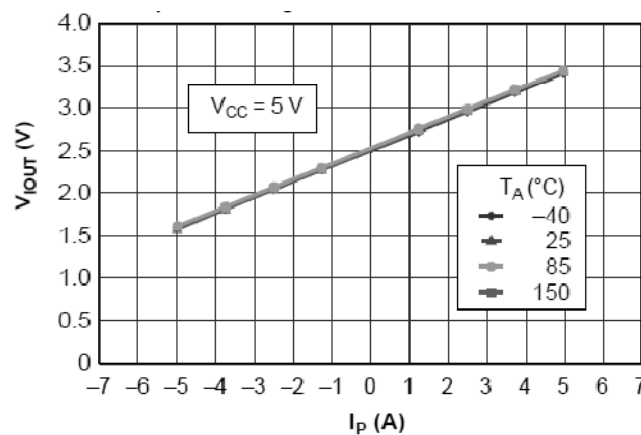


Figura 6.7 – Resposta do Sensor Hall: Tensão de saída (V_{IOUT}) versus Corrente medida (I_P)

Na Figura 6.8 é mostrado o sensor de efeito Hall montado em uma placa de circuito impresso.



Figura 6.8 – Sensor de corrente por Efeito Hall

Como sensor inercial, utilizou-se o circuito integrado MPU6050 (InvenSense, 2015), que possui internamente um acelerômetro e um giroscópio, além de um microprocessador responsável por fazer cálculos complexos com os sensores de aceleração e giro (pré-tratamento). Outro recurso adicional é o sensor de temperatura embutido no circuito integrado, que permite medições entre -40 e +85 °C.

A comunicação com o microcontrolador usa a interface I²C, por meio dos pinos SCL e SDA do sensor. Nos pinos XDA e XCL podem-se ligar outros dispositivos I²C, como um magnetômetro, por exemplo, e criar um sistema de orientação completo. Este sensor é mostrado na Figura 6.9

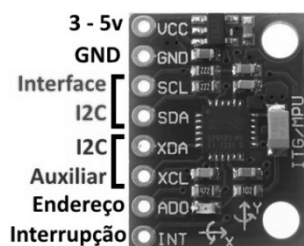


Figura 6.9 – Acelerômetro usado para correções de odometria

6.3. SISTEMA DE CONTROLE

6.3.1 Controle dos motores DC

Em veículos de rodas com acionamento diferencial é comum o uso de controladores clássicos para o controle dos motores de corrente contínua. Uma proposta de desenvolvimento de um controlador para os motores de corrente contínua é o uso de controladores PID.

O controlador foi implementado em um microcontrolador ATMEGA328. A taxa de amostragem foi definida em 30 ms. Esta taxa foi escolhida após alguns experimentos empíricos e também se aproxima da taxa de amostragem de muitos sistemas de odometria visual. A sintonia dos ganhos do controlador foi feita usando o método de Ziegler-Nichols para uma entrada em degrau em trajetória retilínea.

6.3.2 Controle diferencial

O controle diferencial pode ser feito de forma embarcada ou de forma remota. Na abordagem remota, as velocidades dos motores são controladas no próprio veículo, enquanto a correção de trajetória é feita por um computador (ou operador) remoto; neste caso, o canal de comunicação deve ter um desempenho adequado para a transmissão dos dados.

Neste trabalho, foi usada a abordagem de controle embarcado, fazendo com que todo o tratamento de correção de erros de trajetória seja feito no próprio veículo.

6.3.3 Controlador completo

O sistema de controle completo proposto para este trabalho foi projetado de forma híbrida, utilizando controladores clássicos em conjunto com um controlador fuzzy. No protótipo experimental apresentado, há algumas limitações quanto ao número de ensaios que podem ser realizados para sintonizar os ganhos dos controladores. Neste sentido, foram feitas simulações utilizando as regras mostradas na Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3.

Tabela 6.1 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_p do sistema simulado.

K_p		Atrito	
		PE	GR
Velocidade angular	ZE	C_1	C_1
	GR	C_2	C_3

Tabela 6.2 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_I do sistema simulado.

K_I		Atrito	
		PE	GR
Velocidade angular	ZE	C_1	C_1
	GR	C_2	C_3

Tabela 6.3 – Base de regras aplicada ao multiplexador fuzzy para o ganho K_D do sistema simulado.

K_D		Atrito	
		PE	GR
Velocidade angular	ZE	C_1	C_1
	GR	C_2	C_3

O controlador PID é usado para controlar a velocidade dos motores de forma independente. A dinâmica dos motores é alterada em movimentos curvilíneos e pelo coeficiente de atrito, ou seja, quando há diferença de velocidade entre as esteiras. Um controlador foi projetado para atuar em movimentos retilíneos ($C1(k)$). Uma segunda sintonia foi feita, atuando em movimentos curvilíneos ($C2(k)$) e com baixo coeficiente de atrito, considerando o menor raio de curvatura possível (giro em torno de si mesmo). Uma terceira sintonia foi feita, atuando em movimentos curvilíneos ($C3(k)$) e com alto coeficiente de atrito, considerando o menor raio de curvatura possível (giro em torno de si mesmo).

A seguir utiliza-se uma regra fuzzy para ponderar a atuação desses controladores (Fuzzy mux). A saída do controlador usado para o controle diferencial é dada por:

$$Y(k+1) = (1 - R(k)) * C1 + R(k) * (A(k) * C2 + (1 - A(k)) * C3) \quad (6.1)$$

Em que $R(k)$ representa a diferença entre as velocidades das esteiras e está no intervalo fechado $R(k) = (0, 1)$, dependendo do raio de curvatura, sendo 0 a diferença de velocidade mínima e 1 a diferença de velocidade máxima.

$A(k)$ representa o coeficiente de atrito entre esteira e solo, porém não é o valor direto deste coeficiente; $A(k)$ relaciona o incremento de corrente necessário para o veículo realizar a mesma manobra (curvilínea), portanto utiliza os dados provenientes dos sensores de corrente elétrica dos motores.

O controlador $C1(k)$ foi sintonizado através de um ensaio com trajetória retilínea e é dado por:

$$C1(k) = kp1 * E(k) + kd1 * (E(k) - E(k - 1)) + kdd1 * (E(k) - 2 * E(k - 1) + E(k - 2)) \quad (6.2)$$

O controlador $C2(k)$ foi sintonizado por um ensaio com o veículo girando em torno de si mesmo ($v_D = -v_E$) em solo de baixo atrito e é dado por:

$$C2(k) = kp2 * E(k) + kd2 * (E(k) - E(k - 1)) + kdd2 * (E(k) - 2 * E(k - 1) + E(k - 2)) \quad (6.3)$$

O controlador $C3(k)$ foi sintonizado por um ensaio com o veículo girando em torno de si mesmo ($v_D = -v_E$) em solo de baixo atrito e é dado por:

$$C3(k) = kp3 * E(k) + kd3 * (E(k) - E(k - 1)) + kdd3 * (E(k) - 2 * E(k - 1) + E(k - 2)) \quad (6.4)$$

6.4. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLOS

Como visto nas simulações do Capítulo IV, para executar uma mesma trajetória curvilínea, o veículo de esteira realiza maior esforço em piso mais aderentes devido à derrapagem lateral. Foram realizados experimento no intuito de associar a potência exercida pelos motores com as características de aderência do solo. Para isso foram padronizados dois movimentos, executados sobre pisos com características conhecidas.

6.4.1 Piso emborrachado

Na Figura 6.10 é apresentado o desempenho do veículo realizando um percurso retilíneo, com velocidade de aproximadamente 0,3 m/s. O gráfico é associado ao veículo percorrendo um piso emborrachado. Em outro ensaio, o veículo se desloca em uma superfície arenosa (não mostrado). O comportamento dinâmico é muito semelhante

e pode-se afirmar que não é possível determinar o tipo de solo a partir da interpretação das leituras de corrente elétrica porque os valores são similares no percurso retilíneo.

Observa-se que, mesmo em um solo plano e velocidade constante, a corrente apresenta variações em torno de um valor médio. Isso ocorre devido à imperfeição do sistema mecânico. As polias apresentam pequenas falhas de excentricidade comuns ao processo de fabricação e ao desgaste natural. Ao realizar o movimento, ocorre a variação das tensões das correias de transmissão, provocando picos (e vales) de torque aplicados aos motores do veículo.

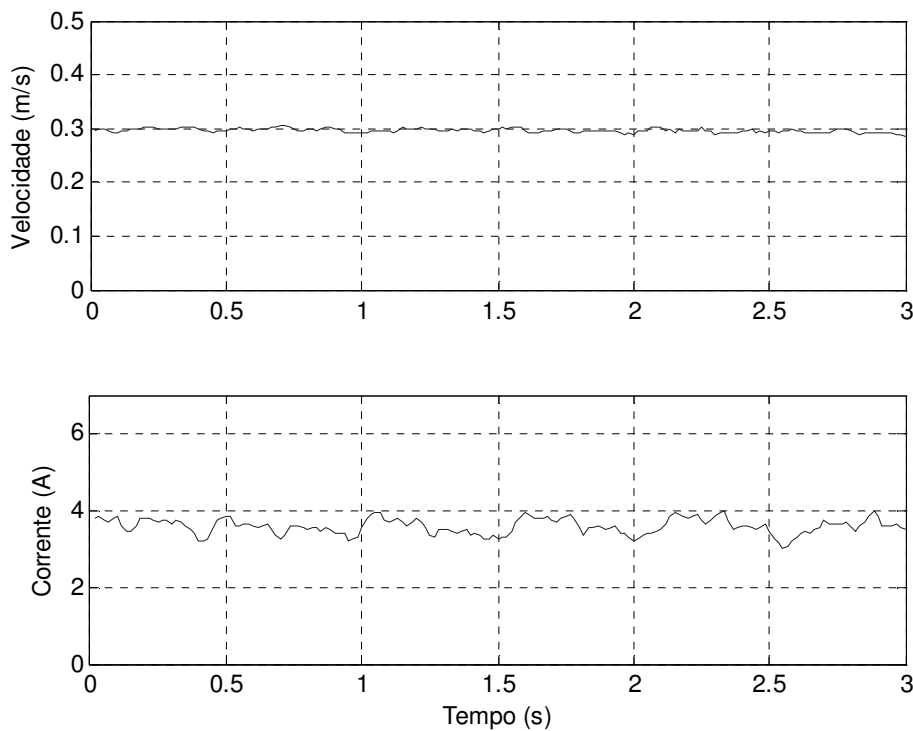


Figura 6.10 – Percurso retilíneo. Neste gráfico é mostrado apenas o comportamento da esteira direita. Velocidade média: 0,29 m/s. Corrente elétrica média: 3,42 A.

Na Figura 6.11 é mostrado o desempenho do mesmo veículo realizando uma curva à esquerda. A velocidade da esteira direita é mantida em 0,3 m/s enquanto a esteira esquerda é mantida em 0,15 m/s. O veículo está fazendo o percurso sobre um piso emborrachado.

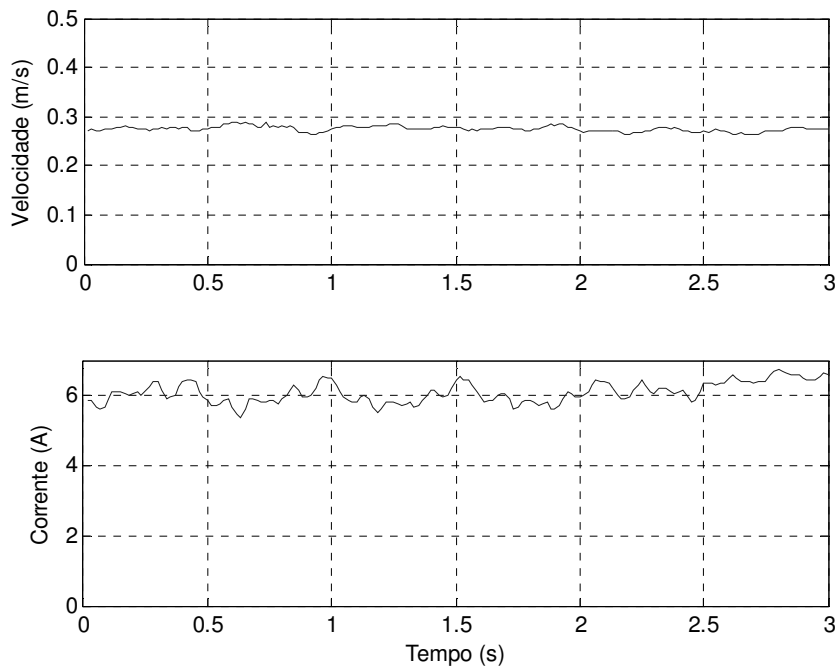


Figura 6.11 – Percurso curvilíneo em piso com areia. Velocidade média de 0,27 m/s.
Corrente elétrica média de 5,77 A.

Na Figura 6.12 é mostrado o desempenho do mesmo veículo realizando uma curva à esquerda. A velocidade da esteira direita é mantida em 0,3 m/s enquanto a esteira esquerda é mantida em 0,15 m/s. O veículo está fazendo o percurso sobre um piso levemente arenoso (piso emborrachado acrescido de areia).

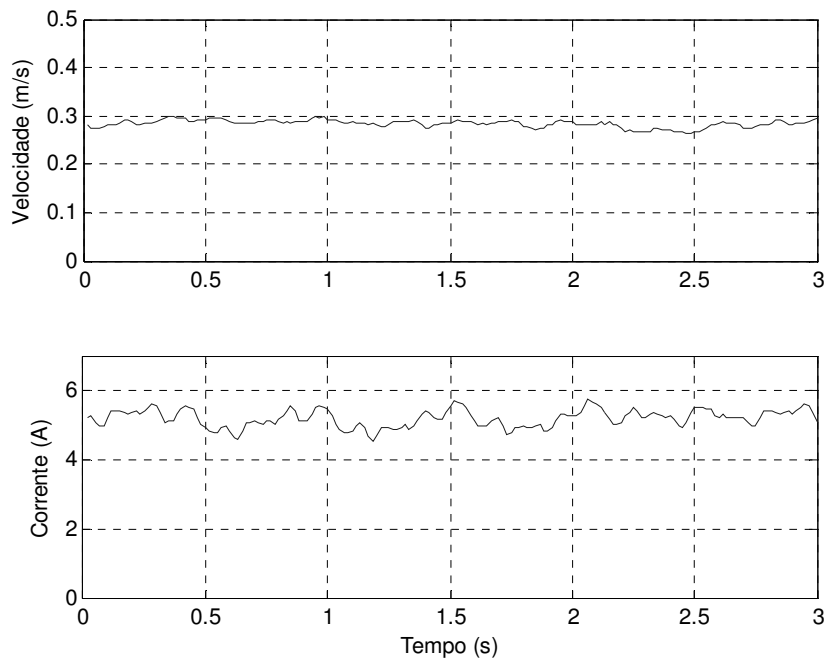


Figura 6.12 – Percurso curvilíneo em piso com areia. Velocidade média de 0,28 m/s.
Corrente elétrica média de 4,93 A.

Utilizando a equação (3.106) e substituindo os valores pelos valores medidos, tem-se os coeficientes de atrito mostrados na Tabela 6.4. Estes valores são apenas estimativas, além de desprezar-se as perdas elétricas.

Tabela 6.4 – Coeficientes de atrito estimados

Solo	Coeficiente de atrito cinético (μ_c)
Piso emborrachado	0,503
Piso arenoso	0,931

6.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os experimentos foram importantes para validar as propostas de controle em um veículo tracionado por esteiras. As características físicas reais inserem uma série de incertezas nas leituras das grandezas e que precisam ser tratadas adequadamente.

O uso das medidas das correntes elétricas dos motores permite ao sistema de controle estimar de forma mais exata a dinâmica do sistema e otimizar o desempenho dos controladores.

7. CONCLUSÃO

Os veículos de esteiras apresentam a vantagem de poderem se locomover por terrenos irregulares, porém apresentam maior dificuldade para serem controlados devidos às incertezas inerentes à geometria. Por consequência disso, este trabalho apresentou as fases de análise, modelamento, simulação e construção de um robô móvel experimental tracionado por esteiras contribuindo com informações relacionadas a sua dinâmica de movimento.

Um modelo dinâmico foi proposto, inserindo os efeitos do atrito cinético que ocorrem durante as derrapagens laterais, proporcionando maior robustez na modelagem matemática de robôs de esteira, até então não consolidada. Esse modelo foi a mais expressiva contribuição do trabalho, pois, será possível fazer o controle do robô de esteira reconhecendo o solo pela derrapagem, especialmente em trajetória curvilíneas. Para justificar a necessidade de inserção do atrito cinético lateral foi mostrado que as características do solo afetam os parâmetros dinâmicos do veículo, perturbando o desempenho de movimentação e do sistema de controle. Além disso, foi mostrado que é possível extrair informações sobre as características de aderência do solo através da corrente elétrica dos motores e inserir esta informação para ajustar o sistema de controle.

Um sistema híbrido de controle clássico e fuzzy foi proposto para atender as características do sistema dinâmico, que apresenta grandezas não-lineares e comportamentos que não podem ser expressos em equações diferenciais. Um veículo robótico foi construído para validar as técnicas propostas nas simulações, além de atestar a eficácia do sistema de controle em situações reais.

Por fim, e com o objetivo de contribuir tecnologicamente, o robô foi instrumentado com sensores e sistemas microcontrolados atuais capazes de armazenar os parâmetros de movimentos e fazer o controle atuar com exatidão.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que é possível dar continuidade a este trabalho no intuito de melhorar o modelo dinâmico e aumentar o grau de confiabilidade do sistema de controle a partir de análises das correntes dos motores elétricos de corrente contínua.

Como sugestão, tem-se o modelamento do efeito do atrito estático que ocorre quando os motores estão com torques diferentes, porém com velocidades iguais. Isto ocorre em trajetórias retilíneas na iminência de ter-se um movimento curvilíneo.

O robô, incluindo seu sistema de controle, pode ser integrado a uma plataforma de desenvolvimento de sistemas robóticos. Neste caso, o modelo pode ser adicionado às bibliotecas de tais plataformas para uso em simulações, ou, no caso de um veículo real, criar-se uma interface entre o veículo e a plataforma.

Como uma nova implementação pode ser proposto à utilização da análise espectral das correntes elétricas dos motores para reconhecimento do solo. Nesse caso, serão identificadas no espectro as frequências que se relacionam com as forças laterais do veículo, oriundas do movimento, para utilização na base de regras do controlador.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abidi, M., & Gonzalez, R. (1992). *"Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence"*. San Diego, CA., USA: Academic Press Inc.
- Acade. (2015). Fonte: http://www.acadegeek.fr/wp-content/uploads/2014/10/robot_arms_at_car_factory.jpg.
- Ahn, S., Lee, K., Chung, W. K., & Oh, S.-R. (2007). "SLAM with Visual Plane: Extracting Vertical Plane by Fusing Stereo Vision and Ultrasonic Sensor for Indoor Environment". *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4787 - 4794). Roma: IEEE.
- Alguirre, L., Pinto, A., Da Silva, A., Fernando, M., Campos, M., & Amaral, W. (2007). *Enciclopédia de Automática: Controle e Automação* (1ª ed., Vol. III). (Blucher, Ed.) São Paulo.
- Allegro. (2015). *ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor*. Acesso em 2015, disponível em <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>
- Araujo, T. d., Lima, A. M., & Santos, A. J. (2009). "Detecting hands, fingers and blobs for multi-touch display applications". *High performance Computing & Simulation* (pp. 237-243). Leipzig: IEEE.
- Arkin, R. C. (1998). *Behavior-based robotics: intelligent robotics and autonomous agents*. Cambridge: MIT Press.
- Arreguin, J. M. (2008). *"Automation and Robotics"* (1st ed.). Croatia: I-Tech Education and Publishing.
- Beer, F., Jr, J., & Russell, E. (2012). *Vector Mechanics for Engineers*. McGraw-Hill.
- Beetz, M., Schmitt, T., Hanek, R., Buck, S., Stulp, F., Schröter, D., et al. (01 de July de 2004). "The AGILO robot soccer team: experience-based learning and probabilistic reasoning in autonomous robot control". *Autonomous Robots* , 17 (1), pp. 55-77.

- Bekey, G. A. (2005). *"Autonomous Robots - From Biological Inspiration to Implementation and Control"*. The MIT Press.
- Benavidez, P., & Jamshid, M. (2011). Mobile Robot Navigation and Target Tracking System". *6th International Conference on Systems Engineering* (pp. 299-304). Albuquerque: IEEE.
- Bhehm, T., & S., R. K. (1994). Hybrid fuzzy logic PID controller. *Proceedings of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., .*
- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *"Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library"* (1st ed.). O'Reilly Media.
- Braga, A. d. (2007). *"Redes Neurais Artificiais - Teoria e Aplicações"* (2ª ed.). LTC.
- Burke, M. (2012). "Path-following Control of a Velocity Constrained Tracked Vehicle Incorporating Adaptive Slip Estimation". *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 97-102). Saint Paul: IEEE.
- Calisi, D., Nardi, D., Ohno, K., & Tadokoro, S. (2008). "A Semi-Autonomous Tracked Robot System For Rescue Missions". *SICE Annual Conference* (pp. 2066-2069). Tokyo: IEEE.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2008). *"Métodos Numéricos para Engenharia"*. McGraw Hill.
- Cheah, C. C., Liu, C., & E., S. J. (2006). "Adaptive Tracking Control for Robots with Unknown Kinematic and Dynamic Properties". *The International Journal of Robotics Research* , 25 (III), 283.
- Chen, Z.-y., & Zhang, C.-N. (01 de 2010). "Control Strategy for Steering in Braking Process of Dual-motor Electric Tracked Vehicle".
- Cootes, T. F., Edwards, G. J., & Taylor, C. J. (1998). "Active Appearance Models". *Proc. European Conference on Computer Vision*, 2, pp. 484-498. Springer.
- Cootes, T. F., Edwards, G. J., & Taylor, C. J. (2001). "Active Appearance Models". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 23, pp. 681-685. IEEE.
- Craig, J. (2005). *"Introduction to Robotics: Mechanics and Control"* (3ª ed.). Pearson Education Inc.
- Cubero, S. (2007). *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. Verlag Robert Mayer-Scholz.

- Dar, T., & Longoria, R. (2010). "Slip Estimation for Small-Scale Robotic Tracked Vehicles". *American Control Conference (ACC)* (pp. 6816 - 6821). Baltimore: IEEE.
- Denavit, J., & Hartenberg, R. (1955). "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.". *Journal of Applied Mechanics* , 1, 215-221.
- Dong, W. (2012). "Tracking Control of Multiple-Wheeled Mobile Robots With Limited Information of a Desired Trajectory". *IEEE transactions on robotics*. 28, pp. 262 - 268. IEEE.
- Dudek, G., & Jenkin, M. (2000). *Computational Principles of mobile robotics*. Cambridge Press.
- Dynapar. (2015). Fonte: http://www.dynapar.com/uploadedFiles/_Site_Root/Technology/White_Papers/Encoders%20and%20Resolvers_How%20to%20Choose%20the%20Right%20Feedback%20Options.pdf.
- Einstein. (2015). Fonte: <http://www.einstein.br/hospital/cirurgia/cirurgia-robotica/Paginas/cirurgia-robotica.aspx>.
- Endo, D., Okada, Y., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2007). Path Following Control for Tracked Vehicles Based on Slip-Compensating Odometry. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* .
- Fainekos, G. E., Kress-Gazit, H., & Pappas, G. J. (2005). "Hybrid Controllers for Path Planning: A Temporal Logic Approach". *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*. Seville: IEEE.
- Fang, N.-H., Li, I.-H., Wang, W.-Y., Lee, L.-W., & Chien, Y.-H. (2012). "Resarch and Design of Control System for a Tracked Robot with a Kinect Sensor". *International Conference on System Science and Engineering* (pp. 217 - 222). Dalian: IEEE.
- Fernandez de Canete, J., Gonzalez-Perez, S., & del Saz-Orozco, P. (2008). "Software Tools for System Identification and Control using Neural Networks in Process Engineering". *World Academy of Science: Engineering & Technolog* , 42, 676.
- Funda, J., Taylor, R. H., & Paul, R. P. (1990). "On homogeneous transorms, quaternions, and computational efficiency.". *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (pp. 382 - 388). IEEE.
- Gat, E. (1992). "Integrating Planning and Reacting in a Heterogeneous Asynchronous Architecture for Controlling Real-World Mobile Robots". *AAAI-92 Proceedings* .
- Geiser, A., Roser, M., & Urtasun, R. (2010). "Efficient Large-Scale Stereo Matching". *Asian Conference on Computer Vision*. Queenstown.

- Goff, K. W. (Nov. de 1966). "Dynamics in direct digital control". *ISA-Journal* , 44-54.
- Groover, M., Weiss, M., Nagel, R., & Odrey, N. (1986). *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Hai-bo, T., & Hong-wei, M. (September de 2014). "Design and Principle Analysis of Wheel-Tracked Robot's Mobile Mechanism". *Applied Mechanics and Materials (Volumes 644 - 650)* , pp. 238-241.
- Halliday, D., & Resnick, R. (2013). *Fundamentals of Physics*. Wiley.
- Haykin, S. (2001). *Redes neurais: princípios e prática* (2ª ed.). (Bookman, Ed.) Porto Alegre.
- Helmick, D. M., Cheng, Y., Clouse, D. S., & Matthies, L. H. (2004). "Path Following using Visual Odometry for a Mars Rover in High-Slip Environments". *IEEE Aerospace Conference*. 2, pp. 772 - 789. IEEE.
- Henderson, H. (2006). *MODERN ROBOTICS: Building Versatile Machines* (1st ed.). (C. House, Ed.)
- Herath, D. C. (2011). "*Stereo Vision Based Simultaneous Localisation and Mapping: A Human Centred Approach*". VDM Verlag Dr. Müller.
- Herath, D. C., Kodagoda, K. R., & Dissanayake, G. (2006). "Modeling Errors in Small Baseline Stereo for SLAM". *ICARCV '06. 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* (pp. 1-6). Singapore: IEEE.
- Hokuyo. (2014). Fonte: http://www.hizook.com/files/users/3/Hokuyo_URG-04LX.jpg.
- Hossain, A., Rahman, A., & Mohiuddin, A. (2011). "Study of Fuzzy Controller to control vertical position of an air-cushion tracked vehicle". *4th International Conference On Mechatronics (ICOM)* (pp. 1 - 6). Kuala Lumpur: IEEE.
- Hutangkabodee, S., Zweiri, Y. H., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2006). "Soil Parameter Identification for Wheel-terrain". *International Journal of Automation and Computing* , 244-251.
- Intuitive. (2015). Fonte: <http://intuitivesurgical.com/company/media/images/>.
- InvenSense. (2015). *MPU-6050 six-axis gyro plus accelerometer*. Acesso em 2015, disponível em <http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>
- Iossaqui, J. G., Camino, J. F., & Zampieri, D. E. (2001). "A Nonlinear Control Design for Tracked Robots with Longitudinal Slip". *Proceedings of the 18th World Congress the International Federation of Automatic Control*. Milano.
- iRobot. (2014). *Roomba*. Acesso em 2014, disponível em <http://www.irobot.com/For-the-Home/Vacuum-Cleaning/Roomba.aspx>

- Jia, Z., Balasuriya, A., & Challa, S. (2008). "Sensor fusion-based visual target tracking for autonomous vehicles with the out-of-sequence measurements solution". *Robotics and Autonomous Systems*, (pp. 157-176).
- Jian, G., & Shilong, Z. (2014). "Path Tracking Control of Micro-Tracked Mobile Robot". *Applied Mechanics and Materials (Volumes 644 - 650)* , pp. 265-271.
- Jun, Y., Xuelin, W., Yujin, H., & Chenggang, L. (2006). "Fuzzy Control and Simulation on Automatic Transmission of Tracked Vehicle in Complicated Driving Conditions". (pp. 259 - 264). Beijing: IEEE.
- K. J. Aström, T. H. (2004). "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control". *Journal of Process Control* , 635-650.
- Kaess, M., & Dellaert, F. (2010). "Probabilistic Structure Matching for Visual SLAM with a Multi-Camera Rig". *Computer Vision and Image Understanding*, 114, pp. 286–296.
- Kane, T., & Levinson, D. (1985). *Dynamics: Theory and Application*. McGraw-Hill.
- Kim, M., & Woo, Y. (2013). "Robust Design Optimization Of The Dynamic Responses Of A Tracked Vehicle System". *International Journal of Automotive Technology* , 14, 47-51.
- Kntu. (2014). Fonte: http://saba.kntu.ac.ir/resquake/Gallery/photos/DSC01558_1.jpg.
- Koh, D., Hyun, K., & Kim, S. (2009). "Design of Multi-joint Tracked Robot for Adaptive Uneven Terrain Driving". *4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009*. (pp. 464 - 469). Wellington: IEEE.
- Kucuk, S., & Bingul, Z. (2004). "The Inverse Kinematics Solutions of Industrial Robot Manipulators". *IEEE International Conference on Mechatronics, 2004. ICM '04* (pp. 274-279). Turkey: IEEE.
- Kudoh, S., Ogawara, K., Ruchanurucks, M., & Ikeuchi, K. (2009). "Painting robot with multi-fingered hands and stereo vision". *Robotics and Autonomous Systems* , 57 (3), 279-288.
- Kurfess, T. R. (2005). *ROBOTICS AND AUTOMATION HANDBOOK*. CRC Press.
- Kwoh, Y., Hou, J., Jonckheere, E., & Hayati, S. (1988). A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (pp. 153 - 160). IEEE.
- Lathi, B. P. (2004). *Linear Systems and Signals*. Oxford University Press.
- Li, J., Zhou, J., Li, Q., & Zhang, Y. (2012). "Running Safety Trait Analysis of Tracked Vehicle Transiting Unilateral Obstruction". *International Conference on Quality*,

- Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE)* (pp. 582 - 586). Chengdu: IEEE.
- Li, L., Wang, W., Wu, D., & Du, Z. (2014). "Research on Obstacle Negotiation Capability of Tracked Robot Based on Terramechanics". *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 1061 - 1066). Besacon: IEEE.
- Low, C. (2014). "Experimental implementation of a novel trajectory tracking control design on a full-sized nonholonomic tracked mobile robot with low-level velocities control systems". *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)* (pp. 1318 - 1323). Juan Les Antibes: IEEE.
- Luo, W., Zou, Y., & Sun, F. (2014). "Control and Power Distribution Strategy for Hybrid Electric Tracked Vehicle with Electric Weapon". *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1 - 5). Beijing: IEEE.
- Ma, H. W., & Wang, C. W. (2013). "Studying and Simulation Analysis for Rubber Track of Rescue Robot ". 643-648.
- Maaref, H., & Barret, C. (2000). "Sensor-based fuzzy navigation of an autonomous mobile robot in an indoor environment". *Control Engineering Practice* , 8 (7), 757-768.
- Marquardt, J., Alvarez, J., & von Ellenrieder, K. (2014). "Characterization and System Identification of an Unmanned Amphibious Tracked Vehicle". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 39 (4), 641 - 661.
- Martínez, J., Mandow, A., Morales, J., Pedraza, S., & García-Cerezo, A. (2005). "Approximating Kinematics for Tracked Mobile Robots". *The International Journal of Robotics Research* , 24, 867-878.
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics". *Bulletin of Mathematical Biophysics* , 5, 115-133.
- Microchip. (2014). *Servo Control of a DC-Brush Motor*. Acesso em 10 de abril de 2014, disponível em Microchip:
http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn_00532c.pdf
- Milliken, W. F., & Milliken, D. F. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International.
- Mitsubishi. (2015). Fonte: <http://www.mitsubishirobot.com/mitsubishi/images/>.
- MS Robotics Studio. (2014). *Microsoft Robotics Developer Studio*. Acesso em 2014, disponível em <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb648760.aspx>

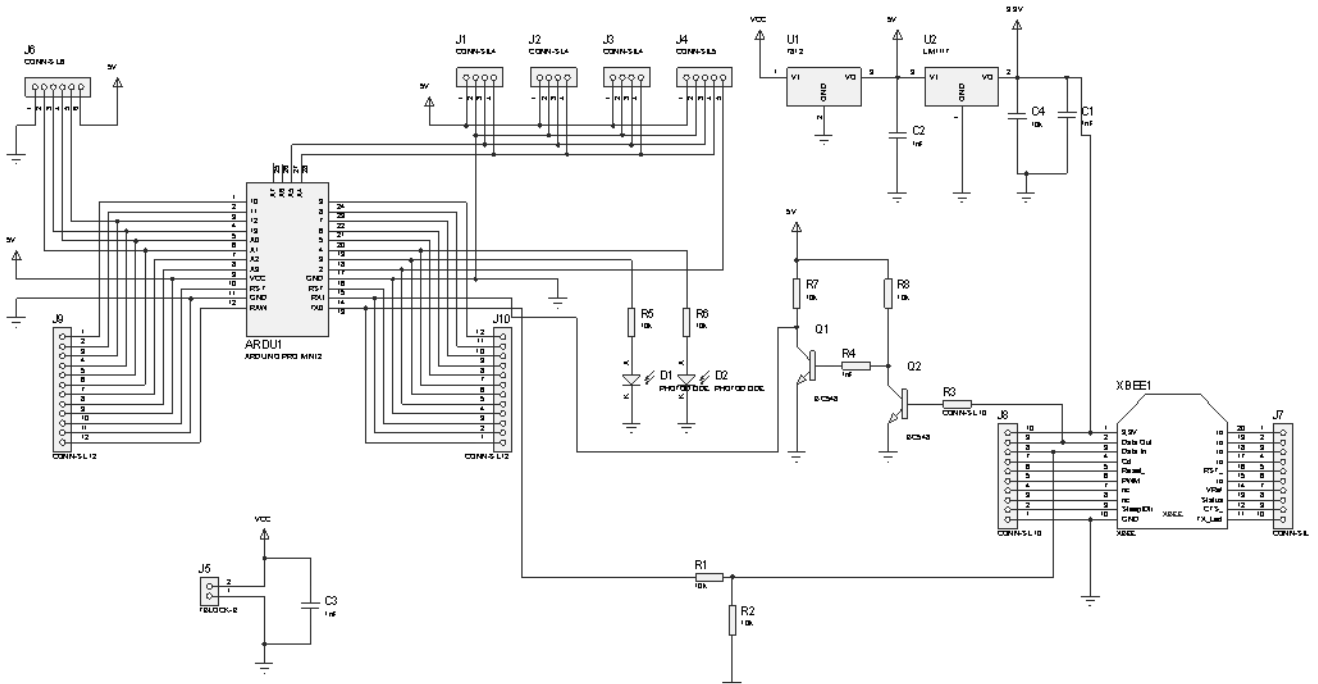
- Murphy, R. R. (2002). *“Introduction to AI robotics”*. MIT Press.
- Naroditsky, O., Zhou, X., Gallier, J., Roumeliotis, S., & Daniilidis, K. (2012). "Two Efficient Solutions for Visual Odometry Using Directional Correspondence". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 34, pp. 818 - 824. IEEE.
- Nguyen, H. G., Morrell, J., Mullens, K., & Burmeister, A. (October de 2004). "Segway Robotic Mobility Platform". *Mobile Robots XVII* , pp. 27-28.
- Niku, S. B. (2013). *"Introdução À Robótica – Análise, Controle, Aplicações"* (2ª ed.). LTC.
- Nise, N. S. (2015). *Control Systems Engineering*. Wiley.
- Ogata, K. (1994). *Discrete-Time Control Systems*. Prentice Hall.
- Ohno, K., Kawatsuma, S., Okada, T., Takeuchi, E., Higashi, K., & Tadokoro, S. (2011). "Robotic Control Vehicle for Measuring Radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant". *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 38 - 43). Kyoto: IEEE.
- Oppenheim, & Schafer. (1988). *Digital Signal Processing*. PHI INDIA.
- Qinetiq. (2014). *Talon V*. Acesso em 2014, disponível em <https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/talonv/>
- Quigley, M., Salisbury, C., Ng, A. Y., & Salisbury, J. K. (February de 2014). "Mechatronic design of an integrated robotic hand". *The international Journal of Robotics Research* , 706-720.
- Rastan, H., Lantaigne, E., & Fahim, A. E. (2014). "Dynamic Analysis Of Fixed Geometry Tracked Robots". *(206) International Journal of Robotics and Automation - 2014* .
- RBR. (2015). Fonte: http://www.roboticsbusinessreview.com/companies/category/mining_exploration.
- Robovolc. (2015). Fonte: <http://www.robovolc.dees.unict.it/tests/20030630/test.htm>.
- ROS. (2014). *Robot Operating System*. Acesso em 2014, disponível em Robot Operating System: www.ros.org
- Russel, S., & Norvig, P. (2002). *“Artificial Intelligence: a modern approach”*. Prentice Hall.
- Santos, I. (2001). *“Dinâmica de Sistemas Mecânicos: Modelagem, Simulação, Visualização e Verificação”*. Makron Books.

- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2009). *Microelectronic Circuits* (6th ed.). Oxford University Press.
- Sheka, A. (2014). "Tracked Mobile Robot Kuzma II". *Contemporary Engineering Sciences* , 7, 901 - 906.
- Shijing, W., Qunli, L., Enyong, Z., Dawei, Z., Jing, & Xie. (2008). "Dynamic Modeling and Simulation on Automatic Transmission of Tracked Vehicle Using Fuzzy Control". *27th Chinese Control Conference* (pp. 387 - 390). Kunming: IEEE.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I., & Scaramuzza, D. (2011). *"Introduction to Autonomous Mobile Robots"* (2^a ed.). The MIT Press.
- Simões, M. G., & Shaw, I. S. (2007). *Controle e Modelagem Fuzzy*. Blusher.
- Takahashi, R., Peres, P., & Ferreira, P. (1997). Multiobjective H_2/H_∞ guaranteed cost PID design. *IEEE Control Systems* (pp. 37 - 47). IEEE.
- Thrun, S., Bugard, W., & Fox, D. (2005). *"Probabilistic Robotics"*. The MIT Press.
- Valério, D., & Da Costa, J. S. (2006). "Tuning of fractional PID controllers with Ziegler–Nichols-type rules". *Journal Signal Processing* , 86 (10), 2771 - 2784.
- van Ginneken, B., Frangi, A., Staal, J., ter Haar Romeny, B., & Viergever, M. (2002). "Active Shape Model Segmentation with Optimal Features". *IEEE Transactions on Medical Imaging* (pp. 924 - 933). IEEE.
- Velagic, J., Lacevic, B., & Osmic, N. (2008). Nonlinear Motion Control of Mobile Robot Dynamic Model. In: *Motion Planning* (pp. 529-550). Publishing, InTech Education and Publishing.
- Wang, M., & Liu, J. N. (2007). "Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends". *Robotics and Autonomous Systems* , 56 (7), pp. 625–643.
- Wang, W., Du, Z., & Sun, L. (2007). "Kinematics Analysis for Obstacle-climbing Performance of a Rescue Robot". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. (pp. 1612 - 1617). Sanya: IEEE.
- Wang, W., Zhou, L., Du, Z., & Sun, L. (2008). Track-Terrain Interaction Analysis for Tracked Mobile Robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (pp. 126 - 131). Xian: IEEE.
- Xiong, G., Chen, H., Gong, J., & Wu, S. (2007). Development and Implementation of Remote Control System for An Unmanned Heavy Tracked Vehicle. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 663 - 667). Istanbul: IEEE.

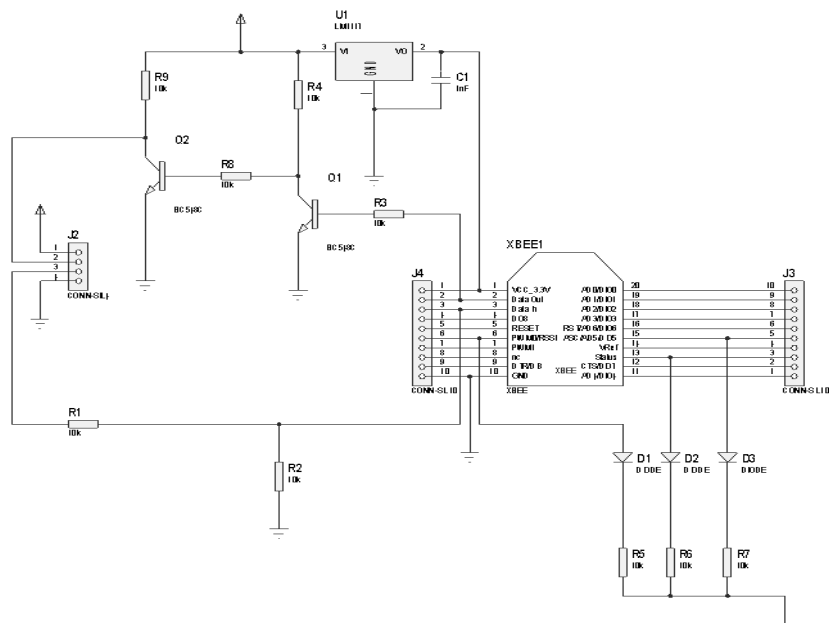
- Xu, Z., & Gao, J. Y. (2014). "The Kinematics and Dynamics Analysis of Rescue Robot Based on Adams and Matlab Simulation". *Advanced Materials Research (Volumes 945 - 949)* , pp. 1400-1407.
- Yamauchi, G., Noyori, T., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2014). "Improvement of Slope Traversability for a Multi-DOF Tracked Vehicle with Active Reconfiguration of Its Joint Forms". *2014 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 1-6). Hokkaido: IEEE.
- Yang, X., Moallem, M., & Patel, R. (2005). "A layered goal-oriented fuzzy motion planning strategy for mobile robot navigation". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*. 35, pp. 1214 - 1224. IEEE.
- Yaug-Fea, J., Bao-Jie, X., Lin, Z., & Kun-Li, W. (2012). Fuzzy PID Controler in Permanent Magnetic. *2012 IEEE International Conference on Intelligent Control, Automatic Detection and High-End Equipment (ICADE)* , pp. 176 - 180.
- Youn, I., Tchamna, R., Lee, S. H., Uddin, N., Lyu, S. K., & Tomizuka, M. (2014). "Preview Suspension Control For A Full Tracked Vehicle". *International Journal of Automotive Tecnology* , 15 (3), 399-410.
- Zhang, H., Li, H., Ma, B., & Gao, Z. (2012). "Control and Parameters Matching of Straight Running for High speed Tracked Vehicle with Hydrostatic Drive". *2012 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* (pp. 887 - 891). Chengdu: IEEE.
- Zhu, A., & Yang, S. (2007). "Neurofuzzy-based approach to mobile robot navigation in unknown environments". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* (pp. 610 - 621). IEEE.

APÊNDICE

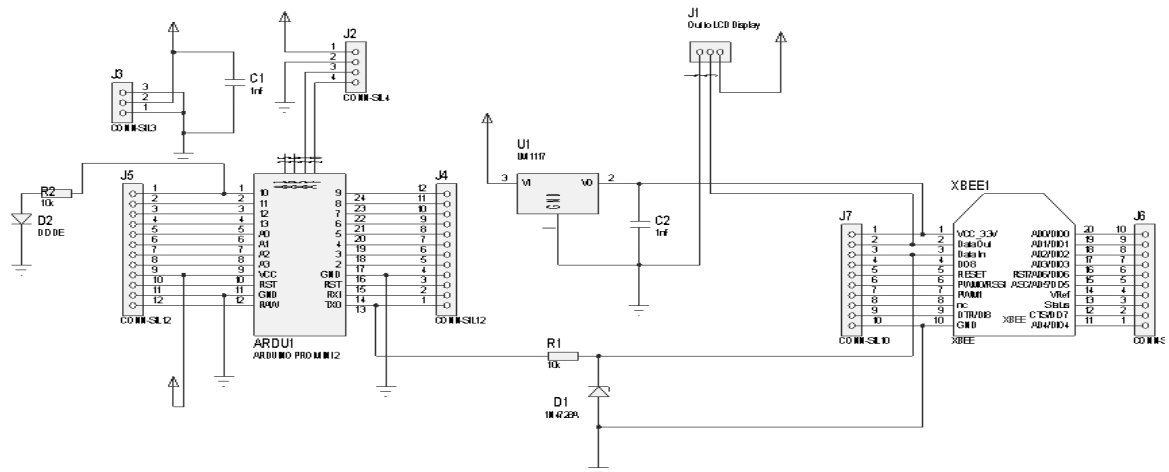
Circuitos eletrônicos



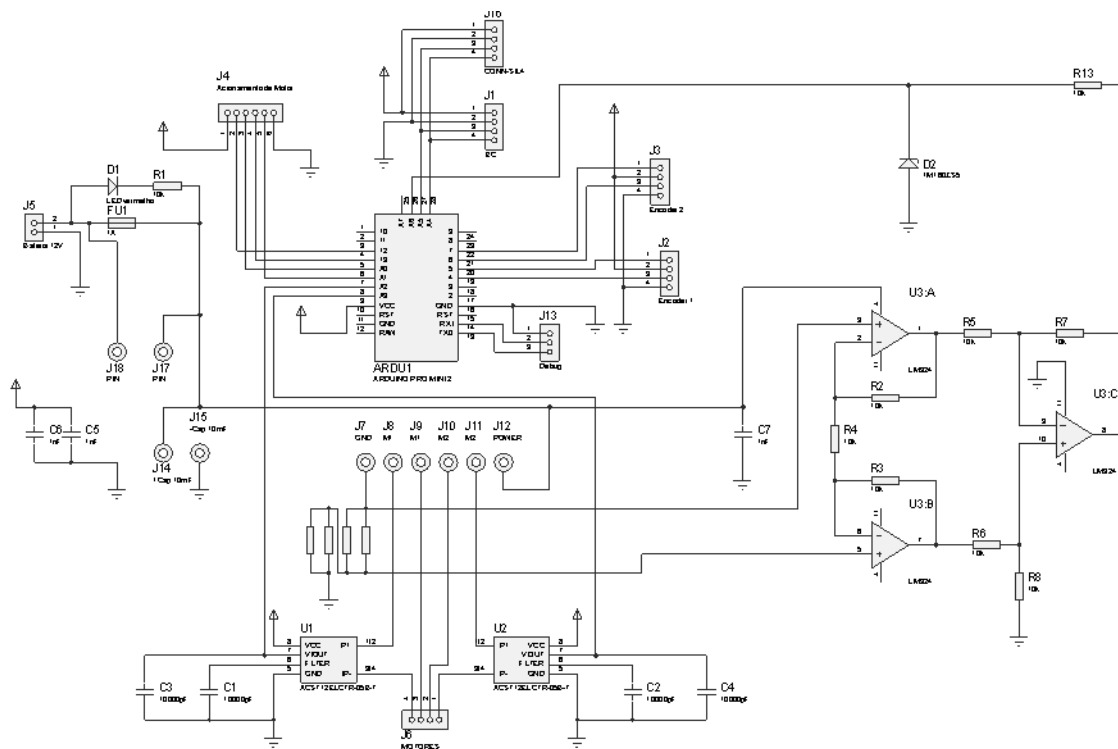
Circuito da placa de processamento central e comunicação via rádio



Circuito da placa para controle remoto



Circuito da placa de comunicação entre robô e computador



Circuito da placa de acionamento de motores e leitura de *encoders*.

Códigos de microcontroladores

Motor_encoder.c

```

/*
Velocidade máxima:
0,3m/s

Encoder com 64 furos, fornecendo 256 posição por volta.
Cada volta representa 256mm.

A velocidade máxima experimental é de 0,3m/s ou 300mm por segundo

          Delta_S [mm], obtido do encoder
Velocidade = -----
          Delta_T [ms], obtido do registrador millis()

DIR1 = pino 12
PWM1 = pino A0
DIR2 = pino 13
PWM2 = pino A1

*/
#include <Wire.h>

short unsigned int encoder_R = 0;
short unsigned int encoder_L = 0;
short unsigned int encoder_anterior_R = 0;
short unsigned int encoder_anterior_L = 0;
long int encoder_R_position;
long int encoder_L_position;
long int encoder_R_position_anterior;
long int encoder_L_position_anterior;
long int last_millis;

float velocidade_ref_R = 0.01; //0,1 m/s
float velocidade_ref_L = 0.00;

float velocidade_R_atual;
float velocidade_L_atual;
float velocidade_R_anterior;
float velocidade_L_anterior;

float erro_R_anterior;
float erro_L_anterior;

const float VELOCIDADE_MAXIMA = 0.3;

int corrente_R;
int corrente_L;
int corrente_T;
int offset_R = 512;
int offset_L = 512;

//referencias vindas do PC:
short int ref_velocidade_R;
short int ref_velocidade_L;

void update_encoder_position(){
    encoder_R = digitalRead(6)+2*digitalRead(7);
    encoder_L = digitalRead(4)+2*digitalRead(5);

    //sequencia: 0 --> 1 --> 3 --> 2

    if(encoder_anterior_R!=encoder_R){
        if(((encoder_anterior_R==0)&&(encoder_R==1))
            ||((encoder_anterior_R==1)&&(encoder_R==3))
            ||((encoder_anterior_R==3)&&(encoder_R==2))
            ||((encoder_anterior_R==2)&&(encoder_R==0))){
            encoder_R_position++;
        }
        else encoder_R_position--;
        encoder_anterior_R = encoder_R;
    }

    if(encoder_anterior_L!=encoder_L){
        if(((encoder_anterior_L==0)&&(encoder_L==1))
            ||((encoder_anterior_L==1)&&(encoder_L==3))
            ||((encoder_anterior_L==3)&&(encoder_L==2))
            ||((encoder_anterior_L==2)&&(encoder_L==0))){
            encoder_L_position--;
        }
        else encoder_L_position++;
        encoder_anterior_L = encoder_L;
    }
}

void calibra_hall(){

```

```

congela_motores();

delay(10);
offset_R = analogRead(A2);
delay(10);
offset_L = analogRead(A3);
}

void congela_motores(){
  //stop motors
  analogWrite(10, 0);
  digitalWrite(12, HIGH);
  analogWrite(11, 0);
  digitalWrite(13, HIGH);
  Serial.print("\nMotores parados");
}

void setup(void)
{
  pinMode(4, INPUT); //encoders
  pinMode(5, INPUT);
  pinMode(6, INPUT);
  pinMode(7, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT); //sensores de corrente
  pinMode(A3, INPUT);
  pinMode(A6, INPUT);
  digitalWrite(A2, LOW);
  digitalWrite(A3, LOW);
  digitalWrite(A6, LOW);

  pinMode(12, OUTPUT); //motor direction
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT); //motor PWM
  pinMode(11, OUTPUT); //motor PWM

  Wire.begin(10); // join i2c bus with address #10
  Wire.onReceive(receiveEvent); // register event
  //Wire.onRequest(requestEvent); // register event

  Serial.begin(115200);
  delay(50);

  calibra_hall();
}

void ler_velocidade(int intervalo){
  int Delta_S;

  //Calculando esteira R
  Delta_S = encoder_R_position - encoder_R_position_anterior;
  velocidade_R_atual = ((float)Delta_S/(float)intervalo);
  //velocidade_R_atual = (short int)(velocidade_real*fator_velocidade);

  //Calculando esteira L
  Delta_S = encoder_L_position - encoder_L_position_anterior;
  velocidade_L_atual = ((float)Delta_S/(float)intervalo);
  //velocidade_R = (short int)(velocidade_real*fator_velocidade);

  encoder_R_position_anterior = encoder_R_position;
  encoder_L_position_anterior = encoder_L_position;
}

void ler_correntes(){
  //=====CORRENTES DOS MOTORES=====
  //Do sensor Hall:
  //tensão no pino --> valor ADC --> Valor da corrente em mA
  // 2,500V --> 512 --> 0 mA
  // 2,685V --> 550 --> 1000 mA
  // 3,425V --> 701 --> 5000 mA
  // 1,575V --> 322 --> -5000 mA
  //
  //Range 322->701, ou seja, resolução de 26,4 mA por cada degrau do ADC
  //
  //Corrente medida:
  //
  // I = (V(ADC)-512)*26,4

  int corrente;
  corrente = analogRead(A2);
  update_encoder_position();
  corrente_R = (int)((corrente-offset_R)*26.4);
  delay(1);
  update_encoder_position();
  corrente = analogRead(A3);
  corrente_L = (int)((corrente-offset_L)*26.4);
  //delay(1);
  //corrente = analogRead(A6);
  //corrente_I = corrente; //TBD: fator multiplicador
}

void set_motor_power(){

```

```

int velocidade_255;
float erro;
int u;

velocidade_255 = (velocidade_R_atual/VELOCIDADE_MAXIMA)*255;
Serial.print("\tV255_R: ");
Serial.print(velocidade_255);
erro = velocidade_ref_R - velocidade_R_atual;

Serial.print("\tErro: ");
Serial.print(erro);
u = ((velocidade_ref_R + erro)/VELOCIDADE_MAXIMA)*255 + ((erro_R_anterior + erro)/VELOCIDADE_MAXIMA)*25;
erro_R_anterior = erro_R_anterior+erro/10;
if(u<0) u=-u;
if(u>250) u=250;
Serial.print("\tU R: ");
Serial.print(u);

    if(velocidade_ref_R>=0){
        digitalWrite(12, HIGH);
        analogWrite(10, u); //Because of the way the max() function is implemented, avoid using other functions inside the
brackets, it may lead to incorrect results
    }
    else
    {
        digitalWrite(12, LOW);
        analogWrite(10, u);
    }

velocidade_255 = (velocidade_L_atual/VELOCIDADE_MAXIMA)*255;
erro = velocidade_ref_L - velocidade_L_atual;
u = velocidade_ref_L + erro;
Serial.print("\tU L: ");
Serial.print(u);

    if(velocidade_ref_L>=0){
        digitalWrite(13, HIGH);
        analogWrite(11, 0);
    }
    else
    {
        digitalWrite(13, LOW);
        analogWrite(11, 0);
    }
}

void debug_all(){
    Serial.print("\nVel R: ");
    Serial.print(velocidade_R_atual);
    Serial.print("\tVel_L ");
    Serial.print(velocidade_L_atual);

    //Serial.print("\tEnc R: ");
    //Serial.print(encoder_R_position);
    //Serial.print("\tEnc L: ");
    //Serial.print(encoder_L_position);

    Serial.print("\tI: ");
    Serial.print(corrente_R);

    Serial.print("\tref_R: ");
    Serial.print(velocidade_ref_R);
    Serial.print("\tref_L: ");
    Serial.print(velocidade_ref_L);
}

void loop(void)
{
    int intervalo= millis()-last_millis;
    update_encoder_position();

    if(intervalo>=30){
        //=====VELOCIDADE=====
        ler_velocidade(intervalo);
        update_encoder_position();
        //ler_correntes(); //dura 2 ms
        update_encoder_position();

        //=====AÇÃO DE CONTROLE=====
        //Implementando um PID:
        set_motor_power();
        update_encoder_position();
        debug_all();
        update_encoder_position();
        last_millis = millis();
    }
}

void receiveEvent(int nao_sei)
{
    signed char byte_recebido;
    while(Wire.available())

```

```

    {
        byte_recebido = Wire.read(); //valor entre 0 e 255, proveniente do PC ou controle remoto; 0->r , 127->parado, 255->frente
        //velocidade_ref_R = ((byte_recebido-127)/127)*VELOCIDADE_MAXIMA;
        byte_recebido = Wire.read();
        //velocidade_ref_L = ((byte_recebido-127)/127)*VELOCIDADE_MAXIMA;
    }
}

void requestEvent()
{
    /*20 bytes:
    Velocidade_R, from encoder
    Velocidade_L, from encoder
    Corrente_R, from hall sensor
    Corrente_L, from hall sensor
    Corrente_total, from A.O.
    Pos_R
    Pos_L

    TODO: Criar struct com todas as variaveis da placa

    */
    //Wire.write(velocidade_R_atual);
    //Wire.write(velocidade_L_atual);
}

```

Xbee.c

```

/*
Protocolo PC-Robot:
- Sinais de comando: (oriundos do PC ou controle remoto)
    1 byte, sincronismo
    1 byte, ref_velocidade_R,
    1 byte, ref_velocidade_L,
    1 bytes, comandos especiais
    4 bytes, reservado
-----
    8 bytes

- Sinais de retorno
    2 bytes, acelera  o_X
    2 bytes, acelera  o_Y
    2 bytes, giro
    2 bytes, velocidade_R
    2 bytes, velocidade_L
    2 bytes, posic  o_X
    2 bytes, posic  o_Y
    1 byte, corrente_R
    1 byte, corrente_L
    1 byte, corrente_GND
    2 bytes, temperatura
    20 bytes, reservado
-----
    40 bytes

Taxa: 115200 b/s --> 11500 Bytes por segundo
Supondo uma taxa de amostragem de 30ms, um pacote de 20 Bytes, d  670 Bytes por segundo

LISTA DE DISPOSITIVOS I C

Addr - Device          - Send pack size - Receive pack size
0x0A - motor           - 2 bytes      - 20 bytes
0x68 - acelerometro    - (Config)    - (verify)
*/

#include <Wire.h>

short int ref_velocidade_R = 128;
short int ref_velocidade_L = 128;
long int escalonador_time;

int LED1 = 0;
int LED2 = 0;

char remote_buffer[8];
char provar[1];

int update_remote = 0;

int get_serial(){

    //Serial.print("\n. ");

    int serial_buf_size = Serial.available();
    Serial.print("\nBuffr: ");
    Serial.print(serial_buf_size);
    if (serial_buf_size==8) {

        Serial.readBytes(remote_buffer, 8);

        if(remote_buffer[0]==100){//sync is ok

```

```

    ref_velocidade_R = remote_buffer[6];
    ref_velocidade_L = remote_buffer[7];
}
Serial.print("\nVR: ");
Serial.print(ref_velocidade_R);
Serial.print("\tVL: ");
Serial.print(ref_velocidade_L);
}
else{
    for(int a=0; a<serial_buf_size; a++) {
        char c = Serial.read(); // receive a byte as character
        Serial.print(c);
    }
}
}
}

void send_status_to_remote(){

void set_motor_speed(){
    Wire.beginTransmission(10);           // transmit to device #10
    Wire.write(ref_velocidade_R);         // sends two bytes
    Wire.write(ref_velocidade_L);         // sends two bytes
    Wire.endTransmission();               // stop transmitting
    delay(10);
}

int get_motor_status(){

    Wire.requestFrom(10, 20);    // request 20 bytes from slave device #10

    while(Wire.available())    // slave may send less than requested
    {
        char c = Wire.read(); // receive a byte as character
        Serial.print(c);      // print the character
    }
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    //myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
    Wire.begin(); // join i2c bus (address optional for master)

    pinMode(3, OUTPUT);
    pinMode(4, OUTPUT);

    escalonador_time = millis();
}

void loop()
{
    int intervalo = millis() - escalonador_time;

    /*
    - STATUS - TAREFA
    - DONE   - Verifica comandos da unidade remota (via interrupção)
    - TODO   - Enviar status para unidade remota
    - TODO   - Verifica dados do motor
    - DONE   - Envia comando para motor
    - TODO   - Verifica dados do acelerômetro
    */

    if(intervalo>200){

        //Faz o LED piscar para incicar funcionamento
        LED1 = 1 - LED1;
        digitalWrite(3, LED1);

        //get_serial();
        //set_motor_speed();

        Wire.beginTransmission(10);           // transmit to device #10
        Wire.write(ref_velocidade_R);         // sends two bytes
        Wire.write(ref_velocidade_L);         // sends two bytes
        Wire.endTransmission();               // stop transmitting

        escalonador_time = millis();
    }
}

void serialEvent() {
    //Serial.print("\n. ");
    delay(10); // espera o buffer encher

    int serial_buf_size = Serial.available();

    if (serial_buf_size==8) {

        Serial.readBytes(remote_buffer, 8);

        if(remote_buffer[0]==100){ //sync is ok
            ref_velocidade_R = remote_buffer[6];
            ref_velocidade_L = remote_buffer[7];

```

```

    }
}
else{
    Serial.print("\nBuffer incompleto");
    for(int a=0; a<serial_buf_size; a++) {
        char c = Serial.read(); // receive a byte as character
        //Serial.print(c);
    }
}
}
}

```

Controle_remoto.c

```

/*
Utilizacao do controle remoto wii nunchuck para comandar os movimentos do veiculo
*/

#include <Wire.h>

int ledPin = 10;
int servoPin = 7;    // Control pin for servo motor

int pulseWidth = 0; // Amount to pulse the servo
int refreshTime = 20; // the time in millisecs needed in between pulses
long lastPulse;
int minPulse = 700; // minimum pulse width
int loop_cnt=0;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    pinMode(servoPin, OUTPUT); // Set servo pin as an output pin
    pulseWidth = minPulse;    // Set the motor position to the minimum

    nunchuck_setpowerpins(); // use analog pins 2&3 as fake gnd & pwr
    nunchuck_init(); // send the initialization handshake
    Serial.print("NunchuckServo ready\n");
}

void loop()
{
    checkNunchuck();
    updateServo(); // update servo position

    if( nunchuck_zbutton() ) // light the LED if z button is pressed
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
    else
        digitalWrite(ledPin, LOW);

    delay(1); // this is hear to give a known time per loop
}

void checkNunchuck()
{
    if( loop_cnt > 100 ) { // loop()s is every 1msec, this is every 100msec

        nunchuck_get_data();
        nunchuck_print_data();

        float tilt = nunchuck_accelx(); // x-axis, in this case ranges from ~70 - ~185
        tilt = (tilt - 70) * 1.5; // convert to angle in degrees, roughly
        pulseWidth = (tilt * 9) + minPulse; // convert angle to microseconds

        loop_cnt = 0; // reset for
    }
    loop_cnt++;
}

// called every loop().
// uses global variables servoPin, pulsewidth, lastPulse, & refreshTime
void updateServo()
{
    // pulse the servo again if rhe refresh time (20 ms) have passed:
    if (millis() - lastPulse >= refreshTime) {
        digitalWrite(servoPin, HIGH); // Turn the motor on
        delayMicroseconds(pulseWidth); // Length of the pulse sets the motor position
        digitalWrite(servoPin, LOW); // Turn the motor off
        lastPulse = millis(); // save the time of the last pulse
    }
}

//
// Nunchuck functions
//

static uint8_t nunchuck_buf[6]; // array to store nunchuck data,

// Uses port C (analog in) pins as power & ground for Nunchuck
static void nunchuck_setpowerpins()
{
    #define pwrpin PORTC3
    #define gndpin PORTC2
    DDRC |= _BV(pwrpin) | _BV(gndpin);
    PORTC &=~ _BV(gndpin);
}

```

```

    PORTC |= _BV(pwrpin);
    delay(100); // wait for things to stabilize
}

// initialize the I2C system, join the I2C bus,
// and tell the nunchuck we're talking to it
void nunchuck_init()
{
    Wire.begin(); // join i2c bus as master
    Wire.beginTransmission(0x52); // transmit to device 0x52
    Wire.write(0x40); // sends memory address
    Wire.write(0x00); // sends sent a zero.
    Wire.endTransmission(); // stop transmitting
}

// Send a request for data to the nunchuck
// was "send_zero()"
void nunchuck_send_request()
{
    Wire.beginTransmission(0x52); // transmit to device 0x52
    Wire.write(0x00); // sends one byte
    Wire.endTransmission(); // stop transmitting
}

// Receive data back from the nunchuck,
// returns 1 on successful read. returns 0 on failure
int nunchuck_get_data()
{
    int cnt=0;
    Wire.requestFrom(0x52, 6); // request data from nunchuck
    while (Wire.available ()) {
        // receive byte as an integer
        nunchuck_buf[cnt] = nunchuk_decode_byte(Wire.read());
        cnt++;
    }
    nunchuck_send_request(); // send request for next data payload
    // If we recieved the 6 bytes, then go print them
    if (cnt >= 5) {
        return 1; // success
    }
    return 0; //failure
}

void nunchuck_print_data()
{
    static int i=0;
    int joy_x_axis = nunchuck_buf[0];
    int joy_y_axis = nunchuck_buf[1];
    int accel_x_axis = nunchuck_buf[2]; // * 2 * 2;
    int accel_y_axis = nunchuck_buf[3]; // * 2 * 2;
    int accel_z_axis = nunchuck_buf[4]; // * 2 * 2;

    int z_button = 0;
    int c_button = 0;

    // byte nunchuck_buf[5] contains bits for z and c buttons
    // it also contains the least significant bits for the accelerometer data
    // so we have to check each bit of byte outbuf[5]
    if ((nunchuck_buf[5] >> 0) & 1)
        z_button = 1;
    if ((nunchuck_buf[5] >> 1) & 1)
        c_button = 1;

    if ((nunchuck_buf[5] >> 2) & 1)
        accel_x_axis += 2;
    if ((nunchuck_buf[5] >> 3) & 1)
        accel_x_axis += 1;

    if ((nunchuck_buf[5] >> 4) & 1)
        accel_y_axis += 2;
    if ((nunchuck_buf[5] >> 5) & 1)
        accel_y_axis += 1;

    if ((nunchuck_buf[5] >> 6) & 1)
        accel_z_axis += 2;
    if ((nunchuck_buf[5] >> 7) & 1)
        accel_z_axis += 1;

    int v = joy_y_axis-127;
    int w = joy_x_axis-127;
    int VR = v+w;
    int VL = v-w;

    Serial.write(100);
    Serial.write(110);
    Serial.write(120);
    Serial.write(130);
    Serial.write(140);
    Serial.write(150);
    Serial.write(VR);
    Serial.write(VL);
    delay(10);

    /*
    Serial.print(i,DEC);
    Serial.print("\t");

```

```

Serial.print("joy:");
Serial.print(joy_x_axis, DEC);
Serial.print(",");
Serial.print(joy_y_axis, DEC);
Serial.print("\t");

Serial.print("acc:");
Serial.print(accel_x_axis, DEC);
Serial.print(",");
Serial.print(accel_y_axis, DEC);
Serial.print(",");
Serial.print(accel_z_axis, DEC);
Serial.print("\t");

Serial.print("but:");
Serial.print(z_button, DEC);
Serial.print(",");
Serial.print(c_button, DEC);

Serial.print("\r\n"); // newline

*/
//i++;
}

// Encode data to format that most wiimote drivers except
// only needed if you use one of the regular wiimote drivers
char nunchuk_decode_byte (char x)
{
    x = (x ^ 0x17) + 0x17;
    return x;
}

// returns zbutton state: 1=pressed, 0=notpressed
int nunchuk_zbutton()
{
    return ((nunchuck_buf[5] >> 0) & 1) ? 0 : 1; // voodoo
}

// returns zbutton state: 1=pressed, 0=notpressed
int nunchuk_cbutton()
{
    return ((nunchuck_buf[5] >> 1) & 1) ? 0 : 1; // voodoo
}

// returns value of x-axis joystick
int nunchuk_joyx()
{
    return nunchuck_buf[0];
}

// returns value of y-axis joystick
int nunchuk_joyy()
{
    return nunchuck_buf[1];
}

// returns value of x-axis accelerometer
int nunchuk_accelx()
{
    return nunchuck_buf[2]; // FIXME: this leaves out 2-bits of the data
}

// returns value of y-axis accelerometer
int nunchuk_accely()
{
    return nunchuck_buf[3]; // FIXME: this leaves out 2-bits of the data
}

// returns value of z-axis accelerometer
int nunchuck_accelz()
{
    return nunchuck_buf[4]; // FIXME: this leaves out 2-bits of the data
}

```