

PROJETO MECATRÔNICO CONCEITUAL DE UM ROBÔ DE COMBATE A
INCÊNDIO

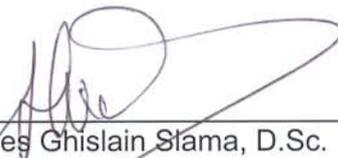
Magda Judith Morales Tavera

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
MECÂNICA.

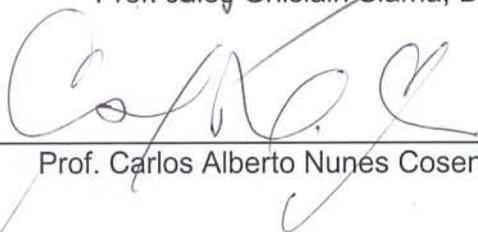
Aprovada por:



Prof. Max Suell Dutra, Dr. – Ing.



Prof. Jules Ghislain Slama, D.Sc.



Prof. Carlos Alberto Nunes Cosenza, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2008

TAVERA, MORALES MAGDA JUDITH

Projeto Mecatrônico Conceitual de um
Robô de Combate a Incêndio [Rio de
Janeiro] 2008

XIII, 141 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Mecânica, 2008).

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Robótica Móvel
2. Combate a Incêndio

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A meu Esposo, a minha Mãe e a Edgui
Algumas pessoas marcam a nossa vida para sempre, umas porque nos vão
ajudando na construção e outras porque nos abandonam no caminho
Amo muito vocês

AGRADECIMENTOS

Inicialmente o agradecimento é para Deus, por permitir o desenvolvimento deste trabalho colocando no meu caminho todas as ferramentas necessárias para a construção desta pesquisa. Agradeço ao apoio financeiro fornecido pela CAPES e pela FAPERJ durante estes anos.

Ao “Doutor Max meu querido chefe” primeiro pelo aporte de toda sua experiência e inteligência nas orientações ao meu trabalho e segundo por permitir que além de professor fosse um pai para mim aqui no Brasil. Mil Gracias.

A minha vovó Zorayda e a toda minha família Tavera, Morales, Lengerke e Pérez que só perguntando pelo MSN de como vai sua tese, ajudaram a começar os dias deixando de lado as saudades.

A todos meus professores que em cada uma das suas aulas ajudaram além da construção da tese à formação da Profissional que hoje eu sou: Lavinia, Fernando, Cosenza, Seixas e Jules.

A todo o pessoal da secretaria da mecânica, em especial a Verinha porque além de fazer tudo o que pudesse para Shakira, sempre me recebeu com um beijão e um sorriso.

Ao meu melhor amigo Elkin, que me agüentou durante 5 anos de graduação e de longe os dois anos de mestrado suportando meus chiquetes.

A meus queridos amigos brasileiros que me receberam de braços abertos: Alox, Fabrício, Ayslan, Musbah, Luisão, Leonardo, Fausto e as meninas superpoderosas Ranny, Aline e Sandra do Lavi.

A todos os que direta o indiretamente deram um incentivo para continuar na luta; alguns com palavras de ânimo e outros gerando problemas para incentivar meu progresso: João, Ivan, Hernan, Liliana, Cesar, Ricardo, Mariana, Gabriel, Diana. Porque ante todo seguimos sendo Colombianos.

A Dilce por todo o ensino de vida que passou para mim, numa época de câmbio total na minha vida como foi o início do casamento e do mestrado.

A minha mãe porque é graças a ela que sou a pessoa e Profissional de hoje, mãe acho que valeu a pena todo seu esforço.

E finalmente não poderia faltar meu amado maridinho que fico sem palavras para agradecer todo o que ele significa na minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROJETO MECATRÔNICO CONCEITUAL DE UM ROBÔ DE COMBATE A INCÊNDIO

Magda Judith Morales Tavera

Fevereiro/2008

Orientador: Max Suell Dutra

Programa: Engenharia Mecânica

Muitos robôs têm sido desenvolvidos para atuar em ambientes que colocam a vida humana em risco. Neste trabalho é proposto o projeto conceitual de um robô para combate a incêndio visando diminuir a exposição dos bombeiros aos ambientes hostis quando do combate a incêndios. Estes ambientes possuem como características: fumaça, temperaturas elevadas, produtos químicos, radiativos, explosões, queda de paredes e reboco, e outros. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento robotizado que aumente a segurança dos bombeiros, aumente as chances de salvamento de pessoas e ajude na extinção ou controle do incêndio minimizando os prejuízos patrimoniais. Para a realização do projeto mecatrônico conceitual do equipamento foi realizado uma pesquisa bibliográfica dos tipos de incêndios, os robôs móveis que poderiam ser utilizados para atuação direta no foco do incêndio, controle para os motores utilizando lógica fuzzy, estudo de diferentes mecanismos robotizados para lançamento de água. Será apresentado também os cálculos de dimensionamento do RobotFire.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHATRONICS CONCEPTUAL DESIGN OF A FIRE FIGHTING ROBOT

Magda Judith Morales Tavera

February/2008

Advisors: Max Suell Dutra

Department: Mechanical Engineering

In this dissertation is presented the study and conceptual mechatronics in the conceptual design of a Robot Fire Fighting to protect teams of firemen fighting the fire, rescue of a greater number of people, and fire-fighting with hostile characteristics, such as: smoke, high temperatures, indoors, chemicals, radioactive, and so on. The profession of fireman is a very dangerous especially indoors, where the advances achieved by using robots equipped mobile technology of automated monitors cannons, which has the main advantage to greater accessibility to the outbreak of the fire, which compared to a fireman that weigh the sacrifice and risks that it exposes, not come close enough for the fight against fire will be as effective as they would like. For the conceptual study is necessary to start with research in engineering, fire, keeping the broad field of mobile robots, developing an implementation of control engine with fuzzy logic, complex when an application is developed with traditional techniques. Finally, is performed the study of mechanisms for robotized expulsion out of water where it is studied the biomimetic as possible mechanism, and implementation of the calculations for the design of the RobotFire.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iv
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ESTADO DA TÉCNICA	2
1.2 MOTIVAÇÕES	6
1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
2 PRINCÍPIOS DOS INCÊNDIOS NA ENGENHARIA	8
2.1 CLASSES DE INCÊNDIOS	13
2.1.1 Classe A.....	14
2.1.2 Classe B.....	14
2.1.3 Classe C.....	15
2.1.4 Classe D.....	15
2.1.5 Classe F	15
2.1.5.1 Limitações dos extintores que não são da Classe F.	16
2.1.5.2 Extintores Classe F	16
2.1.5.3 Norma BS7937:2000	17
2.2 CENÁRIO DE NORMAS TÉCNICAS	18
2.3 PROPORÇÕES DOS INCÊNDIOS	19
2.4 PROPAGAÇÃO DO CALOR	20
2.4.1 Condução.....	20
2.4.2 Radiação	21
2.4.3 Convecção	22
2.4.4 Propagação do Incêndio em um Compartimento.....	23
2.4.5 Propagação de Incêndios em Edifícios.....	23
2.5 EXTINÇÃO	24
2.5.1 Métodos de Extinção.....	24
2.5.2 Agentes Extintores	24
2.5.2.1 Água	25
2.5.2.2 Espuma.....	26
2.5.2.3 Dióxido de Carbono	31
2.5.2.4 Pó Químico Seco (P.Q.S)	32
2.5.2.5 Halon (tipo bromochlorofluoromethane BCF)	33
2.5.2.6 Cobertores de Fogo de Fibra de Vidro.....	34

3	ESTUDO DOS ROBÔS MÓVEIS	35
3.1	TIPOS DE MOVIMENTAÇÃO	35
3.1.1	Robôs Móveis com Pernas	37
3.1.1.1	Robôs de Locomoção com uma Perna.....	38
3.1.1.2	Robôs Móveis com Duas Pernas (Bípede)	39
3.1.1.3	Robôs Móveis com Quatro Pernas (Quadrúpedes).....	40
3.1.1.4	Robôs Móveis com Seis Pernas (Hexápodos)	40
3.1.2	Robôs Móveis com Rodas	40
3.1.2.1	Projeto de Rodas.....	41
3.1.2.2	Geometria da Roda.....	42
3.1.2.3	Estabilidade.....	46
3.1.2.4	Manobrabilidade	46
3.1.2.5	Controlabilidade.....	47
3.1.3	Robôs Híbridos	48
3.2	CINEMÁTICA DOS ROBÔS MÓVEIS.....	49
3.2.1	Introdução	49
3.2.2	Representação da Posição do Robô	50
3.2.3	Modelos Cinemáticos Direitos.....	52
3.2.4	Restrições Cinemáticas da Roda.....	55
3.2.4.1	Roda Padrão Fixa	55
3.2.4.2	Roda Padrão Dirigida	57
3.2.4.3	Roda Louca (Castor).....	58
3.2.4.4	Roda Sueca.....	59
3.2.4.5	Roda esférica.....	60
3.2.5	Restrições Cinemáticas do Robô.....	61
3.2.6	O Robô Diferencial-Dirigido	63
3.2.7	Manobrabilidade do Robô Móvel	64
3.2.7.1	Grau de Mobilidade.....	65
3.2.7.2	Grau de Dirigibilidade	69
3.2.7.3	Grau de Manobrabilidade.....	70
3.2.8	Espaço de Trabalho do Robô Móvel.....	71
3.2.8.1	Graus de Liberdade	71
3.2.8.2	Robôs Holonômicos.....	72
3.2.8.3	Considerações de Caminho e Trajetória	74
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DE UM ALGORITMO FUZZY PARA O CONTROLE DE VELOCIDADE DOS MOTORES DO ROBOTFIRE.....	76
3.3.1	DSP's (Digital Signal Processor).....	77
3.3.1.1	Definição.....	78
3.3.1.2	Aplicações	79
3.3.2	Lógica Fuzzy	80
3.3.2.1	Definição.....	81
3.3.2.2	Princípios Básicos da Teoria Fuzzy	82
3.3.2.3	As Três Principais Características da Teoria Fuzzy	83
3.3.2.4	Por que Fuzzy?.....	83
3.3.2.5	Aplicações	84
3.3.3	Implementação do Algoritmo de Controle Fuzzy	85
3.3.3.1	Fuzzificação	85
3.3.3.2	Inferência Fuzzy	88

3.3.3.3	Defuzzificação por Centróide	89
3.3.3.4	Fluxograma do Controle Fuzzy	89
3.3.4	Resultados	90
3.3.5	Comparação.....	92
4	MECANISMOS ROBOTIZADOS PARA EXPULSÃO DE ÁGUA	96
4.1	MANGUEIRAS	96
4.1.1	Classificação	98
4.2	CANHÕES MONITORES	99
4.2.1	Monitores Fixos com Flange	99
4.2.2	Monitores com Flange por Controle Remoto	100
4.2.3	Monitores Portáteis	101
4.3	ROBÔS SERPENTE	102
4.3.1	Métodos de Locomoção Utilizados pelas Serpentes	104
4.3.1.1	Ondulação Lateral	104
4.3.1.2	Concertina	104
4.3.1.3	Sidewinding	105
4.3.1.4	Retilínea.....	105
4.3.2	Classificação dos Robôs Serpentes	106
4.3.3	Arquiteturas de Controle dos Robôs Serpentes.....	106
4.3.3.1	Arquitetura baseada em seno	106
4.3.3.2	Arquitetura baseada em modelos.....	107
4.3.3.3	Arquitetura baseada em CPG (Gerador de Padrão Central).....	107
4.3.4	Estudos Realizados com Movimentação de Serpentes.....	108
4.4	DIMENSIONAMENTO DO ROBÔ PROPOSTO (ROBOTFIRE)	115
4.4.1	Estimativa da Perda de Carga	115
4.4.2	Perdas Distribuídas: Fator de Atrito	116
4.4.2.1	Número de Reynolds	117
4.4.2.2	Escoamento Laminar	118
4.4.2.3	Escoamento turbulento.....	118
4.4.3	Perdas localizadas	120
4.4.4	Estimativa da Perda de Carga no Sistema Proposto	121
4.4.5	Estimativa da Distância e Altura Alcançada Pelo Jato de Água	126
4.4.6	Estabilidade do Veículo.....	129
5	CONCLUSÕES.....	132
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Robô de combate a incêndios FireRob (American Crane & Equipment Corporation).....	4
Figura 1.2 Robô SACI (ARMTEC).....	5
Figura 1.3 Anna Konda “The Fire Fighting Snake Robot” (LILJEBÄCK, 2005).....	5
Figura 2.1 Reportagem no jornal Irish Independent do 14 de fevereiro de 1981	11
Figura 2.2 Sinistro do incêndio no Bradford City 11 de maio de 1985. Fotografia: PA.	11
Figura 2.3 Triângulo do fogo.....	13
Figura 2.4 Apresentações da água para efeitos de extinção de incêndios (BAPTISTA, 2007).....	25
Figura 2.5 Extintor de Água – Tipo Unidade de Gas (WARREN, 1997).....	26
Figura 2.6 Combate com espumas extintoras do tipo AFFF do maior incêndio ocorrido no Brasil em reservatórios de combustível - Replan, em Janeiro de 1993 (FIGUEREDO & RIBEIRO <i>et al.</i> , 1999).	30
Figura 2.7 Extintor de Espuma – Tipo Unidade de Gas (WARREN, 1997).....	31
Figura 3.1 The Raibert Hopper (RAIBERT, 1986).....	38
Figura 3.2 Robô humanóide WABIAN-RV da Universidade Waseda do Japão.....	39
Figura 3.3 Tipos de rodas básicas. (a) Roda padrão. (b) Roda louca. (c) Roda Sueca. (d) Roda esférica.	41
Figura 3.4 O robô doméstico Cye construído por Aethon Inc. (BATAVIA & NOURBAKHS, 2000).	46
Figura 3.5 Robô Uranus (BLACKWELL, 1990).	47
Figura 3.6 (a) O Camarão. (b) O Polvo.	48
Figura 3.7 Coordenadas globais e locais de referencia do robô.	51
Figura 3.8 Robô móvel com $\theta = \frac{\pi}{2}$	52
Figura 3.9 Robô dirigido-diferencial nas coordenadas de referência globais.....	53
Figura 3.10 Parâmetros da roda padrão fixa.	55
Figura 3.11 Parâmetros da roda padrão dirigida.	57
Figura 3.12 Parâmetros da roda louca (castor).	58
Figura 3.13 Parâmetros da roda sueca.	59
Figura 3.14 Parâmetros da roda esférica.	60
Figura 3.15 (a) Carro de quatro rodas com direção Ackerman. (b) Bicicleta.	65

Figura 3.16 (a) Robô diferencial-dirigido com duas rodas individualmente motorizadas e uma roda louca. (b) Triciclo com duas rodas padrão fixas e uma roda padrão dirigida.	66
Figura 3.17 Os cinco tipos básicos de configuração de três rodas, as rodas esféricas podem ser substituídas por rodas loucas ou suecas sem influenciar na manobrabilidade(SIEGWART & NOURBAKHS, 2004).	70
Figura 3.18 Exemplo de uma trajetória com um robô omnidirecional.	74
Figura 3.19 Exemplo da trajetória do robô similar à Figura 3.18 com duas rodas dirigidas.	76
Figura 3.20 Telefonia celular: um exemplo de sistema em tempo real.	78
Figura 3.21 Conjuntos fuzzy para o erro	87
Figura 3.22 Conjuntos fuzzy para o diferencial de erro	88
Figura 3.23 Fluxograma do algoritmo de controle fuzzy proposto.....	90
Figura 3.24 Tempos de fuzzificação no DSP.	91
Figura 3.25 Tempos de inferência fuzzy no DSP	91
Figura 3.26 Tempo de defuzzificação no DSP	91
Figura 3.27 Fator de PWM em Visual DSP++	92
Figura 3.28 Fator de PWM em Matlab.....	92
Figura 3.29 Fator de PWM em C++.....	93
Figura 3.30 Comparação de Matlab vs Visual DSP++	93
Figura 3.31 Comparação C++ vs Visual DSP++	94
Figura 3.32 Histograma Matlab vs DSP++	94
Figura 3.33 Histograma C++ vs DSP++	95
Figura 4.1 As mangueiras de incêndio devem atender a marca de conformidade ABNT, o que significa atender totalmente a norma NBR 11861.	97
Figura 4.2 Canhão monitor fixo (boletim técnico – Mecânica Reunida, Indústria Brasileira).....	100
Figura 4.3 Canhão monitor com controle remoto (KIDDE).....	101
Figura 4.4 Canhão monitor portátil (SECUR).	102
Figura 4.5 Locomoção ondulação lateral (DOWLING, 1997).....	104
Figura 4.6 Locomoção concertina (DOWLING, 1997).....	105
Figura 4.7 Locomoção sidewinding (DOWLING, 1997).....	105
Figura 4.8 Locomoção retilínea (DOWLING, 1997).....	106
Figura 4.9 Mecanismo de Corda Ativa (ACM-R3) (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002).	109
Figura 4.10 Robô serpente anfíbio (HELIX-I) (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002).	109
Figura 4.11 Robô serpente de YAMAKITA e YAMADA <i>et al.</i> (2003).	110

Figura 4.12 Robô serpente modular com cinco segmentos (LILJEBÄCK & STAVDAHL <i>et al.</i> , 2005).....	110
Figura 4.13 Robô serpente modular (a) Segmento da serpente (b) Robô ajustado mecanicamente (LILJEBÄCK & STAVDAHL <i>et al.</i> , 2005).....	111
Figura 4.14 Princípio de atuação (LILJEBÄCK & STAVDAHL <i>et al.</i> , 2005).	111
Figura 4.15 Protótipo de RAI e KANG com ferramentas LEGO (RAI & KANG, 2005).	112
Figura 4.16 AmphiBot I (CRESPI & BADERTSCHER <i>et al.</i> , 2005).....	112
Figura 4.17 AmphiBot I (CRESPI & BADERTSCHER <i>et al.</i> , 2005).....	112
Figura 4.18 A Anna Konda “The fire fighting snake robot” (LILJEBÄCK, 2005).	113
Figura 4.19 A Anna Konda “The fire fighting snake robot”.	113
Figura 4.20 Robô serpente ANA-II.	114
Figura 4.21 Robô serpente 4N.	114
Figura 4.22 AmphiBot II (CRESPI & IJSPEERT, 2006).....	115
Figura 4.23 Robô contra incêndios – RobotFire.	121
Figura 4.24 Partes do RobotFire para estimativa de perda de carga.	122
Figura 4.25 Gráfico de perda de carga para canhão monitor (Fabricante: Mecânica Reunida).	125
Figura 4.26 Diagrama de corpo livre do RobotFire, quando o jato está direcionado para frente.....	129
Figura 4.27 Diagrama de corpo livre do RobotFire, quando o jato está direcionado para o lado.	130
Figura 4.28 Diagrama de corpo livre em um plano inclinado do RobotFire.....	131

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação dos Líquidos - NFPA.....	15
Tabela 2.2 Alguns compostos comuns e seus pontos de fulgor	16
Tabela 2.3 Alguns pictogramas de classes de incêndios.....	18
Tabela 2.4 Normas Técnicas NBR.	18
Tabela 2.5 Extintores apropriados para cada tipo de incêndio.....	33
Tabela 3.1 Configurações das rodas.....	43
Tabela 3.2 Valores máximos e mínimos do erro e do diferencial de erro.	87
Tabela 3.3 Regras de inferência fuzzy	89
Tabela 3.4 Comparação de tempos de amostragem	95
Tabela 4.1 Pressão para os tipos de mangueiras.	99
Tabela 4.2 Perda de carga em mangueira de incêndio por 15 m.....	121
Tabela 4.3 Interpolação para cálculo de perda de carga em mangueira.	122
Tabela 4.4 Perda de carga para todos os elementos do sistema.	126

1 INTRODUÇÃO

A robótica é uma disciplina científica multidisciplinar em torno da qual outras áreas têm tido desenvolvimentos específicos expressivos. O crescimento, diversidade das suas aplicações e o interesse que cada vez mais grupos de pesquisa revelam nesta área; sugerem cada vez mais a importância desta disciplina em domínios como dos sistemas produtivos e de serviços. As aplicações da robótica vão desde a substituição do homem em tarefas repetitivas, não interessantes, susceptíveis a erro, degradantes ou sub-utilizadoras das suas capacidades e sensibilidade, até as associadas à assistência de pessoas inválidas ou idosas e vigilância ou operação em ambientes hostis (ambientes radioativos, ambientes de elevadas temperaturas, zonas profundas dos mares, no espaço, etc.).

Nos últimos anos, tem se registrado um crescente interesse na pesquisa de robôs móveis devido ao alto número de aplicações remotas que se podem desenvolver com eles, sobretudo, em zonas de alto risco para o ser humano. A importância dos robôs móveis deriva-se, na maior parte, do alto grau de desenvolvimento alcançado nas áreas dos mecanismos e sensores (TAVERA & DUTRA *et al.*, 2007). Com isto se tem alcançado a implementação de sistemas com um alto grau de interação com o meio, fazendo com que os robôs capturem uma descrição mais real do ambiente ao seu redor, tais como a captura de amostras, análises do meio, detecção de gases e fogo, inclusive, sinais de vídeo para que o observador não se exponha. Com todas essas vantagens, os robôs móveis podem realizar suas tarefas com maior exatidão, por isto o desenvolvimento de metodologias de controle assim como a implementação de novos protótipos é de extrema importância.

Dispositivos robóticos têm sido desenvolvidos com várias configurações e objetivos, sendo os mais comuns, sem dúvida, os manipuladores robóticos, que possuem grande popularidade nas linhas de montagem de automóveis, por exemplo. Estes manipuladores de base fixa são, no entanto, limitados ao seu volume de trabalho especificado (TAVERA & NINO *et al.*, 2007). Devido a estas limitações, os robôs móveis começam a serem desenvolvidos e usados para diversos campos, por exemplo, em ambientes industriais para transporte de "peças" entre as estações de fabricação e de armazenagem.

Um robô móvel consiste em uma plataforma móvel, sobre a qual é integrada, de forma inteligente, percepção e ação sobre o ambiente que o circunvizinha. A "ação" guia e controla o robô durante o seu movimento. A "percepção" recolhe os dados dos

sensores, interpreta-os de modo a melhorar a compreensão do ambiente e propõe "ações".

Uma grande aspiração de nossa sociedade é a aplicação de sistemas robóticos substituindo atividades que coloquem em risco a vida humana, em atividades onde a atuação de humanos é deficiente ou onde a atuação humana de certa forma é ineficiente. A tarefa de monitoração e combate de incêndios é um caso onde a aplicação de um sistema mecatrônico (TAVERA & LENGGERKE *et al.*, 2007) poderia diminuir consideravelmente os prejuízos humanos, materiais e ambientais. Visto em um caso, há um prédio em chamas e em sua volta, bombeiros se sacrificam frente ao calor escaldante para segurar as mangueiras de alta pressão que lançam água ou espuma sobre o fogo. Apesar do sacrifício e dos riscos que se expõem muitas vezes eles não conseguem chegar perto o suficiente para que o combate ao fogo seja tão eficaz como eles gostariam que fosse. Nesse âmbito surge toda uma gama de equipamentos que se conhece hoje, tais como roupas isolantes especiais, mangueiras, caminhões pipa, canhões monitores, alarmes, sprinkler, extintores portáteis, etc.

O fogo é um fenômeno natural que ajudou a dar forma à distribuição da espécie, contribuindo à persistência de espécies dependentes do fogo e ajudando à evolução natural dos ecossistemas. Na Europa, por exemplo, somente 5% de fogos de floresta são de causas naturais. Frequentemente estes fogos causam danos irreversíveis aos ecossistemas naturais frágeis e aos recursos humanos. Os fogos são também uma fonte de emissões na atmosfera, e causam a perda de dissipadores extensivos em florestas tropicais e boreais. Embora o impacto do fogo ao redor do mundo seja grande, a informação disponível sobre fogo e os efeitos nas escalas globais e regionais é muito limitada. A necessidade para a descoberta de fogo adiantada varia de acordo a fatores numerosos; fogos naturais que podem ser considerados uma alteração vital de um ecossistema não precisam ser extinguidos; só são extinguidos quando forem considerados uma ameaça aos recursos humanos.

O fogo é útil somente quando há controle sobre ele, por conseguinte é importante permanecer afastado quando há um fogo de emergência.

1.1 ESTADO DA TÉCNICA

Estudos avançados de pesquisadores fazem parte importante deste tema que envolve perdas de vidas humanas. Sendo esta área uma ciência tão ampla, muitas pesquisas em entorno dela tem sido desenvolvidas; como algumas enfocadas ao

monitoramento para a descoberta distintiva que criam detectores de fogo limitando os alarmes desnecessários (PFISTER 1997, MILKE 1999 e SAN-MIGUEL-AYANZ & RAVAIL *et al.*, 2005). Em todas estas pequenas áreas que contribuem ao desenvolvimento de técnicas avançadas para combate a incêndios, os progressos significativos vão sendo apresentados ao passar dos anos dando melhoria aos protótipos e as pesquisas (MILKE & HULCHER *et al.*, 2003) e também a implementações de sistemas inteligentes que usam por exemplo, redes neurais probabilísticas para a detecção de fogo (ROSE-PEHRSSON & HART *et al.*, 2003) e técnicas fuzzy para formar parte da ferramenta de avaliação de segurança para edifícios existentes (LO, 1999). Alguns autores estão preocupados com sistemas remotos para a detecção de fogo ativa e sensoriamento (SAN-MIGUEL-AYANZ & RAVAIL *et al.*, 2005) e utilização de sinais de sensores enfocadas na análise do fogo (DAVIS & CLEARY *et al.*, 2003). Outros trabalhos são mais específicos para incêndios em ambientes determinados, mas podem ser de ajuda em aspectos gerais na construção da presente pesquisa (ZHANG & CASSELLS *et al.*, 1999).

Na literatura encontram-se diversos estudos na área, desde patentes (BABA & INO *et al.*, 2007) até modelos capazes de monitorar, controlar e combater certos tipos de incêndios. O robô de FERNANDO e EKANAYAKE *et al.* (2006) é um robô autônomo que tem a capacidade de localizar o fogo num ambiente estruturado; quando um fogo de emergência existir, será localizado pela rede de sensores térmicos instalados, e as coordenadas do ponto de fogo serão passadas imediatamente ao robô e ao sistema de monitoração central. Achado o ponto, a alarma e as saídas de emergência serão ativadas.

De igual forma, o interesse na pesquisa do fogo motivou diversos concursos, onde se obtiveram projetos enfocados na extinção de incêndios como:

O projeto “Daisy” de ZHOU e WILKINS *et al.* (1998), é um robô de combate a incêndio que foi desenvolvido para cumprir as exigências do curso de robótica na Universidade de Mississippi; o robô navega próximo aos obstáculos até detectar o fogo simulado por velas de aniversário e extingui-lo.

O projeto “Robocateptl” de GUERRERO e MORALES *et al.* (2002) é um robô móvel que consegue movimentar-se autonomamente em um ambiente semelhante a um quarto de uma casa, tendo como tarefa principal achar uma vela acesa e extingui-la; simulando o funcionamento de um robô em um incêndio. O “Robocateptl” participou no concurso de robôs móveis “FIRE-FIGHTING HOME ROBOT CONTEST” celebrado em Trinity College nos Estados Unidos (VERNER & AHLGREN, 2002).

O “Firebot” de MILLER e RODRIGUEZ *et al.* (2003), o robô de DUBEL e GONGORA *et al.* (2003) e o trabalho de REINHART e KHANDWALA *et al.* (2003);

participaram da competição de Hardware da IEEE SOUTHEASTCON, que testa as mentes dos estudantes com o desafio de extinguir um fogo situado em uma casa simulada, cobrindo-o com um copo. O fogo é simulado por uns leds vermelhos escondidos em algum lugar dentro da casa. A estratégia é a autonomia completa, baixo custo e algoritmos de navegação ótimos.

No nível de extinção de incêndios reais, a tecnologia existente está bastante avançada, enquanto a equipamento para a utilização dos bombeiros que são freqüentemente confrontados com perigos próprios da profissão, como o desmoronamento de edifícios e fumaça entre outros; o que desenvolve uma ameaça constante para a vida, conseqüentemente, a melhor coisa a fazer é manter uma distância segura utilizando veículos autônomos ou de controle remoto. Estes tipos de veículos atualmente são pouco desenvolvidos devido a sua limitação de tecnologia. Um deles é o robô de controle remoto contra incêndios FIREROB¹ desenvolvido pela firma American Crane (**Figura 1.1**), capaz de combater fogos em fábricas e túneis, como também pode procurar áreas onde há risco de explosão ou de colapso estrutural. Para operações em condições de tensão térmica alta, o FIREROB pode ser montado com um protetor de calor especial testado em temperaturas de até 1250 graus Celsius. O sistema pode ser usado no combate ao fogo direto com os extintores de alta pressão de névoa de água e monitorando, observando com câmeras e sensores térmicos.



Figura 1.1 Robô de combate a incêndios FireRob (American Crane & Equipment Corporation).

Outro sistema conhecido no Brasil é o Robô SACI (Sistema de Apoio ao Combate de Incidentes) desenvolvido em 2004 (**Figura 1.2**), é um robô controlado a distância, que transporta um canhão monitor de combate a incêndio, capaz de gerar névoa, jato sólido ou espuma. Atuando até 120 m do operador (como o jato sólido

¹ ACECO – American Crane & Equipment Corporation – É uma empresa reconhecida internacionalmente na manipulação de materiais, localizada na Pensilvânia (USA). <http://www.americancrane.com/Telerob/Firerob.htm>

alcança, pelo menos 60 m de distância, equivale a dizer que o brigadista poderá ficar até a 180 m do incidente).



Figura 1.2 Robô SACI (ARMTEC).

Atualmente, se encontra em desenvolvimento na Noruega um sistema robotizado por SINTEF chamado Anna Konda “The fire fighting snake robot” (LILJEBÄCK, 2005), que é o primeiro robô serpente hidráulico já construído (**Figura 1.3**). O sistema tem um comprimento de 3 m e pesa 70 Kg e as articulações são movimentadas por um total de vinte cilindros hidráulicos de água, cada módulo é equipado com duas válvulas para controlar a pressão aplicada aos cilindros. Este equipamento pode subir escadas e entrar em um carro. Os projetistas projetaram este robô para substituir os humanos no combate de incêndios quando é muito perigoso para eles, também poderia ser usado para operações submarinas ou prevenção de explosões.



Figura 1.3 Anna Konda “The Fire Fighting Snake Robot” (LILJEBÄCK, 2005).

1.2 MOTIVAÇÕES

Segundo BANGASH e BANGASH (2006) o maior causador de perdas de vidas e de propriedades em todo o mundo é o fogo, além disto, os incêndios podem destruir instalações completas e com elas, fontes de trabalho prejudicando trabalhadores e a economia do país. O combate de incêndios e salvamento é reconhecido como uma missão arriscada, situação que os bombeiros enfrentam perigosamente quando estão extinguindo fogos e salvando as vítimas; sendo uma parte inerente a esta profissão. Em contraste, um robô pode funcionar autonomamente ou ser controlado de uma distância segura para se executar atividades de salvamento sem pôr em risco a vida dos bombeiros. Em outras palavras, os robôs diminuem a necessidade dos bombeiros se exporem a algumas situações perigosas, reduzindo os perigos a que eles estão expostos. Segundo AMANO (2002), pode-se dizer que o primeiro salvamento do corpo de bombeiros é a própria vida do bombeiro.

Nesta dissertação é proposto o projeto conceitual de um robô de combate a incêndio para o aumento da segurança dos bombeiros, salvamento de um maior número de pessoas e a extinção de incêndios com características hostis, como fumaça, temperaturas elevadas, ambientes fechados, produtos químicos, radiativos, etc., utilizando os avanços alcançados pelos robôs móveis dotados da tecnologia de canhões monitores automatizados, que tem como principal vantagem a maior acessibilidade ao foco do incêndio, quando comparado a um bombeiro.

1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é organizada por capítulos, cada capítulo descreve o estudo da técnica sobre uma percepção que pode ser orientada em diversas pesquisas que surgem através dos estudos de cada um destes sub-campos da robótica, dando como resultado um aporte de novas tecnologias e aplicações da robótica móvel no combate a incêndios.

No capítulo 2 é apresentado um estudo detalhado dos princípios necessários para entender a problemática dos incêndios na engenharia. São apresentados ainda as classes de incêndios, os métodos e agentes extintores existentes e as formas de propagação de calor.

No capítulo 3 é apresentado o estudo de robôs móveis, dotados de pernas e rodas. Também é apresentada a configuração escolhida e a cinemática do robô levando em conta as restrições cinemáticas impostas nos diferentes tipos de rodas

passando por o conceito de robô holonômico. No final do capítulo, é implementada a lógica fuzzy para o controle de motores.

No capítulo 4 é apresentado um estudo de mecanismos robotizados para jateamento de água, levando em conta alguns estudos já feitos na área e a experiência do Corpo de Bombeiros. Para finalizar, este capítulo e levando em conta todo o estudo realizado nos capítulos anteriores, são apresentados cálculos de perda de carga, visando obter uma pressão de saída, determinar a estabilidade do veículo e o alcance do projeto proposto.

2 PRINCÍPIOS DOS INCÊNDIOS NA ENGENHARIA

Perde-se na memória do tempo, a origem do combate ao fogo. Das mais remotas lembranças, sabe-se que no ano 27 antes de Cristo, em Roma, já existiam os “Triunviri Nocturni”, grupos organizados com o objetivo de combater incêndios. Marco Pólo relatava de sua viagem à China, que os bombeiros sufocavam os incêndios de uma forma eficaz e surpreendente. Não utilizavam água contra o fogo, mas se dedicavam a demolir as construções vizinhas, deixando que apenas a casa incendiada acabasse destruída, impedindo a propagação das chamas. A evolução técnica, o aperfeiçoamento dos equipamentos, a utilização de bombas mecânicas, manuais e motorizadas, a substituição dos baldes de pano por mangueiras de tecido, os caminhões tanque, as autobombas, as escadas Magirus e as roupas especiais que permitem o acesso de bombeiros a locais em chamas, tudo isto se deve às maravilhas da revolução industrial, de 1760 aos nossos dias².

No entanto, apesar de toda a tecnologia de combate ao incêndio empregada no mundo, este fenômeno ainda é motivo de preocupação. Sabe-se que o maior número de mortes ocorridas em uma situação de incêndio, não é propriamente em virtude do fogo. Na maioria dos casos, há inalação da fumaça por parte dos ocupantes, o que resulta na morte dos mesmos. Quando não há mais a possibilidade de se salvar vidas, o foco principal a que se destina o combate às chamas, é a preservação do patrimônio.

Como qualquer processo, o fogo pode existir de diversas formas nas quais envolvem reação química entre espécies de combustíveis e o oxigênio do ar. Corretamente aproveitado, o fogo evidencia grande benefício como fonte de poder e de calor para satisfazer as necessidades industriais e domésticas, mas incontrolado, pode causar danos materiais consideráveis e sofrimento humano. Por isto, pode ser dito que um estudo de dinâmica de fogo é essencial ao Engenheiro de Proteção de fogo, como o estudo da química é para o engenheiro químico (DRYSDALE, 1999).

Para poder interpretar fenômenos do fogo, é requerida uma compreensão de ramos da física, como dinâmica dos fluidos e transferência de calor, sendo a condução, a convecção e a radiação, mecanismos básicos para transferência de calor.

A condução determina a taxa de fluxo de calor através dos sólidos sendo importante em problemas relativos à ignição, à propagação da chama em sólidos combustíveis e à resistência do fogo. A palavra “ignição” só é significativa quando está

² Informação disponível no Site do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, <http://www.cbmerj.rj.gov.br/>

aplicada às substâncias que podem propagar uma combustão própria ou uma onda de decomposição exotérmica; a ignição então, pode ser definida como o processo pelo qual tal propagação é iniciada. A ignição acontece quando a taxa de geração de calor em algum volume excede a taxa de dissipação, o que ocasiona que a temperatura aumente (ECKHOFF, 1999).

A convecção está associada com a transferência de calor, entre um gás ou um líquido com um sólido e envolve o movimento do fluido no meio. Acontece em todas as fases do fogo. Em fogos naturais, o movimento de gases associado com este mecanismo de transferência de calor é determinado por fluuabilidade, que também influencia a forma e o comportamento das chamas de difusão.

Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor radioativa não requer nenhum meio de intervenção entre a fonte de calor e o receptor. Um exemplo é a transferência de energia por ondas eletromagnéticas que é a luz visível. A radiação em todas as partes do espectro eletromagnético pode ser absorvida, transmitida ou refletida a uma superfície, e todo objeto opaco colocado em um caminho molda uma sombra. Uma quantidade significativa de calor liberada pelas chamas é transmitida através da radiação aos arredores. O efeito de radiação térmica pelas chamas ou de qualquer objeto aquecido em superfícies próximas, pode ser examinado realizando uma análise detalhada de transferência de calor. Tal análise é requerida para estabelecer a velocidade com que os materiais combustíveis, que são expostos à radiação térmica, alcançam o estado em que podem ser inflamados e queimados.

Por outro lado, os regulamentos de segurança do fogo podem ter impacto principal nos aspectos do projeto total na área das construções, inclusive planos, estéticas, função e custo. Alguns desenvolvimentos em tecnologia moderna de edifícios nas últimas décadas, resultaram em estruturas não convencionais e soluções de projeto. O tamanho físico dos edifícios aumenta continuamente; há uma tendência para construir grandes estacionamentos de carros subterrâneos, armazéns, e shoppings complexos, e é esta nova tendência que introduz novos fatores de risco relativos à expansão de fumaça e fogo. Ao mesmo tempo, vêm sendo desenvolvidos avanços significativos na compreensão de processos de fogo e na inter-relação com os seres humanos, particularmente na área de modelagem analítica de fogo, utilizando estes avanços por engenheiros no processo de projeto na área das construções (KARLSSON & QUINTIERE, 2000).

Cabe ressaltar, que o maior causador de perdas de vidas e de propriedades em todo o mundo é o fogo. Durante décadas passadas o fogo danificou muitas estruturas, é por isto que avanços significativos foram realizados para controlar os efeitos do fogo;

desde materiais novos, métodos para proteger as construções, até boa parte do tempo dos pesquisadores para o desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação do comportamento do fogo (BANGASH & BANGASH, 2006). É por isto, que hoje para a construção de qualquer prédio se têm diversas ferramentas que facilitam o projeto, levando em conta estratégias para a prevenção de desastres.

O fogo é parte de muitos outros perigos que a vida traz, incluindo os da saúde e os naturais, como epidemias, doenças, transportação, acidentes domésticos, terremotos, alagamentos, ciclones, entre outros; mas o fogo é uma necessidade para a sobrevivência do ser humano, desde o cozimento dos alimentos até a impulsão de foguetes para o espaço. O perigo do fogo é a consequência de reações químicas exotérmicas descontroladas, especialmente entre materiais orgânicos e o ar, atingindo temperaturas extremas. Por exemplo, a mistura de propano e ar provocam uma reação de oxidação que se propaga através de uma chama convertendo o hidrocarboneto ao dióxido de carbono e ao vapor de água em temperaturas na faixa de 2000-2500 °k. O fogo surge quando uma fonte de ignição entra em contato com materiais combustíveis em um ambiente propício. A maioria dos fogos é desejada, por ser uma das maneiras mais difundidas de fazer a energia disponível para o uso geral, mas são de interesse neste contexto os que se estendem além do local de origem para causar lesão, dano, despesas ou incômodo.

Uma característica comum em vários desastres é a propagação repentina do fogo aparentemente pequeno e limitado, a um fogo altamente ameaçador e desastroso, como nos seguintes casos de incêndios no mundo:

✓ CENTRO DE LAZER DE SUMMERLAND, ILHA DO HOMEM, 1973.

O fogo aconteceu enquanto um concerto estava em desenvolvimento num andar do edifício, o edifício tinha três áreas extensas de superfícies inflamáveis incorporadas. A causa do incêndio foram crianças que atearam uma cabine plástica, o fogo persistiu por aproximadamente 20 minutos antes que a parede de fibra plástica se queimasse completamente e as chamas se espalharam ao longo do andar em um ou dois minutos. O edifício tinha 3000 pessoas no momento do incêndio e 50 delas foram vitimadas pelo incêndio. O edifício não possuía procedimento de evacuação disciplinado, além disso, e a demora dos pais em encontrarem a seus filhos que estavam em partes diferentes do centro de lazer.

✓ CLUBE DE FOGO DE DANÇA DE STARDUST, DUBLIN, 1981.

Neste caso aproximadamente 800 pessoas estavam no salão de dança e 49 jovens foram vitimados neste incidente (**Figura 2.1**). A ignição foi causada por algum mecanismo dos assentos e as chamas atingiram rapidamente os tapetes e as paredes. Em alguns segundos todos os assentos começaram a queimar, as

chamas e a fumaça se espalharam rapidamente e uma parte do teto desmoronou. O desmoronamento do teto ajudou na diminuição do calor e da fumaça, se não tivesse ocorrido é provável que um número maior de pessoas tivesse morrido.



Figura 2.1 Reportagem no jornal Irish Independent do 14 de fevereiro de 1981

✓ ESTAÇÃO SUBTERRANEA CRUZ DO REI, LONDRES, 1987.

O fogo causou a morte de 31 pessoas, a origem do fogo foi um fósforo aceso que caiu numa abertura de uma escada rolante de madeira, de repente num período de aproximadamente 15 minutos o fogo rapidamente envolveu a parte superior da escada e o material combustível no corredor de superior.

✓ BRADFORD CITY FOOTBALL GROUND, 1985.

No dia 11 de maio de 1985 as 15:40 horas durante uma partida de futebol americano, o fogo começou, nos primeiros minutos de fogo, não houve nenhum esforço por parte dos espectadores de escapar porque o fogo não parecia ser ameaçador. Rapidamente o fogo aumentou a sua intensidade e todos tentavam escapar mas as saídas não foram suficientes para o número de pessoas que tinham que sair em um ou dois minutos fazendo com que 56 pessoas perdessem a vida (VERITY, 1992) (**Figura 2.2**).



Figura 2.2 Sinistro do incêndio no Bradford City 11 de maio de 1985. Fotografia: PA.

✓ BANCO INTERESTADUAL, LOS ANGELES, 1988.

Em Quarta-feira, 4 de maio e continuando em 5 de maio de 1988 o fogo se espalhou pelo chão do edifício até o pavimento, o fogo destruiu 4 andares e danificou 1, morreu uma pessoa, 35 pessoas e 14 bombeiros ficaram feridos com uma perda de 200 milhões de dólares. O fogo se originou no 12 andar onde tinha mobília modular com numerosos computadores pessoais e terminais, a origem do fogo foi elétrica. Se o fogo tivesse acontecido em horas normais de trabalho, muitas mais vidas teriam estado em risco.

✓ HOTEL DUPONT PRAÇA, PUERTO RICO, 1986.

No dia 31 de dezembro de 1986, o fogo causou a morte de 97 pessoas, 140 feridos e perdas de patrimônio que chegaram a milhões de dólares no Hotel Dupont Praça em Porto Rico, o hotel tinha salão de baile, cassino, lojas, restaurantes e 423 quartos. O corpo de bombeiros chegou aproximadamente 5 minutos depois da notificação de fogo, mas levou quase cinco horas para a extinção por causa da magnitude do fogo e a complexidade dos problemas de salvamento. O fogo foi descoberto aproximadamente às 15:22 horas na parte sul do salão de baile que estava desocupado; o corpo de bombeiros foi notificado aproximadamente 15:45 horas. O fogo se desenvolveu depressa depois da ignição, envolvendo materiais armazenados, papelão, madeira, paredes atapetadas, cadeiras empilhadas e uma divisória combustível que separava o salão de baile da parte sul onde o fogo começou da parte norte.

✓ NO BRASIL.

Na década de 70, ocorreram três grandes incêndios, sendo um deles no edifício Andraus, em fevereiro de 1972, com 16 mortes e 329 feridos, depois no edifício Joelma, em fevereiro de 1974, com 189 mortes e 320 feridos, ambos localizados na cidade de São Paulo e o terceiro no edifício da Caixa Econômica Federal, no Rio de Janeiro, em janeiro de 74, sem mortes. Em fevereiro de 1981, ocorreu outro incêndio na cidade de São Paulo, no edifício Grande Avenida, ocasionando 17 vítimas fatais e 53 feridos. Posterior a esta tragédia, em fevereiro de 1986, na cidade do Rio de Janeiro, o edifício Andorinhas pegou fogo deixando 20 mortes e 50 feridos. Ainda nessa década, o edifício CESP, em maio de 1987, na cidade de São Paulo, após incendiar, teve sua estrutura colapsada com desabamento parcial da mesma. Na cidade do Rio de Janeiro, houve três incêndios onde não foram notificadas mortes, porém a perda patrimonial foi notável. O primeiro em fevereiro de 1998, no aeroporto Santos Dumont, em seguida, em fevereiro de 2002, o edifício do Ministério do Trabalho e em fevereiro de 2004, no edifício da

Eletróbrás, no centro da cidade. Recentemente, o voo TAM 3054 do dia 17 de julho de 2007, chocou-se causando um grande incêndio no prédio da empresa TAM Express situado nas proximidades da cabeceira da pista do Aeroporto de Congonhas, do lado oposto da Avenida Washington Luís, São Paulo. A bordo do avião acidentado estavam 187 pessoas: 181 passageiros, 19 dos quais eram funcionários da TAM, e seis membros da tripulação. Todas as pessoas a bordo da aeronave morreram na colisão, e, incluindo as pessoas que não estavam a bordo, o número total de vítimas fatais do acidente foram 199.

Nos casos anteriores, se pode observar que a medida que o fogo aumenta, o ponto de ignição pode envolver uma área maior de material combustível, conseqüentemente aumentaram ainda mais o incêndio. Em uma área fechada, o desenvolvimento de incêndios pode atingir um determinado tamanho crítico capaz de produzir temperaturas altas (tipicamente $> 6000\text{ }^{\circ}\text{C}$) no nível do teto. Por estas razões, as características de excesso de propagação de chamas dos materiais combustíveis devem ser examinadas como um componente básico do crescimento do fogo (DRYSDALE, 1999). A taxa de expansão pode depender como muitas outras, das propriedades físicas de um material e sua composição química. Embora o fogo ameace a vida e as propriedades; é importante obter um equilíbrio entre o perigo e o benefício deste recurso (RASBASH & RAMACHANDRAN *et al.*, 2004).

2.1 CLASSES DE INCÊNDIOS

O fogo, ao fugir ao controle do homem, recebe o nome de incêndio que é na realidade um processo de combustão, ou seja, a combinação do combustível com o calor e o oxigênio do ar atmosférico (comburente) dando lugar à oxidação (combinação química com oxigênio do ar atmosférico) que se desenvolve com elevada velocidade com emissão de luz, calor e fumaça. Uma melhor representação gráfica do processo de combustão é dada pelo triângulo do fogo na **Figura 2.3** (AMYOTTE & KHAN *et al.*, 2003).



Figura 2.3 Triângulo do fogo

Para que ocorra a combustão, o combustível, o comburente e o calor, devem manter-se na mesma proporção, uma vez que uma menor quantidade de um desses elementos ou até a inexistência de um deles, faz com que a combustão não ocorra. Esta descoberta foi feita por Antoine Laurent Lavoisier em 1783, quando ao mesmo tempo conseguiu provar a conexão química entre o oxigênio e o fogo. Ao ser o combustível submetido a uma fonte de calor, que seja proveniente de uma chama, atrito, eletricidade, reação química e outros, são liberados vapores do combustível, e estes se combinam com o oxigênio do ar atmosférico, após seu craqueamento (quebra das moléculas em menores partes), conseqüentemente o processo dará lugar a uma série de reações químicas que caracterizarão a reação de cadeia, liberando quantidades cada vez maiores de calor, e esta realimenta todo o processo de combustão.

A continuação são apresentadas as classes de incêndios que são de certa forma diretamente ligadas ao tipo de combustível (BAPTISTA, 2007).

2.1.1 Classe A

São aqueles cujo combustível queima na superfície e profundidade, deixando resíduos sólidos após a queima (cinzas). São os mais freqüentes, e por queimarem em profundidade, requerem um rescaldo bastante cuidadoso. Como exemplos, poderíamos citar os combustíveis sólidos (madeira, papel, palha, tecido, algodão, etc.).

2.1.2 Classe B

São aqueles que queimam apenas na superfície, como por exemplo, os líquidos inflamáveis (gasolina, álcool, querosene, óleo diesel, tintas, etc.), os gases inflamáveis (acetileno, gás liquefeito de petróleo - GLP, etc.) e os colóides (combustíveis pastosos, como graxas, etc.). Esta classe de incêndio se caracteriza pela liberação de energia térmica em altas quantidades quando comparadas ao mesmo volume de um produto Classe A.

De acordo com a NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA), os líquidos podem ser classificados como inflamáveis ou combustíveis. Líquido inflamável é todo o líquido cujo ponto de fulgor é menor que 37,7°C (100°F) e pode ser

subdividido em subclasses A, B ou C. Enquanto que os líquidos combustíveis são aqueles com o ponto de fulgor superior a 37,7°C, conforme a **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 Classificação dos líquidos segundo a NFPA.

	Classe	Subclasse	Ponto de fulgor	Ponto de ebulição
Líquidos Inflamáveis	I	A	< 22,8 °C	<37,7°C
		B	< 22,8 °C	>37,7°C
		C	> 22,8°C e <37,7°C	
Líquidos Combustíveis	II	-	> 37,7°C e <60°C	-
	III	-	> 60°C	-

2.1.3 Classe C

São os incêndios que ocorrem em aparelhos elétricos energizados. Estes incêndios, após ser retirado o agente energizador, podem ser combatidos como outra classe de incêndio (geralmente classe “A”). Todavia, se deve ter cuidado com aparelhos que possuem acumuladores (capacitores e aparelhos de TV, por exemplo), que mesmo depois de desligados continuam energizados.

2.1.4 Classe D

Composta pela classe dos metais combustíveis os quais queimam a altíssimas temperaturas produzindo uma chama de cor azul-esbranquiçada, como exemplos desta classe estão os seguintes metais: sódio, alumínio, tungstênio, molibdênio, magnésio, entre outros. Nesta classe deve-se evitar o uso de água para a sua extinção sob risco de graves acidentes.

2.1.5 Classe F

Os fogos da classe F são fogos que envolvem a combustão de óleos da arte culinária ou gorduras, os fogos da classe F diferem dos fogos líquidos devido às altas temperaturas envolvidas. Para que qualquer líquido inflamável possa queimar, a temperatura deve exceder o ponto de fulgor (flashpoint). O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um líquido libera vapor ou gás em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável (**Tabela 2.2**). Para que um líquido inflamável acenda

espontaneamente a temperatura de auto ignição necessita ser alcançada (FETA, 2001).

Tabela 2.2 Alguns compostos comuns e seus pontos de fulgor (THOMSON, 2002).

Compostos		Ponto de Fulgor (°C)
Líquidos	Óleo Diesel	+ 40
	Acetona	-17
	Gasolina	-40
	Álcool	10
	Tolueno	4
Sólidos	Madeira de Pino	225
	Polietileno	340

2.1.5.1 Limitações dos extintores que não são da Classe F.

Para extinguir um fogo criado pela auto ignição, devem ser extintas as chamas e a temperatura do líquido ardente deve ser reduzida abaixo da auto ignição. A quantidade de calor envolvida com o líquido a 340°C é alta e o uso de um extintor incorreto pode ser extremamente perigoso. Por exemplo, um extintor de água dirigido num fogo de óleo de cozinha criará uma explosão, a água é rapidamente convertida em vapor de água tendo como resultado a expulsão de óleo ardente. Extintores de espuma convencionais foram testados para extinguir as chamas, mas o calor envolvido destrói rapidamente o cobertor de espuma, expondo a superfície de óleo permitindo a re-ignição. Os extintores de dióxido de carbono e de pó ABC são efetivos em extinguir as chamas, mas sem selar a superfície do líquido do oxigênio, o óleo se re-inflama rapidamente.

Pó convencional, espuma ou CO₂ são extintores demasiado poderosos e podem facilmente espirrar o líquido ardente e espalhar o fogo. Uma descarga rápida e elevada pode ser ideal para o fogo derivado do petróleo, mas é muito perigoso para os fogos que envolvem óleos de cozinha e gorduras.

2.1.5.2 Extintores Classe F

Os extintores projetados para fogos de óleos de cozinha incluem tipicamente “produto químico molhado”, “produto químico seco” ou são espumas baseada em aditivos especiais. Estes materiais especiais reagem com o óleo ardente, criando uma crosta grossa ensaboadada resistente ao calor no alto da superfície do óleo de cozinha, impedindo os vapores inflamáveis de reagir com o oxigênio. Algumas das “espumas baseadas em aditivos especiais” trabalham extinguindo o óleo ardente quente,

cobrindo-o com uma crosta grossa resistente ao calor na superfície e ao mesmo tempo refrigerando o óleo ardente, convertendo água em vapor extinguido de uma maneira controlada. Os aditivos especiais, que são adicionados à mistura básica das espumas “AFFF” (Aqueous Film-Forming Foam), são baseados em nitrogenados derivados e sais de amônio de ácido fosfórico.

Os materiais químicos molhados são baseados tipicamente em sais alcalinas de potássio de citrato, acetato, lactato ou carbonato ou misturas. O potássio ajuda à redução rapidamente da chama enquanto que o acetato ou carbonato providencia os ingredientes para formar a camada de sabão. Os químicos secos são baseados em sódio ou pó de bicarbonato de potássio; o pó reage da mesma maneira que químicos molhados criando uma camada ensaboada. Os tipos de químicos secos têm desvantagem de reduzir a visibilidade e de contaminar a área circunvizinha.

Os cobertores de fogo são apropriados somente para fogos de óleo de cozinha pequenos (até três litros) e requerem do operador para posicionar o cobertor sobre o fogo. Se o operador tenta remover o cobertor arrisca ventilar o fogo. As frituras comerciais de gorduras incluem tipicamente cinqüenta, sessenta ou mais litros de óleo além do espaço para qualquer fogo fértil. Os extintores para fogo de cozinha são geralmente 5F, 15F, 25F, ou 75F dependendo do tamanho do fogo. O número que precede o F denota o número de litros de óleo cozinhando usados para o teste. Os extintores fornecem o benefício do controle para a interrupção e permitem que o operador esteja mais longe do fogo.

2.1.5.3 Norma BS7937:2000

A criação da norma BS7937 levou em consideração não somente o reconhecimento do risco especial na queima de óleo de cozinha, mas também a necessidade de limitar os riscos ao operador. A norma inclui os requisitos de características especiais para reduzir vazamentos, estendendo tempos de descarga mínimos comparados com BS EN3: 1996. Seis litros de extintor de classe F com avaliação de 75F requerem 40 segundos de descarga mínimo comparada com um extintor de água de 6 litros que requer somente 9 segundos de descarga para o cumprimento de BS EN3. Com um ritmo lento de aplicação, é menos provável espirrar óleo ardente. A norma requer também extintores que tenham uma avaliação 15F ou acima para ter um lance rígido de comprimento do mínimo de 400 mm, o que permite que o operador esteja mais longe do fogo. As áreas utilizadas para cozinhar têm muitos dispositivos elétricos conseqüentemente a BS7937 requer que todos os extintores passem no teste dielétrico de 35kv de BS EN3.

Um pictograma para cada classe foi criado para permitir o fácil reconhecimento como se observa na **Tabela 2.3**.

Tabela 2.3 Alguns pictogramas de classes de incêndios.

CLASSE	PICTOGRAMA	CLASSE	PICTOGRAMA
A		C	
B		F	

2.2 CENÁRIO DE NORMAS TÉCNICAS

Na **Tabela 2.4**, estão relacionadas as Normas Brasileiras Regulamentadoras – NBR – referentes a assuntos de proteção e combate a incêndios; sendo indispensável ter conhecimento delas quando se está projetando um robô para estes fins.

Tabela 2.4 Normas Técnicas NBR.

NORMA	DESCRIÇÃO
NBR 5667/80	Hidrantes urbanos de incêndio – Especificação
NBR 6125/92	Chuveiro automático para extinção de incêndio - Método de ensaio
NBR 6135/92	Chuveiro automático para extinção de incêndio – Especificação
NBR 6479/92	Portas e vedadores - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio
NBR 8222/83	Execução de sistemas de proteção contra incêndio em transformadores e reatores de potência, por drenagem e agitação do óleo isolante - Procedimento
NBR 8660/84	Revestimento ao piso - Determinação da densidade crítica de fluxo de energia térmica - Método de ensaio
NBR 9441/98	Execução de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Procedimento
NBR 8674/84	Execução de sistemas fixos automáticos de proteção contra incêndio com água nebulizada para transformadores e reatores de potência - Procedimento
NBR 9442/86	Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio
NBR 9443/02	Extintor de incêndio classe A - Ensaio de fogo em engradado de madeira - Método de ensaio
NBR 9444/02	Extintor de incêndio classe B - Ensaio de fogo em líquido inflamável - Método de ensaio
NBR 9654/97	Indicador de pressão para extintores de incêndio - Especificação
NBR 9695/98	Pó para extinção de incêndio – Especificação
NBR 10636/89	Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo -

	Método de ensaio
NBR 10720/89	Prevenção e proteção contra incêndio em instalações aeroportuárias – Procedimento
NBR 10721/01	Extintores de incêndio com carga de pó
NBR 10897/90	Proteção contra incêndio por chuveiro automático - Procedimento
NBR 10898/99	Sistema de iluminação de emergência - Procedimento
NBR 11711/92	Portas e vedadores corta-fogo com núcleo de madeira para isolamento de riscos em ambientes comerciais e industriais - Especificação
NBR 11715/03	Extintores de incêndio com carga d'água – Especificação
NBR 11716/00	Extintores de incêndio com carga de dióxido de carbono (gás carbônico)
NBR 11742/03	Porta corta-fogo para saída de emergência - Especificação
NBR 11751/03	Extintores de incêndio com carga para espuma mecânica - Especificação
NBR 11762/01	Extintores de incêndio portáteis com carga de halogenado
NBR 11785/97	Barras antipânico – Requisitos
NBR 11830/95	Líquido gerador de espuma de película aquosa (AFFF) a 6% para uso aeronáutico – Especificação
NBR 11836/92	Detectores automáticos de fumaça para proteção contra incêndio - Especificação
NBR 11861/98	Mangueira de incêndio - Requisitos e métodos de ensaio
NBR 12232/92	Execução de sistemas fixos automáticos de proteção contra incêndio com gás carbônico (CO2) por inundação total para transformadores e reatores de potência contendo óleo isolante – Procedimento
NBR 12252/92	Tática de salvamento e combate a incêndios em aeroportos - Procedimento
NBR 12285/92	Proteção contra incêndio em depósitos de combustíveis de aviação - Procedimento
NBR 12615/92	Sistema de combate a incêndio por espuma - Procedimento
NBR 12693/93	Sistemas de proteção por extintores de incêndio - Procedimento
NBR 12779/92	Inspeção, manutenção e cuidados em mangueiras de incêndio – Procedimento.
NBR 12962/98	Inspeção, manutenção e recarga em extintores de incêndio – Procedimento.
NBR 12992/93	Extintor de incêndio classe C - Ensaio de condutividade elétrica - Método de Ensaio.
NBR 13231/94	Proteção contra incêndio em subestações elétricas convencionais, atendidas e não atendidas, de sistemas e transmissão – Procedimento
NBR 13434/95	Sinalização de segurança contra incêndio e pânico - Formas, dimensões e cores Padronização
NBR 13436/95	Líquido gerador de espuma de película aquosa (AFFF) a 3% para uso aeronáutico – Especificação
NBR 13437/95	Símbolos gráficos para sinalização contra incêndio e pânico - Simbologia
NBR 13714/00	Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio
NBR 13792/97	Proteção contra incêndio, por sistema de chuveiros automáticos, para áreas de armazenamento em geral – Procedimento.
NBR 13859/97	Proteção contra incêndio em subestações elétricas de distribuição - Procedimento
NBR 13860/97	Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio
NBR 14023/97	Registro de atividades de bombeiros
NBR 14096/98	Viaturas de combate a incêndio
NBR 14100/98	Proteção contra incêndio - Símbolos gráficos para projeto
NBR 14323/99	Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio
NBR 14349/99	União para mangueira de incêndio - Requisitos e métodos de ensaio
NBR 14432/01	Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações Procedimento
NBR 14870/02	Esguichos de jato regulável para combate a incêndio

2.3 PROPORÇÕES DOS INCÊNDIOS

A proporção de um evento engloba as suas dimensões, a sua intensidade e os meios empregados para a sua extinção. Um incêndio incipiente é um evento de mínimas proporções para o qual é suficiente a utilização de um extintor portátil, um pequeno incêndio é um evento cujas proporções exigem emprego de material especializado, sendo extinto com facilidade e sem apresentar perigo iminente de

propagação, um médio incêndio é definido por um evento em que a área atingida e a sua intensidade exigem a utilização de meios e materiais equivalentes a um socorro básico de incêndio (conjunto de viaturas do Corpo de Bombeiros composta de um Auto Rápido - AR, um Auto Bomba - AB ou ABT, um Auto de Busca e Salvamento - ABS, uma Auto Escada Mecânica - AEM, e um Auto Socorro de Emergência - ASE), apresentando perigo iminente de propagação. Um grande incêndio é um evento cujas proporções apresentam uma propagação crescente, necessitando para a sua extinção, do emprego efetivo de mais de um socorro básico e um incêndio extraordinário é aquele provocado por fenômenos naturais, como abalos sísmicos, vulcões, etc., ou ainda por bombardeios ou similares, atingindo quarteirões, bairros e cidades inteiras (CBMERJ, 2003).

2.4 PROPAGAÇÃO DO CALOR

Chama-se transmissão ou propagação do calor ao processo de transferência de energia, que ocorre exclusivamente em virtude da diferença de temperaturas. Quando um corpo perde ou ganha calor, em geral, ocorre uma mudança no estado de agitação de suas moléculas. Consequentemente há uma variação de temperatura, ou então, mudança na forma de ligação das moléculas do mesmo (sólido torna-se líquido, líquido torna-se vapor etc.). Ao calor trocado (ganho ou perdido) por um corpo e que acarreta mudança de temperatura do mesmo, mas sem mudar a forma de ligação de suas moléculas (sólida, líquida ou gasosa), dá-se o nome de calor sensível. Se houver mudança na forma de ligação das moléculas do corpo (mudança de estado), mas sem mudar a temperatura, o calor trocado é definido como sendo o calor latente.

A continuação será abordado de maneira geral os seguintes mecanismos de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação.

2.4.1 Condução

O calor se propaga de molécula a molécula através de um método direto, como exemplo deste fato, está a situação de uma barra de ferro que ao ser aquecida em uma extremidade após de algum tempo encontrar-se-á aquecida na outra extremidade por condução. Nos gases, a condução de calor é menor que nos corpos sólidos, por exemplo. Isso se explica em virtude da concentração das moléculas constituintes do material. Em materiais sólidos as moléculas estão mais próximas enquanto que em

meios gasosos as mesmas estão mais dispersas umas das outras. A capacidade de condução calorífica da maioria dos materiais aumenta suavemente com o acréscimo da temperatura (SEARS & ZEMANSKY, 1976).

A condutividade térmica (λ_a) é definida por meio da seguinte equação:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda_a \times A_{fc} \times \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (2.1)$$

Onde, $\Delta Q/\Delta t$ é a taxa com que o calor flui através de uma área (W), λ_a é a condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$), A_{fc} a área pela qual há o fluxo de calor (m^2) e $\Delta T/\Delta x$ é a mudança de temperatura por unidade de comprimento ($^{\circ}C/m$). Os materiais que possuem baixa condutividade de temperatura são usualmente empregados como isolantes térmicos.

Em um incêndio o superaquecimento dos pontos superiores de um andar transmitirá por intermédio do piso calor suficiente para reiniciar um incêndio em outro pavimento imediatamente ao lado ou acima do ambiente incendiado.

2.4.2 Radiação

O termo radiação, refere-se à emissão contínua de energia da superfície de todos os corpos. É chamada de energia radiante e tem a forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas propagam-se com a velocidade da luz e são transmitidas através do vácuo ou do ar. Quando atingem um corpo que não lhes é transparente, como por exemplo, as paredes de um compartimento, elas são absorvidas. A energia radiante emitida por uma superfície, por unidade de tempo e de área, depende da natureza e da temperatura do corpo. Medidas experimentais da taxa de emissão de energia radiante da superfície de um corpo foram feitas por John Tyndall (1820-1893) e Josef Stephan (1835-1893), e em 1884, deduções teóricas foram realizadas por L. Boltzmann. Stephan em 1879, concluiu que a taxa de emissão poderia ser expressa pela relação:

$$R = e \times \sigma \times T^4 \quad (2.2)$$

Onde, R é a emitância radiante (W/m^2), e a emissividade da superfície radiante, σ a constante de Stephan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ C^4$) e T é a temperatura da superfície radiante ($^\circ C$). Qualquer superfície que não seja negra terá um poder emissivo menor do que o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura. A razão entre estes dois termos é conhecida como emissividade total, e tem o valor compreendido entre 0 (zero) e 1 (um). Rigorosamente falando, a emissividade varia com a temperatura para uma mesma superfície. Em geral, é maior para superfícies ásperas e menor para as polidas.

De igual forma, uma fonte de elevada energia termo luminosa ao longo do tempo emitindo pacotes de energia aquecera outros materiais sem que haja qualquer contato físico entre ambos. Um exemplo deste fato foram os incêndios secundários gerados do edifício Andraus em São Paulo em 1972, por determinadas vezes lâmpadas de tipo Spot Light deixadas por longo tempo acesas em vitrine causam incêndios por irradiação.

2.4.3 Convecção

O termo convecção aplica-se à transmissão ou transferência de calor de um lugar para outro, pelo deslocamento de material aquecido. O calor perdido ou ganho por uma superfície a uma certa temperatura, em contato com um fluido a outra temperatura, depende de vários fatores, tais como: se a superfície é plana ou curva; se a superfície é horizontal ou vertical; se o fluido em contato com a superfície é um gás ou um líquido; a densidade, a viscosidade, o calor específico e a condutividade térmica do fluido; se a velocidade do fluido é suficientemente pequena para que o escoamento seja laminar, ou grande para que entre em regime turbulento; se ocorre evaporação, condensação ou formação de películas.

O procedimento adotado nos cálculos práticos consiste, inicialmente, em definir um coeficiente de convecção, por meio da seguinte equação:

$$\alpha_c = \frac{H_c}{A \times \Delta temp} \quad (2.3)$$

Onde, α_c é o coeficiente de convecção ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), H_c a corrente térmica de convecção (W), A a área da superfície exposta à troca de calor (m^2) e $\Delta temp$ a diferença de temperaturas entre a superfície e a massa do fluido ($^\circ C$).

Em um incêndio e em virtude dos gases superaquecidos serem mais leves que o ar eles sobem propagando o incêndio para os pontos mais altos do ambiente, no caso de edifícios eles causam o “Efeito Chaminé” que é a propagação de incêndios para os andares superiores via poços de elevadores, dutos de escadas e de ar condicionado.

2.4.4 Propagação do Incêndio em um Compartimento

Para se ter uma idéia melhor, o calor gerado pela combustão acumula-se nas partes superiores do recinto, e ao longo do tempo e de acordo com a densidade da fumaça a mesma vem descendo em direção ao piso de forma estratificada. É importante notar que há duas correntes associadas ao processo de combustão uma delas é a corrente endofocal, ou seja, a corrente de ar que alimenta a combustão e a outra a corrente exofocal, ou seja, a corrente que sai do foco do incêndio, ou seja, a corrente de convecção.

Em um ambiente podemos considerar um plano neutro que é exatamente a metade da altura do compartimento. Acima deste ponto a tendência da fumaça é sair devido a uma diferença de pressão entre o ambiente do incêndio e o ambiente exterior criando uma pressão negativa, depois uma sucção. Abaixo deste ponto neutro há uma alimentação do foco em virtude do gradiente positivo gerado. A compreensão deste fenômeno é imprescindível para se conhecer o mecanismo de propagação dos incêndios.

2.4.5 Propagação de Incêndios em Edifícios

Em um edifício, diversos são os meios de propagação de um incêndio podendo inclusive incluir um quarto elemento, queda de material em combustão, fato ocorrido no incêndio do edifício da Companhia Vale do Rio Doce em 11 de dezembro de 1981 o que fez com que o mesmo se propagasse de cima para abaixo ao contrario da maioria dos incêndios. Um aspecto a ser levado em conta e que está intimamente ligado ao problema de escape das vítimas, é o efeito chaminé quando a fumaça e o calor sobem aos pontos mais altos do edifício. Num exemplo deste caso é o incêndio

do edifício Andorinhas, no Rio de Janeiro em fevereiro de 1986, cerca de quinze pessoas mortas nos últimos pavimentos, uma vez que a porta de acesso ao terraço encontrava-se trancada (BAPTISTA, 2007).

2.5 EXTINÇÃO

Depois que um incêndio tenha começado, a extinção pode ser atingida por uma série de métodos diferentes, principalmente através da remoção do combustível, oxigênio ou calor.

2.5.1 Métodos de Extinção

- ✓ Abafamento: ocorre pela supressão do comburente, ou seja, pela retirada do oxigênio, tal processo pode ocorrer pelo emprego de agentes extintores tipo espuma, pó químico seco (P.Q.S), dióxido de carbono (CO₂) ou água sob a forma de neblina.
- ✓ Isolamento: ocorre pela retirada do combustível ou do seu afastamento da fonte de calor.
- ✓ Resfriamento: ocorre pela redução da temperatura do processo da combustão até níveis que se torna impossível mantê-la. Agentes extintores tais como a água, o dióxido de carbono e a espuma atuam principalmente desta forma.

2.5.2 Agentes Extintores

Os materiais para a extinção de incêndios são componentes de muita importância no equipamento de segurança, utilizados na prevenção da perda de vidas e propriedades causadas pelo fogo. Os extintores de fogo mais comuns utilizados atualmente são: água, pó, espuma e dióxido de carbono (ZHIGANG & KIM *et al.*, 2007). Eles conseguem extinguir um ou dois tipos de fogo, mas o ideal seria encontrar um extintor capaz de controlar eficazmente qualquer um dos tipos de fogo existentes. Por exemplo, os extintores de água são utilizados principalmente para extinguir o fogo associado com a madeira, os tecidos e o papel (Classe A). Os extintores de espuma com uma solução de Aqueous Film-Forming Foam (AFFF), são efetivos para controlar

o fogo classe A e classe B, porém a utilização deste tipo de extintor, devido aos interesses ambientais, esta sendo questionada e esforços estão sendo feitos para outros produtos ambientalmente mais amigáveis. Um extintor de pó seco é usado principalmente contra os incêndios das classes B e C, seu desempenho em fogo de óleo de cozinha não é eficiente pela pobre habilidade de refrigeração. Causa ofuscação quando é utilizado em lugares confinados e os resíduos criam um problema de limpeza. Dióxido de carbono é o inibidor para fogos que envolvem risco elétrico, mas não é usado para extinguir os fogos classe A e os fogos de óleo de cozinha (classe K).

2.5.2.1 Água

A água é a substância mais difundida na natureza, e é o grande agente extintor mais utilizado. A água pode se apresentar sob os três estados físicos da matéria: sólido, líquido, ou gasoso; seja qual for seu estado físico sua constituição química é invariável, sendo sua formula H_2O . Em um combate a incêndio o volume de vapor resultante de sua vaporização pode chegar a relação de 1 para 1600. O vapor de água por possuir uma temperatura consideravelmente inferior (cerca de $150^{\circ}C$), podendo a temperatura do incêndio ser cerca de $950^{\circ}C$, pode ser utilizado como elemento de resfriamento e abafamento em incêndio em ambientes fechados.

A água quimicamente pura não conduz energia elétrica, entretanto a presença de diversos sais em sua composição principalmente os metálicos do tipo ferro, tornam-a altamente condutora oferecendo potencial de risco para aqueles que combatem um incêndio. Este risco é inversamente proporcional à distância, ou seja, quanto mais perto maior o risco, uma vez que a água sob forma de neblina tem uma condutibilidade elétrica menor. Para efeitos de extinção de incêndios a água pode-se apresentar como é observado na **Figura 2.4**:

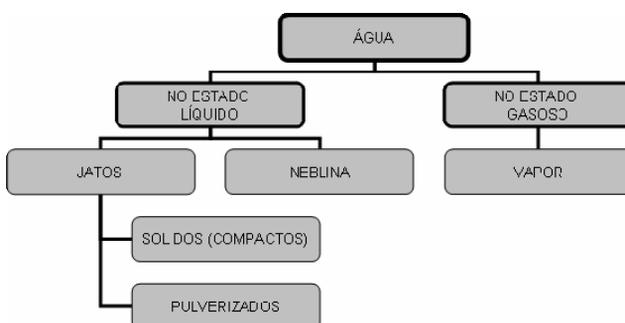


Figura 2.4 Apresentações da água para efeitos de extinção de incêndios (BAPTISTA, 2007).

A água tem sua melhor indicação sob a forma de jato compacto para incêndios de classe A e sob a forma de jatos de neblina ou pulverizados para incêndios classe B, e o vapor uma vez que é difícil a sua produção em quantidade suficiente para a extinção só é utilizado em indústrias e principalmente navios, como agente extintor (BAPTISTA, 2007).

Um equipamento usado atualmente, é um equipamento portátil de cor vermelha que consiste em uma vasilha de metal com 10 litros de água que podem ser dirigidos sobre a base do fogo através de uma mangueira de borracha curta. A água é expelida do extintor operando uma manivela que libera gás de dióxido de carbono de um cartucho que é colocado dentro do extintor. Onde não há nenhuma contra-indicação, tal como instrumentos elétricos ou líquidos orgânicos a água é um bom agente extintor. Recentemente foram produzidos extintores de água que contêm um agente espumante claro conhecido como AFFF que os habilita a serem usados em líquidos inflamáveis e em fogos elétricos; sendo extintores de fogo extremamente eficazes (WARREN, 1997).

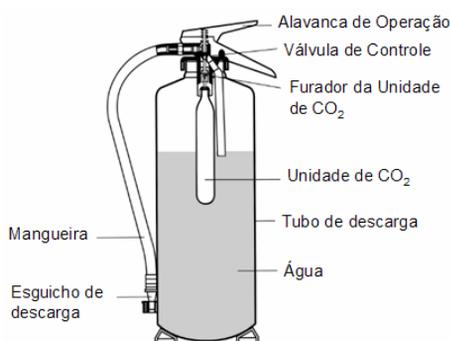


Figura 2.5 Extintor de Água – Tipo Unidade de Gas (WARREN, 1997).

2.5.2.2 Espuma

Desde o ano 1800, a espuma tem sido utilizada como meio para a extinção de incêndios de combustíveis e líquidos inflamáveis. Ao contrário de outros agentes extintores como a água, substância química seca ou CO₂, um cobertor de espuma estável pode extinguir um incêndio de líquido inflamável ou combustível com a separação física da chama de ignição da superfície do combustível, suprimindo desta forma vapores e fumaça. A água se for utilizado na combustão de hidrocarbonetos padrão, é mais pesado do que a maioria de aqueles líquidos e se é aplicado diretamente na superfície do combustível, vai afundar-se sem ter nenhum efeito na extinção ou na supressão do vapor. Se o combustível líquido aquece acima de 100°C, a água pode ferver abaixo da superfície do combustível e jogar o combustível fora da

área contida e espalhar o fogo. Pelo efeito garantido, a espuma é a escolha preliminar para a extinção de fogo em áreas onde líquidos inflamáveis são utilizados, transportados, processados e armazenados.

As espumas são sistemas termodinamicamente instáveis que apresentam uma estrutura tridimensional constituída de células gasosas envolvidas por um filme líquido contínuo. Essa estrutura origina-se do agrupamento de bolhas geradas ao se dispersar um gás em um líquido que contenha agentes espumantes, como surfatantes solúveis ou impurezas. Moléculas do surfatante difundem-se na solução em direção à interface gás-líquido formando uma monocamada adsorvida que estabiliza a bolha de gás e retarda sua rápida coalescência. A destruição das bolhas é termodinamicamente favorável, pois provoca redução da elevada área superficial da espuma e expansão do gás contido nas células e, conseqüentemente, redução da energia livre da espuma. O processo de dispersão do gás pode ser desencadeado por agitação ou batimento do líquido e por borbulhamento do gás no líquido, e influi diretamente sobre as características da espuma. Espumas formam-se também quando há redução de pressão ou aumento de temperatura em soluções supersaturadas de gás (FIGUEREDO & RIBEIRO *et al.*, 1999).

A estrutura particular apresentada pelas espumas garante uma vasta aplicação desse sistema. Espumas produzidas com soluções aquosas são utilizadas em combates a incêndios por apresentarem propriedades que, juntamente com as da água, tornam-nas um eficiente agente extintor. A eficiência da água em incêndios deve-se ao efeito refrigerador provocado pelo seu calor de vaporização, o qual remove calor do processo de combustão e resfria o material em chamas. Outra propriedade extintora está associada à diminuição da concentração de oxigênio do ar pelo vapor de água produzido no combate. Mas a água apresenta algumas limitações, e as espumas extintoras foram desenvolvidas a fim de contorná-las. A alta tensão superficial da água dificulta a molhabilidade da superfície em chamas e a penetração no material e sua baixa viscosidade provoca escoamento rápido pelas superfícies, dificultando a atuação da água sobre elas, principalmente as superfícies verticais. Além disso, os jatos de água podem provocar transbordamento de um líquido em chamas, levando à propagação do incêndio (DAVLETSHINA & CHEREMISINOFF, 1998).

As espumas foram desenvolvidas para se obter melhor aderência ao material em chamas, produzindo um recobrimento contínuo sobre ele. Como apresentam baixa densidade, espalham-se sobre a superfície do material em combustão, abafando-a e isolando-a do contato com o oxigênio atmosférico. Tanto a supressão do vapor comburente como o resfriamento do material em chamas, pelo líquido presente na espuma, previne a re-ignição. Para aperfeiçoar tais características, espuma com

estruturas cada vez mais resistentes e fluidas tem sido obtida para diferentes classes de incêndio, visando-se garantir a rapidez e a segurança do combate.

As espumas utilizadas atualmente em incêndios, chamadas “mecânicas”, são geradas através da introdução de ar, por ação mecânica, em soluções preparadas a partir de líquidos geradores de espuma (LGE). Esses concentrados contêm surfatantes específicos e outros aditivos que conferem alta estabilidade às espumas extintoras. A partir do desenvolvimento da espuma mecânica, mais econômica e de fácil aplicabilidade, o emprego da espuma “química”, largamente utilizada no início do século, tem sido cada vez mais restrito a extintores portáteis. As espumas químicas são densas, viscosas e resistentes ao calor, mas como se espalham lentamente, tem baixo poder de extinção. Estão formadas pela liberação de dióxido de carbono e pela reação entre sulfato de alumínio e bicarbonato de sódio em solução aquosa que contém proteínas hidrolisadas como agentes espumantes.

As primeiras espumas mecânicas foram produzidas a partir de extratos protéicos, para extinções em derivados de petróleo, e surgiram por volta do ano 1937 na Alemanha e na Inglaterra. Os concentrados protéicos são formulados com derivados de cozimento químico e de hidrólise de proteínas naturais, como as encontradas em soja, chifres e cascos de boi. Esses compostos proporcionam elasticidade, resistência mecânica e maior hidratação aos filmes da espuma. Também contém alginatos e pectinas, que estabilizam a espuma e inibem a corrosão e o crescimento de bactérias, sais metálicos e solventes orgânicos, que proporcionam uniformidade à estrutura. A espuma resultante é densa, viscosa e altamente estável, mas a velocidade de espalhamento e de extinção são baixas.

O desenvolvimento de uma espuma de base protéica com maior capacidade de extinção (no caso, velocidade de espalhamento) e compatível com o pó químico, específica para aplicação em derivados de petróleo, ocorreu principalmente na Inglaterra, em 1965. Surgiram os concentrados fluoroprotéicos, de formulação semelhante ao LGE protéico, contendo surfatantes fluorados que melhoram a fluidez da espuma e a resistência à temperatura, propriedades que aumentam a rapidez do combate.

A mais versátil espuma para extinção em líquidos inflamáveis foi desenvolvida em 1962, pela marinha americana, a partir de surfatantes fluorados sintéticos, devido às limitações das espumas de base protéica. Os concentrados, conhecidos como AFFF (aqueous film-forming foam), produzem espumas que formam um fino filme aquoso sobre a superfície em chamas, o qual é resultante do processo de drenagem e tem a propriedade de espalhar-se rapidamente sobre regiões que não estão totalmente recobertas pela espuma. Como em outras espumas, seu mecanismo de

extinção consiste em evitar o contato do oxigênio do ar com o combustível, e a liberação de vapores inflamáveis; a presença do filme aquoso ajuda no resfriamento do combustível e na supressão dos vapores, prevenindo a reignição do material. Menos viscosas, estas espumas apresentam maior fluidez e alta velocidade de extinção, e sua eficiência permite redução na quantidade utilizada de água, de equipamentos e de extrato. As espumas AFFF são compatíveis com o pó químico e também podem ser aplicadas em incêndios de classe A (madeira, tecido, plástico, etc.), pois a baixa tensão superficial do líquido drenado possibilita a umectação do material incendiado, penetrando sob as superfícies expostas e extinguindo os focos de fogo.

Para aplicação em solventes polares foram formulados concentrados AFFF contendo um polissacarídeo solubilizado que, conforme a espuma drena, produz uma membrana polimérica devido à pequena solubilidade desse componente no solvente. Essa membrana protege o filme aquoso e a espuma da destruição pelo solvente, resultando em maior tempo de resistência à reignição do combustível. A formulação desses extratos é muito importante no Brasil, devido ao grande volume de etanol estocado, e também é eficiente no combate a incêndios envolvendo derivados de petróleo. LGE protéicos e fluoroprotéicos para aplicação em incêndios envolvendo solventes polares, apesar de formarem espumas altamente estáveis, não são muito eficientes em função de sua baixa fluidez, característica que dificulta seu espalhamento.

A produção da espuma mecânica é realizada em dois estágios, que são proporcionamento e formação. Durante o proporcionamento, o extrato é introduzido no fluxo de água com dosagem controlada. Concentrados AFFF são geralmente aplicados a 3% (massa de LGE/volume de água) para incêndios em hidrocarbonetos e 6% para solventes polares. A formação da espuma ocorre apenas no estágio final, quando ocorre a introdução de ar no esguicho lançador. Diferentes equipamentos hidráulicos são utilizados na produção da espuma, de acordo com as condições do combate, e a maior parte deles apresenta tanto a introdução do LGE como a do ar ocorrendo através de simples tubos Venturi, que provocam a sucção para o fluxo de linha. Segue-se então a aplicação da espuma, que deve ser suave e feita sobre anteparos para minimizar a perda pelas chamas, a uma velocidade própria para cada caso; segundo normas como ABNT e NFPA.

Um caso do uso do extrato AFFF foi aplicado com sucesso no incêndio ocorrido na Replan, em 8 de janeiro de 1993, o maior incêndio já ocorrido em refinarias de petróleo no Brasil (**Figura 2.6**). Um tanque que possuía 15 milhões de litros de óleo diesel, sua capacidade máxima, foi atingido por um raio que provocou a ignição da

mistura de gases inflamável nele contida e, imediatamente, uma explosão seguida de incêndio. A eficiência do combate de um incêndio de tais proporções é de extrema importância. As chamas atingiram uma área de 4300 m², com labaredas de mais de 40 m de altura, produzindo fumaça que apresentava mais de 50 km de extensão. O grande risco inicial era de que o fogo se alastrasse e atingisse os tanques vizinhos, provocando um prejuízo incalculável e representando uma ameaça ao ambiente. Bombeiros da Replan iniciaram, então, a extinção do fogo que atingia as bacias de contenção com aplicação de jatos de espuma (AFFF) e o resfriamento do tanque atingido e dos adjacentes utilizando jatos de água, enquanto estratégias de combate eram definidas pelos técnicos da Replan, em colaboração com o Corpo de Bombeiros de Campinas. No total, foram 12 horas para o controle e a extinção do fogo, sendo consumidos 4 milhões de litros de óleo diesel e gastos 37 mil litros de LGE, num prejuízo total de cerca de US\$ 1.900.000,00, entre diesel consumido, combate ao fogo e reparo dos equipamentos. Cerca de 100 bombeiros, civis e militares, mobilizaram-se para conter esse incêndio (FIGUEREDO & RIBEIRO *et al.*, 1999).



Figura 2.6 Combate com espumas extintoras do tipo AFFF do maior incêndio ocorrido no Brasil em reservatórios de combustível - Replan, em Janeiro de 1993 (FIGUEREDO & RIBEIRO *et al.*, 1999).

As propriedades dos LGE são periodicamente avaliadas, segundo normas como NFPA (National Fire Protection Association); para testes de qualidade, determina-se a capacidade de produção de espuma pelo concentrado (medidas do coeficiente de expansão), que tem tempo máximo de estoque de dez anos. Testes de estabilidade são realizados por medidas do tempo de drenagem, geralmente o tempo necessário para que drene 25% da amostra da espuma, produzida segundo condições específicas.

As espumas produzidas com concentrados AFFF são de baixa expansão, com coeficiente de até 20. Para incêndios em ambientes fechados e de difícil acesso, como

minas de carvão foram desenvolvidos LGE de tensoativos sintéticos que produzem espumas de alta expansão, apropriadas para provocar inundações. Seu coeficiente de expansão está entre 200 e 1000, e seu uso tem sido restrito a áreas fechadas, pois são espumas de densidade baixa e sua eficácia pode ser comprometida pelas condições climáticas. Elas podem ser aplicadas tanto em incêndios classe A como classe B, mas cuidados devem ser tomados quando estão envolvidos ambientes pequenos, pois o ar proveniente da espuma pode elevar a concentração de oxigênio e, caso a mistura com o vapor combustível exceda a concentração limite para ignição, pode inevitavelmente provocar uma explosão.

O extintor portátil da cor creme de espuma (**Figura 2.7**) consiste em um cilindro que contem agentes químicos ao serem misturados produzem uma espuma estável que é descarregada por um bocal de cone, propulsada por meio de dióxido de carbono. A espuma forma um cobertor sobre o fogo sufocando as chamas e excluindo o oxigênio. Os extintores de espuma são utilizados para lidar com fogos de óleo e de graxa onde o uso de água esta contra-indicado. Em muitos locais, o extintor de espuma foi substituído pelo tipo de água/AFFF.

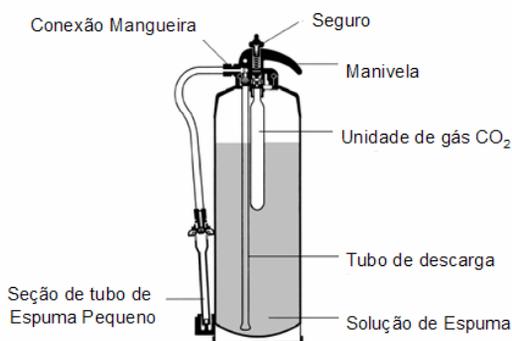


Figura 2.7 Extintor de Espuma – Tipo Unidade de Gas (WARREN, 1997).

2.5.2.3 Dióxido de Carbono

Este é um gás mais pesado que o ar, sem cor, sem cheiro e inerte à eletricidade. Quando comprimido a cerca de 60 atmosferas se liquefaz e é então armazenado em cilindros; por sua vez quando aliviado desta compressão, o líquido se vaporiza e sua rápida expansão abaixa violentamente a temperatura que alcança 70°C e parte do gás se solidifica em pequenas partículas, formando uma neve carbônica conhecida como “gelo seco”. O CO₂, não é um gás venenoso, mas do mesmo modo que não suporta a combustão, também não suporta a vida humana, sendo sufocante. Devido a sua alta densidade ocupa as partes mais baixas do recinto prejudicando a visão. O CO₂ é um extintor que deve ser aplicado nos seguintes tipos de incêndios:

- ✓ Materiais inflamáveis, líquidos e gasosos.
- ✓ Equipamentos elétricos.
- ✓ Motores ou máquinas que utilizam gasolina ou outros combustíveis.
- ✓ Diversos produtos químicos perigosos.
- ✓ Auxilia em extinção de combustíveis comuns, tais como papel, madeira, tecidos etc. Neste caso é bastante efetivo quando usado em inundação de compartimentos fechados.

O CO₂ não deve ser usado na extinção dos seguintes tipos de incêndios:

- ✓ Produtos químicos que contêm seu próprio suprimento de oxigênio (agentes oxidantes, celulose).
- ✓ Classe D: sódio, potássio, magnésio, titânio, zircônio etc.
- ✓ Hidratos metálicos.

De igual forma, é utilizado onde há uma necessidade de proteger equipamento elétrico valioso ou produtos químicos na área que exclui o uso da água. O equipamento portátil de cor preta produz uma nuvem de gás de dióxido de carbono e partículas de CO₂ sólidas, que refrigeram o fogo e o cobrem com o dióxido de carbono pesado enquanto privam o fogo de oxigênio. O gás carbônico não pode ser usado como agente de luta contra o fogo no porão ou em espaços confinados, o acúmulo de concentrações elevadas de dióxido de carbono podem ser letais para as pessoas que lutam ou aqueles que escapam do fogo. O dióxido de carbono não deve ser usado em fogos de metal ardente (WARREN, 1997).

2.5.2.4 Pó Químico Seco (P.Q.S)

O tipo mais comum em uso, consiste além de uma grande variedade de tipos de pós existentes, de um pó a base de Bicarbonato de Sódio, finamente pulverizado. A sua ação sobre o incêndio se baseia principalmente no abafamento que é reforçada pela produção de CO₂ e vapor de água resultantes da queima do bicarbonato, tendo uma ação secundária de resfriamento. Por outro lado, atua de forma eficiente ao combinar-se com os radicais livres de combustão interrompendo o processo de reação em cadeia e a conseqüente retro alimentação da combustão como visto anteriormente.

Pode ser utilizado nas classes A, B e C, sendo, entretanto sua eficiência mais significativa obtida nas classes B e C. É de extrema importância ter-se em conta que o P.Q.S. não deve ser aplicado sob equipamentos elétricos, eletrônicos de pequenos componentes como, por exemplo, computadores nem em motores mecânicos, principalmente em carburadores onde sua penetrabilidade associada ao alto poder corrosivo do Bicarbonato de Sódio tornarão o equipamento definitivamente inoperante.

O P.Q.S. contém uma mistura de pó seco inerte, tal como a sílica fina misturada com o pó de bicarbonato de sódio sólido. Estes tipos de extintores são de cor azul e o pó é propulsado com ajuda do gás de dióxido de carbono de um cartucho de gás. Estes extintores são muito efetivos cobrindo o fogo com uma manta de pó que libera o gás carbônico e exclui o oxigênio do fogo. Em fábricas onde a maquinaria é valiosa, o uso deste extintor poderia não ser desejável, devido aos danos consideráveis feitos nas máquinas e nos instrumentos delicados se são cobertos com o pó abrasivo fino.

Na **Tabela 2.5** se referênciamos os principais agentes extintores contra os principais tipos de classes de incêndios.

Tabela 2.5 Extintores apropriados para cada tipo de incêndio.

EXTINTOR	CLASSE A	CLASSE B	CLASSE C	CLASSE D
ÁGUA	Alta	Alta sob a forma de neblina	Nunca utilizar!	Nunca utilizar!
ESPUMA	Média	Alta	Nunca utilizar!	Nunca utilizar!
DIÓXIDO DE CARBONO	Reduzida	Alta desde que em focos confinados	Alta	Nunca utilizar!
PÓ QUÍMICO SECO	Alta desde que em focos confinados	Alta	Alta	Somente pós especiais

2.5.2.5 Halon (tipo bromochlorofluoromethane BCF)

São usados em fábricas, laboratórios e nas oficinas onde há possibilidade de óleo e fogos de espírito inflamáveis; o agente BCF foi desenvolvido originalmente para extinguir rapidamente fogos em aeronaves. Operando o extintor de cor verde libera um fluxo de vapor líquido e gás sobre o fogo, que cobre eficazmente o fogo e exclui o oxigênio de maneira similar ao dióxido de carbono. Entretanto, a presença do átomo de bromo na molécula do BCF age como um exterminador da cadeia no processo de oxidação do fogo; uma desvantagem usando este agente é sua inadequação para tratar com fogos que envolvem superfícies de metal quentes. A molécula de BCF é degradada para produzir gases de halóide de hidrogênio, que naturalmente são tóxicos e corrosivos, por causa disto o uso em espaços limitados requer ventilação adequada da área antes da reocupação do pessoal. Recentemente, este extintor foi assunto de publicidade adversa ambiental devido à visão que o gás poderia afetar a camada de ozônio e contribuir ao aquecimento global. Estes extintores não são apropriados para os laboratórios ou as oficinas que contêm instrumentos eletrônicos valiosos.

2.5.2.6 Cobertores de Fogo de Fibra de Vidro

São úteis em eventos onde o fogo envolve cilindros de gás pequenos e o fogo está na redução da válvula do cilindro, se o cobertor pode ser colocado sobre o cilindro nas primeiras faces do fogo, podem ser dirigidos extintores portáteis sobre o cobertor para reduzir a severidade do fogo permitindo ao pessoal evacuar com segurança (WARREN, 1997).

3 ESTUDO DOS ROBÔS MÓVEIS

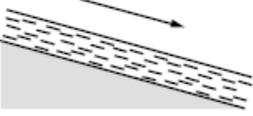
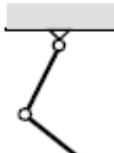
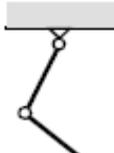
A robótica conseguiu um grande sucesso no mundo da indústria da manufatura. Os braços robóticos, ou manipuladores compreendem dois bilhões de dólares nas indústrias. Pois podem movimentar-se a grandes velocidades e executar com exatidão tarefas repetitivas, tais como soldagem e pintura de ponto. Na indústria eletrônica, por exemplo, os manipuladores colocam componentes com muita precisão que fazem possível a montagem de telefones celulares, laptops e circuitos impressos, mas têm uma desvantagem fundamental: a falta de movimentação. Um manipulador fixo tem uma escala limitada de movimento que depende de onde é aparafusado, no entanto, um robô móvel viaja por toda a planta fazendo seu trabalho onde for preciso.

Em ambientes hostis perigosos e inóspitos, os robôs móveis geram a necessidade de mecanismos novos de locomoção fazendo que mecanismos teleoperados ganhem maior popularidade, sendo impossível da parte dos seres humanos a operação direta em ambientes que colocam em risco a vida. Embora os robôs móveis tenham um amplo mercado de aplicações, o projeto envolve a integração de diferentes áreas de conhecimento que fazem a robótica móvel um campo multidisciplinar. Neste capítulo faz-se uma descrição dos tipos de movimentação e o estudo da cinemática dos robôs móveis.

3.1 TIPOS DE MOVIMENTAÇÃO

Um dos aspectos mais importantes no momento de projetar um robô móvel é a forma de movimentação, que são os mecanismos necessários para que o robô possa mover-se no ambiente, os quais são inspirados por suas contrapartes biológicas. Tem-se uma variedade de maneiras possíveis de movimentação muito ampla como: andar, pular, correr, deslizar, patinar, nadar, voar e naturalmente rolar mostradas na **Tabela 3.1**. A reprodução de sistemas biológicos por diversas razões é extremamente difícil, começando com a complexidade mecânica da replicação estrutural. Devido a esta limitação, os robôs utilizam mecanismos com rodas para obter uma simples aproximação nas movimentações, porque a locomoção com pernas requer um maior número de graus de liberdade o que conseqüentemente traz maior complexidade mecânica. As rodas, além de ser simples, conseguem bom desempenho em terra lisa, mas têm atrito e diferente da locomoção com pernas, sofre menos o efeito de ter somente um ponto de contacto com a terra.

Tabela 3.1 Mecanismos de Locomoção utilizados em sistemas biológicos (SIEGWART & NOURBAKHSH, 2004).

Tipo de movimento	Resistência ao movimento	Cinemática básica do movimento
Fluir num canal 	Forças hidrodinâmicas	Remoinho, turbilhão 
Rastejar 	Forças de atrito	Oscilação longitudinal 
Deslizar 	Força de atrito	Oscilação transversal 
Correr 	Perda de energia cinética	Movimento oscilatório de um pêndulo de ligação múltiple 
Pular 	Perda de energia cinética	Movimento oscilatório de um pendulo de ligação múltiple 
Caminhar 	Forças gravitacionais	Rolando um polígono 

De fato, a eficiência da locomoção com rodas depende extremamente das qualidades ambientais, particularmente do nivelamento e da dureza da terra. Enquanto que a eficiência da locomoção com pernas depende da massa do pé e do corpo que devem ser suportadas em vários pontos da perna. Conseqüentemente, todas as

aplicações industriais de robôs móveis utilizam alguma forma de locomoção com rodas, mas também se têm progressos em robôs para ambientes fora da industrial com pernas ou híbridos.

A locomoção é o complemento da manipulação, nos dois casos acima a base científica é o estudo dos atuadores que geram as forças de interação e os mecanismos que executam propriedades cinemáticas e dinâmicas (SIEGWART & NOURBAKHS, 2004).

3.1.1 Robôs Móveis com Pernas

A locomoção com pernas é caracterizada pela série de pontos de contato entre o robô e a terra. Uma das maiores vantagens deste tipo de robôs é a adaptabilidade e manobrabilidade em terrenos acidentados e o potencial de manipular objetos com grande habilidade; em contrapartida tem-se a complexidade mecânica e de potência. A perna pode incluir diversos graus de liberdade, deve ser capaz de sustentar parte do peso total do robô e em muitos robôs deve ser capaz de levantar e baixar o robô. Adicionalmente uma elevada manobrabilidade será conseguida somente se os pés tiveram um número de graus de liberdade suficientes para dar forças em sentidos diferentes.

As configurações e estabilidade das pernas são inspiradas nos sistemas biológicos como, por exemplo, os mamíferos e répteis que têm quatro pernas e os insetos que têm seis ou mais. Alguns mamíferos desenvolvem a habilidade de caminhar perfeitamente em duas pernas; especialmente é o caso dos humanos, sendo que nós conseguimos até saltar num só pé. Esta manobrabilidade excepcional tem um preço: um controle ativo muito mais complexo para manter a estabilidade.

Um mínimo de dois graus de liberdade é geralmente requerido para levantar e balancear o pé para frente, mas é comum adicionar um terceiro grau de liberdade para manobras mais complexas. Recentemente, na criação de robôs bípedes se adicionou um quarto grau de liberdade no tornozelo que permite mais contato com a terra. Em geral, adicionar graus de liberdade no pé do robô aumenta a manobrabilidade dele, mas adiciona complexidades ao aumentar o número de juntas e atuadores porque aumenta a massa e a dificuldade do controle.

3.1.1.1 Robôs de Locomoção com uma Perna

Minimizar o número de pernas traz muitos benefícios, a massa do corpo é particularmente importante para máquinas que andam, além disso, com um pé não é necessária nenhuma coordenação. Talvez o mais importante, é que os robôs com uma perna maximizam a vantagem da locomoção com pernas: o pé tem um único ponto de contato com a terra.

O desafio principal em criar um robô com uma perna é a estabilidade, além da estática ao caminhar e a estabilidade estática impossível quando o robô está em pé. O robô deve ativamente balançar-se mudando o seu centro de gravidade ou dando forças corretivas; assim, um robô com uma perna, bem sucedido deve ser dinamicamente estável.

Na **Figura 3.1** se apresenta o robô chamado “The Raibert Hopper”, este robô faz correções contínuas à atitude do corpo e à velocidade do robô ajustando o ângulo do pé com respeito ao corpo. A atuação é hidráulica e requer uma bomba conectada ao robô para seu funcionamento. Recentemente, foi criado um robô que não precisa de bomba hidráulica, a perna foi projetada para capturar a energia cinética do robô quando ele pousa. Utilizando na perna uma mola eficiente que retorna 85% da energia o que significa que só precisa de 15% adicional em cada pulo, foi testado por 20 minutos com um só sistema de baterias a bordo do robô.

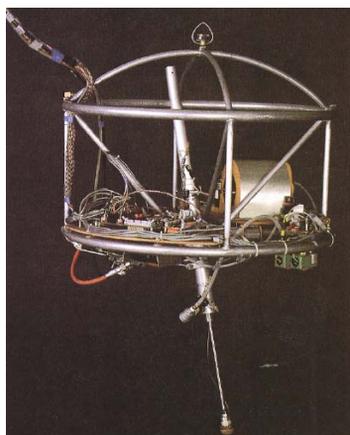


Figura 3.1 The Raibert Hopper (RAIBERT, 1986).

O robô de RINGROSE (1997), onde a importância dos mecanismos e dos controles por ser um projeto mecânico inteligente executa as mesmas operações que um circuito de controle complexo. Neste robô, a forma física do pé é exatamente a curva certa de forma que quando o robô pousa sem ser perfeitamente vertical, a força corretiva apropriada é fornecida no impacto, fazendo que o robô fique vertical para a

seguinte aterrissagem. Assim, as correções são feitas com iterações físicas entre o robô e o ambiente.

3.1.1.2 Robôs Móveis com Duas Pernas (Bípede)

Nestes últimos dez anos foi apresentada uma variedade de robôs bípedes, eles conseguem correr, saltar, subir, descer escadas e até fazer truques aéreos, tendo uma importante característica em sua forma antropomórfica, sendo estaticamente estáveis dentro de alguns limites.

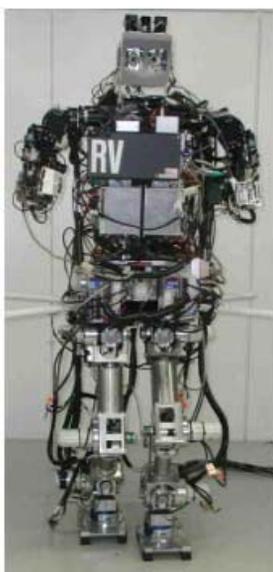


Figura 3.2 Robô humanóide WABIAN-RV da Universidade Waseda do Japão.

A Sony começou uma pesquisa em 1997 para projetar um robô bípede que tem como objetivo principal o entretenimento, ele consegue dançar e cantar; o robô SDR-4X tem 38 graus de liberdade, 58 cm de altura e massa de 6,5 kg (KUROKI & BLANK *et al.*, 2003). A Honda projetou o modelo P2 que mede 120 cm e pesa 520 N, projetado para ajudar na sociedade consegue a mobilidade no mundo humano das escadas e bordas (HIRAI & HIROSE *et al.*, 1998). A Universidade “Waseda” no Japão, em Tóquio construiu em 2002 WABIAN-RV o robô (WAseda BIped humANoid Refined V), última versão do WABIAN que começou em 1972. Com 43 graus de liberdade este robô foi projetado para emular movimentos humanos até mesmo dançar **Figura 3.2** (KORDIC & LAZINICA *et al.*, 2005). Já no MIT o “Spring Flamingo” consegue uma caminhada mais elástica introduzindo molas em série e atuadores no pé, combinados com “rótulas” que limitam os ângulos do joelho alcançando movimentos surpreendentemente biométricos (PRATT & PRATT, 1998). Um exemplo de

controladores para este tipo de robôs utilizando osciladores não lineares é apresentado em DUTRA (1995).

3.1.1.3 Robôs Móveis com Quatro Pernas (Quadrúpedes)

Um robô de quatro pernas é estaticamente estável. Para permanecer estável durante a movimentação o centro de gravidade do robô deve ser trocado ativamente; como os cachorros artificiais criados pela Sony, o MUTANT (FUJITA & KITANO, 1998) e o AIBO, que tem um sistema de visão com cores que permite perseguir uma esfera brilhante colorida e pode funcionar uma hora sem precisar de troca de baterias; o AIBO serve como animal de estimação e pode desenvolver um relacionamento emocional similar ao homem-cão. Os robôs de quatro pernas têm um potencial para servir como elemento de pesquisa na interação humano-robô.

3.1.1.4 Robôs Móveis com Seis Pernas (Hexápodes)

Os robôs móveis com seis pernas foram populares por causa da estabilidade estática durante a caminhada, reduzindo a complexidade do controle, sendo que geralmente cada perna tem três graus de liberdade. Alguns trabalhos nesta área são apresentados em DE MENEZES (1999), DA COSTA (2001) e DA COSTA (2004).

A inspiração para a criação destes tipos de robôs são as formas biológicas dos insetos, que conseguem movimentasse em qualquer terreno assim seja de cabeça para abaixo, mas a diferença entre as capacidades de insetos de seis pernas e robôs de seis pernas artificiais ainda é bastante grande; isto não é devido à falta de graus de liberdade nos robôs; só que os insetos combinam um pequeno número de graus de liberdade com estruturas passivas, como farpas microscópicas que produzem um aumento significativo na força de agarre de cada perna.

As pesquisas na robótica daquelas estruturas passivas só começaram recentemente, por exemplo, a criação da função mecânica completa da perna da barata (WEI & QUINN *et al.*, 2004). É claro que os robôs com pernas têm muito progresso a fazer antes de ser competitivos com os equivalentes biológicos.

3.1.2 Robôs Móveis com Rodas

A roda é sem dúvida o mecanismo de locomoção mais popular em robótica móvel; porque alcança muita eficiência fazendo uma implementação mecânica

relativamente simples; adicionalmente existe uma ampla variedade de dispositivos com rodas como os brinquedos que podem ser modificados para utilizá-los como robôs (JONES & FLYNN *et al.*, 1993). O equilíbrio normalmente não é um problema de pesquisa em projetos de robôs móveis com rodas, porque quase sempre os robôs são projetados para que as rodas tenham contato o tempo todo com o chão. É por isto que três rodas são suficientes para garantir o equilíbrio estável. Se forem utilizadas mais de três rodas é necessário um sistema de suspensão que permita manter todas as rodas em contato com o chão quando o terreno é desigual.

Em vez de preocupar-se com o equilíbrio, a pesquisa de robôs móveis com rodas tende a focalizar-se em problemas de tração e estabilidade, manobrabilidade e controle, para que as rodas do robô forneçam tração e estabilidade suficiente para cobrir todo tipo de terreno (SIEGWART & NOURBAKSH, 2004). Há um espaço muito grande de possíveis tipos de configurações de rodas com vantagens e desvantagens específicas, como se descreve a seguir.

3.1.2.1 Projeto de Rodas

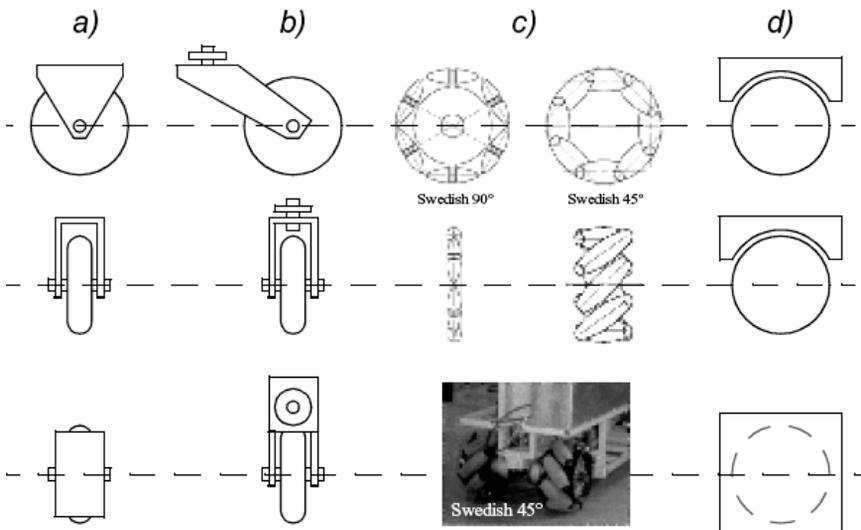


Figura 3.3 Tipos de rodas básicas. (a) Roda padrão. (b) Roda louca. (c) Roda Sueca. (d) Roda esférica.

Os tipos de rodas deferem amplamente e têm um efeito na cinemática global do robô móvel. Na **Figura 3.3** são apresentados os diferentes tipos de rodas iniciando pela (a) Roda padrão que possui dois graus de liberdade; rotação em torno do eixo da roda e do ponto de contato. (b) Roda louca (castor) possui dois graus de liberdade; rotação ao redor de uma junta de direção compensada e do ponto de contato. (c) Roda sueca possui três graus de liberdade: rotação em torno do eixo da roda, em

torno dos rolos e em torno do ponto de contato. E por último a (d) Bola ou roda esférica.

A roda padrão e a roda louca têm um eixo primário de rotação sendo assim altamente direcionais. A diferença fundamental entre estas duas rodas, é que a roda padrão pode realizar o movimento de direção sem efeitos colaterais porque o centro de rotação passa através da parte do contato com o chão, e a roda louca gira ao redor de um eixo compensado, causando uma força ao chassi do robô durante a movimentação.

A roda sueca funciona como uma roda normal, mas fornece baixa resistência em outro sentido as vezes perpendicular ao sentido convencional. Os rolos pequenos unidos em torno da circunferência da roda são passivos e os eixos primários das rodas servem como a única junta ativa de energia. A vantagem fundamental deste projeto, é que a rotação da roda é energizada somente ao longo do eixo principal, e a roda pode cinematicamente mover-se com muita ou pouca fricção ao longo de possíveis trajetórias.

A roda esférica, é uma roda verdadeiramente omnidirecional projetada de modo que possa girar em qualquer sentido ao ser energizada, um mecanismo para executar este projeto esférico imita o mouse do computador, fornecendo energia ativamente aos rolos da superfície da esfera para dar força rotatória.

Embora a roda seja usada, em robôs projetados para todo tipo de ambientes e em robôs com mais de três rodas, é necessário um sistema de suspensão que mantenha as rodas em contato com o chão. Uma das aproximações mais simples para a suspensão, é projetar a flexibilidade na própria roda. Por exemplo, no caso de alguns robôs de quatro rodas que usam rodas loucas, fabricantes aplicaram um pneu deformável de borracha macia à roda para criar uma suspensão primitiva (SIEGWART & NOURBAKHS, 2004). Naturalmente, esta solução limitada não pode competir com um sistema sofisticado onde o robô precisa de uma suspensão mais dinâmica para um terreno não liso.

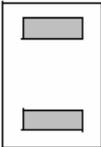
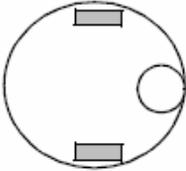
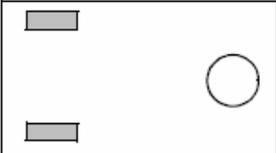
3.1.2.2 Geometria da Roda

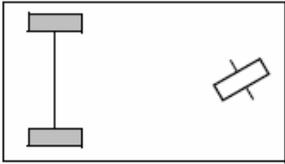
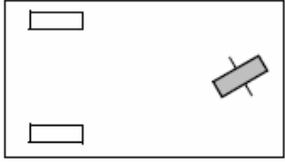
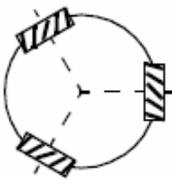
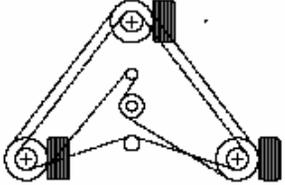
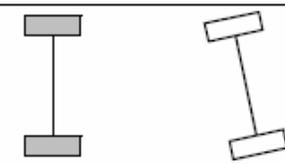
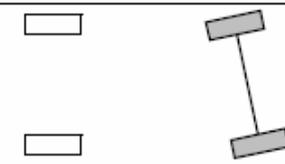
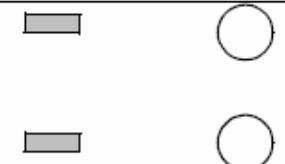
A escolha do tipo de roda para um robô móvel é ligada fortemente à escolha da geometria da roda, na hora de projetar um robô com rodas é necessário considerar estes dois assuntos simultaneamente, porque três características fundamentais do robô são governadas a partir destas escolhas: manobrabilidade, controlabilidade e estabilidade.

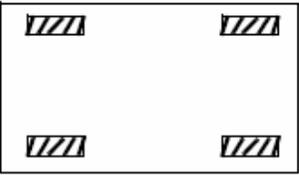
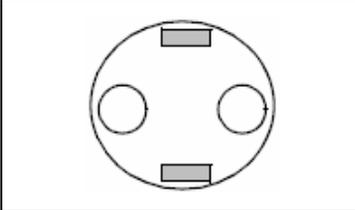
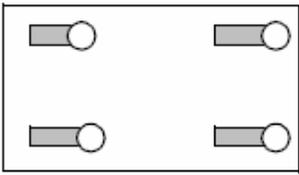
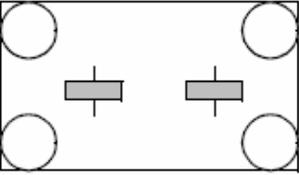
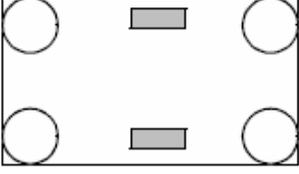
Os automóveis são projetados para ambientes altamente estandardizados e os robôs móveis são projetados para uma variedade ampla de aplicações. Todos os automóveis compartilham configurações similares porque há uma região no espaço do projeto que maximiza manobrabilidade, controlabilidade e estabilidade para o ambiente padrão: a estrada pavimentada. Entretanto, não há nenhuma configuração de roda que maximize estas qualidades para a variedade de ambientes enfrentados pelos diferentes robôs móveis, e por isto que existe um grande número de configurações de rodas para os robôs móveis. De fato, poucos robôs utilizam a configuração Ackerman do automóvel por causa de sua pobre manobrabilidade com exceção dos robôs móveis projetados para o sistema da estrada.

A **Tabela 3.2** dá uma vista geral das configurações de rodas ordenadas pelo número de rodas, mostrando a seleção de tipos particulares e sua configuração geométrica no chassi do robô, mas algumas são de pouco uso nas aplicações dos robôs móveis. Por exemplo, o arranjo de bicicleta de duas rodas tem manobrabilidade moderada e controlabilidade tão pobre como uma máquina de uma perna que não consegue levantar-se imóvel. Não obstante, esta tabela fornece uma indicação das possíveis configurações de rodas num projeto de robô móvel, porém há tendências importantes e agrupamentos que ajudam a compreender as vantagens e desvantagens de cada uma das configurações.

Tabela 3.2 Configurações das rodas.

NÚMERO DE RODAS	ARRANJO	DESCRIÇÃO
2		Uma roda que guia na frente e uma roda de tração na parte traseira.
		Movimentação diferencial das duas rodas com o centro de massa abaixo do eixo.
3		Duas rodas guiadas centradas diferencialmente com um terceiro ponto de contato
		Duas rodas independentemente guiadas traseiras ou na frente, uma roda omnidirecional sem motor traseira ou na frente.

		Duas rodas de tração na parte traseira e uma roda guiada na parte dianteira.
		Na parte traseira duas rodas livres e uma de tração guiada na parte dianteira.
		Três rodas suecas ou esféricas organizadas num triângulo o que torna possível o movimento omnidirecional.
		Três rodas com motor, dirigidas sincronicamente; a orientação não é controlável.
4		Duas rodas motorizadas na parte traseira e duas rodas dirigidas na frente, com diferencial para evitar deslizamentos e escorregamento.
		Duas rodas motorizadas e guiadas na frente e duas rodas livres na parte traseira; as rodas guiadas com diferencial para evitar deslizamentos e escorregamentos.
		Quatro rodas guiadas e motorizadas.
		Duas rodas de tração (diferencial) traseiras ou na frente e duas rodas omnidirecionais traseiras ou na frente.

		Quatro rodas omnidirecionais.
		Duas rodas guiadas com diferencial e duas adicionais para ponto de contato.
		Quatro rodas loucas guiadas e motorizadas.
6		Duas rodas guiadas e motorizadas alinhadas no centro e uma roda omnidirecional em cada canto.
		Duas rodas de tração (diferencial) no centro e uma omnidirecional em cada canto.

ÍCONES PARA CADA TIPO DE RODA	
	Roda omnidirecional desenergizada (esférica, louca, sueca).
	Roda sueca motorizada (roda Stanford).
	Roda padrão desenergizada.
	Roda padrão motorizada.
	Roda louca guiada e motorizada.
	Roda padrão guiada.
	Rodas conectadas.

3.1.2.3 Estabilidade

Surpreendentemente o número mínimo de rodas requeridas para a estabilidade estática é dois, um robô de duas rodas guiado-diferencial pode conseguir a estabilidade estática se o centro de massa estiver abaixo do eixo das rodas. O robô mostrado na **Figura 3.4** utiliza este tipo de configuração é um robô doméstico comercial que consegue limpar o pó e fazer entregas na casa. Porém, esta solução requer diâmetros maiores de rodas (BATAVIA & NOURBAKSH, 2000).



Figura 3.4 O robô doméstico Cye construído por Aethon Inc. (BATAVIA & NOURBAKSH, 2000).

Convencionalmente, estabilidade estática requer um mínimo de três rodas e o centro de gravidade deve ser contido dentro do triângulo formado pelos pontos de contato do chão com as rodas. A estabilidade, pode ser melhorada adicionando mais rodas, embora uma vez que o número de pontos de contato excede de três a geometria requererá alguma forma de suspensão flexível num terreno desigual.

3.1.2.4 Manobrabilidade

Alguns robôs são omnidirecionais o que significa que se podem mover a qualquer momento em qualquer direção ao longo do plano (x, y). Este nível de manobrabilidade requer rodas que se podem mover em mais do que apenas um sentido, é por isto que os robôs omnidirecionais empregam geralmente rodas suecas ou esféricas motorizadas. Por exemplo, na **Figura 3.5** é apresentado o robô Uranus da Universidade Carnegie Mellon do instituto de Robótica (BLACKWELL, 1990) que utiliza quatro rodas suecas 45-graus, cada uma dirigida por um motor separado variando o sentido de rotação e velocidades relativas das quatro rodas; o robô pode movimentar-se ao longo de uma trajetória num plano e até mesmo girar simultaneamente ao redor de seu eixo vertical.

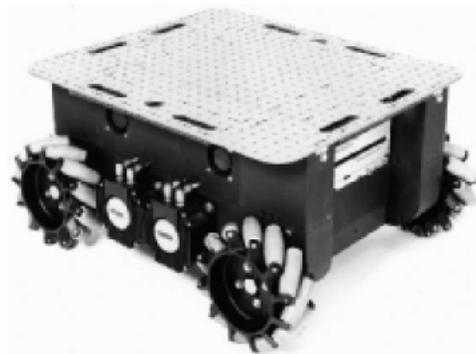


Figura 3.5 Robô Uranus (BLACKWELL, 1990).

Por exemplo, quando todas as quatro rodas girarem para diante ou para trás o robô avança em uma linha reta para frente ou para trás respectivamente; entretanto quando um par de rodas diagonais estão girando num mesmo sentido e o outro par estão girando no sentido oposto o robô movimenta-se lateralmente. Este arranjo de quatro rodas suecas não é o mínimo em termos de controle de motores porque há só três graus de liberdade no plano, pode-se construir um robô com chassi de três rodas omnidirecional usando três rodas suecas 90-graus. Entretanto, os exemplos existentes como o Uranus foram projetados com quatro rodas devido às considerações de capacidade e estabilidade.

Em contraste, considerando a configuração guiada Ackerman comum nos automóveis, o veículo tem tipicamente um diâmetro maior de giro que o carro é por isto que para o veículo mover-se lateralmente requer uma manobra de estacionamento que consiste em mudanças repetitivas no sentido para frente e para trás. Não obstante, a geometria guiada Ackerman foi e continua sendo especialmente popular no mercado dos robôs de passatempo onde um robô pode ser construído começando com um carro de controle remoto e adicionando sentido de autonomia para o mecanismo existente, além disso, a manobrabilidade limitada da configuração Ackerman tem uma vantagem importante: sua direcionalidade e geometria proporcionam uma estabilidade lateral muito boa para voltas de alta velocidade.

3.1.2.5 Controlabilidade

Geralmente existe uma correlação inversa entre controlabilidade e manobrabilidade, por exemplo, os projetos omnidirecionais como a configuração de quatro rodas loucas, requerem processos significativos para converter velocidades rotatórias e translacionais desejadas aos comandos de roda individual; além disso, tais projetos omnidirecionais têm freqüentemente maiores graus de liberdade na roda, por exemplo, a roda sueca tem um jogo de rolos livres ao longo do perímetro da roda

estes graus de liberdade causam uma acumulação do deslizamento, tendem a reduzir a exatidão do cálculo da locomoção e aumenta a complexidade do projeto.

Controlar um robô omnidirecional para uma direção específica de viagem é mais difícil e freqüentemente menos preciso comparado com projetos menos maneáveis, por exemplo, o veículo guiado Ackerman pode avançar em linha reta simplesmente travando as rodas dirigíveis e dirigindo as rodas de movimentação. Com quatro rodas omnidirecionais dirigidas como o robô Uranos da **Figura 3.5**, que possui quatro rodas suecas o problema é mais complicado porque, todas as quatro rodas devem ser dirigidas exatamente na mesma velocidade para que o robô viaje em uma linha perfeitamente reta.

Em resumo, não há nenhuma configuração “ideal” que maximize simultaneamente a estabilidade, manobrabilidade e controlabilidade; cada aplicação para robôs móveis traz as próprias necessidades ao projeto e a tarefa do desenhista é escolher a configuração mais apropriada possível de movimentação.

3.1.3 Robôs Híbridos

Os robôs com pernas oferecem a melhor manobrabilidade no terreno áspero, entretanto são ineficientes em terra lisa e necessitam de um controle sofisticado; soluções híbridas combinando a adaptabilidade das pernas com a eficiência das rodas oferecem uma solução interessante.

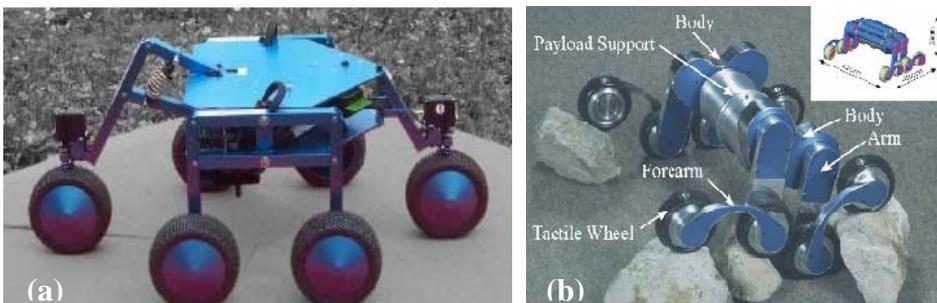


Figura 3.6 (a) O Camarão. **(b)** O Polvo.

Os projetos de robôs móveis híbridos mais recentes foram produzidos por EPFL (ESTIER & CRAUSAZ *et al.*, 2000) e (LAURIA & PIGUET *et al.*, 2002) mostrados na **Figura 3.6**, o robô Camarão (a) tem seis rodas motorizadas e é capaz de escalar objetos até duas vezes o diâmetro de sua roda o que permite escalar escadas regulares; usando uma configuração de rombo; o Camarão tem duas rodas dirigidas uma na frente e outra na parte traseira e duas rodas de vagão em cada lado, a roda

dianteira tem uma suspensão de mola para garantir o contato com a terra de todas as rodas o tempo todo. O Polvo (b) tem oito rodas motorizadas e um total de 15 graus de liberdade (14 deles motorizados).

Enquanto a pesquisa de robôs móveis avança, projetam-se sistemas mecânicos mais complicados, no mesmo tempo os problemas de controle de cinemática inversa e dinâmica também aumentam, mas em geral estes problemas mecânicos complexos são controlados. Assim, no futuro próximo pode-se esperar o aumento no número de robôs móveis híbridos que extraem as vantagens de diversos mecanismos estudados na primeira parte deste capítulo.

3.2 CINEMÁTICA DOS ROBÔS MÓVEIS

3.2.1 Introdução

A cinemática é o estudo dos movimentos sem a preocupação com as suas causas, em robótica móvel necessitamos compreender o comportamento mecânico do robô a fim de projetar robôs móveis para tarefas determinadas e compreender como criar o software de controle para um exemplo de hardware do robô móvel. O estudo da cinemática de robôs móveis tem muitos pontos em comum com os manipuladores robóticos; a área de trabalho de um robô manipulador é crucial porque define a escala das possíveis posições que podem ser alcançadas pelo efetor final relativo a sua instalação no ambiente; o espaço de trabalho de um robô móvel é igualmente importante, porque ele define as possíveis posições que o robô pode conseguir em seu ambiente. A controlabilidade do braço do robô define a maneira em que o acoplamento ativo dos motores pode ser utilizado para que ele se movimente de um lugar a outro no espaço de trabalho; similarmente a controlabilidade de um robô móvel define possíveis caminhos e trajetórias em sua área de trabalho. Mas a diferença principal entre o robô móvel e o manipulador é o desafio significativo para a estimativa da posição. O manipulador tem uma extremidade fixada no ambiente, o assunto é compreender a cinemática do robô. Mas um robô móvel autônomo que pode se mover livremente no ambiente não teria nenhuma maneira direta de medir instantaneamente a posição, ao invés tem-se que integrar o movimento do robô sobre o tempo, adicionando as inexatidões da estimativa de movimento devido ao deslizamento; é por esta causa que medir com precisão a posição de um robô móvel é uma tarefa extremamente desafiadora. Modelos específicos para esta medição vêm sendo

estudados faz algum tempo como, por exemplo, o modelo de SAHA & ANGELES (1989) para um AGV (Automatic Guided Vehicle).

Um robô móvel pode-se modelar como um corpo rígido montado num número de rodas arbitrário, onde se tem que desenvolver a relação entre o movimento do corpo rígido e as rodas (ALEXANDER & MADDOCKS, 1989), o procedimento começa com o processo de descrever a contribuição que cada roda fornece ao movimento, desempenhando sua função fazendo que o robô inteiro consiga movimentar-se. Justamente por isso, derivar um modelo para o movimento inteiro do robô é um processo complexo porque cada roda individualmente contribui ao movimento do robô e ao mesmo tempo impõe restrições; as rodas também são ligadas na geometria do chassi do robô e conseqüentemente suas restrições também influenciam o movimento global no chassi do robô, mas as forças e as restrições de cada roda devem ser expressadas com respeito a uma referência clara e consistente isto é particularmente importante nos robôs móveis por causa da sua natureza móvel; sendo necessário um mapeamento claro entre as referências locais e globais.

3.2.2 Representação da Posição do Robô

Definem-se as referências, enquanto se usam os resultados da cinemática das rodas individuais na construção da cinemática inteira do robô. Para este processo se adota a notação e terminologia que apresentam CAMPION & BASTIN *et al.* (1996). Supondo que os robôs móveis têm uma estrutura rígida com rodas deformáveis e se movimentam num plano horizontal; o número de graus de liberdade totais do chassi do robô no plano é três, dois para posição no plano e um para a orientação ao longo do eixo vertical que é ortogonal ao plano, é claro que há graus de liberdade adicionais e flexibilidade devido aos eixos da roda, as juntas da roda dirigida e as juntas da roda louca. De qualquer modo o chassi do robô refere-se somente ao corpo rígido do robô, ignorando as juntas, os graus de liberdade internos do robô e as rodas.

Para especificar a posição do robô no plano se estabelece uma relação entre as coordenadas globais de referência no plano e as coordenadas locais de referência do robô como mostra a **Figura 3.7**. Os eixos X_I e Y_I definem uma base inercial arbitraria no plano como as coordenadas globais de referência; para especificar a posição do robô, escolhe-se um ponto P no chassi do robô como referência de posição. Os eixos $\{X_R, Y_R\}$ são relativos a P no chassi e são as coordenadas locais de referência do robô; a posição de P na referência global é especificada por coordenadas x e y , e a diferença angular entre as coordenadas globais e locais esta dada por θ .

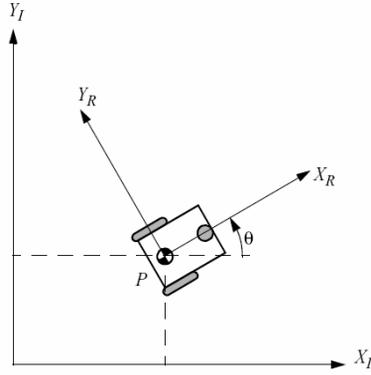


Figura 3.7 Coordenadas globais e locais de referência do robô.

Então se pode descrever a posição do robô como um vetor com três elementos (equação (3.1)):

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Para descrever os movimentos do robô em termos de componentes de movimento, é necessário mapear o movimento ao longo dos eixos de coordenadas globais de referência para o movimento ao longo dos eixos de coordenadas locais de referência do robô. Naturalmente o mapeamento é uma função da posição atual do robô, este mapeamento é realizado utilizando uma matriz de rotação ortogonal (equação (3.2)):

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta & 0 \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Esta matriz pode ser utilizada para o mapeamento do movimento nas coordenadas de referência globais $\{X_I, Y_I\}$ movimentando-se em termos de coordenadas de referência locais $\{X_R, Y_R\}$. Esta operação é denotada por $R(\theta)\dot{\xi}_I$ (equação (3.3)) porque depende do valor de θ :

$$\dot{\xi}_R = R(\theta)\dot{\xi}_I \quad (3.3)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2}$$

Por exemplo, considerando o robô da **Figura 3.8**; para este robô sendo a matriz R de rotação esta dada por:

$$R\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

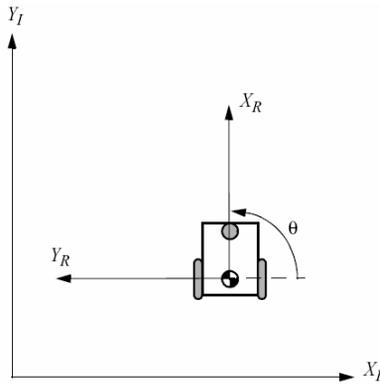


Figura 3.8 Robô móvel com $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Dada alguma velocidade $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ nas coordenadas de referência globais podem-se computar os componentes de movimento ao longo dos eixos locais do robô $\{X_R, Y_R\}$. Neste caso, devido ao ângulo específico do robô o movimento ao longo do X_R é igual a \dot{y} e o movimento ao longo de Y_R é $-\dot{x}$; assim:

$$\dot{\xi}_R = R\left(\frac{\pi}{2}\right) \dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ -\dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2.3 Modelos Cinemáticos Direitos

Considerando o exemplo mostrado na **Figura 3.9**, o robô diferencial-dirigido de duas rodas cada uma com diâmetro r , um ponto P centralizado entre as duas rodas e uma distancia l entre o ponto P e a roda. Dado r, l, θ , e as velocidades de giro de cada roda, $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$, o modelo cinemático direito prediria a velocidade total do robô nas coordenadas de referência globais; de acordo com a expressão:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2) \quad (3.6)$$

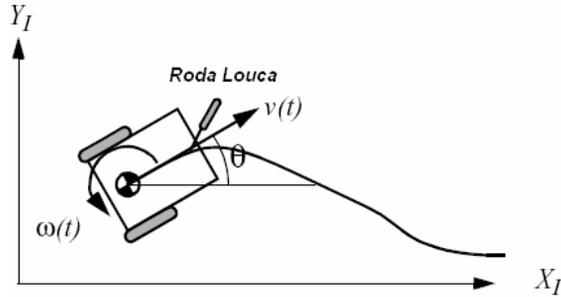


Figura 3.9 Robô dirigido-diferencial nas coordenadas de referência globais.

Da equação (3.3) se sabe que se pode computar o movimento do robô nas coordenadas globais de referência com relação às coordenadas locais de referência: $\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_R$. Primeiro, se computa a contribuição de cada uma das rodas na referência local, $\dot{\xi}_R$.

Supondo que as coordenadas locais de referencia do robô estão alinhadas tais que o robô movimenta-se longitudinalmente para frente $+X_R$ como mostra a **Figura 3.7**. Primeiro, se considera a contribuição de cada roda na velocidade de giro à velocidade de translação em P na direção de $+X_R$; se uma roda gira quando a outra for estacionária, se P está na metade das duas rodas, se moverá instantaneamente com a metade da velocidade: $\dot{x}_{r1} = \frac{1}{2} r \dot{\phi}_1$ e $\dot{x}_{r2} = \frac{1}{2} r \dot{\phi}_2$. Em um robô dirigido-diferencial, estas duas contribuições podem simplesmente adicionadas para calcular \dot{x}_R componente de $\dot{\xi}_R$. Considerando, por exemplo, um robô diferencial em que cada roda gira com a mesma velocidade mas em sentidos opostos, o resultado é um robô estacionário girando; então, \dot{x}_R é zero neste caso. O valor de \dot{y}_R é mais simples de calcular porque nenhuma roda pode contribuir ao movimento lateral nas coordenadas de referência do robô e só \dot{y}_R é sempre zero. Finalmente computa-se o valor do componente rotatório $\dot{\theta}_R$ de $\dot{\xi}_R$. Uma vez mais as contribuições de cada roda podem ser computadas independentemente e ser adicionadas, considerando a roda direita (roda 1), os resultados de giro para frente desta roda são em sentido anti-horário no ponto P, lembrando-se a roda 1 gira sozinha, o robô gira entorno da roda 2. A

velocidade de rotação w_1 em P pode ser computada porque a roda está movendo-se instantaneamente ao longo do arco de um círculo de raio $2l$; assim:

$$w_1 = \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} \quad (3.7)$$

O mesmo cálculo aplica-se à roda esquerda, com a diferença que os resultados de giro para frente são em sentido horário de rotação no ponto P; da seguinte forma:

$$w_2 = \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \quad (3.8)$$

Combinando estas fórmulas individuais temos um modelo cinemático para o robô diferencial-dirigido do exemplo:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Geralmente calcular $R(\theta)^{-1}$ a inversa de uma matriz pode ser trabalhoso, mas neste caso é fácil porque é simplesmente uma transformação de $\dot{\xi}_R$ a $\dot{\xi}_I$ ou vice-versa (equação (3.10)):

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta & 0 \\ \text{sen} \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Se o robô está posicionado em $\theta = \frac{\pi}{2}$, $r = 1$ e $l = 1$; com velocidades $\dot{\phi}_1 = 4$ e $\dot{\phi}_2 = 2$ então pode-se calcular a velocidade nas coordenadas globais de referência assim:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Este robô movimenta-se instantaneamente ao longo do eixo y , com uma velocidade de três nas coordenadas globais de referência e gira com uma velocidade de um. Esta aproximação de modelo cinemático pode fornecer a informação sobre o movimento do robô dada a componente de velocidade da roda em casos diretos.

3.2.4 Restrições Cinemáticas da Roda

A primeira etapa para o modelo cinemático é expressar as restrições nos movimentos das rodas individualmente; porém várias suposições importantes simplificaram a análise. Assumindo que o plano da roda sempre permanece vertical e que em todos os casos há um único ponto de contato entre a roda e o plano do chão sem nenhum deslizamento; quer dizer que a roda só sofre movimento de rotação pura e rotação sobre o eixo vertical através do ponto de contato. Com estas suposições apresentam-se duas restrições para cada tipo de roda, a primeira que a roda deve rolar quando o movimento acontece na direção apropriada e a segunda que a roda não deve deslizar ortogonal ao plano da roda.

3.2.4.1 Roda Padrão Fixa

A roda padrão fixa não tem nenhum eixo vertical de rotação para guiar, seu ângulo ao chassi é fixo e limitado no movimento para diante e para trás ao longo do plano da roda.

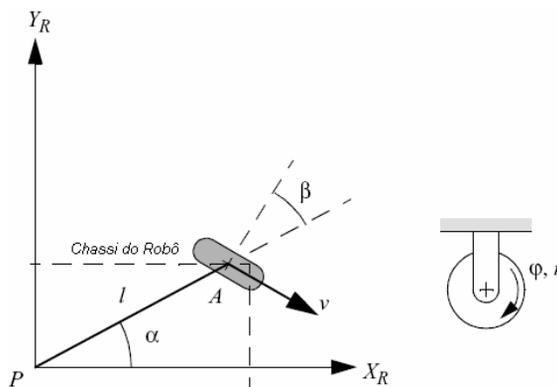


Figura 3.10 Parâmetros da roda padrão fixa.

Na **Figura 3.10** descreve uma roda padrão fixa A e indica sua posição relativa as coordenadas locais de referência do robô $\{X_R, Y_R\}$; expressada em coordenadas polares com uma distância l e um ângulo α , o ângulo do plano da roda relativo ao chassi é denotado por β que é fixo porque a roda padrão não é dirigida.

A posição da roda com raio r em torno de seu eixo horizontal é uma função do tempo $t = \varphi(t)$. A restrição de rolamento para esta roda obriga que todos os movimentos ao longo do plano da roda devem ser acompanhados pela quantia apropriada de rotação da roda de modo que tenha uma rotação pura no ponto de contato; da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_l - r\dot{\varphi} = 0 \quad (3.12)$$

O primeiro termo da soma da equação (3.12) denota o movimento total ao longo do plano da roda, os três elementos do vetor da esquerda representam $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$ e suas contribuições para o movimento ao longo do plano da roda. O termo $R(\theta)\dot{\xi}_l$ é utilizado para transformar os parâmetros de movimento de coordenadas globais de referência $\{X_i, Y_i\}$ em parâmetros de movimento nas coordenadas locais de referência $\{X_R, Y_R\}$; isto é necessário porque todos os outros parâmetros na equação estão em termos das coordenadas locais de referência do robô. Este movimento ao longo do plano da roda deve ser igual de acordo com esta restrição ao movimento girando da roda $r\dot{\varphi}$.

A restrição de não deslizamento para esta roda, obriga que o componente ortogonal de movimento da roda ao plano da roda deve ser zero:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) & l\sin\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_l = 0 \quad (3.13)$$

Por exemplo, supondo que a roda A esta em uma posição tal que $\{(\alpha=0), (\beta=0)\}$. Isto colocaria o ponto de contato da roda em X_i com o plano da roda paralelo a Y_i , se $\theta=0$, então a restrição de deslizamento da equação (3.13) se reduz a:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.14)$$

Está restrição de movimento ao longo de X_I sendo zero e X_I e X_R sendo paralelos neste exemplo, a roda é restringida a não deslizar lateralmente como é esperado.

3.2.4.2 Roda Padrão Dirigida

A roda padrão dirigida difere da roda padrão fixa no grau de liberdade adicional, a roda pode girar em torno de um eixo vertical que passa através do centro da roda e com o ponto de contato com o chão. As equações de posição para a roda padrão dirigida da **Figura 3.11** são idênticas às da roda padrão fixa mostrada na **Figura 3.10** com uma exceção.

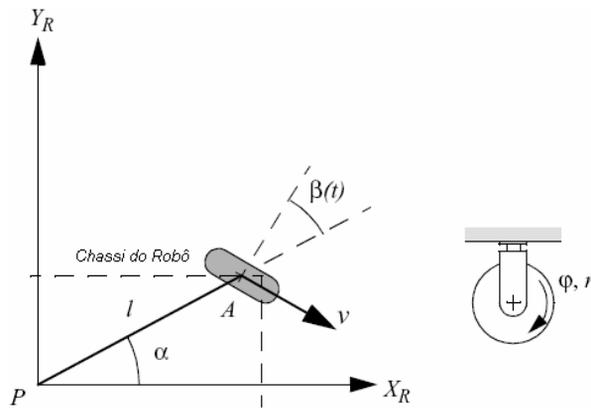


Figura 3.11 Parâmetros da roda padrão dirigida.

A orientação da roda para o chassi do robô já não é um valor fixo único β , porque varia em função do tempo $\beta(t)$. As restrições de rolamento e deslizamento estão dadas por:

$$\begin{bmatrix} \text{sen}(\alpha + \beta) & -\text{cos}(\alpha + \beta) & (-l)\text{cos} \beta \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_I - r \dot{\phi} = 0 \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} \text{cos}(\alpha + \beta) & \text{sen}(\alpha + \beta) & l \text{sen} \beta \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_I = 0 \quad (3.16)$$

Estas restrições são idênticas às da roda padrão fixa porque diferentes $\dot{\phi}$ e $\dot{\beta}$ não têm impacto direto nas restrições instantâneas de movimento do robô; e somente integrando no tempo muda o ângulo e pode afetar a mobilidade do veículo.

3.2.4.3 Roda Louca (Castor)

As rodas loucas podem-se dirigir em torno de um eixo vertical, entretanto ao contrario das rodas padrão dirigidas, o eixo vertical de rotação na roda louca não atravessa o ponto de contato com o chão, é por isto que a roda louca requer um parâmetro adicional como é mostrado na **Figura 3.12**.

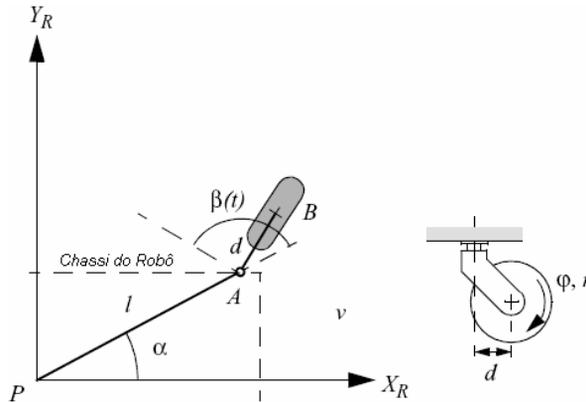


Figura 3.12 Parâmetros da roda louca (castor).

O ponto de contato da roda está agora na posição B , que está conectado por uma haste rígida AB de comprimento fixo d ao ponto A fixo à posição do eixo vertical B dirigido, e este ponto tem uma posição especificada nas coordenadas de referência do robô **Figura 3.12**. Assumindo que o plano da roda está alinhado sempre com AB . Similar à roda padrão dirigida, a roda louca tem dois parâmetros que variam em função do tempo; $\varphi(t)$ representa a rotação da roda, $\beta(t)$ denota o ângulo de direção e orientação de AB em função do tempo. Para a roda louca, a restrição de rolamento é idêntica à equação (3.15) porque o eixo central compensado não tem nenhum papel durante o movimento alinhado com o plano da roda:

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_1 - r\dot{\varphi} = 0 \quad (3.17)$$

A geometria deste tipo de roda tem impacto significativo na restrição de deslizamento; o assunto crítico é que a força lateral na roda acontece no ponto A porque este é o ponto de anexo da roda ao chassi, por causa do ponto de contato com o chão compensado relativo a A , a restrição de zero no movimento lateral estaria errada. A restrição pode-se tratar como uma restrição de rolamento, esta rotação apropriada deve ocorrer no eixo vertical:

$$\left[\cos(\alpha + \beta) \quad \text{sen}(\alpha + \beta) \quad d + l \text{sen} \beta \right] R(\theta) \dot{\xi}_I + d \dot{\beta} = 0 \quad (3.18)$$

Na equação (3.18) qualquer movimento ortogonal ao plano da roda deve ser balanceado por uma quantidade equivalente e oposta à quantidade de movimento dirigido da roda louca; este resultado é crítico ao sucesso da roda porque ajustado o valor de $\dot{\beta}$ qualquer movimento lateral arbitrário pode ser aceitável. Numa roda padrão dirigida a ação de direção não causa o movimento do chassi por si só, mas numa roda louca a própria ação de direção move o chassi do robô por causa das compensações entre o ponto de contato com o chão e o eixo vertical de rotação.

Mais concisamente pode-se ver nas equações (3.17) e (3.18) que qualquer movimento determinado no chassi do robô $\dot{\xi}_I$, existe algum valor para a velocidade de rotação $\dot{\varphi}$ e a velocidade guia $\dot{\beta}$ tais que as restrições são conhecidas; conseqüentemente um robô só com rodas loucas pode mover-se com qualquer velocidade num espaço de movimentos possíveis do robô, tais sistemas são denominados omnidirecionais. Um exemplo de tal sistema é a cadeira de escritório com cinco rodas loucas.

3.2.4.4 Roda Sueca

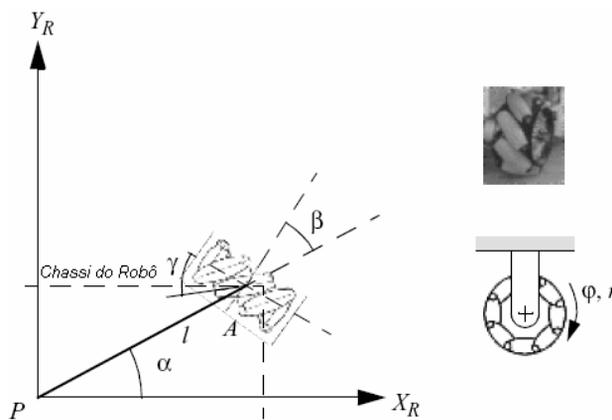


Figura 3.13 Parâmetros da roda sueca.

A roda sueca não tem nenhum eixo vertical de rotação, mas consegue mover-se omnidirecionalmente como a roda louca; isto é possível acrescentando um grau de liberdade à roda padrão fixa. As rodas suecas consistem em uma roda padrão fixa com rolos unidos ao perímetro da roda com eixos antiparalelos ao eixo central principal do componente fixo da roda. A posição de uma roda sueca é expressada exatamente como em uma roda padrão fixa com adição do termo γ representando o

ângulo entre o plano principal da roda e o eixo de rotação dos rolos apresentado na **Figura 3.13** nas coordenadas locais de referência.

As restrições instantâneas de uma roda sueca são devidas à orientação específica dos rolos pequenos; a componente de velocidade ao ponto de contato e zero ao redor do eixo de giro dos rolos, isto é mover-se para uma direção sem girar o eixo principal não é possível sem deslizar. A restrição de movimento é derivada da restrição da roda padrão fixa na equação (3.12) só que a fórmula é modificada adicionando γ :

$$\left[\begin{matrix} \text{sen}(\alpha + \beta + \gamma) & -\text{cos}(\alpha + \beta + \gamma) & (-l)\text{cos}(\beta + \gamma) \end{matrix} \right] R(\theta) \dot{\xi}_I - r\dot{\phi} \text{cos} \gamma = 0 \quad (3.19)$$

O movimento ortogonal não é restringido por causa da rotação livre $\dot{\phi}_{sw}$ dos rolos pequenos.

$$\left[\begin{matrix} \text{cos}(\alpha + \beta + \gamma) & \text{sen}(\alpha + \beta + \gamma) & l\text{sen}(\beta + \gamma) \end{matrix} \right] R(\theta) \dot{\xi}_I - r\dot{\phi} \text{sen} \gamma - r_{sw} \dot{\phi}_{sw} = 0 \quad (3.20)$$

3.2.4.5 Roda esférica

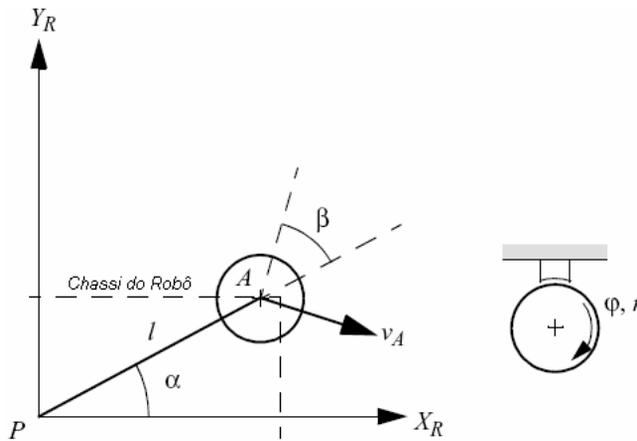


Figura 3.14 Parâmetros da roda esférica.

A roda esférica não tem em nenhum lugar restrições diretas no movimento **Figura 3.14**; tal mecanismo não tem nenhum eixo principal de rotação e conseqüentemente nenhuma restrição de rolamento ou deslizamento, a roda esférica é claramente omnidirecional e não coloca nenhuma restrição no chassi do robô. Então a equação descreve simplesmente a taxa de rolo da esfera na direção de movimento v_A no ponto A do robô.

$$\left[\begin{array}{ccc} \text{sen}(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos \beta \end{array} \right] R(\theta) \dot{\xi}_l - r\dot{\phi} = 0 \quad (3.21)$$

Por definição a rotação ortogonal da roda nesta direção é zero.

$$\left[\begin{array}{ccc} \cos(\alpha + \beta) & \text{sen}(\alpha + \beta) & l \text{sen} \beta \end{array} \right] R(\theta) \dot{\xi}_l = 0 \quad (3.22)$$

Como pode ser visto as equações para a roda esférica são exatamente iguais que as da roda padrão fixa; entretanto a interpretação da equação (3.22) é diferente. A roda esférica omnidirecional pode ter qualquer direção arbitrária de movimento onde a direção de movimento dada por β é uma variável livre deduzida da equação (3.22).

3.2.5 Restrições Cinemáticas do Robô

Dado um robô com M rodas podem-se computar as restrições cinemáticas do chassi do robô; a idéia fundamental é que cada roda impõe zero ou mais restrições no movimento do robô. As rodas são categorizadas em: (1) roda padrão fixa, (2) roda padrão dirigida, (3) roda louca, (4) roda sueca, (5) roda esférica; mas nota-se que as restrições cinemáticas da roda nas equações (3.17), (3.18) e (3.19) que a roda louca, a roda sueca e a roda esférica não impõem nenhuma restrição cinemática no chassi do robô, desde $\dot{\xi}_l$ a escala pode variar livremente em todos estes casos devido aos graus de liberdade internos de cada roda.

Conseqüentemente, somente a roda padrão fixa e a roda padrão dirigida têm impacto na cinemática do chassi do robô e requerem consideração ao computar as restrições cinemáticas do robô. Supondo que o robô tem um total de N rodas padrão, N_f rodas padrão fixas e N_d rodas padrão dirigíveis sendo $\beta_d(t)$ o ângulo variável nas N_d rodas. Em contraste β_f recorre a orientação das N_f rodas como é descrito na **Figura 3.10**. No caso do giro a roda padrão fixa e a roda padrão dirigida têm a posição rotatória ao redor do eixo horizontal que varia em função do tempo. Os casos fixos e dirigíveis são denotados separadamente como $\varphi_f(t)$ e $\varphi_d(t)$; e $\varphi(t)$ é utilizada como uma matriz agregada que combina ambos valores:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_f(t) \\ \varphi_d(t) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

As restrições de todas as rodas podem ser coletadas numa única expressão da seguinte forma:

$$J_1(\beta_d)R(\theta)\dot{\xi}_I - J_2\dot{\phi} = 0 \quad (3.24)$$

Esta expressão carrega uma semelhança forte à restrição de rolamento de uma única roda, mas substitui matrizes em vez de únicos valores levando em conta todas as rodas. J_2 é uma matriz de diagonal constante $N \times N$ cujas entradas são os raios r de todas as rodas padrão. $J_1(\beta_d)$ Denota uma matriz com projeções para todas as rodas e seus movimentos ao longo dos planos individuais de cada roda, como é mostrado a continuação:

$$J_1(\beta_d) = \begin{bmatrix} J_{1f} \\ J_{1d}(\beta_d) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Note-se que na equação (3.25) $J_1(\beta_d)$ é só função de β_d e não de β_f . Isto é porque as orientações das rodas padrão dirigidas variam em função do tempo e as orientações das rodas padrão fixas são constantes. J_{1f} é uma matriz constante das projeções para todas as rodas padrão fixas, tem tamanho ($N_f \times 3$) com cada linha que consiste nos três termos do vetor da equação (3.12) para cada roda padrão fixa. $J_{1d}(\beta_d)$ é uma matriz de ($N_d \times 3$) com cada linha que consiste nos três termos do vetor da equação (3.15) para cada roda padrão dirigida.

Em resumo a equação (3.24) representa a restrição que todas as rodas padrão devem girar em torno de seu eixo horizontal uma quantidade apropriada baseada nos movimentos ao longo do plano da roda de modo que o rolo aconteça no ponto de contato com o chão. Para coletar as restrições de deslizamento de todas as rodas padrão numa única expressão com a mesma estrutura das equações (3.13) e (3.16) se usa a mesma técnica, obtendo as seguintes equações:

$$C_1(\beta_d)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (3.26)$$

$$C_1(\beta_d) = \begin{bmatrix} C_{1f} \\ C_{1d}(\beta_d) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

C_{1f} e C_{1d} são $(N_f \times 3)$ e $(N_d \times 3)$ matrizes cujas linhas são as três condições do vetor das equações (3.13) e (3.16) para todas as rodas padrão fixas e dirigíveis. A equação (3.26) é uma restrição sobre todas as rodas padrão que seus componentes de movimento ortogonal aos planos da roda devem ser zero, esta restrição de deslizamento sobre todas as rodas padrão têm um impacto mais significativo ao definir a manobrabilidade do chassi do robô.

3.2.6 O Robô Diferencial-Dirigido

Na seção 3.2.3 foi apresentada uma solução de cinemática direita para $\dot{\xi}_I$ de um robô diferencial-dirigido combinando a contribuição de cada roda ao movimento do robô; agora se pode utilizar as ferramentas apresentadas na seção anterior para construir a mesma expressão cinemática pela aplicação direta das restrições para todo tipo de roda.

As equações (3.24) e (3.26) relacionam o movimento do robô com as restrições de rolamento e deslizamento $J_1(\beta_d)$ e $C_1(\beta_d)$, e a velocidade de giro das rodas do robô $\dot{\varphi}$; juntando estas duas equações obtemos a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} J_1(\beta_d) \\ C_1(\beta_d) \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} J_2 \dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Considerando o robô diferencial dirigido da **Figura 3.9** se constrói $J_1(\beta_d)$ e $C_1(\beta_d)$ diretamente das restrições de cada roda. A roda louca é sem energia e é livre de mover-se em qualquer direção, assim que é ignorado o terceiro ponto de contato completamente. As duas rodas de movimentação restantes não são dirigidas, e então $J_1(\beta_d)$ e $C_1(\beta_d)$ se simplifica a J_{1f} e C_{1f} respectivamente. Para empregar a fórmula da restrição de rolamento da roda padrão fixa da equação (3.12) se deve primeiramente identificar valores de cada roda para α e β ; supondo que as coordenadas de referência do robô estão alinhadas tais que o robô se movimenta para frente longitudinalmente ao longo de $+X_R$, mostrado na **Figura 3.7**. Neste caso para a roda direita $\alpha = -\frac{\pi}{2}$, $\beta = \pi$, e para a roda esquerda, $\alpha = \frac{\pi}{2}$, $\beta = 0$. O valor de β para

a roda direita é necessário, para assegurar que a rotação positiva cause o movimento na direção $+X_R$ (**Figura 3.10**). Agora pode-se computar a matriz J_{1f} e C_{1f} usando os termos das equações (3.12) e (3.13), sendo que as duas rodas padrão fixas estão paralelas, a equação (3.13) resulta em só uma equação independente e a equação (3.28) dá como resultado:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & l \\ 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_l = \begin{bmatrix} J_2 \varphi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Invertendo a equação (3.29) temos a equação cinemática específica do robô diferencial dirigido:

$$\dot{\xi}_l = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & l \\ 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_2 \varphi \\ 0 \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_2 \varphi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Isto demonstra que para o caso do robô diferencial-dirigido a combinação das restrições de rolamento e deslizamento descreve o comportamento da cinemática baseado no cálculo manual da seção 3.2.3.

3.2.7 Manobrabilidade do Robô Móvel

A mobilidade cinemática do chassi do robô, é a habilidade de mover-se diretamente no ambiente, a restrição básica que limita a mobilidade é a regra que cada roda deve satisfazer sua restrição de deslizamento. Então podemos derivar formalmente a mobilidade do robô começando pela equação (3.26).

Além ao movimento cinemático instantâneo, um robô móvel pode manipular sua posição no tempo guiando as rodas dirigíveis; a manobrabilidade total de um robô é uma combinação da mobilidade baseada na restrição cinemática de deslizamento das rodas padrão, mais a liberdade adicional contribuída guiando e girando as rodas padrão dirigíveis.

3.2.7.1 Grau de Mobilidade

A equação (3.26) impõe a restrição que toda roda tem que evitar qualquer deslizamento lateral. Especificando separadamente a restrição para cada uma das rodas padrão fixas e dirigíveis obtém-se:

$$C_{1f}R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (3.31)$$

$$C_{1d}(\beta_d)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (3.32)$$

Para as duas restrições a ser satisfeitas o vetor de movimento $R(\theta)\dot{\xi}_I$ deve pertencer ao espaço nulo da matriz de projeção $C_1(\beta_d)$ que simplesmente é uma combinação de C_{1f} e C_{1d} . Matematicamente o espaço nulo de $C_1(\beta_d)$ é o espaço N tal que para qualquer vetor n em N $C_1(\beta_d)n = 0$. De acordo com as restrições cinemáticas, o movimento do robô sempre deve estar dentro do espaço N ; as restrições cinemáticas (equações (3.31) e (3.32)) podem ser demonstradas geometricamente usando o conceito de centro instantâneo de rotação do robô (CIR).

Considerando uma única roda padrão, forçada pela restrição de deslizamento para que o movimento lateral seja zero. Isto pode ser mostrado geometricamente traçando uma linha de movimento zero pelo eixo horizontal, perpendicular ao plano da roda (**Figura 3.15**); em qualquer determinado momento o movimento da roda ao longo da linha zero de movimento deve ser zero ou seja a roda deve mover-se instantaneamente ao longo de algum círculo de raio R tal que o centro do círculo está situado na linha zero de movimento. Este ponto é chamado o centro instantâneo de rotação, pode encontrar-se em qualquer lugar ao longo da linha zero de movimento; quando R é infinito a roda move-se em uma linha reta.

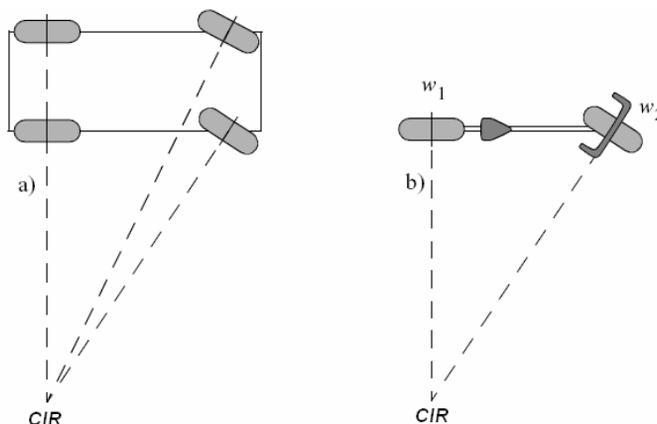


Figura 3.15 (a) Carro de quatro rodas com direção Ackerman. **(b)** Bicicleta.

Um robô como o veículo Ackerman da **Figura 3.15 (a)** pode ter diversas rodas, mas deve ter um único *CIR*, porque todas suas linhas de movimento zero se encontram num único ponto, há uma única solução para o movimento do robô colocar o *CIR* neste ponto de reunião.

A construção geométrica do *CIR* demonstra como a mobilidade do robô é uma função do número de restrições no movimento do robô não do número de rodas. Na **Figura 3.15 (b)** a bicicleta mostrada tem duas rodas w_1 e w_2 , cada roda contribui numa restrição ou numa linha zero de movimento; levando juntas as duas restrições resulta um único ponto como a única solução para o *CIR*. Isto é porque as restrições são independentes, e assim cada uma adiciona restrições no movimento total do robô.

No caso do robô diferencial dirigido da **Figura 3.16 (a)** as duas rodas estão alinhadas ao longo do mesmo eixo horizontal então o *CIR* é restringido para encontrar-se ao longo de uma linha não em um ponto específico. De fato, a segunda roda não impõe nenhuma restrição de movimento adicional do robô desde que sua linha zero de movimento seja idêntica à da primeira roda; assim embora o chassi da bicicleta e do diferencial-dirigido tenha o mesmo número de rodas não omnidirecionais, a bicicleta tem duas restrições cinemáticas independentes e o diferencial-dirigido tem somente uma.

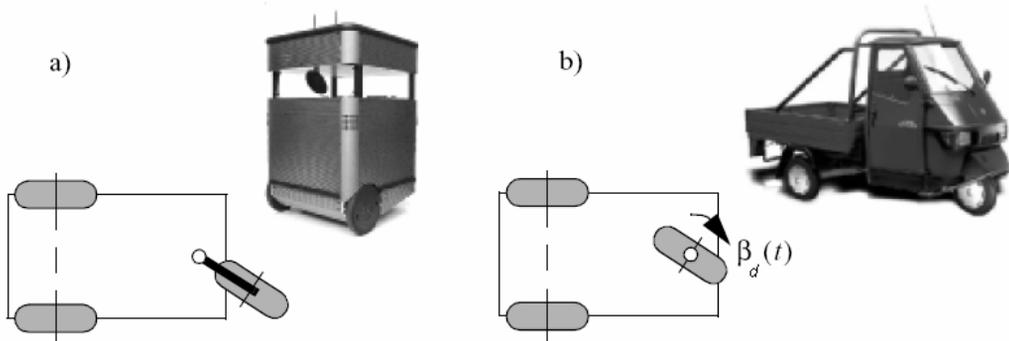


Figura 3.16 (a) Robô diferencial-dirigido com duas rodas individualmente motorizadas e uma roda louca. **(b)** Triciclo com duas rodas padrão fixas e uma roda padrão dirigida.

O veículo Ackerman da **Figura 3.15 (a)** demonstra outra maneira em que uma roda não contribui numa restrição independente na cinemática do robô; este veículo tem duas rodas padrão dirigidas, dada a posição instantânea de apenas uma das rodas dirigíveis e a posição das rodas traseiras fixas há somente uma única solução para o *CIR*. A posição da segunda roda dirigível é absolutamente restringida pelo *CIR*; conseqüentemente não oferece nenhuma restrição independente ao movimento do robô.

A cinemática do chassi do robô é uma função do jogo das restrições independentes que surgem de todas as rodas padrão, a interpretação matemática de independência é relativa ao grau de uma matriz. O grau de uma matriz é o menor número de linhas independentes ou de colunas. A equação (3.26) representa todas as restrições de deslizamento impostas pelas rodas do robô móvel. Por conseguinte o grau $[C_1(\beta_d)]$ é o número de restrições independentes. O maior número de restrições independentes é conseqüentemente o maior grau de $C_1(\beta_d)$; por exemplo, considerando um robô com uma única roda padrão fixa, lembrando que somente consideramos rodas padrão, este robô pode ser um monociclo ou pode ter várias rodas suecas, entretanto tem exatamente uma roda padrão fixa. A roda está em uma posição especificada pelos parâmetros α, β, l relativos às coordenadas locais de referência, $C_1(\beta_d)$ esta compreendido por C_{1f} e C_{1d} se não há nenhuma roda padrão dirigível C_{1d} é nulo e então $C_1(\beta_d)$ só contem C_{1f} , porque há uma roda padrão fixa, esta matriz tem grau de 1 então o robô tem uma única restrição na mobilidade:

$$C_1(\beta_d) = C_{1f} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \text{sen}(\alpha + \beta) & l \text{sen} \beta \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Adicionando uma roda padrão fixa para criar um robô diferencial-dirigido com restrições na segunda roda sendo alinhada com o mesmo eixo horizontal que a roda original; sem perda de generalidade, se pode colocar o ponto P no ponto meio entre os centros das duas rodas. Dado α_1, β_1, l_1 para a roda w_1 e α_2, β_2, l_2 para a roda w_2 geometricamente $\{(l_1 = l_2), (\beta_1 = \beta_2 = 0), (\alpha_1 + \pi = \alpha_2)\}$. Então neste caso a matriz $C_1(\beta_d)$ tem duas restrições, mas o grau é um:

$$C_1(\beta_d) = C_{1f} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \text{sen}(\alpha_1) & 0 \\ \cos(\alpha_1 + \pi) & \text{sen}(\alpha_1 + \pi) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Alternativamente considerando o caso quando w_2 é colocado no plano da roda de w_1 mas com a mesma orientação, como em uma bicicleta com a direção presa na posição dianteira. O ponto P é colocado novamente entre os dos centros e se orientam as rodas tais que se encontram no eixo x_1 . Esta geometria implica

$\{(l_1 = l_2), (\beta_1 = \beta_2 = \frac{\pi}{2}), (\alpha_1 = 0), (\alpha_2 = \pi)\}$ e então a matriz $C_1(\beta_d)$ retém duas restrições independentes e o grau é dois:

$$C_1(\beta_d) = C_{1f} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & l_1 \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{3\pi}{2}\right) & \text{sen}\left(\frac{3\pi}{2}\right) & l_1 \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_1 \\ 0 & -1 & l_1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Em geral, se o grau $[C_1(\beta_d)] > 1$ então o veículo no melhor dos casos só viaja ao longo de um círculo ou ao longo de uma linha reta; esta configuração significa que o robô tem duas ou mais restrições independentes devido às rodas padrão fixas que não compartilham o mesmo eixo central de rotação. Em geral, um robô pode ter zero ou mais rodas padrão fixas e zero ou mais rodas padrão dirigíveis e podem-se identificar os possíveis valores de graus para qualquer robô: $0 \leq \text{grau}[C_1(\beta_d)] \leq 3$. O $\text{grau}[C_1(\beta_d)] = 0$ somente, se houver zero restrições independentes em $C_1(\beta_d)$; neste caso não existe nenhuma roda padrão fixa nem dirigível unidas à armação do robô: $N_f = N_d = 0$. Considerando o outro extremo $\text{grau}[C_1(\beta_d)] = 3$ este é o máximo grau possível desde que as restrições cinemáticas são especificadas ao longo de três graus de liberdade. Então não pode haver mais de três restrições independentes; quando $\text{grau}[C_1(\beta_d)] = 3$ o robô é completamente restrito em todas as direções e então o movimento no plano é completamente impossível.

O grau de mobilidade de um robô é dado por:

$$\delta_m = \dim N[C_1(\beta_d)] = 3 - \text{grau}[C_1(\beta_d)] \quad (3.36)$$

A dimensionalidade do espaço nulo ($\dim N$) da matriz $C_1(\beta_d)$ é uma medida do número de graus de liberdade do chassi do robô, que podem ser imediatamente manipulados através das mudanças na velocidade da roda, é por isso que δ_m deve variar entre 0 e 3; considerando um chassi diferencial-dirigido com duas rodas padrão fixas que têm o eixo horizontal comum, como já foi discutido, a segunda roda não adiciona nenhuma restrição independente ao sistema; então $\text{grau}[C_1(\beta_d)] = 1$ e

$\delta_m = 2$. Um robô diferencial-dirigido pode controlar a taxa da mudança na orientação e a velocidade para frente e para trás manipulando as velocidades da roda. Ou seja, o *CIR* é restringido para encontrar-se na linha infinita que se estende dos eixos horizontais de suas rodas. Em contraste, considerando o chassi da bicicleta, a configuração consiste numa roda padrão fixa e uma roda padrão dirigida; neste caso, cada roda contribui numa restrição de deslizamento independente a $C_1(\beta_d)$, então $\delta_m = 1$. A bicicleta tem o mesmo número de rodas omnidirecionais que o chassi diferencial-dirigido e certamente uma de suas rodas é dirigida, contudo tem um grau menos de mobilidade. Uma bicicleta tem só o controle sobre a velocidade para diante e para trás pela manipulação direta da velocidade da roda somente guiando a bicicleta pode mudar seu *CIR*.

Baseado na equação (3.36) qualquer robô que tenha só rodas omnidirecionais tais como as rodas suecas ou esféricas terá uma mobilidade máxima $\delta_m = 3$; tal robô pode manipular diretamente os três graus de liberdade.

3.2.7.2 Grau de Dirigibilidade

A dirigibilidade é o número de parâmetros de direção independentemente controláveis definido como δ_d :

$$\delta_d = \text{grau}[C_{1d}(\beta_d)] \quad (3.37)$$

No caso da mobilidade um aumento no grau $C_1(\beta_d)$ implica mais restrições cinemáticas e assim um sistema menos móvel; no caso da dirigibilidade um aumento no grau $C_{1d}(\beta_d)$ implica mais graus de liberdade na direção e assim uma manobrabilidade maior. Então se $C_1(\beta_d)$ inclui $C_{1d}(\beta_d)$ significa que uma roda padrão dirigida pode diminuir a mobilidade e aumentar a dirigibilidade, logo é imposta uma restrição cinemática, mas a habilidade de mudar a orientação pode conduzir a trajetórias adicionais. A escala de δ_d pode ser especificada: $0 \leq \delta_d \leq 2$; o caso $\delta_d = 0$ implica que o robô não tem nenhuma roda padrão dirigível $N_d = 0$. O caso $\delta_d = 1$ é muito comum quando a configuração do robô inclui uma ou mais rodas padrão dirigíveis. O caso $\delta_d = 2$ só é possível em robôs sem rodas padrão fixas; $N_f = 0$; dadas estas circunstâncias é possível criar um chassi com duas rodas padrão

dirigíveis separadas, como a pseudobicicleta onde ambas rodas são dirigíveis. Então orientar uma roda restringe a CIR para uma linha enquanto a segunda roda pode restringir o CIR para qualquer ponto ao longo daquela linha; isto significa que $\delta_d = 2$ implica que o robô pode colocar o seu CIR em qualquer lugar no plano da terra.

Por exemplo, considerando um automóvel ordinário $N_f = 2$ e $N_d = 2$ mas as rodas fixas compartilham o eixo comum e assim $\text{grau}[C_{1f}] = 1$, as rodas fixas e qualquer uma das rodas dirigíveis restringe o CIR para ser um ponto ao longo da linha que se estende do eixo traseiro; mas a segunda roda dirigível não pode impor nenhuma restrição cinemática independente por isto $\text{grau}[C_{1d}(\beta_d)] = 1$, neste caso $\delta_m = 1$ e $\delta_d = 1$.

3.2.7.3 Grau de Manobrabilidade

Os graus de liberdade totais que o robô pode manipular são chamados de graus de manobrabilidade δ_M que podem ser definidos em termos de mobilidade e dirigibilidade, assim:

$$\delta_M = \delta_m + \delta_d \tag{3.38}$$

Então manobrabilidade inclui os graus de liberdade que o robô manipula diretamente com a velocidade da roda, e os graus de liberdade que manipula indiretamente trocando e movimentando a configuração de direção. A **Figura 3.17** tem os tipos básicos de configurações de rodas.

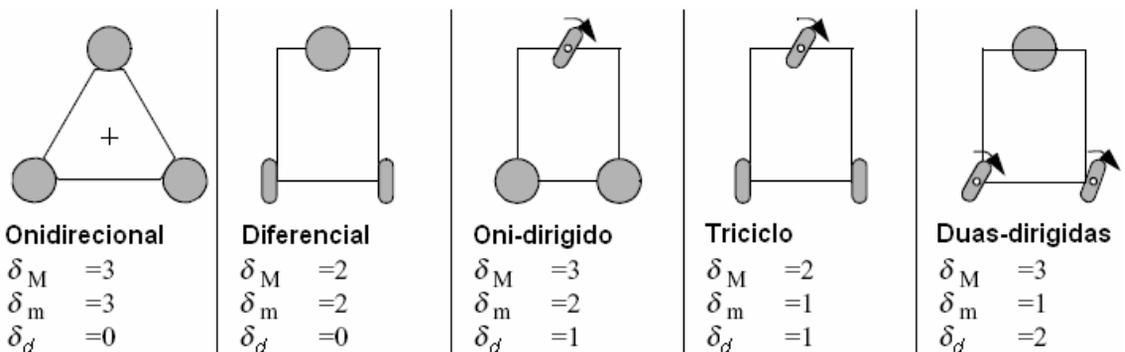


Figura 3.17 Os cinco tipos básicos de configuração de três rodas, as rodas esféricas podem ser substituídas por rodas loucas ou suecas sem influenciar na manobrabilidade(SIEGWART & NOURBAKHSH, 2004).

Dois robôs com o mesmo δ_M não são necessariamente equivalentes, por exemplo, a geometria do diferencial-dirigido e do triciclo tem uma manobrabilidade igual $\delta_M = 2$, no diferencial dirigido toda a manobrabilidade é resultado da mobilidade direta porque $\delta_m = 2$ e $\delta_d = 0$, no caso do triciclo a manobrabilidade é resultado de $\delta_m = 1$ e $\delta_d = 1$. Nenhuma destas configurações permite variar a escala do *CIR* em qualquer lugar do plano, em ambos casos o *CIR* deve encontrar-se em uma linha predefinida com respeito às coordenadas de referência. Mais geralmente para qualquer robô com $\delta_M = 2$ o *CIR* é sempre restringido para encontrar-se em uma linha e para qualquer robô com $\delta_M = 3$ o *CIR* pode ser ajustado em qualquer ponto do plano.

3.2.8 Espaço de Trabalho do Robô Móvel

Para um robô, manobrabilidade é equivalente ao controle dos graus de liberdade, mas o robô é situado em algum ambiente e por isto que agora é preciso situar a análise em um ambiente e achar as maneiras com que o robô pode usar o controle dos graus de liberdade para se posicionar no ambiente. Por exemplo, considerando o veículo Ackerman o número total de controle de graus de liberdade é $\delta_M = 2$, um para guiar e o segundo para atuar nas rodas de movimentação, mas são três os graus totais de liberdade do veículo no ambiente: o carro pode posicionar-se em qualquer ponto x, y no plano e em qualquer ângulo θ .

Assim identificar as configurações possíveis no espaço do robô é importante porque surpreendentemente pode exceder δ_M ; além do espaço de trabalho é importante como o robô pode se mover entre várias configurações.

3.2.8.1 Graus de Liberdade

Definir o espaço de trabalho do robô é útil primeiramente para examinar o espaço admissível de velocidade; dadas as restrições cinemáticas do robô, seu espaço de velocidade descreve os componentes independentes do movimento do robô que ele consegue controlar. O número de dimensões no espaço de velocidade de um robô é o número de velocidades independentemente realizáveis, isto é chamado de graus de liberdade diferenciáveis (*GDL*). Os *GDL* do robô são sempre iguais ao grau de mobilidade δ_m .

Uma bicicleta tem manobrabilidade: $\delta_M = \delta_m + \delta_d = 1+1=2$ mas o *GDL* da bicicleta é 1. No contraste, considerando um robô com três rodas suetas; sabemos que neste caso há zero rodas padrão $\delta_M = \delta_m + \delta_d = 3+0=3$, então o robô tem três *GDL*. Isto é apropriado porque tal robô não tem nenhuma restrição cinemática no movimento, pode ajustar independente todas as três variáveis de posição: $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$. Dada a diferença dos *GDL* entre a bicicleta e o robô com três rodas suetas, considerando os graus de liberdade totais no espaço de trabalho de cada configuração; o robô pode alcançar qualquer posição (x, y, θ) no ambiente e pode diretamente conseguir as posições objetivo de todos os três eixos simultaneamente porque *GDL*=3. Claramente tem uma área de trabalho com *GDL*=3. A bicicleta por sua parte também pode alcançar qualquer posição (x, y, θ) mas pode requerer mais tempo e energia do que o robô com três rodas suetas. Por exemplo, se uma configuração de bicicleta tem que mover-se 1m lateralmente a manobra mais simples seria uma espiral ou um movimento para frente e para trás semelhante ao movimento de estacionamento dos automóveis, não obstante a bicicleta pode alcançar qualquer posição (x, y, θ) e conseqüentemente o espaço de trabalho da bicicleta tem também *GDL*=3.

Visivelmente existe uma relação de desigualdade no trabalho $GDL \leq \delta_M \leq GDL$. Embora, a dimensionalidade do espaço de trabalho de um robô é um atributo importante, está claro do exemplo acima que as trajetórias disponíveis é uma matéria também do robô; da mesma maneira que os *GDL* no espaço de trabalho governam a habilidade do robô para alcançar várias posições, assim os *GDL* do robô governam a habilidade para alcançar vários trajetos.

3.2.8.2 Robôs Holonômicos

Na comunidade robótica ao descrever o espaço de trajeto de um robô móvel é freqüentemente usado o conceito de holonômico; o termo holonômico tem aplicabilidade em diversas áreas da matemática, incluindo equações diferenciais, funções e expressões de restrições (BORISOV & MAMAEV, 2002). Na robótica móvel o termo refere-se especificamente às restrições cinemáticas no chassi do robô; um robô holonômico é um robô que tem zero restrições cinemáticas não holonômicas, inversamente um robô não holonômico é um robô com uma ou mais restrições cinemáticas não holonômicas. Os sistemas não holonômicos estão presentes em uma grande variedade de ambientes: variando de engenharia a robótica, veículos com

rodas e dinâmica de satélites, dispositivos de manipulação e sistemas de locomoção. Muitos problemas típicos mecânicos e na teoria de controle, aparecem de modo natural ao investigar o comportamento desta classe de sistemas (CORTÉS, 2002). Controle de movimento poderia não ser uma tarefa fácil para sistemas não holonômicos, entretanto foi estudado por vários grupos de pesquisa como CANUDAS e SORDALEN (1993), e algumas soluções adequadas para o controle de movimento de um robô móvel estão disponíveis na literatura.

Uma restrição cinemática holonômica pode ser expressada, como uma função explícita somente de variáveis de posição; por exemplo, no robô móvel com uma única roda padrão fixa, uma restrição cinemática holonômica seria utilizando somente $\alpha_1, \beta_1, l_1, r_1, \varphi_1, x, y, \theta$. Tal restrição não pode utilizar derivadas destes valores como $\dot{\varphi}$ ou $\dot{\xi}$; uma restrição cinemática não holonômica requer uma relação diferencial tal como a derivada da variável de posição, além disso, não pode ser integrado para providenciar restrições em termos somente de variáveis de posição. Por causa deste último ponto de vista, os sistemas não holonômicos são chamados freqüentemente de sistemas não integráveis.

Considerando a restrição de deslizamento da roda padrão fixa:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \text{sen}(\alpha + \beta) & l \text{sen} \beta \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_r = 0 \quad (3.39)$$

Esta restrição tem que usar o movimento do robô $\dot{\xi}$ em lugar da posição ξ porque o ponto é que a restrição perpendicular de movimento ao plano da roda do robô seja zero, a restrição é não integrável dependendo explicitamente do movimento do robô então a restrição de deslizamento é uma restrição não holonômica. Considerando a configuração da bicicleta, com uma roda padrão fixa e uma dirigida, a restrição de deslizamento para a roda fixa estará dentro da força para tal robô, então, podemos concluir que a bicicleta é um robô não holonômico. Um caso de robô holonômico existe quando não há nenhuma restrição cinemática $N_f = 0$ e $N_d = 0$; desde que não exista nenhuma restrição cinemática também não há nenhuma restrição não holonômica e então o robô é holonômico, este é o caso de todos os robôs holonômicos com $\delta_M = 3$.

Um modo alternativo para descrever um robô holonômico é baseado na relação entre os graus de liberdade diferenciais do robô e os graus de liberdade no espaço de trabalho: um robô é holonômico se e somente se $GDDL = GDL$. Intuitivamente, isto é porque as restrições não holonômicas (impostas pelas rodas padrão fixas ou dirigíveis)

no robô podem conseguir que os graus de liberdade no espaço de trabalho excedam os graus de liberdade diferenciais $GDL > GDLD$, como os robôs diferencial-dirigidos, bicicletas e triciclos.

Na robótica móvel um chassi útil deve conseguir localizar-se num espaço de trabalho com dimensionalidade de 3, assim geralmente é requerido $GDL = 3$ no chassi. Mas as habilidades do “holonômico” para manobrar em torno de obstáculos sem afetar a orientação e de seguir um alvo desenvolvendo um trajeto arbitrário são considerações adicionalmente importantes. Por estas razões a forma particular de holonômicos mais relevante para robótica móvel é $GDLD = GDL = 3$. Definimos esta classe de configurações de robô como omnidirecionais: um robô omnidirecional é um robô holonômico com $GDLD = 3$.

3.2.8.3 Considerações de Caminho e Trajetória

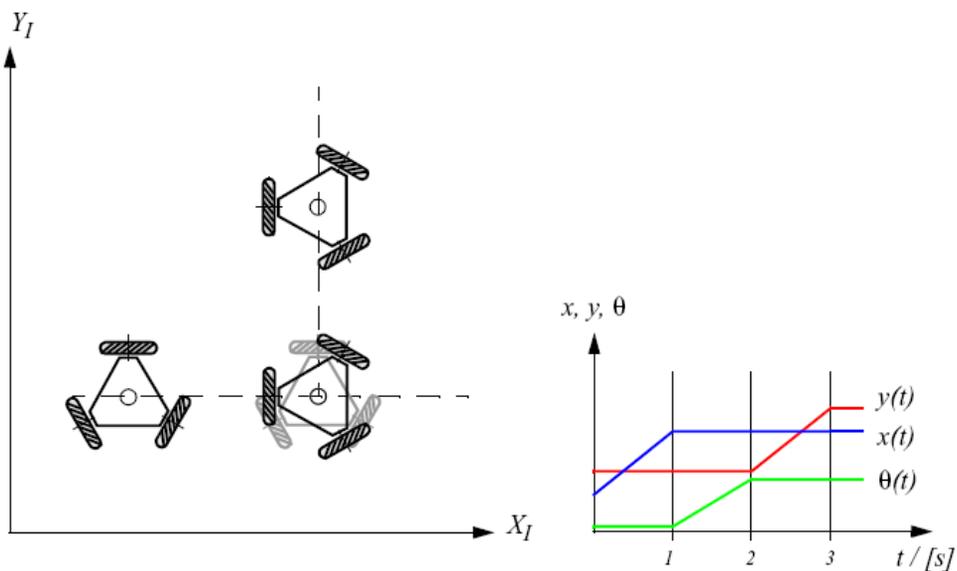


Figura 3.18 Exemplo de uma trajetória com um robô omnidirecional.

Em robótica móvel não é importante só a habilidade do robô para alcançar as configurações finais requeridas, mas também sobre como chegar lá. Considerando a habilidade de um robô de seguir caminhos: no melhor caso um robô deveria seguir qualquer caminho através do espaço de trabalho. Claramente qualquer robô omnidirecional pode fazer isso porque é holonômico num espaço de trabalho tridimensional. Infelizmente, robôs omnidirecionais devem usar rodas sem restrições limitando a escolha às rodas suecas, loucas ou esféricas; embora poderosas são menos comuns do que as rodas padrão fixas ou dirigidas, principalmente porque os projetos e fabricação são um tanto complexos e caros. Adicionalmente, as restrições

não holonômicas poderiam melhorar drasticamente a estabilidade dos movimentos; considerando um veículo omnidirecional que dirigi em alta velocidade numa curva com diâmetro constante durante o movimento o veículo será exposto a uma força centrípeta não desprezível, esta força lateral empurra o veículo para fora da curva e tem que ser neutralizado pelo torque do motor das rodas omnidirecionais, em caso de falha o veículo será jogado para fora.

Há ainda uma diferença entre um grau de liberdade concedido pela direção contra o controle direto da velocidade da roda, esta diferença está clara no contexto de trajetórias em lugar de caminhos. Uma trajetória é como um caminho exceto que ocupa uma dimensão adicional, o tempo. Conseqüentemente, para um robô omnidirecional no plano da terra um caminho denota geralmente um traço através de um espaço 3D de posição, para o mesmo robô uma trajetória denota um traço através de um espaço 4D de posição mais o tempo.

Por exemplo, considerando uma trajetória objetivo em que o robô se move ao longo do eixo central X_i a uma velocidade constante de $1 \frac{m}{s}$ durante 1 segundo, muda a orientação anti-horário 90 graus também em um segundo, depois se move paralelo ao eixo Y_i por o segundo final. A trajetória de 3 segundos é mostrada na **Figura 3.18**. O robô pode alcançar um pouco de velocidade arbitrária finita em cada roda, mas para simplicidade supomos que a aceleração é infinita leva o tempo a zero para alcançar qualquer velocidade desejada, debaixo destas suposições o robô omnidirecional da **Figura 3.18** pode seguir certamente a trajetória.

Duas rodas dirigidas com $\delta_M = 3$ devem poder seguir o caminho que seria o resultado de projetar esta trajetória num espaço de trabalho infinito. Entretanto não pode seguir esta trajetória 4D. Mesmo se a velocidade de direção for infinita e arbitrária, embora as duas dirigidas fossem capaz de mudar imediatamente a velocidade de direção, teriam que esperar a mudança do ângulo das rodas dirigíveis à posição desejada, antes de iniciar uma mudança na orientação do chassi do robô. Em resumo, as rodas dirigidas requerem mudanças nos graus de liberdade internos e estas mudanças levam tempo, trajetórias arbitrárias não são atingíveis. A **Figura 3.19** descreve a trajetória mais similar que duas rodas dirigidas podem alcançar; em contraste, às três fases desejadas de movimento esta trajetória tem cinco fases.

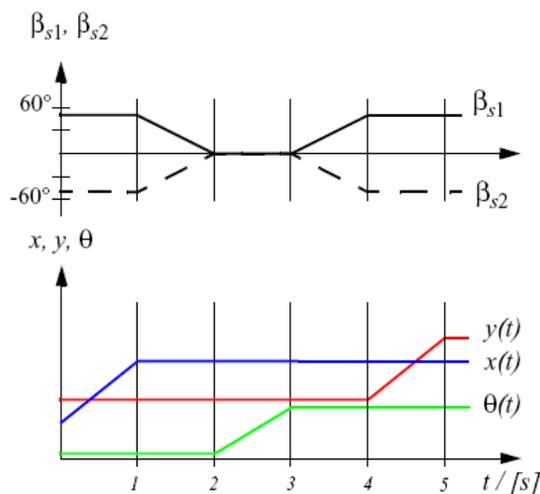
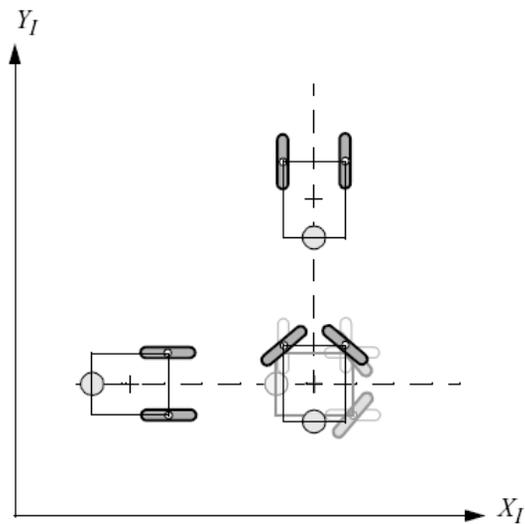


Figura 3.19 Exemplo da trajetória do robô similar à Figura 3.18 com duas rodas dirigidas.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE UM ALGORITMO FUZZY PARA O CONTROLE DE VELOCIDADE DOS MOTORES DO ROBOTFIRE

A extinção de um incêndio é uma tarefa que deve ser desenvolvida no menor tempo possível, porque é deste tempo que depende o número de pessoas que podem conseguir salvar-se. Perda de tempo em um incêndio pode significar perda de vidas humanas, é por isto que para o controle de motores neste projeto é preciso respostas no menor tempo possível o melhor que isso em tempo real.

Em um grande número de aplicações de controle de velocidade de motores, requer-se uma resposta dinâmica rápida e uma elevada densidade de potência. Em outras palavras, o peso e o volume dos dispositivos (por exemplo, motores elétricos e

conversores estáticos) utilizados no sistema de acionamento devem ser os menores possíveis, para este tipo de aplicação.

Quanto ao comportamento dinâmico do sistema de acionamento, a aplicação de técnicas de modelagem e controle avançadas, tais como modelagem e controle fuzzy, possibilita o desenvolvimento de acionamentos de alto desempenho dinâmico, mas também com elevado grau de robustez e com capacidade de adaptação ou aprendizagem.

3.3.1 DSP's (Digital Signal Processor)

Os sistemas digitais estão presentes na vida de todo mundo, desde os eletrodomésticos aos sistemas industriais, passando pelo computador pessoal e telefones celulares. Em quase tudo que tocamos existe um microprocessador, ou um microcontrolador ou um processador digital de sinais (do inglês, Digital Signal Processor - DSP). O baixo custo dos microprocessadores fez com que processos, antes controlados por componentes analógicos, passassem a ser controlados por sistemas digitais programáveis. Somam-se ao baixo custo outras vantagens dos sistemas digitais, como flexibilidade, confiabilidade, repetitividade, entre outras. Hoje em dia, está disponível uma enormidade de processadores e a cada dia são lançados novos processadores no mercado.

De um modo geral, os processadores podem ser divididos em três classes principais:

- ✓ Microprocessadores
- ✓ Microcontroladores
- ✓ DSP (Processadores Digitais de Sinais).

Cada uma destas classes possui estruturas particulares que as diferenciam entre elas, porém conceitualmente são muito parecidas, isto quer dizer que ao estudar uma estrutura particular de processador não se terá grande dificuldade em aprender uma nova estrutura. Conceitos como modos de endereçamentos, unidade lógica e aritmética, unidade de controle e execução, registradores, acesso a dispositivos e outros, são comuns a todos os processadores.

Historicamente, os primeiros protótipos de processadores destinados ao processamento digital de sinais datam das décadas de 60 e 70. Devido aos custos elevados suas aplicações foram limitadas a somente algumas aplicações críticas. Esforços pioneiros foram feitos em quatro áreas chaves: radar e sonar onde a segurança nacional estava em risco; exploração de petróleo onde poderiam ser feitas

grandes fortunas; exploração espacial onde os dados devem ter uma grande precisão; e no processamento de imagens na área médica onde poderiam ser economizadas vidas. A revolução do computador pessoal nos anos 80 e 90 causaram uma explosão de novas aplicações utilizando DSP's. Em lugar de estar incentivado por razões militares e governamentais, o DSP foi dirigido de repente para o mercado comercial e rapidamente definiu seus produtos alvos como: telefones móveis, CD players, modems, entre outros, em 1982, a Texas Instruments lançam o TMS32010, o primeiro DSP de ponto fixo da família TMS320. Neste mesmo ano, a revista de Electronic Products premiou o TMS32010 com o título "Produto do Ano". O TMS32010 se tornou o "ponto de partida" para as futuras gerações dos TMS320 (EMBREE, 1995).

3.3.1.1 Definição

Os sentidos humanos convivem com sinais analógicos como: som, luz, temperatura, pressão, mas para um computador digital, concebido para operar com sinais digitais, a manipulação direta destes sinais não é possível. Um sinal digital é representado por uma seqüência de dígitos 1 e 0 que pode ser uma representação numérica do sinal analógico após um processo de conversão A/D (Analógico-Digital). Um sinal digital pode ser facilmente manipulado por um computador, e se necessário, convertido em sinais analógicos por um conversor D/A (Digital-Analógico). A esta manipulação de sinais se designa como DSP (Digital Signal Processing) ou processamento digital de sinais, que são métodos de processamento de sinais representados por uma seqüência de números, usando técnicas matemáticas para transformação ou análise dos mesmos.

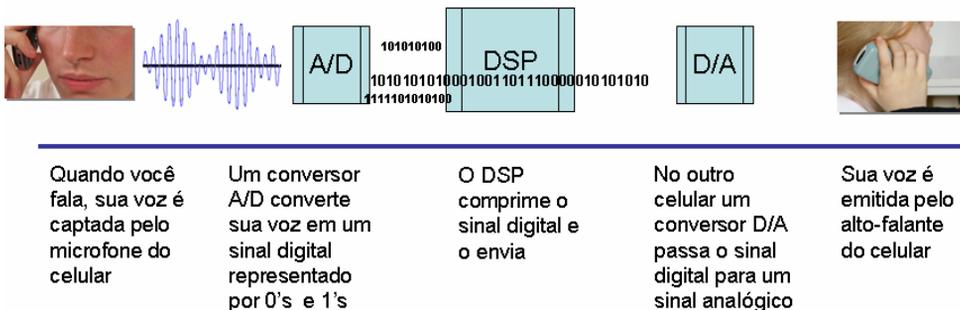


Figura 3.20 Telefonia celular: um exemplo de sistema em tempo real.

Outra característica dos sentidos humanos é o processamento em tempo-real, ou seja, a capacidade de rápida interpretação dos sinais analógicos. Em uma conversação via telefone celular digital, mostrada na **Figura 3.20**, é totalmente inconcebível haver grandes atrasos entre o momento em que se fala até ao que a

outra extremidade escute. Os microprocessadores em geral não possuem tal capacidade. A capacidade de processamento em tempo real requer processadores otimizados para executar algoritmos comuns em processamento digital de sinais. Estes processadores recebem a denominação genérica de DSP.

Processadores digitais de sinal são componentes chaves em muitos produtos eletrônicos de comunicação, industriais e instrumentação. Seu hardware e instruções especializadas executam mais eficientemente as operações matemáticas comuns em processamento de sinais. Por exemplo, como o processamento de sinais constantemente envolve multiplicações repetidas, os DSP's possuem um multiplicador rápido e múltiplas conexões com a memória para multiplicar vários dados de uma única vez. Diferente dos demais processadores, a velocidade não é o único fator a ser considerada em uma aplicação com o DSP. Tamanho das instruções, quantidade de memória requerida em uma aplicação e outras características afetam diretamente a performance do processador (LUK & CONSTANTINIDES *et al.*, 2004).

3.3.1.2 Aplicações

Atualmente os DSP's são empregados em um grande número de dispositivos eletrônicos, mas destacam-se em algumas aplicações mais comuns descritas a seguir:

✓ Telecomunicações

Telecomunicação é a transferência de informação de um local para outro. Isto inclui muitas formas de informação: conversações telefônicas, sinais de televisão, arquivos de computador e outros tipos de dados. Para transferir a informação de um ponto a outro, é preciso de um canal que pode ser um par de fios, sinal de rádio, fibra óptica, entre outros, as companhias de telecomunicações recebem para transferir informação de seus clientes, enquanto elas têm que estabelecer e manter o canal. A questão principal é financeira, ou seja, quanto mais informação pode atravessar um único canal, mais lucro. O DSP revolucionou a indústria de telecomunicações em muitas áreas: geração e detecção de tom sinalizado, filtros para remover EMI (do inglês, Electro Magnetic Interference) ruídos de alta tensão, multiplexação, compressão e cancelamento de eco, etc.

✓ Processamento de áudio

Os dois principais sentidos humanos são visão e a audição, e a maioria das aplicações com DSP está relacionada à imagem e ao processo auditivo. Como exemplos estão as aplicações na gravação de música e reconhecimento de voz.

✓ Processamento de imagens

Em 1971 foi apresentado o primeiro aparelho de tomografia computadorizada (antigamente chamada de tomografia axial computadorizada, ou CAT do inglês, Computed Axial Tomography). Tomografia computadorizada (CT) é um exemplo clássico de processamento digital de sinais. São passadas radiografias de muitas direções pela seção do corpo do paciente que é examinado, em vez de formar imagens simplesmente com as radiografias, os sinais são convertidos em dados digitais e armazenados em um computador. A informação é usada para calcular imagens que parecem ser fatias do corpo humano, estas imagens mostram muito mais detalhes que técnicas convencionais, permitindo diagnósticos melhores. O impacto da tomografia computadorizada foi quase tão grande quanto a invenção da radiografia.

✓ Instrumentação e Controle

Com a popularização dos DSP's, estes vêm sendo utilizados com frequência em instrumentos de medição e em controles industriais. Técnicas de medidas utilizando processamento digital de sinais aumentam a confiabilidade e precisão das medidas de grandezas elétricas. A alta performance em relação aos microprocessadores em geral proporcionam repostas mais rápidas em alguns processos de controle industriais (TOLIYAT & CAMPBELL, 2003).

3.3.2 Lógica Fuzzy

Tem sido reconhecido, cada vez mais, que nossa sociedade está experimentando uma significativa transformação, normalmente caracterizada como uma transição de uma sociedade industrial para uma sociedade de informação. Poucos duvidam de que essa transição seja fortemente relacionada com o surgimento e o desenvolvimento da tecnologia dos computadores e com as atividades intelectuais associadas, do que resultam novas áreas de pesquisa, tais como ciência dos sistemas, ciência da informação, análise de decisão, ou inteligência artificial.

O avanço da tecnologia de computadores tem contribuído firmemente para aumentar nossa capacidade de lidar, com êxito, com sistemas em um âmbito crescentemente amplo, incluindo sistemas que nos são previamente intratáveis, em face de sua natureza e complexidade. Embora o nível de complexidade com que nos defrontamos continue a crescer, começamos a compreender que a necessidade de simplificação de sistemas, muitos dos quais se têm tornado essenciais para caracterizar certas situações problemáticas, muitas vezes relevantes, é com frequência inevitável. Em geral, uma boa simplificação pode minimizar a perda de

informações importantes para a solução do problema em pauta. De fato, informação e complexidade estão inter-relacionadas. Mas, a simplificação se faz imprescindível. Um dos meios de simplificar um sistema muito complexo talvez, o mais significativo deles é permitir o grau de incerteza em sua descrição.

Proposições obtidas de sistemas simplificados são menos precisas (sem dúvida), mas sua relevância para o sistema original é plenamente mantida; isto é, para possibilitar um nível manejável de complexidade de um problema, é absolutamente válido introduzir no sistema uma simplificação (introdução de grau de incerteza), sem que isso afete, de maneira fundamental, o sistema analisado. O conceito de incerteza é portanto, relacionado com a complexidade da informação.

Percebe-se, atualmente, que há diferentes maneiras de lidar com incerteza, e que cada uma delas desempenha um importante papel na simplificação de problemas complexos. Uma formulação matemática, contida dentro desses vários tipos de incerteza pode ser propriamente caracterizada e pesquisada, está agora disponível, baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e das medidas fuzzy.

A teoria de conjuntos fuzzy foi desenvolvida pelo Prof. Lotfi Zadeh, catedrático do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade de Califórnia-Berkeley, na década de 60. Contudo, a teoria não foi aplicada até a metade da década de 70 quando foi criado um controlador fuzzy por Ebrahim H. Mandami do Queen Mary College, Londres. A partir daí, as aplicações começaram a se multiplicar e, hoje, os exemplos são vastos e bastante conhecidos como o célebre metrô controlado por um sistema fuzzy, que foi inaugurado em 1988 em Sendai, Japão (NUNES, 2003).

3.3.2.1 Definição

A lógica fuzzy é uma teoria matemática, que é chamada no português de lógica nebulosa que leva em consideração um aspecto de incerteza. Nebulosidade (Fuzziness) é uma palavra que designa ambigüidade que pode ser encontrada na definição de um conceito ou no sentido de uma palavra. Como seu nome implica, a teoria dos conjuntos fuzzy é, basicamente, uma teoria de conceitos graduados, uma teoria na qual tudo tem elasticidade. Há um pouco mais de três décadas, desde sua iniciação, a teoria tem amadurecido, dentro de uma vasta cadeia de conceitos inter-relacionados e técnicas, para tratar fenômenos complexos que não se emprestam para serem tratados através de uma análise que utilize os métodos clássicos, baseados na teoria das probabilidades ou na lógica bivalente. Consta que a teoria da probabilidade surgiu no século XVII, tendo, pois, uma longa tradição. Desde o seu início, a engenharia tem feito uso de suas proposições e conceitos e ela tem sido

largamente utilizada nas ciências naturais. Por outro lado, a lógica fuzzy somente começou a ser desenvolvida há cerca de uns 35 anos e seu uso, no Brasil pelo menos, ainda é restrito. Isso se deve, principalmente, ao fato da teoria fuzzy e suas possibilidades não terem sido, ainda, suficientemente divulgadas e só serem conhecidas dentro de um círculo relativamente pequeno.

A nebulosidade expressa uma incerteza que é uma parte do significado das palavras e as palavras são partes indivisíveis do pensamento humano. As pessoas pensam e expressam seus pensamentos e informações através de palavras. Se esse tipo de incerteza puder ser tratado matematicamente e a engenharia puder fazer uso disso, seus efeitos serão imensuráveis. E o são na realidade. Só no Japão, há uns dois anos, havia mais de 2000 patentes baseadas em lógica fuzzy, registradas. Diz-se que a diferença entre computadores, que somente podem utilizar processo de informações usando a matemática binária, e as pessoas é que estas últimas podem lidar com ambigüidade, e agora esta excepcional capacidade humana se pode expressar pela teoria fuzzy, tratada independentemente dos computadores e podendo ser aplicada à engenharia e a outras ciências como, por exemplo, na medicina (COSENZA-ANDRAUS & NUNES-COSENZA *et al.*, 2006) e veículos de transporte (GONZÁLEZ-ROJO & SLAMA *et al.*, 2002). Além de definições conceituais e do significado das palavras, alguns conceitos de nebulosidade estão bastante divulgados para incluir assuntos como a incerteza dos julgamentos subjetivos das pessoas.

Os critérios gerais da teoria fuzzy que fazem uso da nebulosidade são a teoria dos conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy e a teoria dos sistemas fuzzy. A teoria dos conjuntos fuzzy expressa a nebulosidade *stricto sensu* por meio de conceitos da teoria dos conjuntos; a teoria dos sistemas fuzzy trata da nebulosidade em um sentido mais abrangente. A lógica fuzzy é o conceito de conjuntos fuzzy incorporado à estrutura da lógica multivalorada. Existe, pois, o que se chama de matemática fuzzy, uma matemática padrão em que os conjuntos fuzzy e princípios de medida fuzzy são muito bem introduzidos (NUNES, 2003).

3.3.2.2 Princípios Básicos da Teoria Fuzzy

A Teoria Fuzzy baseia-se no princípio de que o pensamento humano é estruturado não em números, mas sim em classes de objetos cuja transição entre pertencer ou não a um conjunto é gradual e não abrupta; o que diferencia dos atuais computadores digitais. Assim, enquanto as fronteiras dos conjuntos clássicos são bem definidas, aquelas dos conjuntos fuzzy apresentam uma nebulosidade, a qual se tenta aproximar das imprecisões do modo de raciocínio humano. A água para um banho

pode estar um pouco fria para um indivíduo, mas isso não significa que ela não esteja, em certo grau, quente. O raciocínio humano não trabalha somente com dicotomias água fria (0) ou quente (1), mas também com o intervalo entre os dois extremos (COSENZA, 2003).

3.3.2.3 As Três Principais Características da Teoria Fuzzy

- ✓ Uso de variáveis lingüísticas no lugar ou em adição a variáveis numéricas.
- ✓ Caracterização das relações simples entre variáveis por expressões condicionais.
- ✓ Caracterização das relações complexas por algoritmos fuzzy.

3.3.2.4 Por que Fuzzy?

O termo Fuzziness, cuja tradução em português é nebulosidade, é encontrado em nossas decisões, em nossos pensamentos, na maneira como processamos informações e, particularmente, em nossa linguagem do dia-a-dia; proposições vagas podem ser obscuras, ou não muito claras, e ser sujeitas a diferentes interpretações. Frases como: *mais tarde procuro você, um pouco mais, eu não me sinto muito bem* são expressões fuzzy. A nebulosidade tem origem nas diferentes interpretações ou percepções que nós atribuímos a *mais tarde, um pouco mais e muito bem*. Assim, para engenheiros, *mais tarde* pode significar nanosegundos, enquanto para paleontólogos pode estar na ordem de milhares de anos. A ordem de grandeza é relativa; portanto, se utilizamos unidades fuzzy elas devem ser consideradas no contexto em que é empregada e devem ser encontrados o ponto de referência e a unidade de medida.

Ocasionalmente, proposições fuzzy podem indicar unidades relativas e subunidades que não indicam unidades absolutas. Quando se diz que o corredor A é rápido, que o corredor B é mais rápido do que A, e o corredor C é mais lento do que B; se fazem duas observações. As proposições fuzzy podem estabelecer taxonomia (B é mais rápido do que A e C é mais lento do que B) ou ambigüidade (não está claro se A é mais rápido do que C); além do mais, não há medida das velocidades de A, B e C.

A proposição *João é muito alto* é fuzzy porque não existe referência de medida. Em um time de basquete, com uma medida de altura de 1,90 m, *muito alto* pode significar, provavelmente, mais alto do que 1,90 m; para a média das pessoas, muito alto significa, muitas vezes, maior do que 1,60 m, mas não necessariamente maior do que 1,90 m.

Importante chamar a atenção para o fato de que a nebulosidade não significa o mesmo que probabilidade. Uma proposição é probabilística se ela expressa uma probabilidade ou grau de certeza ou se ela é o resultado de eventos claramente definidos, mas aleatoriamente. Quando se diz, por exemplo, que *há uma chance de 50% de que José chegue a tempo*, está-se diante de uma proposição puramente probabilística. Na proposição *muito provavelmente eu estarei aqui*, todas as probabilidades foram mentalmente pensadas e algum grau de certeza ou probabilidade foi exposto. Mas, por outro lado, se eu afirmo *eu posso estar aqui*, esta proposição expressa uma completa incerteza, uma indecisão, e, portanto, uma nebulosidade (NUNES, 2003).

3.3.2.5 Aplicações

Aspiradores de pó Matsushita usam controladores de quatro bits rodando algoritmos fuzzy que interrogam sensores de pó e ajustam o poder de sucção; máquinas de lavar Hitachi usam controladores fuzzy para controle de peso, verificação de tipo de tecido, sensores de sujeira e automaticamente citam os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente.

A câmara desenvolveu uma câmera com autofoco que usa um dispositivo para medir a claridade de imagens em seis regiões do campo de visão e usa a informação obtida para determinar se a imagem está no foco; ela também rastreia a taxa de mudança no movimento da lente durante a procura do foco e controla a velocidade para evitar overshoot. O sistema de controle da câmera usa doze entradas: seis para obter a claridade atual fornecendo dados para o dispositivo de autofoco e seis para medir a taxa de mudança no movimento da lente. A saída é a posição do curso da lente. O sistema fuzzy usa treze regras e requer 1,1 KB de memória.

Um ar condicionado industrial projetado pela Mitsubishi usa 25 regras de aquecimento e 25 regras de resfriamento. Um sensor de temperatura fornece a entrada, com o controle da saída alimentado por um inversor, uma válvula compressora e um ventilador. Comparado com o projeto anterior, o controlador fuzzy aquece e esfria cinco vezes mais rápido, reduz o consumo de potência em 24%, incrementa a estabilidade da temperatura por um fator de dois e utiliza menos sensores.

O entusiasmo dos japoneses por lógica fuzzy é refletido na ampla faixa de outras aplicações que eles têm pesquisado ou implementado: reconhecimento de caracteres, sistemas fuzzy óticos, robôs, helicópteros comandados por voz através de um robô, sistemas de elevadores, entre outras.

A agência de proteção ambiental nos EUA tem investigado controle fuzzy para motores de energia eficaz, e a NASA tem estudado controle fuzzy para ancorar suas naves automaticamente no espaço; simulações mostram que um sistema de controle fuzzy pode reduzir em muito o consumo de combustível. Firms como: Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler, Eaton e Whirlpool têm trabalhado em lógica fuzzy para uso em refrigeradores de baixa potência, melhorando a transmissão automotiva, e motores elétricos de energia eficaz.

Em 1995 a Maytag introduziu uma máquina de lavar pratos “inteligente” baseada em um controlador fuzzy que combina um termistor (para medida de temperatura), um sensor condutivo (para medir o nível de detergente através dos íons presentes na água), um sensor de turvação que difundi a medida e transmite luz para medir a sujeira na lavagem e um sensor magnético para ler a taxa de giro. O sistema determina uma otimização no ciclo de lavagem para qualquer carga obter os melhores resultados com o mínimo de energia, detergente e água.

Pesquisa e desenvolvimento estão em andamento em aplicações fuzzy em projeto de software, incluindo sistemas fuzzy expertos e integração de lógica fuzzy com redes neurais (ZHOU & LI *et al.*, 2002) e algoritmos genéticos adaptativos (LAKHMI & MARTIN, 1998), com o objetivo de um sistema fuzzy capaz de aprender.

3.3.3 Implementação do Algoritmo de Controle Fuzzy

O controle de velocidade de rotação de motores universais seriais é muito complicado quando são utilizadas técnicas de controle tradicionais e requer um modelo matemático muito complexo. O uso de lógica fuzzy elimina a necessidade de modelos matemáticos e permite o desenvolvimento de uma solução mais fácil. A lógica fuzzy define regras que determinam o comportamento do sistema usando palavras descritivas ao em vez de equações matemáticas (KLIR & YUAN, 1995). O sistema fuzzy consiste em três passos fundamentais (DADONE, 2001):

- ✓ Fuzzificação
- ✓ Inferência Fuzzy
- ✓ Defuzzificação

3.3.3.1 Fuzzificação

A fuzzificação é um processo que determina o grau de pertinência dos valores de entrada definidos pelo conjunto fuzzy (variáveis lingüísticas). No caso do controle

de velocidade de rotação de motores universais seriais, os valores da entrada estão definidos por:

- ✓ O erro absoluto na velocidade de rotação.
- ✓ O diferencial de erro na velocidade de rotação: este valor é obtido subtraindo o valor do erro anterior do valor do erro atual, assim:

$$\text{derro} = \text{erro} - \text{lasterro} \quad (3.40)$$

Os conjuntos fuzzy são determinados partindo de dados experimentais obtidos do sistema DalSy (Database for the Identification of Systems). DalSy, é uma aplicação em Internet, que consiste principalmente numa base de dados com um conjunto de dados (datasets) usados na identificação de sistemas ou análise de séries temporais, desenvolvida e mantida pelo departamento de Engenharia Elétrica de K. U. Leuven, no grupo de pesquisa SISTA baixo a responsabilidade do professor Bart De Moor (DE MOOR & DE GERSEM *et al.*, 1997). O sistema tem dois objetivos, o primeiro é descarregar o conjunto de dados da base de dados (por exemplo, para utilizá-los com o fim de comparar e provar algoritmos de identificação) e a segunda, subindo conjuntos de dados na base de dados (permitindo que outras pessoas utilizem os conjuntos de dados para verificar os algoritmos, ou para reproduzir ou realçar os resultados). Os datasets na base de dados são colocados no sistema após uma revisão, a modo de garantir um bom nível de qualidade nos dados. É uma ferramenta útil quando se deseja verificar um algoritmo com um exemplo do mundo real, ao mesmo tempo, permite uma evolução gradual de diversos datasets em provas padrões e a publicação de comparações entre os diversos métodos ou algoritmos utilizados. A identificação do sistema é a disciplina que consiste em fazer os modelos matemáticos de sistemas, começando pelos dados experimentais, medições e observações.

Tipicamente, certa estrutura modelo é eleita pelo usuário que contém parâmetros desconhecidos (se propõe certa parametrização). Ter o modelo do sistema é muito importante para análise, simulação, predição, supervisão, diagnose e projeto do sistema de controle. As categorias de datasets disponíveis são: processos industriais, elétrico-eletrônicos, mecânicos, biomédicos, bioquímicos, econometria, ambientais, clássicos e térmicos. Para o desenvolvimento desta implementação foi escolhida uma base de dados feita para um motor, onde as entradas para a obtenção de dados foram forças dos atuadores mecânicos enquanto as saídas são relacionadas com a exatidão do movimento. Os dados foram medidos em malha fechada e o número de amostras é de 2047.

Para esta aplicação dos motores, são definidos cinco conjuntos fuzzy para o erro e o diferencial de erro, da seguinte forma:

- ✓ NM: meio negativo
- ✓ NP: pequeno negativo
- ✓ ZE: zero igual
- ✓ PP: pequeno positivo
- ✓ PM: meio positivo

As funções de pertinência são triangulares e o valor máximo e mínimo do erro e do diferencial de erro estão dados na **Tabela 3.3**.

Tabela 3.3 Valores máximos e mínimos do erro e do diferencial de erro.

	ERRO	DERRO
MÍNIMO	-1,4683	-0,515
MÁXIMO	1,4992	0,545

Da tabela anterior é obtida a configuração dos conjuntos fuzzy para o erro (**Figura 3.21**) e para o diferencial de erro (**Figura 3.22**); onde o máximo grau de pertinência está dado pelo valor máximo de cada uma das variáveis lingüísticas.

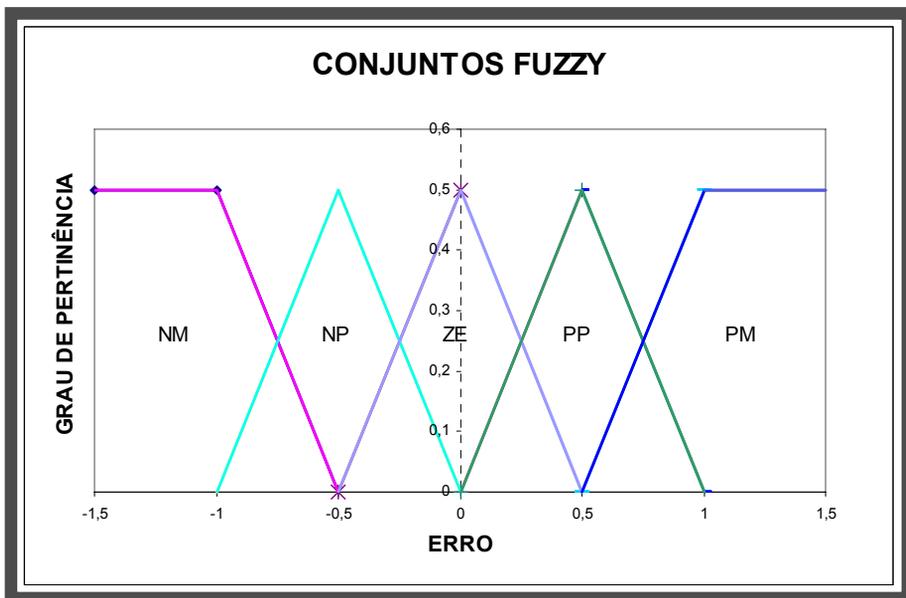


Figura 3.21 Conjuntos fuzzy para o erro

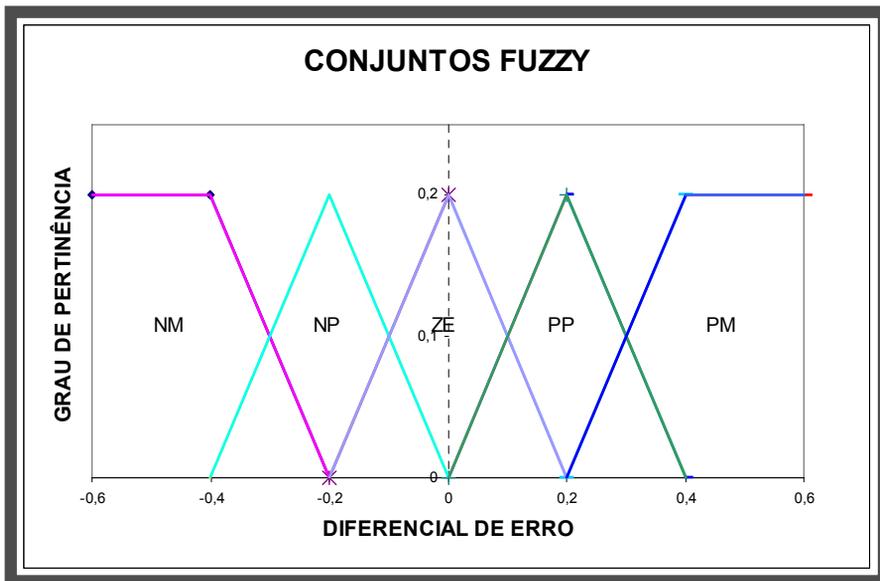


Figura 3.22 Conjuntos fuzzy para o diferencial de erro

O resultado da fuzzificação de um valor de entrada é um vetor de cinco elementos, visto que existem cinco conjuntos fuzzy. O valor de cada membro define o grau de pertinência do valor de entrada a cada conjunto fuzzy em particular (valor y). Os vetores para o erro e o diferencial de erro os quais são os resultados da fuzzificação são denotados como $X_1 []$ e $X_2 []$ respectivamente, e mostrados nas equações (3.41) e (3.42).

$$X_1 = [NM \quad NP \quad ZE \quad PP \quad PM] \quad (3.41)$$

$$X_2 = [NM \quad NP \quad ZE \quad PP \quad PM] \quad (3.42)$$

3.3.3.2 Inferência Fuzzy

As relações de máximos e mínimos de Zadeh (CHONGFU & RUAN, 2000), são utilizadas já que a experiência provou que dão resultados precisos. O processo consiste em:

1. Limpar o vetor de saída $Y []$;
2. Pegar o primeiro membro do vetor $X_1 []$;
3. Comparar todos os membros do vetor $X_2 []$; o menor valor é guardado em cada uma das comparações;
4. O máximo valor é encontrado entre os membros obtidos na etapa anterior;

5. O máximo valor é adicionado no vetor de saída $Y[]$ dependendo das regras fuzzy;
6. O próximo membro do vetor $X_1[]$ é tomado e se repete o processo desde o passo 3 ao passo 6;

As regras de inferência fuzzy são mostradas na **Tabela 3.4**.

Tabela 3.4 Regras de inferência fuzzy

		DIFERENCIAL DE ERRO $X_2[]$				
		NM	NS	ZE	PS	PM
ERRO $X_1[]$	NM	PM	PM	PM	PS	ZE
	NS	PM	PM	PS	ZE	NS
	ZE	PM	PS	ZE	NS	NM
	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
	PM	ZE	NS	NM	NM	NM

3.3.3.3 Defuzzificação por Centróide

O resultado da defuzzificação é um valor numérico que determina um fator de PWM (do inglês, Pulse Width Modulation) utilizado para dirigir um atuador. É obtido achando o ponto do centróide da função, que é o resultado do produto da função de pertinência de saída com o vetor de saída $Y[]$ que é obtido na inferência fuzzy. A equação geral matemática que é utilizada para obter o ponto do centróide está indicada na equação (3.43).

$$Defuz = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_{[i]} \times CM_{[i]}}{\sum_{i=1}^5 Y_{[i]}} \quad (3.43)$$

Onde, Y é o vetor de saída, e CM são os coeficientes de multiplicação da função de saída.

3.3.3.4 Fluxograma do Controle Fuzzy

Na **Figura 3.23** é mostrado o fluxograma do programa, desenvolvido para a implementação no DSP utilizando a plataforma virtual de Analog Devices VisualDSP++

[Target: ADSP-21160 ADSP-2116x Simulator], onde se podem identificar cada uma das etapas do algoritmo.

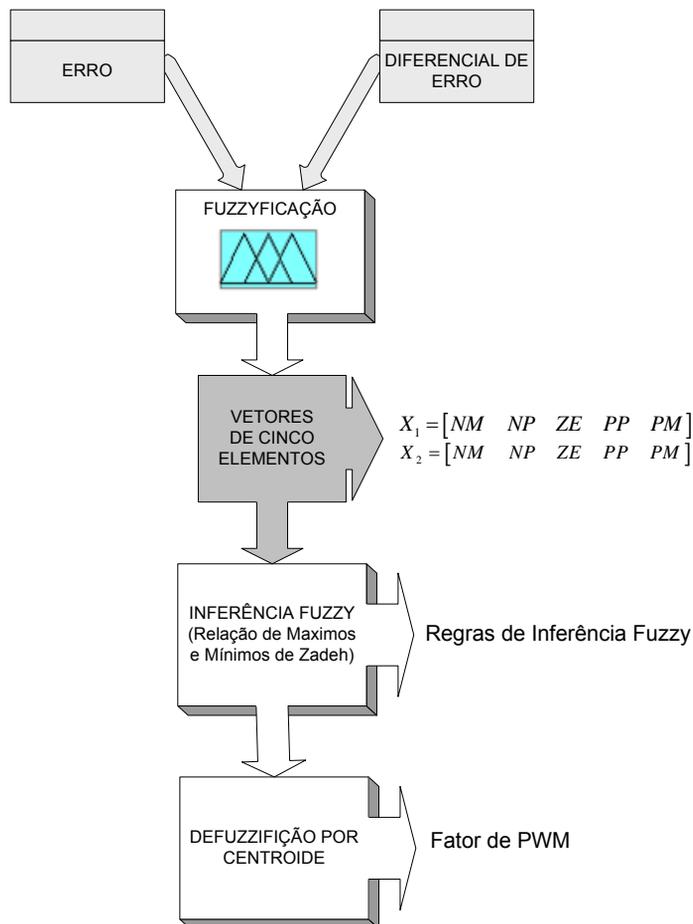


Figura 3.23 Fluxograma do algoritmo de controle fuzzy proposto.

3.3.4 Resultados

Inicialmente no DSP são calculados tempos para a etapa de fuzzificação (Figura 3.24), inferência fuzzy (Figura 3.25) e defuzzificação (Figura 3.26) das 2047 amostras, onde se observa que no DSP a maior parte do tempo no algoritmo de controle é consumido na inferência fuzzy. Pela sua parte a defuzzificação que se reduz a uma equação matemática simples, registra um tempo zero no processo.

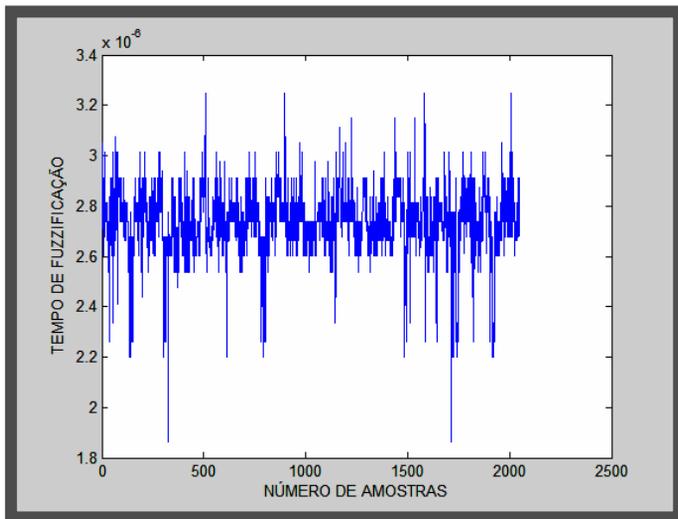


Figura 3.24 Tempos de fuzzificação no DSP.

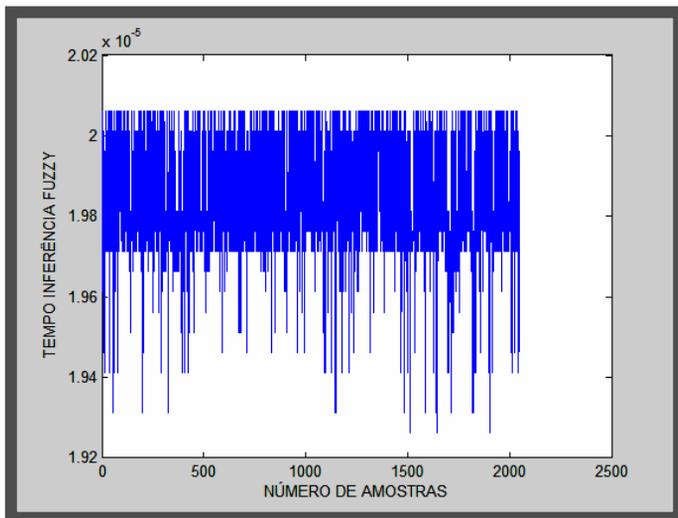


Figura 3.25 Tempos de inferência fuzzy no DSP

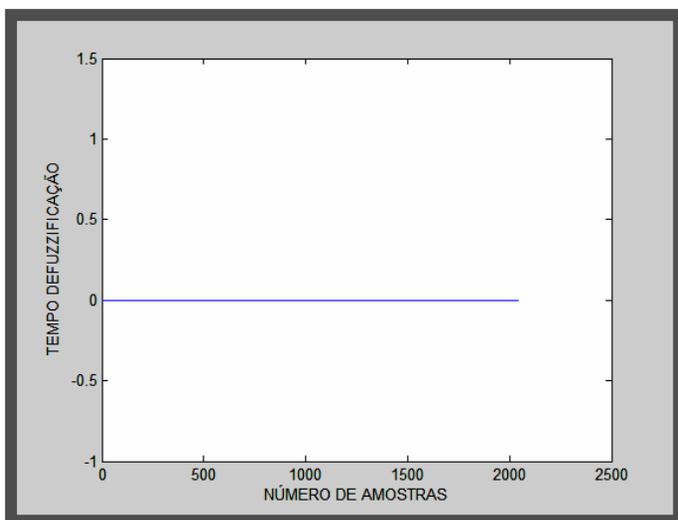


Figura 3.26 Tempo de defuzzificação no DSP

3.3.5 Comparação

O algoritmo da Figura 6.7 é implementado também em Matlab e C++ com o propósito de fazer uma comparação de tempos de processamento de amostras. Nesta comparação inicialmente são observados os resultados obtidos em cada uma destas tecnologias; observando o fator de PWM (Pulse Width Modulation) obtido em Visual DSP++ (Figura 3.27), Matlab (Figura 3.28) e C++ (Figura 3.29).

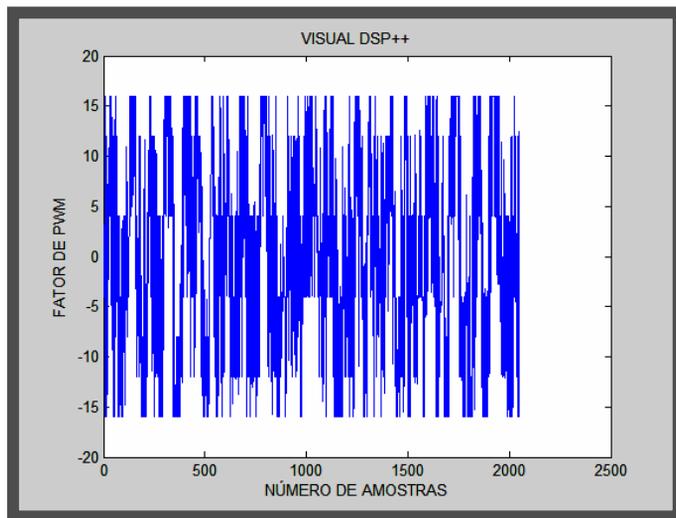


Figura 3.27 Fator de PWM em Visual DSP++

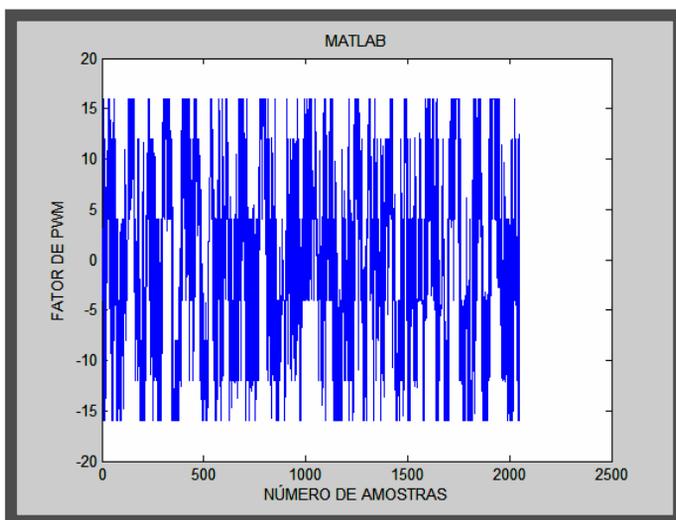


Figura 3.28 Fator de PWM em Matlab

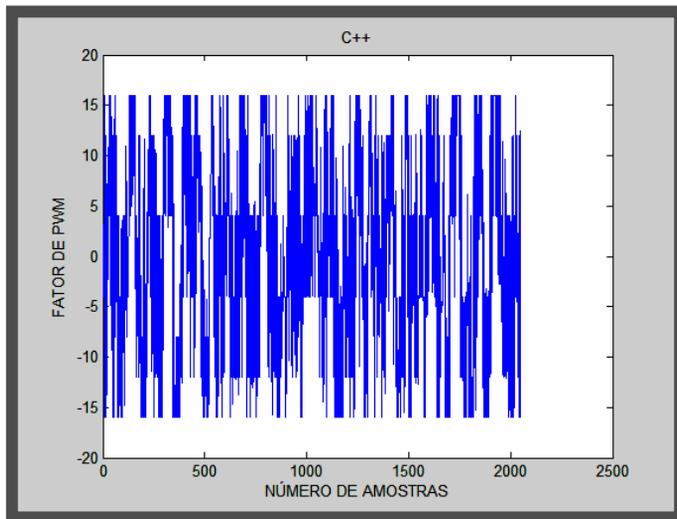


Figura 3.29 Fator de PWM em C++

Pela quantidade de número de amostras, é necessário fazer uma comparação entre os resultados das diferentes tecnologias, para determinar que tão exata seja uma tecnologia ao respeito da outra nos resultados de PWM obtidos. Tomando como base Visual DSP++ comparam-se os resultados ao respeito de Matlab (**Figura 3.30**) e de C++ (**Figura 3.31**). Nesta comparação é observado um erro na escala de $[-5 \cdot 10^{-5}, 5 \cdot 10^{-5}]$ nas duas comparações, portanto, é realizado um histograma para determinar quais das duas tecnologias se assemelham mais aos resultados obtidos em Visual DSP++.

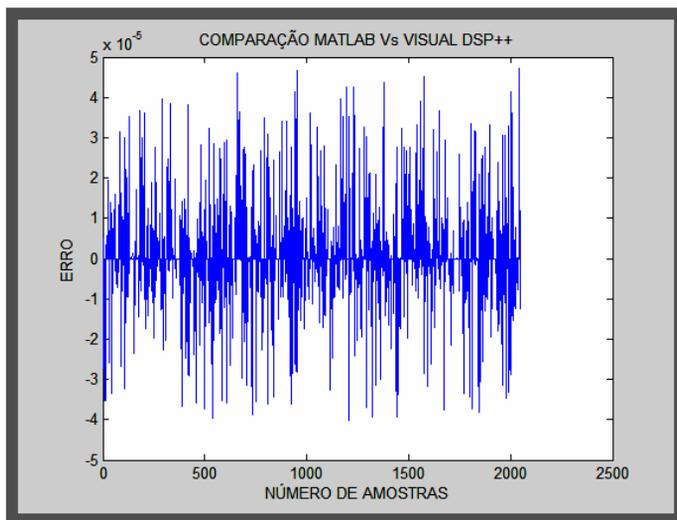


Figura 3.30 Comparação de Matlab vs Visual DSP++

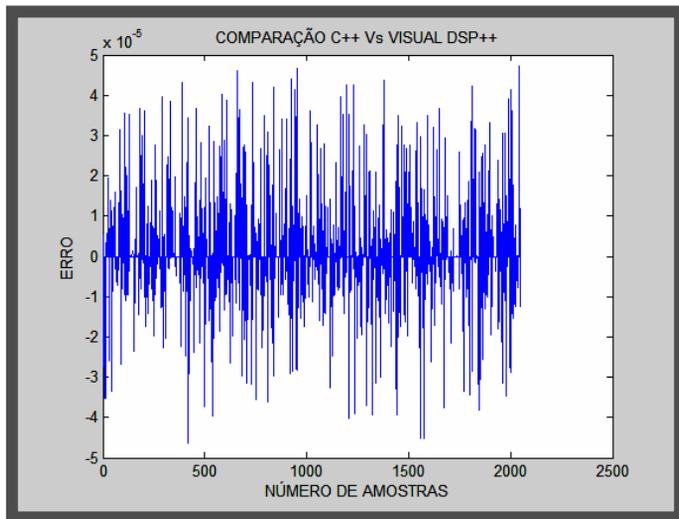


Figura 3.31 Comparação C++ vs Visual DSP++

Na **Figura 3.32** se observa que um maior número de amostras está no intervalo de $[-0,5 \times 10^{-5}, 0,5 \times 10^{-5}]$, enquanto na **Figura 3.33** o maior número de amostras está no intervalo de valores $[-1 \times 10^{-5}, 0]$. O que quer dizer que C++ obtém resultados mais similares aos de Matlab, ao respeito de Visual DSP++ nesta implementação particular de controle utilizando lógica fuzzy.

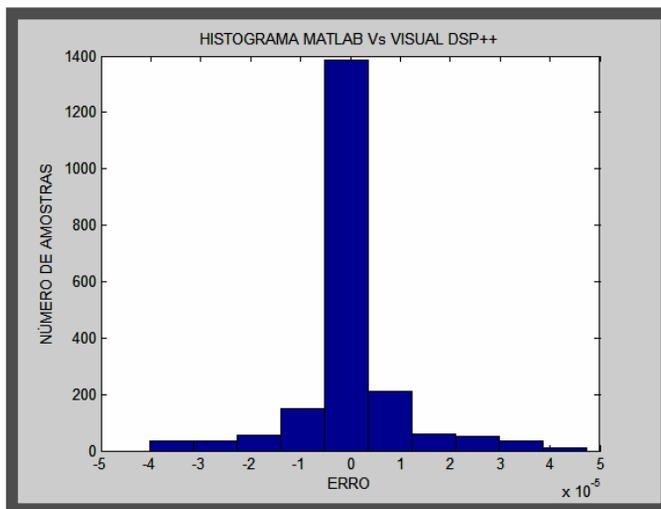


Figura 3.32 Histograma Matlab vs DSP++

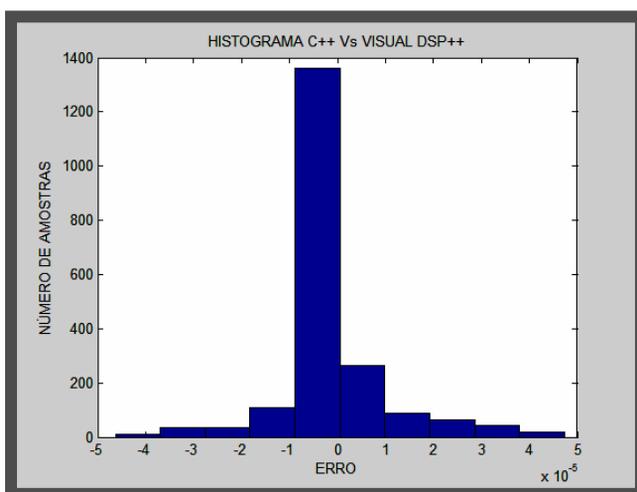


Figura 3.33 Histograma C++ vs DSP++

Após da análise do resultado no caso o fator PWM, a **Tabela 3.5** apresenta os tempos de amostragem em cada uma das tecnologias utilizadas. Para este cálculo é ignorada a linha de impressão do resultado que é necessária para o análise anterior, devido a que esta sentença toma tempo.

Tabela 3.5 Comparação de tempos de amostragem

COMPARAÇÃO DE TEMPOS			
TECNOLOGIA	NÚMERO DE AMOSTRAS	TEMPO TOTAL	TEMPO EM CADA AMOSTRA
C++	2047	0,076 s	0,0371 ms
VISUAL DSP++	2047	0,1036 s	0,0506 ms
MATLAB	2047	0,5470 s	0,2672 ms

4 MECANISMOS ROBOTIZADOS PARA JATEAMENTO DE ÁGUA

Quando o homem se enfrenta a problemas para os quais as ferramentas técnicas desenvolvidas até o momento não brindam o apoio necessário para sua solução, a engenharia procura a forma de criar estruturas novas que transpasse pelas limitações que impedem sua solução. Neste trabalho foram levados a estudo duas possíveis opções para a expulsão de água, a primeira situando acima de um veículo uma mangueira robotizada e a segunda usando um canhão monitor.

A maioria dos sistemas robóticos móveis terrestres desenvolvidos até o momento utiliza como elemento de locomoção rodas ou extremidades móveis (pernas). Poucos têm sido os esforços para desenvolver sistemas que usem outro tipo de locomoção. Neste capítulo, se realiza um estudo dos diferentes mecanismos robotizados para jateamento de água começando com um estudo das mangueiras e dos canhões monitores e finalizando com um estudo da biomimética das serpentes, como possíveis soluções para o sistema na expulsão da água. No entanto no campo de robôs serpente a maioria das pesquisas estão destinadas à locomoção, além disso, a pouca flexibilidade da mangueira depois de estar cheia de água dificulta a movimentação.

4.1 MANGUEIRAS

Um incêndio é mais comumente extinto por água no seu estado líquido, embora também o seja por diversas outras formas. Dentro desta idéia básica, conclui-se que se faz necessário levar a água da sua tomada até o local de sua efetiva utilização. O transporte da água pressurizada para um incêndio, nem sempre é uma tarefa simples, na medida em que a distância a ser vencida, os obstáculos intervenientes (escadas, subidas, descidas, vias públicas), implicam um sem número de operações, como aumento de linhas e mudanças de direção com arrastamentos abrasivos, o que obriga a esse equipamento manipular certas propriedades, tais como, flexibilidade, leveza, impermeabilidade, resistência à abrasão e durabilidade.

De acordo ao anterior, criam-se, então, as condições mínimas para que se possa pensar sobre uma definição para a mangueira, bem como, sobre as características e propriedades que consubstanciam o seu conceito. O coronel Orlando Seco na sua obra “Manual de Prevenção e Combate a Incêndio”, definiu-a como:

condutores flexíveis utilizados para transportar a água, sob pressão, do seu ponto de tomada até o local onde deve ser utilizada para a extinção do incêndio. Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1998) a definiu como: um equipamento de combate a incêndio, constituído essencialmente por um duto flexível dotado de uniões (**Figura 4.1**).



Figura 4.1 As mangueiras de incêndio devem atender a marca de conformidade ABNT, o que significa atender totalmente a norma NBR 11861.

As mangueiras possuem características especiais na hora de serem usadas nos combates a incêndios, devem ser impermeáveis de forma a conter no seu interior água pressurizada e devem apresentar boa resistência à abrasão (devido ao constante contato como solo), e à corrosão (devido aos eventuais contatos com superfícies sujas ou substâncias corrosivas, tais como óleo, graxa, gasolina, etc). A flexibilidade deve ser um ponto forte para viabilizar os constantes avanços e recuos, bem como as mudanças de direção numa linha de mangueira e devem possuir juntas que possibilitem o acoplamento de várias mangueiras. Geralmente as mangueiras vêm nos tamanhos de 15 m ou de 30 m, e nos diâmetros de 38 mm (1½”) ou 64 mm (2½”). Há determinados serviços especializados que requerem outros diâmetros e comprimentos, tais como, combate a incêndio florestal (mangueira de 1”), ou estabelecimento de torre de água (mangueira de 3”), utilizadas em alguns estados por exemplo Minas Gerais no Brasil.

A fim de atender as necessidades acima descritas, tem-se na formação da mangueira um duto de borracha ou plástico, ou borracha e plástico, revestido de um ou mais dutos de material natural (algodão ou rami) ou sintético. Depreende-se dessa estrutura que a impermeabilidade foi atendida pelo uso da borracha; que a resistência à abrasão e corrosão foi satisfeita como o uso da(s) túnica(s) que se sobrepõem ao duto de borracha ou plástico, e que pelo uso e associação de tais materiais atingiu-se aos objetivos de resistência e flexibilidade que deve possuir a mangueira utilizada no combate a incêndios.

De igual forma, as mangueiras como vários outros materiais, foi objeto de normatização pela ABNT. Na sua NBR 11861/98 ela define as partes componentes de uma mangueira, como se segue:

- ✓ Reforço têxtil: Tecido que integra a mangueira.
- ✓ Urdume: Conjunto de fios sintéticos que constituem o reforço têxtil disposto no sentido transversal da mangueira.
- ✓ Trama: Conjunto de fios sintéticos que constituem o reforço têxtil disposto no sentido transversal da mangueira.
- ✓ Vinco: Dobra existente em todo o comprimento da mangueira, no sentido longitudinal, tornando-a plana e possibilitando o seu enrolamento.
- ✓ Lance: Mangueira no comprimento de 15 m.
- ✓ União: Acessório acoplado às extremidades da mangueira para conexão desta.
- ✓ Empatação: Fixação da mangueira à união.

4.1.1 Classificação

Atualmente o mercado brasileiro conta com mangueiras de incêndio que possuem a marca de conformidade ABNT. Ela é garantia que o fabricante atende aos quesitos da norma NBR 11861 na íntegra. A escolha do tipo de mangueira é função do local e condições de aplicação levando em conta a pressão de trabalho que é a pressão máxima à qual a mangueira pode ser submetida em condições normais de uso. As pressões para os diversos tipos de mangueira estão estabelecidas na **Tabela 4.1** e a norma NBR 11861 classifica as mangueiras em cinco tipos, de acordo com o local de aplicação e pressão de trabalho:

- ✓ Mangueira Tipo 1

Destina-se a edifícios de ocupação residencial, construída com um reforço têxtil e para pressão de trabalho de 980 kPa (10 kgf/cm²).

- ✓ Mangueira Tipo 2

Destina-se a edifícios comerciais e industriais ou Corpo de Bombeiros, construída com um reforço têxtil e para pressão de trabalho de 1370 kPa (14 kgf/cm²).

- ✓ Mangueira Tipo 3

Destina-se à área naval e industrial ou Corpo de Bombeiros, onde é desejável uma maior resistência à abrasão. Construída com dois reforços têxteis sobrepostos e para pressão de trabalho de 1470 kPa (15 kgf/cm²).

- ✓ Mangueira Tipo 4

Destina-se à área industrial, onde é desejável uma maior resistência à abrasão. Construída com um reforço têxtil, acrescida de uma película externa de plástico e para pressão de trabalho de 1370 kPa (14 kgf/cm²).

✓ Mangueira Tipo 5

Destina-se à área industrial, onde é desejável uma alta resistência à abrasão e a superfícies quentes. Construída com um reforço têxtil, acrescida de um revestimento externo de borracha e para pressão de trabalho de 1370 kPa (14 kgf/cm²).

Tabela 4.1 Pressão para os tipos de mangueiras.

Tipo	Pressão kPa (kgf/cm ²)			
	Trabalho	Prova	Ruptura	Dobramento
1	980 (10)	2060 (21)	3430 (35)	2060 (21)
2,4,5	1370 (14)	2745 (28)	4120 (42)	2350 (24)
3	1470 (15)	2940 (30)	4900 (50)	2350 (24)

4.2 CANHÕES MONITORES

Os canhões monitores são equipamentos especializados para combate a incêndios a distância ou refrigeração de áreas próximas aos incêndios de grande porte. Os canhões monitores podem operar tanto com água, pó químico ou água e espuma e atualmente, os modernos monitores fixos de plataforma possuem modelos diferentes e oferecem um sem número de opções que não eram oferecidas a algumas gerações atrás.

4.2.1 Monitores Fixos com Flange

Os primeiros monitores tinham um desenho de cano de água duplo. Os monitores originais possuíam movimento limitado. Depois eles foram progredindo para monitores com controle horizontal de 360° e diferentes graus de controle vertical. A tendência dos monitores atuais aponta para monitores de plataforma de cano único com fluxos de até 2000 GPM com trajetória horizontal de 360° e vertical de 150° ou mais. A maioria dos produtores oferece monitores de alumínio anodizado ou de bronze, dependendo da aplicação. Outro desenvolvimento recente foi a utilização de tubos de extensão para dar maior altura ao monitor da plataforma, permitindo assim a eliminação de qualquer obstáculo da plataforma do veículo. Atualmente, isso pode ser conseguido de diferentes maneiras, incluindo uma operação elétrica. Como exemplo a

Figura 4.2 mostra um canhão monitor fixo da firma Brasileira Mecânica Reunida. O Canhão Monitor Fixo modelo pescoço de ganso tem opções de material em bronze ou em alumínio, com movimento horizontal com giro livre de 360° e possibilidade de travamento em qualquer posição, movimento vertical através do volante e sistema de engrenagem de -60° (para abaixo) +90° (para cima) em relação ao plano horizontal e com uma vazão de até 1250 GPM (4731LPM).



Figura 4.2 Canhão monitor fixo (boletim técnico – Mecânica Reunida, Indústria Brasileira³).

4.2.2 Monitores com Flange por Controle Remoto

As versões anteriores possuíam motores elétricos instalados em vez do mecanismo de transmissão mecânica. A faixa de fluxo desses monitores era similar aos dos monitores fixos manuais. Atualmente os monitores de plataforma por controle remoto oferecem uma ampla variedade de opções e podem ter um fluxo acima dos 2000 GPM. Opções verticais e horizontais foram complementadas com acréscimos, tais como retração e desdobramento, capacidade de elevação automática, programação contra obstáculos, oscilação limitada e uma variedade de pacotes de controle. Como exemplo, a **Figura 4.3** mostra um canhão monitor com controle remoto da firma Kidde, ideal para utilização em viaturas de combate a incêndio construído em liga leve de alumínio, possui uma vazão máxima de 2000 GPM (7570 LPM); com um movimento horizontal de até 345° com possibilidade de ajuste e um movimento vertical de 90° para cima e 45° para baixo. Os movimentos do canhão são realizados por três motores elétricos, com possibilidades de comando manual em caso de falha do circuito elétrico.

³ MECANICA REUNIDA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. É uma empresa que está a mais de 20 anos atuando no mercado do Brasil, é uma firma do setor metalúrgico com grande atuação no mercado de materiais hidráulicos para combate e prevenção a incêndios. <http://www.mecanicareunida.com.br>



Figura 4.3 Canhão monitor com controle remoto (KIDDE⁴).

4.2.3 Monitores Portáteis

Desde que os monitores de plataforma fixos são usados no combate a incêndio, os bombeiros procuraram maneiras de levar seus veículos o mais próximo possível do incidente, isso causava preocupação, já que colocava o veículo e os bombeiros em perigo. Os monitores portáteis originais utilizavam até quatro entradas e eram feitos de bronze, seus pesos e a quantidade de mangueiras os tornavam pesados, volumosos e difíceis de montar e, portanto, raras vezes eram utilizados.

Modelos posteriores deram início aos monitores leves utilizados atualmente, feitos de alumínio anodizado. Esses projetos melhorados geraram maiores fluxos e alcance e são fornecidos em duas configurações básicas: Monitor de entrada dupla e monitor de entrada única. Muitos fabricantes oferecem uma variedade de tipos de roscas de entrada e saída para atender aos diferentes requisitos de fluxo de até 1250 GPM. Alguns dos monitores portáteis da atualidade podem ser utilizados tanto como monitores de plataformas portáteis ou fixos sobre as auto bombas. O canal de água superior (ou parte que se levanta) do monitor encontra se fixo na base através de um mecanismo de fecho e a parte que se levanta também pode ser fixada na base para aplicações portáteis. Quando estiver no modo de plataforma, o monitor pode ser operado como um monitor fixo de plataforma. Preferivelmente, um monitor portátil deveria ter uma trajetória horizontal de 180° e proteção de segurança incorporada para maior segurança. Para trajetória vertical, uma proteção fixada em 35° preveniria que o bombeiro baixasse a elevação do jato sob um ângulo seguro, o que causaria uma grande força de reação, a mesma que causaria falta de estabilidade ao monitor. A base portátil do monitor também inclui estacas de terra em cada pé para maior estabilidade. É recomendado que o fabricante coloque uma corrente e um gancho de segurança para ancorar o monitor a fim de obter maior estabilidade. Como exemplo a

⁴ KIDDE é uma das maiores organizações mundiais especializadas em segurança e proteção contra incêndio. Atuando nos mercados: aeroespacial, defesa, industrial, comercial e consumidor, fornece a solução ideal e personalizada em serviços, detecção, proteção e combate a incêndios. www.kidde.com.br

Figura 4.4 mostra um canhão monitor portátil da firma Secur. O modelo é um monitor apollo de entrada dupla com fluxos de até 1259 GPM (4800 LPM) no modo de plataforma e 800 GPM (3030 LPM) no modo portátil. Possui duas entradas giratórias fêmea de 2 ½” ou 3” e uma saída de rosca macho de 2 ½”.



Figura 4.4 Canhão monitor portátil (SECUR⁵).

4.3 ROBÔS SERPENTE

Devido ao desenvolvimento da tecnologia nos anos recentes, o ambiente em que o ser humano trabalha se espalhou em várias direções e em muitos casos, é acompanhado do perigo. A necessidade dos robôs para entrar neste espaço de trabalho tem aumentado, durante séculos, pessoas criaram uma coleção de máquinas cuja aparência e movimentos refletiam animais a um grau surpreendente, existem figuras antropomórficas que se assemelham ao homem e máquinas móveis que se assemelham aos animais.

O atrativo do trabalho com cadeias articuladas, é sua habilidade de deslocamento a traves de terrenos adversos e áreas confinadas onde as plataformas de rodas e/o pernas enfrentam problemas, abrindo assim um campo de aplicações em robótica móvel. Desastres naturais e desastres causados pelo homem, como terremotos e ataques terroristas, provêm evidencia de falhas técnicas nas ferramentas utilizadas para atender este tipo de catástrofes, onde os tipos de operações são muito perigosas para trabalhadores humanos e até mesmo para cachorros treinados. Neste tipo de situações, se arriscam e se perdem irremediavelmente muitas vidas humanas, além das vítimas imediatas da tragédia deve se adicionar as mortes causadas por desabamentos ou incêndios posteriores.

⁵ SECUR - Comercial Importadora e Exportadora Ltda. É uma empresa especializada no mercado de proteção e combate a Incêndio. www.secur.com.br

Esta é uma das mais importantes aplicações das cadeias articuladas; se um robô tipo serpente faz a procura das vítimas, por uma parte, poderia agilizar o processo de resgate e por outra, diminuir o número de pessoas em risco.

Conseqüentemente, o desenvolvimento de robôs com redundâncias está sendo pesquisado e desenvolvido nos últimos anos, a locomoção de serpentes e robôs-serpente é uma área nova que os pesquisadores estão começando a explorar. A capacidade de movimento da serpente é diferente de outros animais, devido a que seu corpo pode funcionar como pernas ao movimentarem-se, como braços ao atravessar ramos e como dedos ao agarrar objetos. As serpentes biológicas são penetrantes através do planeta; suas modalidades diversas de locomoção e fisiologia fazem que sejam supremamente adaptáveis para uma variedade de terrenos, ambientes e climas que habitam. Seria maravilhoso capturar estas características de movimento e potencialidades em equivalentes artificiais, e por isso, que sistemas robóticos desenvolvidos recentemente, utilizam rodas ou membros como elementos de locomoção (propulsão). A vantagem de trabalhar com articulações bio-miméticas está no uso de plataformas de locomoção de serpentes com a habilidade e flexibilidade para mover-se por caminhos estreitos, superfícies desiguais ou superar obstáculos.

As plataformas com rodas e pernas podem desenvolver alguns problemas, é por isto que se estão abrindo aplicações de robôs serpentes na robótica móvel, porém as serpentes mecânicas são complexas de projetar porque existem muitos graus de liberdade envolvidos e o planejamento do movimento é complexo, embora os muitos graus de liberdade de robôs serpentes provêem grande funcionalidade, eles também fornecem um problema de pesquisa desafiador de como coordenar todos os atuadores no robô para desenvolver o movimento requerido. Apesar do desempenho alcançado pelos robôs móveis existe ainda uma preocupação principal: a fonte de energia. Os robôs de procura e salvamentos deveriam operar continuamente por horas e até dias, não é possível tolerar um robô que volta à superfície só por recarregar ou mudar baterias.

No futuro, uma plataforma automática bio-inspirada poderia trabalhar em circunstancias, onde a perda e a exposição da vida humana são inevitáveis. Uma das aplicações mais importantes das cadeias articuladas é o salvamento de vítimas, onde o processo poder ser acelerado e o número de pessoas em risco pode ser diminuído. Outras aplicações são as explorações e inspeções de ambientes hostis, em tubulações e oleodutos para manutenção ou reparação que são ambientes com caminhos estreitos onde uma plataforma com rodas ou pernas falharia ao tentar mover-se completamente.

4.3.1 Métodos de Locomoção Utilizados pelas Serpentes

As serpentes usam vários métodos de locomoção que lhes permitem uma mobilidade substancial mesmo perante a sua condição de répteis sem pernas, como concertina, ondulação lateral, sidewinding e retilínea (DOWLING, 1997). Na realidade, estes métodos são andaduras, um termo regularmente associado para animais providos de pernas. Andaduras são padrões repetitivos de movimento mudando a velocidade, para a adequação a terrenos e a melhoria da estabilidade.

4.3.1.1 Ondulação Lateral

A ondulação lateral é a forma mais freqüentemente utilizada de locomoção de serpentes; onde todas as partes do corpo se movimentam simultaneamente, enquanto é experimentado um contato correção com o chão (**Figura 4.5**). O movimento correção acontece, quando todas as partes se movimentam na mesma velocidade em que ocorre a propagação das ondas da frente para trás da serpente (cobra). A cobra permanece em contato com a superfície e o movimento é semelhante ao movimento natatório. A ondulação lateral requer de um mínimo de três pontos de contato para o progresso contínuo dianteiro: dois gerando a força e o terceiro equilibrando as forças para se mudar de direção. A ondulação lateral é inadequada para chãos lisos ou de baixa-fricção e para animais robustos ou pesados, porque não conseguem fazer as curvas requeridas, reduzindo assim a eficácia.

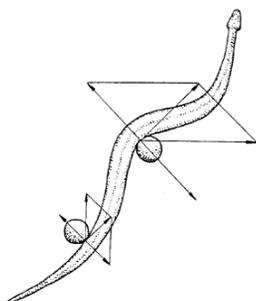


Figura 4.5 Locomoção ondulação lateral (DOWLING, 1997).

4.3.1.2 Concertina

No método concertina, parte do corpo da serpente é empurrado contra uma superfície que forma um número pequeno de ondas; movendo estas ondas e os correspondentes pontos de contato a serpente avança (**Figura 4.6**). O elemento fundamental da locomoção concertina é a utilização da diferença entre as forças altas com o coeficiente estático de fricção, e as forças baixas com o coeficiente estático de

fricção ao longo de diferentes partes do corpo. Este método é geralmente utilizado quando a serpente precisa mover-se ao longo de um trajeto reto e os coeficientes de fricção do chão não permitem locomoção ondulatória lateral. Devido a mudanças de impulso, fricção estática e velocidades mais lentas, concertina é um modo relativamente ineficiente de locomoção.

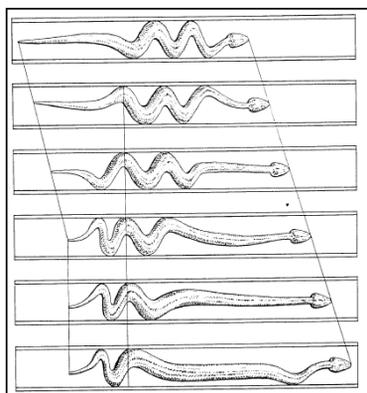


Figura 4.6 Locomoção concertina (DOWLING, 1997).

4.3.1.3 Sidewinding

É um método usado por serpentes do deserto que tem necessidade de mover-se na areia (**Figura 4.7**); nesta modalidade a serpente levanta uma parte do corpo para manter somente alguns pontos de contato com o chão, usando para mover-se o resto do corpo; a técnica minimiza o deslizamento e é até mesmo mais eficiente que a ondulação lateral. O desenvolvimento deste tipo de movimentação pode ser relacionado à necessidade de tração e para evitar as altas temperaturas de deserto.

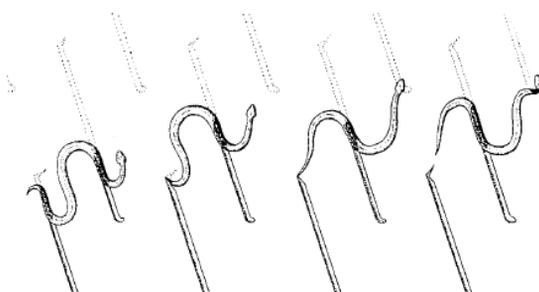


Figura 4.7 Locomoção sidewinding (DOWLING, 1997).

4.3.1.4 Retilínea

O modo retilíneo é obtido “fixando” partes da pele ciclicamente ao chão usando as escamas, movendo a coluna vertebral respeito da pele e finalmente liberando as escamas permitindo à pele movimentar-se para frente (**Figura 4.8**); são precisados só movimentos verticais pequenos para este tipo de locomoção. Esta modalidade de

locomoção é usada geralmente só por serpentes grandes (boas) porque o peso faz ineficiente a ondulação lateral.

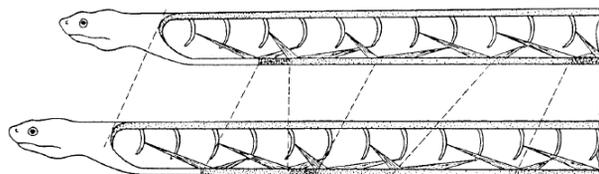


Figura 4.8 Locomoção retilínea (DOWLING, 1997).

4.3.2 Classificação dos Robôs Serpentes

Os robôs serpentes podem ser classificados em dois grupos principais: Os robôs que se movimentam utilizando rodas motorizadas, onde um torque é aplicado no eixo das rodas que entram em contato com o chão; produzindo uma rotação e conseqüentemente um movimento. E os robôs que se movimentam aplicando torques nas junções entre os segmentos; entre estes robôs alguns podem ter rodas passivas.

Os robôs que usam rodas motorizadas são mais simples de controlar, as técnicas de projeto são algoritmos conhecidos e padrões para o controle de robôs móveis; porém a locomoção resultante é completamente artificial e as rodas podem não ser adequadas em todos os ambientes (CRESPI & BADERTSCHER *et al.*, 2005).

4.3.3 Arquiteturas de Controle dos Robôs Serpentes

Uma variedade de robôs serpentes foi projetada para ser usadas no chão, outros para nadar e até mesmo alguns para chão e água; a arquitetura de controle deles pode ser dividida em três categorias (IJSPEERT & CRESPI, 2007): baseada-seno, baseada-modelo e baseada-CPG.

4.3.3.1 Arquitetura baseada em seno

A arquitetura baseada em seno são aproximações que usam funções seno simples para gerar ondas viajantes; a vantagem de tal aproximação é a simplicidade e o fato das quantidades importantes, tais como a frequência, amplitude e comprimento estarem definidas explicitamente. Uma desvantagem é a modificação on-line dos parâmetros da função seno que conduzirão a saltos descontínuos de setpoints, que gerarão movimentos aos arrancos com riscos de danificar os motores e as caixas de

engrenagens. Este problema pode ser superado até certo ponto filtrando os parâmetros e/ou as saídas, mas a aproximação perde então a simplicidade. Outra desvantagem é que as funções baseadas-seno não oferecem maneiras simples de integrar os sinais de retro-alimentação dos sensores.

4.3.3.2 Arquitetura baseada em modelos

Aproximações baseadas-modelos utilizam os modelos cinemáticos ou dinâmicos do robô para projetar leis de controle para a geração de movimento. As leis de controle as vezes estão baseadas em funções baseadas-seno, mas as aproximações baseadas-modelos oferecem um modo para identificar movimentos mais rápidos para um determinado robô, utilizando restrições cinemáticas ou aproximações das equações de movimento. Aproximações baseadas-modelos são úteis para ajudar a projetar os controladores, mas tem duas limitações; primeiro os controladores resultantes não sempre servem para modulação interativa por um operador humano. Segundo o desempenho dos controladores se deteriora quando os modelos ficarem inexatos; que é rapidamente o caso para interação de forças num ambiente complexo como a fricção com o chão desigual.

4.3.3.3 Arquitetura baseada em CPG (Gerador Padrão Central)

Aproximações baseadas-CPG usam sistemas dinâmicos, por exemplo, sistemas de osciladores não-lineares acoplados a redes neurais periódicas, para gerar as ondas viajantes necessárias para a locomoção. Estas aproximações são implementadas com equações diferenciais integradas no tempo, e o objetivo é produzir uma onda viajante como um ciclo limite. Se este for o caso, os padrões oscilatórios são robustos contra perturbações passageiras. Além disso, o limite do ciclo pode ser modulado por alguns parâmetros que oferecem a possibilidade de modular o tipo de ganhos suavemente produzidos. Finalmente, CPG pode integrar prontamente sinais de realimentação de sensores nas equações diferenciais e do mesmo modo mostrar propriedades interessantes de treinamento pelo corpo mecânico. Entretanto, uma dificuldade com aproximações baseada-CPG é como projetar um CPG para produzir um padrão particular. Muitos modelos CPG não têm parâmetros explícitos, quantidades definíveis como frequência, amplitude e comprimento de onda.

4.3.4 Estudos Realizados com Movimentação de Serpentes

Nesta seção são apresentados alguns dos desenvolvimentos achados no campo de robôs serpentes que começou desde os inícios dos anos 70. Foi em 1972, quando Hirose focalizou o trabalho dele em plataformas que poderiam executar ondulação lateral e depois desenvolveu uma série de dispositivos com rodas, para melhorar o movimento da cadeia articulada, denominados mecanismos ativos de cabo (HIROSE, 1993). Shan também trabalhou com cadeias articuladas, focalizando o trabalho principalmente na acomodação do obstáculo. Em 1995 a companhia japonesa, NEC, desenvolveu uma cadeia articulada chamada Orochi, este trabalho foi projetado para procura de sobreviventes depois de terremotos e explosões que fazem este processo mais seguro. Martin Nilsson do instituto sueco para informática, como parte do projeto PIRAIA desenvolveu uma ligação universal serpentina nova. Isto dá ao robô a habilidade de executar algumas modalidades de locomoção que não são próprias das serpentes incorporando movimentos rolantes. A plataforma teria a possibilidade de “abraçar” uma árvore e rolar acima da árvore. Na Alemanha Karl Paap e seu grupo GMD, desenvolveram um dispositivo de snakelike com controle em tempo real. A estrutura utiliza músculos tensionadores combinados com uma seção curta de cabo que se enrola para dar a curvatura ao dispositivo requerido. Robóticas LS construiu uma máquina de snakelike chamada Kaa, projetada para mover-se através das redes de tubulações e dar sustentação à estrutura. Este era um dos primeiros protótipos a ter uma unidade contida, utilizando RC-servos como atuadores; Kaa tem um movimento direito linear em superfícies planas (CARDONA & PARRA *et al.*, 2006).

O Mecanismo de Corda Ativa (ACM-R3) foi a primeira serpente mecânica desenvolvida por Hirose (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002), sendo um mecanismo em duas dimensões com movimento de propulsão com o mesmo princípio de funcionamento que governa o movimento real das serpentes, a serie ACM foi seguida por um modelo capaz de movimentar-se em três dimensões e substituído agora pelo último modelo ACM-R3 mostrado na **Figura 4.9**; sendo modelos auto-suficientes e semi-autônomos. São equipados com baterias a bordo, motores e computadores que calculam e geram movimentos desejados em tempo real. ACM-R3 está composto de 20 segmentos unidos em série, cada unidade-segmento tem somente um grau de liberdade ativo, e duas rodas passivas que estão livres para girar; estas unidades-segmento estão conectadas em série 90 graus um do outro.



Figura 4.9 Mecanismo de Corda Ativa (ACM-R3) (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002).

O robô serpente anfíbio (HELIX-I) **Figura 4.10** é um mecanismo de três graus de liberdade que consegue se movimentar no chão e na água, baseado no movimento de um microorganismo chamado “Spirochete”. Esta pesquisa está ainda em uma fase inicial, mas os resultados experimentais do primeiro protótipo dão a luz para o desenvolvimento de uma classe totalmente nova de serpentes anfíbias (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002).

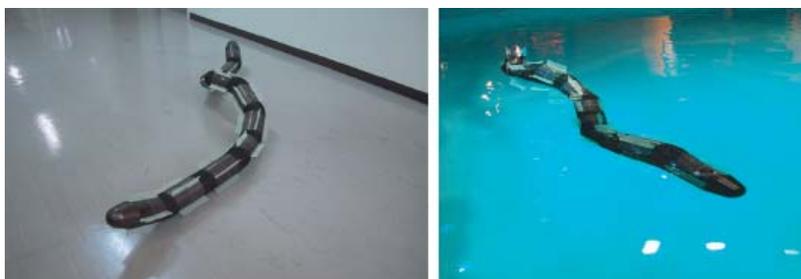


Figura 4.10 Robô serpente anfíbio (HELIX-I) (HIROSE & FUKUSHIMA, 2002).

O modelo tipo serpente desenvolvido por YAMAKITA e YAMADA *et al.* (2003) chamado SMA (Super-Mechano Anaconda) mostrado na **Figura 4.11**, tem rodas passivas em cada ligação e o coeficiente de fricção em direção tangente ao corpo é zero e o normal é infinito, de modo que o robô tem restrições de não deslizar na direção normal das rodas. No controle deste tipo de robôs, evasão singular das posturas é um dos problemas importantes onde a postura singular significa o estado quando é impossível para o robô avançar. A forma de uma linha reta ou o arco são exemplos típicos. Quando o robô chega a um ponto designado, é necessário levantar a cabeça e trabalhar como um manipulador. Porém, dependendo do número de ligações para elevar, o grau de liberdade pode ser insuficiente ou inversamente redundante. Neste modelo foi proposta uma técnica de controle de configuração de cabeça que usa uma função de critério a qual não é influenciada pelo número de ligações ao levantar.



Figura 4.11 Robô serpente de YAMAKITA e YAMADA *et al.* (2003).

Em 2005, o trabalho de LILJEBÄCK e STAVDAHL *et al.* (2005), apresenta um modelo matemático de três dimensões para a cinemática e dinâmica de um robô serpente modular com cinco segmentos (**Figura 4.12**).



Figura 4.12 Robô serpente modular com cinco segmentos (LILJEBÄCK & STAVDAHL *et al.*, 2005).

O robô consiste em cinco segmentos idênticos cada um com dois graus de liberdade (GDL). Cada segmento é essencialmente um módulo independente que consiste em um cilindro oco e uma placa, conectado por uma junta de dois GDL; os cilindros contém a eletrônica para controlar o segmento, enquanto a placa serve como conexão ao segmento vizinho. Os eixos de rotação dos dois GDL de cada segmento são ortogonais aos outros e se interceptam no ponto central entre o cilindro e a placa. O robô mecanicamente ajuntado é mostrado na **Figura 4.13**. O cilindro somado na frente da serpente além dos cinco segmentos representa a cabeça ou cérebro que contém eletrônica dedicada ao controle superior dos movimentos. No princípio de atuação, as juntas do robô são atuadas através de ar pressurizado. Isto representa uma solução moderna ao problema de atuação, sendo que as maiorias de robôs serpentes prévios utilizam um princípio de atuação baseado em motores elétricos montados em série. A razão principal desta escolha é que os atuadores pneumáticos permitem maior força em cada junta e os motores elétricos em pequena escala estão muito limitados sobre a quantia de torque que podem produzir. O princípio de atuação é ilustrado na **Figura 4.14**, cada segmento utiliza três câmaras flexíveis montadas em torno da junta de dois GDL; aplicando ar pressurizado numa câmara faz com que se expanda e movimente a junta; se assume que as outras duas câmaras estão

despressurizadas permitindo que o movimento aconteça. A pressurização de cada câmara é alcançada por válvulas solenóide pequenas localizadas dentro do cilindro em cada segmento.

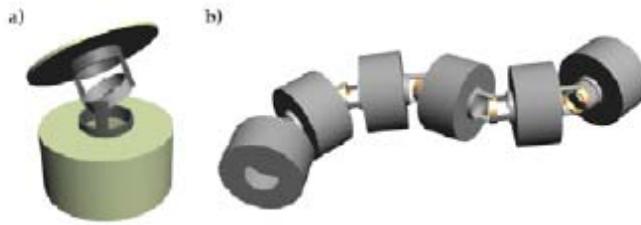


Figura 4.13 Robô serpente modular (a) Segmento da serpente (b) Robô ajuntado mecanicamente (LILJEBÄCK & STAVDAHL *et al.*, 2005).



Figura 4.14 Princípio de atuação (LILJEBÄCK & STAVDAHL *et al.*, 2005).

De igual forma, RAI e KANG em 2005 desenvolveram um protótipo de robô serpente com um conjunto de ferramentas LEGO (**Figura 4.15**). Sendo o obstáculo principal, a coordenação entre cada uma das unidades do robô e o tempo consumido. Neste modelo foram usados quatro motores e quatro sensores de ângulo, utilizados para a co-coordenação e a sucessão de movimentos de onda seno numa direção ou caminho particular. Cada um dos motores trabalha com o atuador para dirigir uma unidade do robô, sendo cada unidade um elemento individual, muitas unidades fazem junto uma seção. No geral uma serpente pode ter N seções e cada seção podem ter M unidades. O número total de unidades é igual a $N \cdot M$ que é igual a o número de motores necessários. O robô usa rodas para o movimento e foi testado em movimento senoidal. As vantagens básicas são controlabilidade, flexibilidade, custo e a possibilidade de usar novamente. Muitos robôs serpentes já foram desenvolvidos com a cabeça e o rabo definidos e geralmente a cabeça define o trajeto que o corpo deve seguir tendo algumas desvantagens porque se acontece uma falha na cabeça, o resto do corpo para de funcionar. O modelo presente supera estas limitações porque as seções podem ser projetadas para operar independentemente.

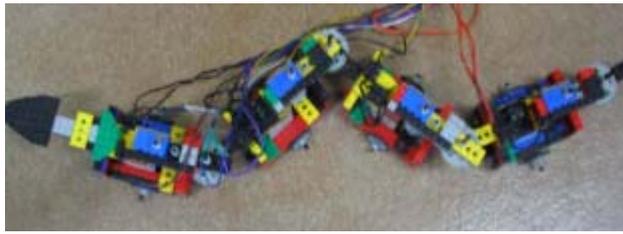


Figura 4.15 Protótipo de RAI e KANG com ferramentas LEGO (RAI & KANG, 2005).

O artigo de CRESPI e BADERTSCHER *et al.* em 2005 apresenta um robô serpente biologicamente inspirado em um anfíbio; o robô é projetado para ser capaz de nadar e locomover-se de forma ondulatória lateral no chão. A locomoção do robô é controlada por um gerador padrão central que produz ondas viajantes de oscilações em um ciclo limite de comportamento. O AmphiBot I como foi chamado é mostrado na **Figura 4.16**.



Figura 4.16 AmphiBot I (CRESPI & BADERTSCHER *et al.*, 2005).

Em outro protótipo no mesmo ano, foi apresentada uma segunda versão do robô AmphiBot I com as mesmas características mencionadas acima (CRESPI & BADERTSCHER *et al.*, 2005) mostrado na **Figura 4.17**.

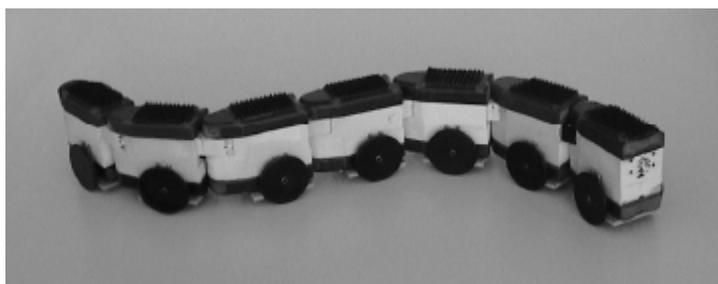


Figura 4.17 AmphiBot I (CRESPI & BADERTSCHER *et al.*, 2005).

A Anna Konda “The fire fighting snake robot” (**Figura 4.18** e **Figura 4.19**) (LILJEBÄCK, 2005) foi o primeiro robô serpente no mundo hidráulico de água já construído. As junções são movidas por um total de vinte cilindros hidráulicos de água, cada módulo é equipado com duas válvulas hidráulicas de água para controlar a

pressão aplicada aos cilindros. No sistema de controle são utilizados microcontroladores para o movimento das juntas, e a comunicação de bus permite a comunicação entre os microcontroladores e a cabeça (o cérebro), que pode comunicar-se com um computador externo por uma conexão sem fio baseada em Bluetooth o que permite controlar o robô remotamente por um operador.



Figura 4.18 A Anna Konda “The fire fighting snake robot” (LILJEBÄCK, 2005).

A parte dianteira da Anna Konda está equipada com bocais que permitem pulverizar a água e demonstrar a aplicação de luta contra o fogo. Alguns dados técnicos do robô são citados a continuação:

- ✓ Comprimento: 3 m
- ✓ Peso: 75 Kg
- ✓ Número de GDL: 20
- ✓ Flexão angular em cada junção: +/- 33 graus
- ✓ Atuadores: cilindros hidráulicos de água
- ✓ Pressão máxima do sistema: 100 bar (1450 PSI)
- ✓ Torque máximo (para 100 bar): 300 Nm



Figura 4.19 A Anna Konda “The fire fighting snake robot”.

A universidade Javeriana na Colômbia tem desenvolvido dois projetos de cadeias articuladas, ANA-II e 4N (CARDONA & PARRA *et al.*, 2006). O projeto ANA-II mostrado na **Figura 4.20**, tem cinco segmentos modulares interconectados numa cadeia articulada. Cada segmento tem dois graus de liberdade; um no eixo vertical e um no eixo horizontal. Um microcontrolador mestre faz a plataforma de controle, com um protocolo de comunicação I2C em cada um dos segmentos, estes segmentos são chamados de escravos. Estes módulos são os encarregados de gerar o movimento e controlar as posições dos atuadores. O mestre indica a cada um dos escravos que seqüência deve executar para gerar a locomoção serpentina.

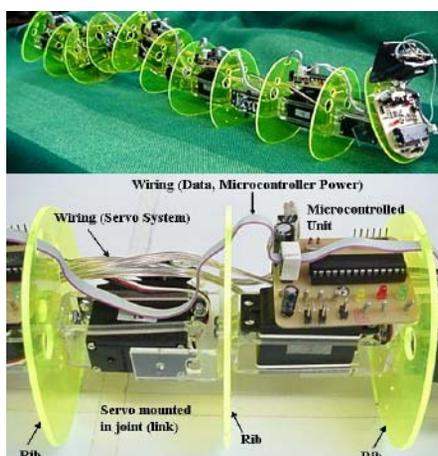


Figura 4.20 Robô serpente ANA-II.

O projeto 4N mostrado na **Figura 4.21** tem quatro segmentos que interconectados articulam a cadeia; cada segmento tem dois graus de liberdade, um no eixo vertical e outro no eixo horizontal. Neste projeto foi desenvolvida uma estratégia de controle distribuída, cada segmento tem uma unidade de micro-controle que toma conta da comunicação com os outros segmentos. Há um módulo extra que se encarrega de dar os comandos à estrutura e é chamado de unidade de comando; tendo as cinco unidades uma comunicação serial uma com a outra.

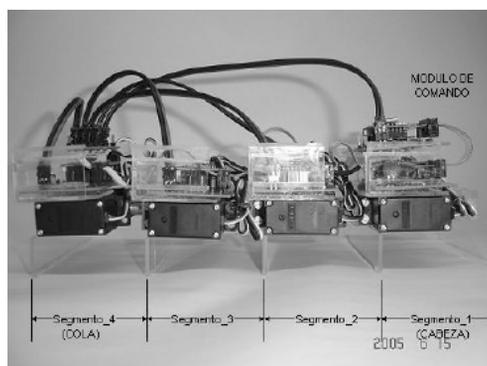


Figura 4.21 Robô serpente 4N.

Recentemente, o AmphiBot II (**Figura 4.22**) é uma nova versão do AmphiBot I mencionado anteriormente. Comparado com seu antecessor tem um número significativo de melhorias: Um projeto mecânico melhorado: a construção do robô é simplificada e todas as peças podem ser montadas sem a necessidade de soldar, motores com maior torque, capacidade de comunicação sem fio, Impermeabilização aprimorada e CPG a bordo.



Figura 4.22 AmphiBot II (CRESPI & IJSPEERT, 2006).

Após a pesquisa feita nos itens 4.1 4.2 e 4.3 e como sugestão do pessoal de pesquisa do corpo de bombeiros militar do Rio de Janeiro a melhor opção para este projeto é o tubo, no caso a utilização de um canhão monitor para expulsão de água.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO ROBÔ PROPOSTO (ROBOTFIRE)

Este item é destinado ao desenvolvimento de cálculos necessários para o dimensionamento do veículo proposto. Os cálculos são baseados na pesquisa feita nos capítulos anteriores e em normas técnicas existentes de interesse na temática de incêndios.

4.4.1 Estimativa da Perda de Carga

O líquido ao escoar ao longo de dispositivos (tubulações, válvulas, conexões, órgãos de máquinas etc.) cede energia para vencer as resistências que se oferecem ao seu escoamento, devida à atração molecular no próprio líquido, e as resistências próprias aos referidos dispositivos. Esta energia despendida pelo líquido para que possa escoar-se entre seções consideradas chama-se perda de carga (MACINTYRE, 1980).

A perda de carga h_f , então representa a energia por unidade de peso perda no trecho da tubulação em estudo, é considerada como a soma das perdas de carga distribuídas h_{fd} e das perdas de carga localizadas h_{fl} , sendo:

$$h_f = h_{fd} + h_{fl} \quad (4.1)$$

A perda de carga distribuída é aquela que ocorre em trechos retos de tubulações (devidas aos efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante) e a localizada é devida a entradas, aquelas que se verificam em acessórios (válvulas, conexões, etc), mudanças de áreas e outras (MATTOS & FALCO, 1989).

4.4.2 Perdas Distribuídas: Fator de Atrito

Para determinar esta perda é necessário, inicialmente, determinar a equação de um fluido real (considerando atrito) em regime permanente ao longo de uma linha de corrente, sendo a linha de corrente definida como a linha tangente à direção do vetor velocidade em cada instante. No regime permanente, esta linha mostra o caminho descrito por uma partícula de fluido em certo intervalo de tempo. O balanço de energia é expresso pela equação (4.2).

$$h_f = \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (4.2)$$

Para escoamento completamente desenvolvido num tubo de área constante,

$h_{fl} = 0$ e $\alpha_1 \frac{v_1^2}{2} = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2}$; a equação (4.2) reduz-se a:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g(z_2 - z_1) + h_{fd} \quad (4.3)$$

Se o tubo for horizontal, então $z_2 = z_1$ e

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = h_{fd} \quad (4.4)$$

Dessa forma, a perda de carga distribuída pode ser expressa como a perda de pressão para escoamento completamente desenvolvido através de um tubo horizontal de área constante.

A perda de carga representa a energia mecânica convertida em energia térmica por efeitos do atrito. Logo, a perda de carga para escoamento completamente desenvolvido em tubos de área constante, depende tão-somente dos detalhes do escoamento através do conduto. A perda de carga é independente da orientação do tubo (FOX & McDONALD, 2001).

4.4.2.1 Número de Reynolds

A resistência que os líquidos oferecem ao escoamento é um fenômeno de inércia-viscosidade e é caracterizada pelo número de Reynolds (Re), que exprime a relação entre as forças de inércia e as forças de atrito interno (forças de cisalhamento) atuantes durante o escoamento (MACINTYRE, 1980).

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (4.5)$$

A grande importância do número de Reynolds reside em que permite entre inúmeras outras aplicações:

- ✓ Estabelecer a lei de analogia entre dois escoamentos;
- ✓ Caracterizar a natureza do escoamento;
- ✓ Calcular o coeficiente de perda de carga.

O regime de escoamento num tubo (laminar ou turbulento) é determinado pelo número de Reynolds. Pode-se demonstrar, pela clássica experiência de Reynolds, a diferença qualitativa entre escoamentos laminar e turbulento. Nessa experiência, a água escoava de um grande reservatório através de um tubo transparente. Um fino filamento de corante injetado na entrada do tubo permite a observação visual do escoamento. A baixas vazões (baixos números de Reynolds), o corante permanece num único filamento; há pouca dispersão de corante porque o escoamento é laminar. Um escoamento laminar é aquele no qual o fluido escoava em lâminas ou camadas; não há mistura macroscópica de camadas adjacentes de fluido.

À medida que a vazão através do tubo é aumentada, o filamento de corante torna-se instável e parte-se num movimento aleatório; a linha corante é esticada e torcida numa infinidade de fios enovelados, e rapidamente se dispersa por todo o campo de escoamento. Esse comportamento do escoamento turbulento é devido a pequenas flutuações de velocidade, de alta frequência, superpostas ao movimento principal, a mistura de partículas de camadas adjacentes de fluido resulta na rápida dispersão do corante.

Com o cuidado necessário para manter o escoamento isento de perturbações e com superfícies lisas, experiências realizadas até hoje têm sido capazes de manter o escoamento laminar dentro de um tubo até números de Reynolds de cerca de 100.000. Contudo, a maioria das situações de escoamento na engenharia não é controlada com tanto cuidado. Sob condições normais, a transição ocorre em $Re \approx 2300$ para escoamento em tubos (FOX & McDONALD, 2001).

4.4.2.2 Escoamento Laminar

No escoamento laminar, a queda de pressão pode ser calculada analiticamente para o escoamento completamente desenvolvido em um tubo horizontal. Desse modo,

de $Q = \frac{\pi \Delta p D^4}{128 \mu L}$, se obtém:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = \frac{128 \mu L v \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu v}{D} \quad (4.6)$$

Substituindo na equação (4.4) resulta em:

$$h_{fd} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu v}{\rho D} = \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \left(64 \frac{\mu}{\rho v D} \right) = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (4.7)$$

4.4.2.3 Escoamento turbulento

No escoamento turbulento não é possível avaliar a queda de pressão analiticamente; sendo necessária alguma ajuda de dados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los. No escoamento turbulento completamente desenvolvido, a queda de pressão, Δp , devida ao atrito num tubo horizontal de área

constante, depende do diâmetro do tubo, D , do comprimento, L , da rugosidade, e , da velocidade média do escoamento, v , da massa específica, ρ , e da viscosidade, μ , do fluido. Resultando uma correlação da forma:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = f \left(\frac{\mu}{\rho v D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right) \quad (4.8)$$

Sendo $\frac{\mu}{\rho v D} = \frac{1}{\text{Re}}$, e combinado com a equação (4.4) se observa que:

$$\frac{h_{fd}}{v^2} = \phi \left(\text{Re}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D} \right) \quad (4.9)$$

Experiências mostram que a perda de carga adimensional é diretamente proporcional a $\frac{L}{D}$ e visto que a função, ϕ , é ainda indeterminada, é admissível introduzir uma constante no primeiro membro da equação anterior. O número $\frac{1}{2}$ é introduzido no denominador para tornar o termo da equação do lado esquerdo, igual à razão entre a perda de carga e a energia cinética por unidade de massa. Assim:

$$\frac{h_{fd}}{\frac{1}{2} v^2} = \frac{L}{D} \phi_1 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \quad (4.10)$$

A função desconhecida, $\phi_1 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right)$, é definida como o fator de atrito,

$f \equiv \phi_1 \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right)$, de onde se obtém que:

$$h_{fd} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (4.11)$$

ou

$$H_{fd} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.12)$$

4.4.3 Perdas localizadas

O escoamento em uma tubulação pode exigir a passagem do fluido através de uma variedade de acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área. Perdas de carga adicionais são encontradas, sobretudo, como resultado da separação do escoamento. (A energia é eventualmente dissipada pela mistura violenta nas zonas separadas). Essas perdas serão relativamente menores (e por isso denominadas perdas menores ou localizadas) se o sistema incluir longos trechos de seção constante. As perdas de carga menores ou localizadas podem ser expressas como:

$$h_{fl} = K \frac{v^2}{2} \quad (4.13)$$

Onde o coeficiente de perda, K , deve ser determinado experimentalmente para cada situação. A perda de carga localizada também pode ser expressa como:

$$h_{fl} = f \frac{Le}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.14)$$

onde Le , é o comprimento equivalente de tubo reto.

Para o escoamento em curvas de tubos e acessórios, o coeficiente de perda, K , varia com a bitola (diâmetro) do tubo do mesmo modo que o fator de atrito, f , para o escoamento num tubo de seção reta constante. Conseqüentemente, o comprimento equivalente, $\frac{Le}{D}$, tende para uma constante para diferentes bitolas de um tubo o acessório.

Existe uma profusão de dados experimentais para as perdas localizadas, mas eles encontram-se espalhados em diversas fontes bibliográficas. Diferentes fontes podem dar diferentes valores para a mesma configuração de escoamento.

4.4.4 Estimativa da Perda de Carga no Sistema Proposto

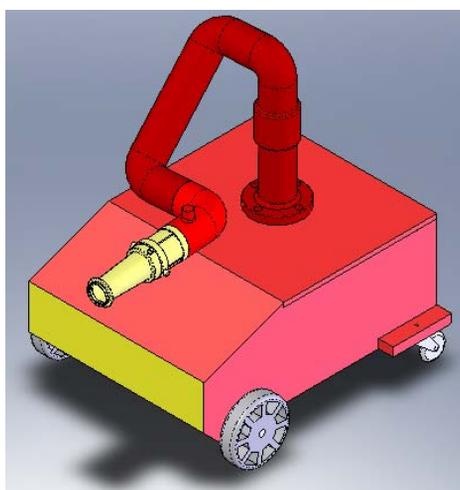


Figura 4.23 Robô contra incêndios – RobotFire.

O sistema proposto chamado pelo autor como RobotFire é apresentado na Figura 4.23, a estimativa de perda de carga começa nas mangueiras, que são as encarregadas de transportar a água desde a viatura de bombeiros até o robô. Para esta estimativa de perda de carga foi tomada a Tabela 4.2 (PETROBRAS, 1997). De acordo com as pesquisas feitas no início deste capítulo, se utiliza a mangueira de 2½”.

Tabela 4.2 Perda de carga em mangueira de incêndio por 15 m (PETROBRAS, 1997).

Vazão ℓ/min	Diâmetro da Mangueira				Vazão ℓ/min	Diâmetro da Mangueira	
	38,1 mm (1 1/2")		63,5 mm (2 1/2")			63,5 mm (2 1/2")	
	kPa	kgf/cm ²	kPa	kgf/cm ²		kPa	kgf/cm ²
37,8	1,70	0,02	-	-	719,2	31,22	0,32
56,8	3,39	0,03	-	-	757,0	34,28	0,35
75,7	5,78	0,05	-	-	794,0	37,67	0,38
94,6	8,82	0,09	-	-	832,7	40,73	0,42
113,5	12,21	0,12	-	-	870,6	44,12	0,45
132,5	16,29	0,17	-	-	908,4	47,85	0,49
151,4	20,36	0,21	-	-	946,3	51,92	0,53
170,3	25,79	0,26	-	-	984,1	55,65	0,57
195,3	31,56	0,32	-	-	1022,0	59,39	0,61
227,1	44,79	0,46	-	-	1059,9	63,45	0,65
265,0	57,69	0,59	-	-	1097,7	67,53	0,69
302,8	78,72	0,80	-	-	1135,5	71,94	0,73
340,7	93,99	0,96	-	-	1173,4	76,35	0,78
378,5	111,96	1,14	8,49	0,09	1211,2	80,76	0,82
416,4	135,74	1,38	10,86	0,11	1249,1	85,85	0,88
454,2	159,48	1,63	13,23	0,14	1286,9	91,28	0,93
492,1	186,63	1,90	15,27	0,16	1324,8	96,36	0,98
529,9	-	-	17,64	0,18	1362,6	101,79	1,04
567,8	-	-	19,68	0,20	1400,5	106,89	1,09
605,6	-	-	22,40	0,23	1438,3	111,98	1,14
643,5	-	-	25,11	0,26	1476,2	117,41	1,20
681,3	-	-	28,17	0,29	1514,0	122,84	1,25

Para obter dados de perda de pressão, é necessário determinar a vazão do sistema, a norma 1203 da Petrobras determina que os canhões monitores devem ser especificados para permitir uma vazão mínima de 2000 l/min, por conseguinte, com 1500 l/min em cada mangueira obtém-se uma vazão total de 3000 l/min. Realizando uma interpolação são obtidos os dados da **Tabela 4.3**. A perda de carga por cada 15 m de mangueira é 120,829 kPa (1,231 Kgf/cm²).

Tabela 4.3 Interpolação para cálculo de perda de carga em mangueira.

DIÂMETRO DA MANGUEIRA 63,5 mm (2½")		
VAZÃO (l/min)	kPa	Kgf/cm²
1476,2	117,41	1,20
1500	120,829	1,231
1514,0	122,84	1,25

A seguir no sistema encontra-se o manifold (1) na **Figura 4.24**, para o cálculo de perda de carga é realizada uma aproximação por uma conexão tipo "T". Para este tipo de acessório é usada a equação (4.14) para perdas de carga localizadas, onde é preciso começar com o cálculo do número de Reynolds, da seguinte forma:

$$Re = \frac{vD}{\mu} \tag{ 4.15 }$$

Onde:

- ✓ Re : número de Reynolds
- ✓ v : velocidade
- ✓ D : diâmetro da tubulação
- ✓ μ : viscosidade cinemática

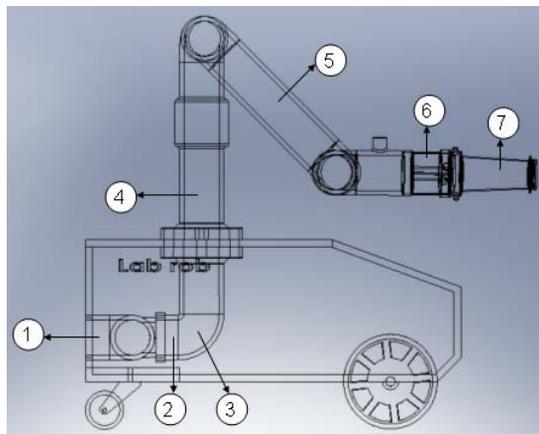


Figura 4.24 Partes do RobotFire para estimativa de perda de carga.

Para o cálculo da velocidade:

$$Q = vA \quad (4.16)$$

Onde:

Q : vazão

A : área

A área é dada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.17)$$

Com o diâmetro interno da tubulação de 0,0635 m, tem-se uma área de $3.167 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Por conseguinte, da equação (4.16) com uma vazão de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (3000 l/min) se obtêm uma velocidade de 15.788 m/s.

Adicionando a velocidade na equação (4.15) e a viscosidade cinemática da água a 30°C da tabela propriedades da água (FOX & McDONALD, 2001), se determina que:

$$\text{Re} = \frac{vD}{\mu} = \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right) * (0,0635m)}{8,01 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 1,252 * 10^{-6} \quad (4.18)$$

Com o diâmetro da tubulação na tabela “Relative Roughness of Pipe Materials and Friction Factors For Complete Turbulence” do livro de Crane (1982), se obtêm a rugosidade relativa para ferro galvanizado igual a 0,0024. Com o valor da rugosidade relativa e o número de Reynolds, o fator de atrito do diagrama de Moody do livro de FOX & McDONALD (2001) é igual a 0,0249. Adicionando estes valores na equação (4.14) com o comprimento equivalente $\frac{Le}{D} = 20$ da tabela “Comprimentos equivalentes adimensionais representativos para válvulas e acessórios” do livro FOX & McDONALD (2001) tem-se que

$$h_{fl} = f \frac{Le}{D} \frac{v^2}{2g} = (0,0249)(20) \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right)^2}{2\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 6,327m \quad (4.19)$$

Para os tubos retos (2) e (4) na **Figura 4.24**, é utilizada a equação (4.12) e o comprimento é obtido diretamente a partir de $L = L_1 + L_2 = 0,15m + 0,29m = 0,44m$, adicionando este valor na equação, resulta que:

$$H_{fd} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = (0,0249) \frac{0,44m}{0,0635m} \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right)^2}{2\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 2,192m \quad (4.20)$$

No mesmo sistema proposto na **Figura 4.24**, se tem uma curva (3) de diâmetro nominal de 63,5 mm e raio de curvatura de 100 mm, porém define-se um L equivalente em tubo reto, esse valor é obtido da tabela Joelhos, curvas e T's do livro de MATTOS e FALCO (1989). Sendo $Le = 1,83m$ é adicionado este valor na equação de perda de carga localizada, assim:

$$h_{fl} = f \frac{Le}{D} \frac{v^2}{2g} = (0,0249) \left(\frac{1,83m}{0,0635}\right) \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right)^2}{2\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 9,117m \quad (4.21)$$

Para calcular a perda de carga no canhão monitor (5) na **Figura 4.24** são tomados dados obtidos diretamente do fabricante, sendo que para canhões monitores das mesmas características, a tabela de perda de carga em diferentes firmas tem os mesmos dados. O gráfico de perda de carga para o canhão monitor da firma Mecânica Reunida, por exemplo, é mostrado na **Figura 4.25**.

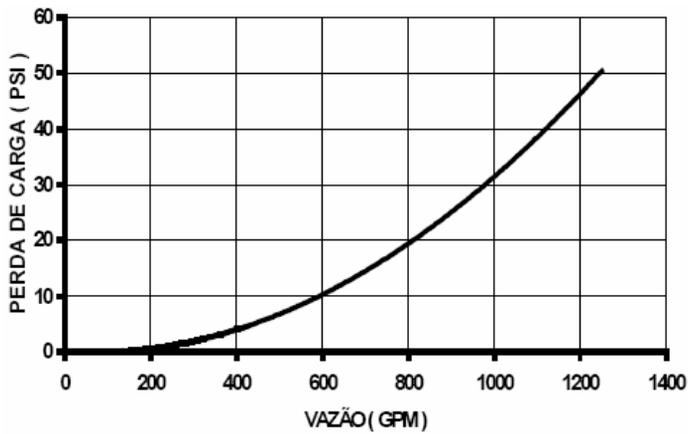


Figura 4.25 Gráfico de perda de carga para canhão monitor (Fabricante: Mecânica Reunida).

Com uma vazão de 3000 l/min (792,517 GPM), a perda de carga é aproximadamente 18 PSI (124,106 kPa). Logo após, é encontrado o laminador diferencial (6) na **Figura 4.24**, sua função é diminuir o escoamento turbulento na entrada do esguicho, aumentando assim o rendimento hidráulico do sistema; a redução da turbulência é conseguida através do orientador de jato instalado no interior do tubo, tornando laminar o escoamento da água. O laminador diferencial é aproximado com uma válvula borboleta e a perda de carga é calculada da equação (4.13), por tanto o coeficiente de perda K é encontrado no apêndice A-28 do livro de CRANE (1982), com diâmetro de 0,0635 m (2½") $K = 45f_T$, sendo $f_T = 0,018$. Se tem um valor de $K = 0,81$, adicionando os valores na equação (4.22) a perda de carga no laminador diferencial é calculada.

$$h_{fl} = K \frac{v^2}{2g} = (0,81) \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 10,291m \quad (4.22)$$

Finalmente, para calcular a perda de carga no esguicho (7) na **Figura 4.24** é utilizada a tabela de coeficientes de perdas K para contrações graduais (FOX & McDONALD, 2001), com um diâmetro de saída de 0,044 m (1¾"), é obtida uma área de saída de $1,552 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Com um coeficiente de perda $K = 0,05$ e adicionando os valores na equação (4.13) resulta a perda de carga no esguicho, assim:

$$h_{fl} = K \frac{v^2}{2g} = (0,05) \frac{\left(15,788 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0,635m \quad (4.23)$$

Para obter-se a perda de carga em pressão multiplica-se pelo peso específico da água (9790,38 N/m³). Todos os dados obtidos anteriormente são consolidados na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 Perda de carga para todos os elementos do sistema.

	Perda de carga (m)	Perda de carga (kPa)
Mangueiras	-	120,829
Manifold	6,327	61,944
Tubos	2,192	21,461
Curva	9,117	89,259
Canhão	-	124,106
Laminador	10,291	100.753
Esguicho	0,635	6,217

A perda de carga total estimada para o sistema, é a soma das perdas de carga calculadas anteriormente na equação (4.1), logo:

$$h_f = h_{mangueira} + h_{fl(manifold)} + h_{fd} + h_{fl(curva)} + h_{fl(canhão)} + h_{fl(l.d)} + h_{fl(esguicho)} \quad (4.24)$$

A perda de carga total do sistema é de 524,569 kPa, com pressão de entrada de 1370 kPa, delimitada pela pressão de trabalho das mangueiras tipo 2, 4 e 5 (ABNT, 1998). Por último, obtém-se uma pressão de saída no sistema igual a 845,431 kPa.

4.4.5 Estimativa da Distância e Altura Alcançada pelo Jato de Água

Neste item é feita uma estimativa da distância máxima alcançada na horizontal pelo jato de água e a altura máxima possivelmente atingida. O jato de água descreve um movimento parabólico que é formado por dois movimentos simultâneos em direções perpendiculares, o eixo y descreve um MRUA (Movimento Retilíneo Uniformemente Acelerado) e o eixo x descreve um MRU (Movimento Retilíneo Uniforme).

Para dar início à análise, é necessário calcular a velocidade de saída do jato de água. Considerando a equação da continuidade $Q_{entrada} = Q_{saída}$, a velocidade de saída $v_{saída}$, é dada por:

$$v_{saída} = \frac{v_{entrada} A_{entrada}}{A_{saída}} \quad (4.25)$$

Considerando,

$$v_{entrada} = 15,788 \frac{m}{s}$$

$$A_{entrada} = 3.167 * 10^{-3} m^2$$

$$A_{saída} = 1,552 * 10^{-3} m^2$$

Substituindo estes valores na equação (4.25), a $v_{saída} = 32,217 \frac{m}{s}$. Para separar o movimento em dois eixos, é necessário decompor a velocidade obtida $v_{saída}$, que passa a ser a velocidade inicial na análise de movimento parabólico em suas respectivas componentes x e y, assim:

$$\vec{v}_0 = v_{0x} \vec{i} + v_{0y} \vec{j} \quad (4.26)$$

Com $\alpha = 45^\circ$, o alcance máximo na horizontal é dado por:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha = 32,217 \frac{m}{s} \cos 45^\circ = 22,781 \frac{m}{s} \quad (4.27)$$

$$v_{0y} = v_0 \text{sen} \alpha = 32,217 \frac{m}{s} \text{sen} 45^\circ = 22,781 \frac{m}{s} \quad (4.28)$$

Com as componentes de velocidade e a equação (4.29) de MRUA, se inicia a análise de movimento no eixo y.

$$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (4.29)$$

Onde, $y_0 = 0,98m$, $a = g = -9,81 \frac{m}{s^2}$ e $v_{0y} = 22,781 \frac{m}{s}$. Substituindo estes valores na equação (4.29), é calculado que:

$$y = 0,98 + 22,781t - 4,905t^2 \quad (4.30)$$

Para o cálculo da máxima distância alcançada na horizontal, a condição a impor é $y = 0$, de onde o tempo de duração do percurso em que a água atinge o chão é $4,687s$.

Da equação (4.31) de MRU no eixo x , adicionando $v_{0x} = 22,781 \frac{m}{s}$ e $t = 4,687s$ se calcula a distancia máxima na horizontal que é $106,775m$, sendo acima da distancia mínima especificada pela norma da Petrobrás N-1203.

$$x = v_{0x}t \quad (4.31)$$

Para a altura máxima, é utilizado um ângulo de elevação $\alpha = 80^\circ$ sendo o maior ângulo de elevação seguro para o veículo, conseguindo jogar água perto dele, mas não para cima dele. O cálculo da velocidade inicial em suas respectivas componentes x e y , é dado por:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha = 32,217 \frac{m}{s} \cos 80^\circ = 5,594 \frac{m}{s} \quad (4.32)$$

$$v_{0y} = v_0 \text{sen} \alpha = 32,217 \frac{m}{s} \text{sen} 80^\circ = 31,728 \frac{m}{s} \quad (4.33)$$

Utilizando a equação $v_y = v_{0y} + gt$ e impondo a condição de $v_y = 0$, o tempo em que água começa a retornar para abaixo é igual a $3,234s$. Com o tempo calculado e reformulando a equação (4.29), obtém-se que:

$$y_{\text{máximo}} = 0,98m + 31,728 \frac{m}{s} (3,234s) + \frac{1}{2} \left(-9,81 \frac{m}{s^2} \right) (3,234s)^2 \quad (4.34)$$

Com o valor resultante de $y_{\text{máximo}} = 52,288m$, os valores encontrados acima deste, são em condições ideais, considera-se que não estaria ventando e que o fluxo de água se manteria coeso, que nem sempre é verdade.

4.4.6 Estabilidade do Veículo

Para o estudo da estabilidade do veículo, primeiramente é necessário calcular a reação do esguicho. Lembrando que a pressão exercida por um fluido numa superfície é, por definição, igual ao quociente da intensidade da força de pressão pela área da superfície, assim:

$$P \left[\frac{N}{m^2} \right] = \frac{F [N]}{A [m^2]} \quad (4.35)$$

Por conseguinte, com uma pressão na saída do esguicho de 845,431 kPa e com uma área de saída de $1,552 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, é obtida a força exercida pelo jato de água de 1312,109 N.

Na **Figura 4.26** é observada a situação mais crítica quando o jato está direcionado para frente do veículo (BEER & JOHNSTON, 1980), sendo que a força plena em x gera o maior momento para a geometria do veículo. Inicialmente é feita a análise de momentos em relação a R_1 da seguinte forma:

$$-0,3P + 0,55N_2 + 0,54F = 0 \quad (4.36)$$

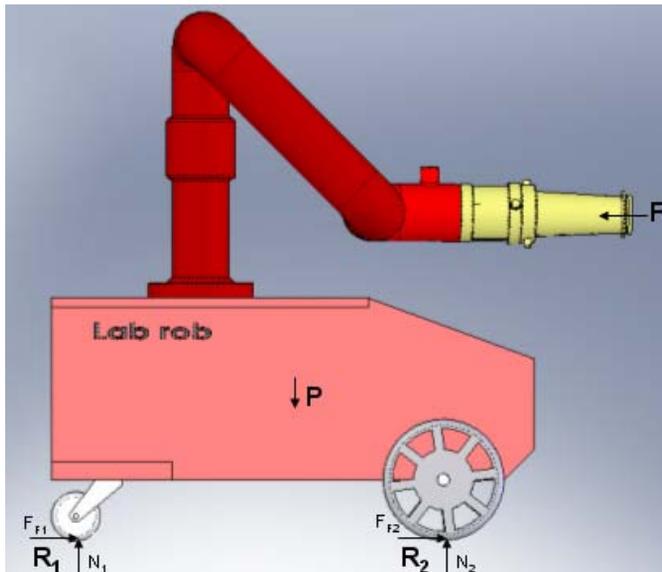


Figura 4.26 Diagrama de corpo livre do RobotFire, quando o jato está direcionado para frente.

Da equação (4.36) é possível estimar o peso do veículo, fazendo que N_2 seja igual a zero. O peso mínimo do veículo para que não vire é 2361,197 N; para fazer um

aumento na estabilidade do veículo é lastreado o peso para 2943 N. Aumentando a massa de 240,754 Kg para 300 Kg. Da equação (4.36) é calculado o valor de $N_2 = 317,02N$. Fazendo $\sum F_y = 0$, obtém-se que:

$$N_1 + N_2 - P = 0 \quad (4.37)$$

Substituindo os valores de $N_2 = 317,02N$ e $P = 2943N$, por tanto $N_1 = 2622,98N$. Da $\sum F_x = 0$, logo:

$$F_{F_1} + F_{F_2} - F = 0 \quad (4.38)$$

Porém os valores calculados de F_{F_1} e F_{F_2} correspondem a 656,055 N.

Para a situação mais crítica, quando o jato está sendo direcionado para o lado, como na **Figura 4.27**, é aplicado o mesmo procedimento anterior. Para $\sum M_{R_1} = 0$, obtém-se que:

$$-0,3P + 0,6N_2 + 0,54F = 0 \quad (4.39)$$

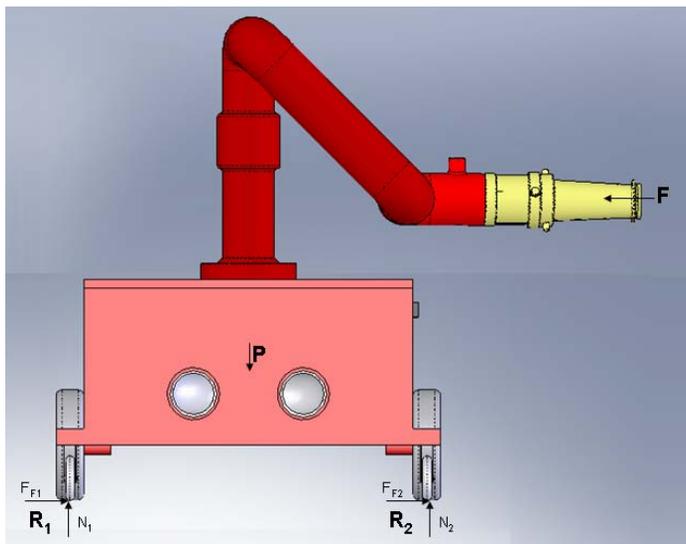


Figura 4.27 Diagrama de corpo livre do RobotFire, quando o jato está direcionado para o lado.

Da equação (4.39) é encontrado o valor de $N_2 = 290,602N$. Fazendo $\sum F_y = 0$ na equação (4.37), substituindo $N_2 = 290,602N$ e $P = 2943N$, de modo

que o valor de $N_1 = 2652,398N$; e finalmente, fazendo $\sum F_x = 0$ na equação (4.38), são obtidos os valores de F_{F_1} e F_{F_2} iguais a 656,055 N, que são mantidos iguais que os da análise anterior, sendo que as forças aplicadas no eixo x não variam.

Finalmente, para estimar a inclinação máxima à qual o veículo pode ser submetido, quando o jato está na situação mais crítica como é mostrado na **Figura 4.28**. É novamente realizada a $\sum M_{R_1} = 0$, levando em conta que agora o peso possui componentes em x e y, assim:

$$0,54F + 0,25P_x - 0,3P_y + 0,6N_2 = 0 \quad (4.40)$$

substituindo os valores de $F = 1312,109N$, $P_x = P \sin \alpha$, $P_y = P \cos \alpha$ e fazendo que N_2 seja igual a zero é obtido o ângulo de inclinação máximo do plano ao que o veículo pode ser submetido, $\alpha = 12,133^\circ$

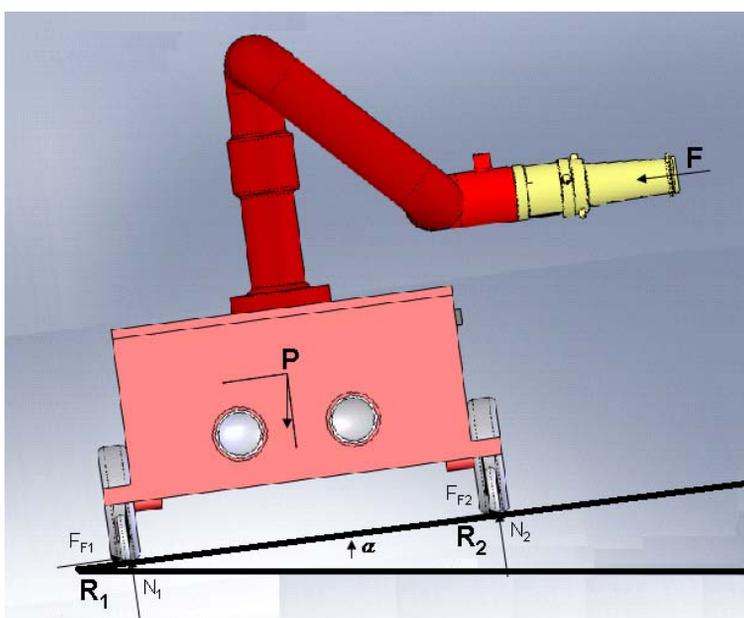


Figura 4.28 Diagrama de corpo livre em um plano inclinado do RobotFire.

5 CONCLUSÕES

Inicialmente a pesquisa feita na área de engenharia em incêndios foi básica para uma introdução em todos os problemas inerentes a este tema. Foram adquiridos conhecimentos multidisciplinares que ajudaram ao projeto conceitual do robô delimitando e ampliando as possibilidades de atuação em campo do sistema.

A área de classes e extinção de incêndios foi de vital importância para determinar que tipo de extintor utilizar na hora de combater certo tipo de incêndio, mas as constantes conversas com os bombeiros foram chaves para um melhor entendimento da realidade à qual eles enfrentam na hora de combater um incêndio, levando em conta que nem sempre num lugar de sinistro existe só um material combustível; desta forma a água continua sendo o extintor universal.

A água é a substância mais difundida na natureza, e é o grande agente extintor é por isto que neste projeto foi considerada a utilização de água inicialmente, mas é viável a implementação de espuma como agente extintor, com a troca do esguicho no canhão monitor implementando também um sistema de controle remoto adicional para a expulsão da espuma.

O estudo das normas existentes nesta área é um dos pontos fundamentais para levar em conta, na hora de pensar num projeto que consiga cumprir e implementar as normas já estabelecidas por entidades nacionais e internacionais.

O capítulo de robôs móveis foi bastante amplo devido ao alto desenvolvimento de pesquisas nesta área nos últimos anos; foi preciso o estudo profundo para os tipos de movimentação e a cinemática, que de forma geral foi compreendida para qualquer configuração dando as restrições a partir do tipo de rodas do sistema.

Em geral, não há nenhuma configuração “ideal” que maximize simultaneamente a estabilidade, manobrabilidade e controlabilidade do robô; para esta aplicação em particular foi escolhida a configuração diferencial-dirigido com quatro rodas, duas rodas padrão fixas e duas rodas loucas desenergizadas, que consegue controlar a taxa da mudança na orientação e a velocidade para frente e para trás manipulando as velocidades da roda.

O robô estudado nesta dissertação é um robô não holonômico, sendo que tem rodas padrão fixas que inserem restrições cinemáticas no chassi do robô não holonômicas; por exemplo, a restrição de deslizamento necessária imposta no sistema para que exista um único ponto de contato entre a roda e o plano do chão.

A implementação de um sistema fuzzy neste trabalho, foi feita pela complexidade de controle de velocidade de motores, utilizando técnicas de controle

tradicionais que requerem um modelo matemático muito complexo. Sendo que a lógica fuzzy elimina a necessidade de modelos matemáticos e permite o desenvolvimento de uma solução mais fácil, definindo regras que determinam o comportamento do sistema usando palavras descritivas em vez de equações matemáticas.

Na implementação do controle fuzzy, foram obtidos tempos de processamentos de amostras para cada uma das tecnologias utilizadas. De onde se pode concluir que para um tempo de 1ms, que é um tempo razoável para o processamento de amostras, todas as tecnologias experimentadas conseguem cumprir o objetivo de enviar respostas para os dois motores no tempo estipulado. Para 1ms com C++ é possível processar 26 amostras, com VisualDSP++ é possível processar 19 amostras e para Matlab é possível processar 3 amostras. Se forem aumentados os números de motores a controlar, podem ir sendo descartadas algumas tecnologias para esta implementação em particular.

Levando em conta a pouca flexibilidade da mangueira depois de estar cheia de água dificultando a movimentação; a pesquisa de robôs serpentes ficou por enquanto em uma possibilidade futura de implementar este tipo de mecanismo para expulsão de água.

O mecanismo escolhido para a expulsão da água foi o canhão monitor sendo uma ferramenta utilizada atualmente pelos bombeiros e implementada nas viaturas, este mecanismo especializado para combate a incêndios a distância pode operar tanto com água, pó químico ou água e espuma.

Nos cálculos desenvolvidos para perda de carga, alcance e estabilidade foram obtidos dados satisfatórios que cumprem com os objetivos para o qual foi projetado o robô; levando em conta que foram feitos baixo condições ideais e podem variar dependendo do lugar onde for necessária a atuação do sistema.

As dimensões do robô permitem que ele consiga entrar pela porta de uma casa para extinguir um possível incêndio, porém não é só esta aplicação, pois ele consegue atingir uma altura horizontal e vertical razoável para ajudar no combate a incêndios de modo geral.

A conclusão global do trabalho além dos pontos técnicos mencionados acima é a possibilidade de preservar uma vida a mais no combate a incêndio, ou seja, a vida do bombeiro; possibilitando que ele comande o robô de uma distância segura ao foco do incêndio.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Num incêndio as temperaturas atingidas são muito altas, é por isto que um estudo detalhado de materiais para possíveis recobrimentos nas peças e para os componentes em geral do sistema é de vital importância para a construção futura do robô.

Convencionalmente, estabilidade estática requer um mínimo de três rodas e o centro de gravidade deve ser contido dentro do triângulo formado pelos pontos de contato do chão com as rodas. A estabilidade, pode ser melhorada adicionando mais rodas, embora uma vez que o número de pontos de contato excede de três, a geometria requererá alguma forma de suspensão flexível num terreno desigual. Sendo um trabalho muito interessante a suspensão do veículo para conseguir manter as quatro rodas no chão.

O prosseguimento do trabalho aqui apresentado pode incluir projetos mais complexos, como o desenvolvimento detalhado de cada um dos mecanismos, projetando peça a peça para uma possível construção futura.

Mesmo em um estudo conceitual, com os cálculos desenvolvidos, é possível analisar novas configurações e mecanismos de locomoção (esteiras, pernas, etc.). Outras simulações cinemáticas e dinâmicas da locomoção podem ser realizadas para avaliar o modo ingressar a ambientes hostis.

De Forma geral, este trabalho pode ser projetado para atuar autonomamente em determinados ambientes. Conseguindo proteger ainda mais a vida do bombeiro delimitando a ação dele a uma supervisão, afastado do lugar do sinistro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1998, “Norma NBR 11861” Brasil.
- ALEXANDER, J. C., MADDOCKS, J. H., 1989 “On the Kinenatics of Wheeled Mobile Robots”, *Int. J. Robot Vehicles. Res.*, v. 8, n. 5, pp. 15-27.
- AMANO, H., 2002, “Present Status and Problems of Fire Fighting Robots”, *Sice Annual Conference*, pp. 880-885.
- AMYOTTE, P.R., KHAN, F.I. AND DASTIDAR, A.G., 2003, “Reduce Dust Explosions the Inherently Safer Way”, *Chemical Engineering Progress*, v. 98, pp. 36-43.
- BABA, K., INO, S., TAKAMOTO, Y., *et al.*, 2007, “Fire-fighting Robots” *United States Patent*.
- BANGASH, M. Y. H., BANGASH, T., 2006, *Explosion-Resistant Buildings*. Londres, Springer-Verlag.
- BAPTISTA, S., 2007, *Manual de prevenção de incêndio*. Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro.
- BATAVIA, P., NOURBAKHSI, I., 2000, “Path Planning for the Cye Personal Robot”, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 15-20.
- BEER, F., JOHNSTON, E., 1980, *Mecânica Vetorial para Engenheiros, Estática*. 3 ed. São Paulo, McGraw-Hill.
- BLACKWELL, M., 1990, “The URANUS Mobile Robots” *Tech. report CMU-RI-TR-91-06*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, pp. 33.
- BORISOV, A. V., MAMAIEV, I. S., 2002, “On the History of the Development of the Nonholonomic Dynamics”, *Regular and Chaotic Dynamics*, v.7, n.1, pp. 43-47.
- CAMPION, G., BASTIN, G., D’ANDRÉA-NOVEL, B., 1996, “Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.12, n.1, pp. 47-62.
- CANUDAS DE WIT, C., SORDALEN, O. J., 1993, “Exponential Stabilization of Robots with Nonholonomic Constrains”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, n. 37, pp. 1791-1797.
- CARDONA, A. M., PARRA, C., BARRERO, J. I., 2006, “Control Strategies for Articulated Chain Robots”, *Florida Conference on Recent Advances in Robotics 2006*, Miami, Florida, Maio 25-26.
- CBMERJ, 2003, “Informações Técnicas - Classificação dos Incêndios”, Subsecretaria de Defesa Civil, Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro.

- CHONGFU, H., RUAN, D., 2000, *Fuzzy Sets and Fuzzy Information Granulation Theory (Key selected papers by Lotfi A. Zadeh)*, Beijing, Beijing Normal University Press.
- CORTÉS, J., 2002, *Geometric, Control and Numerical Aspects of Nonholonomic Systems*. Alemanha, Springer-Verlag.
- COSENZA-ANDRAUS, M. E., NUNES-COSENZA, C. A., GOMEZ-NUNES, R., *et al.*, 2006, “Monitorización prolongada por videoelectroencefalografía de pacientes con diagnóstico ambulatorio de epilepsia del lóbulo temporal de difícil control: aplicación del modelo de lógica fuzzy”, *Rev Neurol*, v.43, n.1, pp. 7-14.
- CRANE, 1982, *Flow of Fluids, Through Valves, Fittings and Pipe*. New York.
- CRESPI, A., BADERTSCHER, A., GUIGNARD, A., *et al.*, 2005, “AmphiBot I: an amphibious snake-like robot”, *Robotics and Autonomous Systems*, 31 de março, v. 50, pp. 163-175.
- CRESPI, A., BADERTSCHER, A., GUIGNARD, A., *et al.*, 2005, “Swimming and Crawling with an Amphibious Snake Robot”, *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE*, 18-22 Abril, pp. 3035-3039.
- CRESPI, A., IJSPEERT, A. J., 2006, “AmphiBot II: Amphibious Snake Robot that Crawls and Swims using a Central Pattern Generator”, *Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2006)*, pp. 19-27.
- DA COSTA, S. M., 2001, *Estudo e Projeto de um Robô Hexápode com Atuadores Utilizando Materiais Com Memória de Forma*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DA COSTA, V., 2004, *Simulação de um Sistema de Controle para Robôs Hexápodes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DADONE, P., 2001, *Design Optimization of Fuzzy Logic Systems*. Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- DAVIS, W. D., CLEARY, T., DONNELLY, M., *et al.*, 2003, “Using Sensor Signals to Analyze Fires”, *Fire Technology*, v. 39, pp. 295-308.
- DAVLETSHINA, T.K., CHEREMISINOFF, N.P. 1998, *Fire and Explosion Hazards Handbook of Industrial Chemicals*, Noyes Publications.
- DE MENEZES, A., 1999, *Cinémática de um Robô Hexápode*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DE MOOR, B., DE GERSEM, P., DE SCHUTTER, B., *et al.*, 1997, “DaISy: A database for identification of systems”, *Jornal A, special Issue on CACSD (Computer Aided Control Systems Design)*, v. 38, n. 3, pp. 4-5.

- DOWLING, R., 1997, *Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot*. Ph.D. Tese, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- DRYSDALE, D., 1999, *An Introduction to Fire Dynamics*. 2 ed. Edinburgh (UK), Jhon Wiley & Sons.
- DUBEL, W., GONGORA, H., BECHTOLD, K., *et al.*, 2003, "An Autonomous Firefighting Robot".
- DUTRA, M. S., 1995, *Bewegungskoordination und Steuerung einer zweibeinigen Gehmaschine*. D.Sc., Gerhard Mercator Universität Gh Duisburg, UNI-DUISBURG, Alemanha.
- ECKHOFF, R. K., 1999, *Dust Explosions in the process Industries*. 2 ed, Butterwoeth-Heinemann.
- EMBREE, P., 1995, *DSP C Algorithms For Real-Time DSP*. USA, Prentice Hall PTR.
- ESTIER, T., CRAUSAZ, Y., MERMINOD, B., *et al.*, 2000, "An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities", *In Proceedings of Space & Robotics, the Fourth International Conference and Exposition on Robotics in Challenging Environments*, Albuquerque, New Mexico.
- FERNANDO, M. L. E., EKANAYAKE, H., RANASINGHE, D. N., 2006, "An autonomous Robot for Controlling Fire in a Structured Environment", *Proceedings of 8th International Information Technology Conference*, Colombo, Sri Lanka.
- FETA (Fire Extinguishing Trades Association), 2001, Feta File no.015 class F fires.
- FIGUEREDO, R. C. R., RIBEIRO, F. A. L., SABADINI, E., 1999, "Ciência de Espumas - Aplicação na Extinção de Incêndios" *Química Nova, Artigos de Divulgação*, v. 22, n. 1, pp. 126-130.
- FOX, R., McDONALD, A., 2001, *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.).
- FUJITA, M., KITANO, H., 1998, "Development of an Autonomous Quadruped Robot for Robot Entertainment", *Autonomous Robots*, v. 5, n. 1, pp.7-18.
- GONZÁLEZ-ROJO, S., SLAMA, J. G., PEREIRA, A. L., MORACAMINO, F., 2002, "A Fuzzy Logic Approach for Car-Following Modelling", *Systems analysis, modelling, simulation*, Estados Unidos, v. 42, n. 5, pp. 735-755.
- GUERRERO, J. F., MORALES, G., SÁNCHEZ, J. M., *et al.*, 2002, "Diseño y Construcción del Robot Móvil Contra Incendios ROBOCATEPETL", *Segundo Congreso Nacional de Electrónica*, Puebla, Mexico.
- HIRAI, K., HIROSE, M., HAIKAWA, Y., *et al.*, 1998, "The Development of Honda Humanoid Robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v. 2, Leuven, Belgium, pp. 1321-1326.

- HIROSE, S., 1993, *Biologically Inspired Robots, Snake-like Locomotors and Manipulators*, Oxford University Press.
- HIROSE, S., FUKUSHIMA, E. F., 2002, "Snakes and Strings: New Robotic Components for Rescue Operations", *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, v. 1, pp. 338-343.
- IJSPEERT, A. J., CRESPI, A., 2007 "Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model", *In proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp. 262-268.
- JONES, J., FLYNN, ANITA., SEIGER, BRUCE., 1993, *Mobile Robots, Inspiration to implementation*. 2 ed, AK Peters.
- KARLSSON, B., QUINTIERE, J. G., 2000, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.
- KLIR, G., YUAN, B., 1995, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*, Prentice Hall.
- KORDIC, V., LAZINICA, A., MERDAN, M., 2005, *Cutting Edge Robotics*, pro literature Verlag.
- KUROKI, Y., BLANK, B., MIKAMI, T., *et al.*, 2003, "Motion Creating System for a Small Biped Entertainment Robot" *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings IEEE/RSJ*, v. 2, pp. 1394-1399.
- LAKHMI, C., MARTIN, N. M., 1998, *Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications*, CRC Press LLC.
- LAURIA, M., PIGUET., SIEGWART, R., 2002, "Octopus: An Autonomous Wheeled Climbing Robot", *In Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots. Published by Professional Engineering Publishing Limited*, Londres, UK.
- LILJEBÄCK, P., 2005, "SnakeFighter – Intelligent slangerobot for krevende intervensjoner", Servomøtet, NFA, Trondheim.
- LILJEBÄCK, P., STAVDAHL, Ø., PETERSEN, K. Y., 2005, "Modular Pneumatic Snake Robot 3D Modelling, Implementation and Control", *in Proc IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- LO, S. M., 1999, "A Fire Safety Assessment System for Existing Buildings", *Fire Technology*, v. 35, n. 2, pp. 131-152.
- LUK, W., CONSTANTINIDES, G., CHEUNG, P.Y.K., 2004, *Synthesis and Optimization of DSP Algorithms (Fundamental Theories of Physics)*. 1 ed, Springer.
- MACINTYRE, A. J., 1980, *Bombas e Instalações de Bombeamento*. Rio de janeiro, Guanabara dois.

- MATTOS, E., FALCO, R., 1989, *Bombas Industriais*. 1 ed. Rio de Janeiro, Editora Técnica Ltda.
- MILKE, J. A., 1999, "Monitoring Multiple Aspects of Fire Signatures for Discriminating Fire Detection", *Fire Technology*, v. 35, n. 3, pp. 195-209.
- MILKE, J. A., HULCHER, M. E., WORRELL, C. L., 2003, "Investigation of Multi-Sensor Algorithms for fire Detection", *Fire Technology*, v. 39, pp. 363-382.
- MILLER, L., RODRIGUEZ, D., ALLEN, K., *et al.*, 2003, "Firebot: Design of an Autonomous fire Fighting Robot", *16th Florida conference on Recent advances in Robotics*.
- NUNES, C. A., 2003, *Lógica e Matemática Fuzzy 1º Curso de Curta Duração*. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- PETROBRAS, 1997, "N-1203 Projeto de Sistemas de Proteção contra Incêndio em Instalações", Comissão de Normas Técnicas.
- PFISTER, G., 1997, "Multisensor/Multicriteria Fire Detection: A New Trend Rapidly Becomes State of the Art", *Fire Technology*, v. 33, n. 2, pp. 115-139.
- PRATT, J., PRATT, G., 1998, "Intuitive Control of a Planar Bipedal Walking Robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v. 3, Leuven, Belgium, pp. 2014-2021.
- RAI, L., KANG, S. J., 2005, "Multi-Thread based Synchronization of Locomotion Control in Snake Robots", *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'05)*, pp. 559-562.
- RAIBERT, M. H., 1986, "Legged Robots", *Communications of the ACM*, v. 29, n. 6, pp. 499-514.
- RASBASH, D. J., RAMACHANDRAN, G., KANDOLA, B., *et al.*, 2004, *Evaluation of Fire Safety*, Inglaterra, John Wiley & Sons.
- REINHART, J., KHANDWALA, V., SHAH, T., *et al.*, 2003, "Design and Implementation of Fully Autonomous Fire-fighting Robot for a Small House Model", *16th Florida conference on Recent advances in Robotics*.
- RINGROSE, R., 1997, "Self-Stabilizing Running", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico.
- ROSE-PEHRSSON, S. L., HART, S. J., STREET T. T., *et al.*, 2003, "Early Warning Fire Detection System Using a Probabilistic Neural Network", *Fire Technology*, v. 39, pp. 147-171.
- SAHA, S. K., ANGELES, J., 1989, "Kinematics and Dynamics of a Three-Wheeled 2-DOF AGV", *IEEE*, Canada.

- SAN-MIGUEL-AYANZ, J., RAVAIL, N., KELHA, V., *et al.*, 2005, "Active Fire Detection for Fire Emergency Management: Potencial and Limitations for the Operacional Use of Remote Sensing", *Natural Hazards*, v. 35, n. 3, pp. 361-376.
- SEARS, F.W., ZEMANSKY, M.W., 1976, *Física – Vol. II*. 1 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
- SIEGWART, R., NOURBAKHSI, I. R., 2004, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Londres, A Bradford book.
- TAVERA, M. J. M., LENGERKE, O., DUTRA, M.S., MARTINEZ, C., SILVA, F.L.E., 2007, "Mechatronics Design of a Packing and Dosing Machines of Low Cost for Doughy Products", *19th Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2007*, Brasilia - Brasil.
- TAVERA, M. J. M., NINO, J.T., LENGERKE, O., DUTRA, M.S., 2007, "Diseño y Automatización de un Puente Grúa Para Procesos Secuenciales". *8 Congreso Iberoamericano de Ingeniera Mecánica - CIBIM8*, Cusco - Perú.
- TAVERA, M.J.M, DUTRA M.S., LENGERKE, O., GONZALEZ, H.A., 2007, "Diseño Mecatrónico de un Controlador de Velocidad Implementado en un Robot Móvil de Tracción Síncrona", *8 Congreso Iberoamericano de Ingeniera Mecánica - CIBIM8*, Cusco, Perú.
- THOMSON, N., 2002, *Fire hazards in industry*. 1 ed. Inglaterra, Butterwoeth-Heinemann.
- TOLIYAT, H.A., CAMPBELL, S.G., 2003, *DSP-Based Electromechanical Motion Control (Power Electronics and Applications Series)*. 1 ed. USA, CRC.
- VERITY, B. 1992, "A day at the football match: The Bradford city football club fire, 1985", *Bulletin du Service de Documentation Generale*, n. 79, pp. 1-8.
- VERNER, I. M., AHLGREN, D. J., 2002, "Fire-Fighting Robot Contest: Interdisciplinary Design Curricula in College and High School", *Journal of Engineering Education*, v. 91, n. 3, pp. 355-360.
- WARREN, P., 1997, *Hazardous Gases and Fumes, A Safety Handbook*. Inglaterra, Butterworth-Heinemann.
- WEI, T. E., QUINN, R. D., RITZMANN, R. E., 2004, "A CLAWAR that Benefits From Abstracted Cockroach Locomotion Principles", *Climbing and Walking Robots Proceedings of the 7th International Conference*, pp. 849-857, Springer Berlin Heidelberg.
- YAMAKITA, M., YAMADA, T., TANAKA, K., 2003, "Control of Snake Like Robot for Locomotion and Manipulation", *Proceedings of International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*.

- ZHANG, X. M., CASSELLS, C. J. S., GENDEREN, J. L., 1999, "Multi-sensor data fusion for the detection of underground coal fires", *Geologie en Mijnbouw*, v.77, pp. 117-127.
- ZHIGANG, L., KIM, A. K., CARPENTER, D., 2007, "A study of portable water mist fire extinguishers used for extinguishment of multiple fire types", *Fire Safety Journal*, v. 42, n. 1, pp. 25-42.
- ZHOU, Y., LI, S., JIN, R., 2002, "A new fuzzy network with fast learning algorithm and guaranteed stability for manufacturing process control". In: *Fuzzy Sets and Systems*, v.132, Elsevier Science, pp. 201-216.
- ZHOU, Y., WILKINS, D., COOK, R. P., 1998, "Neural Network Control for A Fire-Fighting Robot", *Soft ware-Concepts and Tools*, v. 19, n. 3, pp. 146-152.