

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WANDERLEY CARDOSO CELESTE

UM SISTEMA AUTÔNOMO PARA NAVEGAÇÃO DE
CADEIRAS DE RODAS ROBÓTICAS ORIENTADAS A
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA SEVERA

VITÓRIA
2009

WANDERLEY CARDOSO CELESTE

**UM SISTEMA AUTÔNOMO PARA NAVEGAÇÃO DE
CADEIRAS DE RODAS ROBÓTICAS ORIENTADAS A
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA SEVERA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de Automação.

Orientador: Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho.

Coorientadores: Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho e Prof. Dr. Ricardo Carelli.

VITÓRIA

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C392s Celeste, Wanderley Cardoso, 1978-
Um sistema autônomo para navegação de cadeiras de rodas robóticas orientadas a pessoas com deficiência motora severa / Wanderley Cardoso Celeste. – 2009.
130 f. : il.

Orientador: Teodiano Freire Bastos Filho.
Co-Orientadores: Mário Sarcinelli Filho, Ricardo Carelli.
Tese (doutorado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Robótica. 2. Robôs móveis. 3. Dinâmica. 4. Teoria do controle não-linear. 5. Sistemas de controle ajustável. 6. Liapunov, Funções de. I. Bastos Filho, Teodiano Freire. II. Sarcinelli Filho, Mário. III. Carelli, Ricardo. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 621.3

WANDERLEY CARDOSO CELESTE

**UM SISTEMA AUTÔNOMO PARA NAVEGAÇÃO DE
CADEIRAS DE RODAS ROBÓTICAS ORIENTADAS A
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA SEVERA**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de agosto de 2009.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho - Co-orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Ricardo Carelli - Co-orientador
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Prof. Dr. Pablo Javier Alsina
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Edson de Paula Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Paulo Faria Santos Amaral
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Leandro Felix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo

À minha família.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES, à FACITEC e à FAPES pelo apoio financeiro concedido, o qual tornou possível a realização da pesquisa aqui apresentada.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho, Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho e Prof. Dr. Ricardo Carelli, por compartilharem suas experiências de vida e os conhecimentos acumulados durante suas vidas acadêmicas, e por terem trabalho incessantemente em busca de recursos materiais e convênios institucionais sem o quais esta pesquisa não teria sido possível.

Aos companheiros da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) e do INAUT (Instituto de Automática) da *Universidad Nacional de San Juan, Argentina*, pelo apoio profissional e pela amizade que estabelecemos, a qual considero como sendo o mais belo resultado alcançado durante todo o meu doutorado.

A Felipe N. Martins e Cynthia A. Netto - o casal mais alto astral de todos os tempos -, a Alexandre S. Brandão (conhecido no Brasil como Timótiu, e no exterior como Pajarito Llamador), a Rafael Leal Silva (iniciais PS) e a Vinícius T. L. Rampinelli (o Aspira), com os quais tive o imenso prazer de compartilhar moradia durante minhas estadias em San Juan - Argentina; a André Ferreira, Celso De La Cruz, Fernando Auat e Patrick Filgueira, os quais foram os grandes parceiros na empreitada que foi fazer a Cadeira de Rodas Robótica funcionar; e a Daniel C. Cavalieri, Igor B. Arantes, Sandra Mara T. Muller e muitos outros, por terem aceitado a "perigosa" tarefa de serem voluntários em experimentos envolvendo a Cadeira de Rodas Robótica.

Aos membros da banca examinadora, o Prof. Dr. Pablo J. Alsina, o Prof. Dr. Edson de Paula Ferreira, o Prof. Dr. Paulo F. S. Amaral e o Prof. Dr. José Leandro F. Salles, pelas observações e sugestões feitas, as quais contribuíram para a melhoria desta tese.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigado!

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar; é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver...”

Martin Luther King.

Resumo

Esta tese propõe um sistema autônomo para navegação de cadeiras de rodas robóticas como solução para o problema de locomoção enfrentado por pessoas com deficiência motora severa. Ele consiste de um sistema de controle, de um sistema para geração de referências, e de um sistema supervisorio. O sistema de controle é formado por um conjunto de controladores cinemáticos responsáveis por realizar tarefas específicas de controle de uma Cadeira de Rodas Robótica (CRR), além de uma compensação dinâmica capaz de adaptar-se a variações do comportamento dinâmico, comuns em CRRs, e de garantir a robustez frente a perturbações não modeladas. É verificado formalmente que todos os controladores envolvidos garantem a estabilidade do sistema como um todo, mesmo quando um dos controladores é trocado por outro (comutação). É possível, assim, a realização de tarefas mais complexas, sob a coordenação do sistema supervisorio, tais como seguir um caminho de referência, desviando de possíveis obstáculos, e orientando-se no destino. Tais tarefas são realizadas com o cuidado de preservar a segurança e o conforto do usuário. É proposto, também, um modelo dinâmico parametrizado que descreve a dinâmica do sistema formado pela CRR e seu usuário. Tal modelo permite a formulação de uma lei de compensação que leva em conta uma possível variação da dinâmica do sistema. Resultados de simulações e de experimentos realizados em um protótipo de CRR comprovam o bom desempenho do sistema quando submetido a tais variações. Verifica-se, também, que o sistema se comporta muito bem frente a perturbações provenientes de fontes diversas, justificando a existência de uma compensação dinâmica adaptativa e robusta para CRRs.

Abstract

This dissertation proposes a solution to the problem met by people with severe motor-diseases, which have full incapacity of moving around by themselves, but keep intact their cognitive abilities. Such a solution is a navigating system for a Robotic Wheelchair, which consists of a control system, a reference generating system and a supervisory system. The control system comprises a set of kinematic controllers to execute specific tasks, besides a dynamic compensation controller capable to adapt itself in the presence of structured uncertainties and being robust to unstructured uncertainties. The robust adaptive dynamic compensator is based on a dynamic model of the robotic wheelchair carrying a user seated. Specific tasks are accomplished by the reference generator based on a user command and vehicle information. User commands establish poses of interest to be reached by the robotic wheelchair after following a safe route. To split a general task in specific ones is the strategy here adopted to reduce the complexity of the navigating system, which should also take care of the safety and comfort of the user. The supervisory system is responsible for an adequate coordination of the kinematic controllers, in addition to perform a sequence of specific tasks. Simulation and experimentation results show the good performance of the system, even when submitted to changes caused by a user on board the vehicle and by external effects.

Lista de Figuras

1	Hardware adicional embarcado na cadeira de rodas elétrica.	26
2	Cadeira de rodas para assistência a pessoas com deficiência motora severa.	27
3	Diagrama de conexão entre as peças de hardware da cadeira de rodas.	28
4	Diagrama de blocos do sistema para assistência a pessoas com deficiência motora em nível 4.	29
5	Comandos diretos para interação com pessoas (à esquerda), para navegação guiada (centro) e escrita de texto (à direita).	30
6	Comandos para navegação autônoma.	30
7	Diagrama de blocos do sistema de navegação.	37
8	Cinemática de movimento para seguimento de caminho.	38
9	Simulação: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação (acima), e velocidades angulares de referência e de resposta (abaixo).	41
10	Simulação: a) Caminho seguido; b) Velocidades angulares de referência e de resposta.	42
11	Simulação: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação, e velocidades angulares de referência e de resposta.	43
12	Experimento: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação, e velocidades angulares de referência e de resposta.	44
13	Ajuste da velocidade linear a) com base em ω_{ref} b) com base na distância veículo móvel-obstáculo.	46
14	Ajuste da velocidade linear.	47
15	a) Ilustração do problema de seguimento de caminho com o ponto de interesse em uma posição qualquer do robô; b) Representação dos pontos Q e H do robô; c) Detalhamento da distância a entre os pontos Q e H do robô.	47

16	Ilustração do problema de seguimento de caminho com o ponto de interesse em uma posição qualquer do robô móvel: <i>trailer</i> entre os robôs real e virtual.	48
17	Ponto H (deslocado do centro do eixo que une as rodas de tração, isto é, o ponto Q) seguindo caminho de referência.	49
18	Ambiente hipotético descrito através do <i>Mapper</i>	50
19	PDA exibindo símbolos pictográficos que indicam as possíveis regiões de interesse em um ambiente doméstico.	51
20	Fluxograma do sistema de geração de caminho de referência.	52
21	Mapa de um ambiente hipotético a) discretizado e b) dilatado.	53
22	Definição de região de segurança.	53
23	Geometria da cadeira de rodas.	54
24	Ambiente gerado em <i>Mapper</i>	55
25	Mapa de um ambiente hipotético a) discretizado e b) dilatado.	56
26	Diagrama de estados do sistema de prevenção contra criação de ilhas devido à dilatação.	56
27	Mapas de ambientes hipotéticos: a) dilatação sem criação de ilhas; b) ambiente com passagem estreita.	57
28	Ilustração de forças virtuais de repulsão atuando sobre o veículo móvel. . .	58
29	Mapa de ambiente hipotético: a) formação da parede virtual repulsiva; b) risco de colisão.	59
30	Mapeamento de células livres para navegação em uma estrutura de grafos.	60
31	Representação do caminho mais seguro a) discretizado e b) interpolado. . .	60
32	Postura de veículos móveis unicyclos.	61
33	Cinemática de movimento para alcance de ângulo desejado.	62
34	Caso de estudos: a) ambiente hipotético; b) caminho gerado.	63
35	Sensor de proximidade desligado: colisão com obstáculo inesperado. . . .	65
36	Sensor ligado: o veículo se aproxima do obstáculo, mas não se choca. . . .	66
37	Desvio Tangencial Modificado: Determinação do ângulo de rotação. . . .	68

38	Cinemática de movimento para alcance de uma postura desejada.	69
39	Escape tangencial.	70
40	Estratégias de retorno ao caminho de referência.	71
41	Geração de arcos convergentes.	72
42	Conexão suave entre arcos convergentes e caminho a) visão geral b) detalhe.	74
43	Diagrama de blocos do sistema de navegação.	75
44	Máquina de estados finitos do sistema supervisorio.	77
45	Descrição de efeitos cinemáticos e dinâmicos sobre uma CRR.	85
46	Excitações e respostas de sistema: a) velocidade linear b) velocidade angular.	90
47	Cadeira de rodas robótica transportando uma pessoa.	91
48	Excitações e respostas reais e simuladas: a) velocidade linear b) velocidade angular.	91
49	Diagrama de blocos da estrutura de controle.	95
50	Simulação com lei de controle robusta considerando incertezas de modelo e parâmetros variantes no tempo: a) seguimento de caminho; b) erros de controle.	102
51	Simulação com lei de controle não robusta considerando incertezas de modelo e parâmetros variantes no tempo.	103
52	Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto com velocidade linear alta: a) caminho seguido e erros de controle b) velocidades de excitação e de resposta, e erros de velocidade.	105
53	Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto com velocidade linear baixa: a) caminho seguido e erros de controle b) velocidades de excitação e de resposta, e erros de velocidade.	106
54	Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto: evolução dos parâmetros dinâmicos estimados.	107
55	Simulação usando caminho de referência persistentemente excitante.	107
56	Evolução de parâmetros dinâmicos estimados.	108

57	CRR transportando pessoa pesada para pose desejada através de um caminho de referência.	108
58	Gráficos de experimento com a CRR transportando pessoa pesada para pose desejada através de um caminho de referência.	109
59	Experimento com desvio de obstáculo.	109
60	Gráficos do experimento com desvio de obstáculo.	110
61	Sinais de chaveamento do supervisor.	110
62	Estabilidade via método direto de Lyapunov.	122

Lista de Tabelas

1	Pessoas com Deficiência no Brasil.	22
2	Classificação do Nível de Deficiência Motora de um Indivíduo.	23
3	Parâmetros Identificados	90

Notações

O número da página onde cada símbolo é explicado está indicado em cada linha de definição.

a	Comprimento de uma haste rígida virtual	48
$a_{frenagem}$	Desaceleração constante	67
a_{max}	Desaceleração máxima	67
b_1	Deslocamento longitudinal do centro de massa do veículo móvel	84
b_2	Deslocamento lateral do centro de massa do veículo móvel	84
c	Curvatura de um caminho	37
c_1	Distância entre eixos das rodas dianteiras e traseiras	84
c_2	Distância entre as rodas livres	84
$c(\cdot)$	Função de risco de colisão em células de um ambiente	59
d	Distância entre rodas de tração	84
$d_{dilatacao}$	Dilatação máxima permitida	68
d_{obst}	Distância entre veículo e obstáculo	46, 67
d_{min}	Distância mínima permitida entre veículo e obstáculo	47, 68
d_{max}	Distância máxima de detecção de obstáculo	47
d_{90}	Distância observada pelo sensor a 90° daquele que detecta d_{min}	68
$F_{ex'}, F_{ey'}$	Forças externas	84
$F_{rlx'}, F_{rly'}$	Forças atuando sobre as rodas livres	84
$F_{rrx'}, F_{rry'}$	Forças atuando sobre as rodas de tração	84
h	Ponto do veículo móvel que serve como referência de controle	84
k_a	Constante de torque	86
k_b	Constante de tensão dos motores	86
k_{DR}	Ganho derivativo de rotação do controlador de baixo nível	87
k_{DT}	Ganho derivativo de translação do controlador de baixo nível	87
k_{PR}	Ganho proporcional de rotação do controlador de baixo nível	87
k_{PT}	Ganho proporcional de translação do controlador de baixo nível	87

$k(v)$	Função contínua estritamente positiva	38
$k_{\tilde{x}}$	Ganho constante	39
k_{ϕ}	Ganho constante	41
$k_{\tilde{\psi}}$	Ganho constante	39
k_{ρ}	Ganho constante	70
k_{ω}	Ganho constante	70
k_1	Ganho constante	38
r	Raio das rodas de tração $C1$	85
r_1	Raio da circunferência $C1$	73
r_2	Raio da circunferência $C2$	73
m	Massa do sistema (CRR mais usuário)	85
s	Abscissa curvilínea de um caminho	37
t	Tempo	39
u	Lei de controle não linear	38
u_l	Tensão de entrada aplicada ao motor CC esquerdo	86
u_r	Tensão de entrada aplicada ao motor CC direito	86
v	Velocidade linear	37, 62, 69, 84
\bar{v}^s	Velocidade linear de deslizamento lateral das rodas de tração	85
v_l^s	Velocidade linear de deslizamento longitudinal da roda de tração esquerda	85
v_r^s	Velocidade linear de deslizamento longitudinal da roda de tração direita	85
v'	Velocidade longitudinal do centro de massa do veículo	85
\bar{v}	Velocidade lateral do centro de massa do veículo	85
v_{ref}	Velocidade linear de referência baseada em comportamento dinâmico	87
v_{ref}^c	Velocidade linear de referência baseada em comportamento cinemático	38, 49
v_{ref}^0	Velocidade linear de referência para robô virtual	49
\mathbf{z}	Vetor com características de $C1$	74
(x, y)	Coordenadas da posição do robô	62
(x_0, y_0)	Coordenadas do centro de $C1$	73
(\tilde{x}, \tilde{y})	Coordenadas do erro de distância Γ	38
B_e	Coefficiente de fricção viscosa de cada combinação rotor-transmissão-roda	86
C_N	Conjunto de células navegáveis	59
C_O	Conjunto de células ocupadas	59
C_R	Conjunto de células repulsivas	59
$C1, C2$	Circunferências que passam pelos pontos \mathbf{P}_{robo} e \mathbf{P}_{cam}	73
G	Centro de Massa de sistema composto por CRR e seu usuário	84

H	Ponto qualquer de um robô 47
I_e	Momento de inércia de cada combinação rotor-transmissão-roda 86
I_z	Momento de inércia no ponto G 85
K	Número de células repulsivas 59
K_o	Constante de calibração 59
L_{dist}	Constante de calibração 46
L_x, L_y	Distâncias críticas 68
L_ω	Constante de calibração 46
M	Conjunto de células de um ambiente 59
P	Ponto de um caminho 37
Q	Ponto central do eixo virtual que une as rodas de tração do robô 37, 84
R_a	Resistência elétrica dos motores 86
R_c	Raio do maior círculo possível que tangencia Γ exatamente em P 38
\mathbf{T}	Matriz de regressão 89
\mathbf{T}_F	Matriz de regressão filtrado 90
V_{min}	Velocidade linear mínima positiva 46
V_{max}	Velocidade linear máxima positiva 46, 67, 70
\tilde{X}_{max}	Constante de saturação 42
\mathbf{Y}	Vetor de saída 90
\mathbf{Y}_F	Vetor de saída filtrado 90
\mathbf{Z}	Vetor com características de C^2 74
(X_0, Y_0)	Coordenadas do centro de C^2 73
α	Ângulo de deslocamento entre robôs real e virtual 49
δ	Vetor de parâmetros não identificáveis 88
$\phi(\cdot)$	Função para ajuste de transiente 39
φ	Ângulo de rotação entre alvos virtual e real 68
γ	Ganho constante 39
$\gamma(\tilde{y})$	Função contínua estritamente positiva 42
$\kappa_2(\alpha_c)$	Curvatura de C^2 74
λ_i	Autovalores de uma matriz 93
θ	Vetor de parâmetros identificáveis 88
$\hat{\theta}$	Vetor de parâmetros estimados 90
$\tilde{\theta}$	Vetor de erros paramétricos 96
ρ	Erro de distância 37, 69
σ	Sinal de comutação 77

ς	Variável independente	43, 81
τ_l	Torque do motor esquerdo	86
τ_p	Torque externo	84
τ_r	Torque do motor direito	86
ω	Velocidade angular	37, 62, 69, 84
ω_l	Velocidade angular da roda de tração esquerda	85
ω_r	Velocidade angular da roda de tração direita	85
ω_{ref}	Velocidade angular de referência baseada em comportamento dinâmico	87
ω_{ref}^c	Velocidade angular de referência baseada em comportamento cinemático	38
ψ	Orientação do robô	37, 62, 84
ψ_d	Orientação desejada Γ no ponto P	37, 62
ψ_0	Orientação de robô virtual	49
$\tilde{\psi}$	Erro de orientação;	37, 62, 69
Γ	Caminho de Referência	37
Γ_{max}	Constante de saturação	43
Ω_{sat}	Valor absoluto da velocidade angular de saturação	46
$\ \cdot\ $	Norma euclidiana de um vetor	99

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Definição do Problema	23
1.2	Objetivo	24
1.3	Trabalhos Prévios	25
1.3.1	Cadeira de Rodas Robótica	25
1.3.2	Interface Homem-Máquina	28
1.4	Trabalhos Relacionados	31
1.5	Contribuições	34
1.6	Estrutura da Tese	35
2	Sistema de Navegação	36
2.1	O Problema de Seguimento de Caminho	36
2.1.1	Limitação dos Sinais de Controle	41
2.1.2	Ajuste da Velocidade Linear	44
2.1.3	Deslocamento do Ponto de Controle	46
2.2	Planejamento e Geração de Referências	48
2.2.1	Mapa de Ambiente	49
2.2.2	Algoritmo de Geração de Caminho Livre	52
2.3	Orientação do Veículo	61
2.3.1	Modelagem	61
2.3.2	Controlador de Orientação	62
2.3.3	Orientação Inicial	63

2.4	Desvio de Obstáculos	64
2.4.1	Desvio Tangencial Modificado	67
2.4.2	Posicionamento	68
2.5	Arcos Convergentes	70
2.6	Sistema Supervisório	75
2.6.1	A Máquina de Estados	76
2.6.2	Estabilidade da Comutação	79
2.7	Discussão	81
3	Dinâmica da Cadeira de Rodas Robótica	83
3.1	Modelagem	83
3.1.1	Identificação de Parâmetros e Validação do Modelo	88
3.1.2	Propriedades do Modelo	91
3.2	Projeto e Análise do Controlador Dinâmico	94
4	Resultados	101
5	Conclusões	111
5.1	Discussões Finais	111
5.2	Trabalhos Futuros	114
	Referências	116
	Apêndice A	120
A.1	Definição de Estabilidade	120
A.2	Classes de Funções	121
A.3	Método Direto de Lyapunov	121
	Apêndice B	124
	Procedimento para Teste de Independência Linear	124

Apêndice C

125

Publicações 125

1 *Introdução*

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier.

O envelhecimento populacional é um fenômeno mundial que está ocorrendo a uma velocidade sem precedentes. Para se ter uma idéia, em 1950 havia cerca de 204 milhões de idosos (pessoas com idade igual ou superior a 60 anos) em todo o mundo. Esse número aumentou para 579 milhões em 1998 (o que equivale a um crescimento de quase 8 milhões de idosos por ano), e projeta-se que em 2050 os idosos do mundo alcançarão os incríveis 1,9 bilhão de pessoas. No Brasil, de acordo com os dados do censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) nos anos de 1991 e 2000, verificou-se que a proporção da população de pessoas com idade superior a 65 anos cresceu de 4,8% (o que equivalia a 7 milhões de pessoas) para 5,8% (o que equivalia a 9,9 milhões de pessoas), seguindo, assim, a tendência mundial.

Uma das explicações para tal fenômeno é o aumento da expectativa de vida da população mundial, devido, por exemplo, às descobertas de medicamentos mais eficientes, proporcionando a erradicação de algumas doenças que no passado assolaram a humanidade, bem como o grande avanço da medicina moderna. Deste modo, enquanto por um lado tem-se vivido mais, por outro lado é necessário garantir a qualidade de vida do grande número de idosos em um futuro que não está tão distante.

Uma outra grande preocupação é com relação ao crescimento mundial de pessoas com algum tipo de deficiência. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que 10% da população mundial possui alguma deficiência. O grande problema é que a cada 14 anos soma-se um bilhão de pessoas ao planeta, ou seja, são mais 100 milhões de *pessoas com deficiência* (termo mundialmente adotado a partir da *Convenção sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência* realizada e aprovada pela *Assembléia Geral das Nações Unidas* no ano de 2006). O Brasil tem motivos ainda maiores para se preocupar, pois segundo o

censo realizado no ano de 2000 pelo IBGE (o último até então), 14,5% dos brasileiros (o que equivalia a 24,5 milhões de pessoas) apresentavam algum tipo de deficiência, como pode ser visto na Tabela 1. Trata-se de um percentual consideravelmente superior aos 10% estimados pela OMS.

Tabela 1: Pessoas com Deficiência no Brasil.

Tipo de deficiência	Dados IBGE (%)	Número de habitantes (em milhões)
Mental	1,24	2,09
Física	0,59	0,99
Auditiva	2,42	4,08
Visual	6,97	11,77
Motora	3,32	5,6
Total	14,5	24,5

Tendo em vista o acelerado avanço do envelhecimento populacional e o incrível aumento do número de pessoas com deficiência, muito se tem falado sobre a chamada *tecnologia assistiva*. Trata-se de um ramo da ciência voltado para a pesquisa, desenvolvimento e aplicação de instrumentos que aumentam, ou até mesmo restauram, a função humana. Logo, o grande objetivo da tecnologia assistiva é o de permitir o aumento da autonomia de pessoas com deficiência e de idosos, proporcionando a tais indivíduos uma perfeita integração com a sociedade e garantindo a dignidade da pessoa humana, prevista, por exemplo, pela constituição brasileira.

Como pode ser observado na Tabela 1, no ano de 2000 haviam 5,6 milhões de brasileiros que apresentavam dificuldades parciais ou totais de movimento de alguma parte do corpo. Acredita-se que esse número atualmente já ultrapasse os 6,3 milhões de pessoas. É, sem dúvida, um número enorme de pessoas que necessitam, em seu dia-a-dia, de algum tipo de auxílio para que possam exercer sua autonomia. Tal auxílio pode ir desde uma simples muleta até dispositivos baseados em alta tecnologia, o que é definido com base no grau de deficiência motora apresentado pelo indivíduo.

Uma proposta de classificação do nível de comprometimento da capacidade de autolocomoção (deslocar-se de um lugar para o outro sem o auxílio de terceiros) de uma pessoa é apresentada na Tabela 2. A classificação é feita de acordo com o(s) dispositivo(s) necessário(s) para restaurar tal capacidade. Na tabela, são apontadas, ainda, as possíveis causas relacionadas a cada nível. Observa-se que a indicação de tais causas é realizada de forma relativamente genérica, mas suficiente para permitir a identificação do tipo de

Tabela 2: Classificação do Nível de Deficiência Motora de um Indivíduo.

Nível	Descrição	Causas
1	Autolocomoção com auxílio de muletas.	Paralisia permanente ou ausência de membro inferior.
2	Autolocomoção com auxílio de cadeira de rodas manual.	Paralisia permanente ou ausência de membros inferiores.
3	Autolocomoção com auxílio de cadeira de rodas elétrica.	Paralisia permanente ou ausência de membros inferiores, com comprometimento parcial de movimento de membros superiores.
4	Autolocomoção com auxílio de cadeira de rodas especial.	Paralisia permanente ou ausência de membros inferiores e superiores, com algum movimento muscular voluntário e atividade cognitiva preservada.
5	Autolocomoção impossível.	Paralisia permanente ou ausência de membros inferiores e superiores, e atividade cognitiva comprometida.

dispositivo mais adequado à pessoa com deficiência motora, em um processo inverso ao utilizado para gerar a tabela em questão.

Atualmente existem dispositivos no mercado que atendem às pessoas que se enquadram nos níveis 1, 2 e 3 da Tabela 2. Por outro lado, os indivíduos com nível 4 de deficiência motora ainda encontram dificuldades em alcançar a capacidade de auto-locomoção, por não disporem dos dispositivos necessários para isso. Por fim, há ainda as pessoas do nível 5, pelas quais, infelizmente, nada se pode fazer com relação à auto-locomoção, devido à gravidade do estado em que se encontram.

1.1 Definição do Problema

Está clara a grande necessidade de desenvolvimento de aparatos que atendam àqueles indivíduos do nível 4 de comprometimento da capacidade motora, possibilitando sua locomoção independente. A grande dificuldade é que pessoas com deficiência motora em nível 4 apresentam, em muitos casos, uma limitação enorme com relação à realização de atos voluntários, tais como o falar, o mover o pescoço, o piscar os olhos, ou seja, acionar algum músculo da face de forma voluntária. Há casos ainda piores, onde a pessoa sequer possui o controle do globo ocular, embora mantenha uma plena atividade cognitiva, ou seja, a pessoa raciocina de forma normal, mas não tem como externar o que pensa.

Mesmo em casos tão extremos como os recém citados, possibilitar que tais pessoas comuniquem-se e exerçam autonomia em tarefas como, por exemplo, movimentar-se dentro de suas residências, é perfeitamente plausível. É acreditando nisso que se propõe, nesta pesquisa, um sistema composto por uma cadeira de rodas especial para servir de dispositivo de apoio a todas aquelas pessoas que possuam nível 4 de deficiência motora.

Uma cadeira de rodas especial consiste em um veículo móvel que possui algo além do observado em cadeiras de rodas atualmente disponíveis no mercado. Ela deve, primeiramente, ser capaz de compreender as vontades da pessoa com deficiência e suprir tal deficiência, permitindo que tal pessoa alcance seus objetivos de locomoção.

A segurança da pessoa com deficiência é outra questão de extrema importância. É visível que as pessoas com nível 4 de deficiência motora possuem grandes limitações, de modo que toda a responsabilidade em se evitar situações de risco deve ser transferida ao sistema (ou dispositivo) que se propõe para suprir suas necessidades de locomoção (no caso, a cadeira de rodas especial). Este fato permite concluir que a cadeira de rodas deve possuir uma inteligência tal que a torne autônoma. Isto é, a pessoa com deficiência motora dita à cadeira de rodas a tarefa a ser executada (alcançar um determinado local), e o veículo, a partir de então, toma as decisões necessárias para o cumprimento de tal tarefa. Devido à natureza autônoma das cadeiras de rodas especiais, estas serão, a partir de então, chamadas de *Cadeiras de Rodas Robóticas*.

Por fim, vale ressaltar o problema de obtenção de um sistema de melhor custo-benefício. Trata-se de um problema implícito em todo desenvolvimento tecnológico, mas que ganha uma maior importância aqui pelo fato de o sistema ser um dispositivo que deve atender a pessoas com poder aquisitivo diverso.

1.2 Objetivo

Assim, o objetivo desta tese é o de *desenvolver um sistema de navegação para cadeiras de rodas robóticas que proporcione a tais veículos móveis a autonomia necessária para que sejam suportes motores adequados a pessoas com deficiência motora em nível 4*.

Cadeiras de rodas robóticas são veículos móveis tripulados, cuja massa do tripulante pode chegar a ser igual a duas vezes a sua própria massa. Isso significa dizer que o veículo possui uma carga considerável que pode variar dinamicamente tanto no tempo quanto no espaço. Logo, os controladores que compõem o sistema de navegação da cadeira de rodas robótica devem considerar não somente a dinâmica do sistema (veículo móvel mais

tripulante), como também tais características de variação. Daí a necessidade de se buscar uma representação matemática do comportamento dinâmico do veículo móvel tripulado, a qual permita o desenvolvimento de controladores que se adaptem às possíveis variações e que sejam estáveis sob quaisquer circunstâncias.

Por outro lado, por melhor que seja o modelo matemático de representação do comportamento dinâmico do sistema, ele raramente descreverá fielmente tal comportamento, seja devido à não observação de alguma característica dinâmica, ou por simplificações matemáticas, ou pela não consideração de algum efeito dinâmico conhecido em troca de modelos mais simples e que sejam de mais fácil implementação computacional. Assim, os controladores que constituem o sistema de navegação da cadeira de rodas robótica devem, ainda, ser robustos com relação a tais imprecisões, as quais são vistas pelo sistema como sendo distúrbios, responsáveis por degradarem o seu comportamento a ponto de poderem, até mesmo, torná-lo instável.

1.3 **Trabalhos Prévios**

Apresenta-se nesta seção um sistema o qual pode ser visto como sendo uma base para solução dos problemas definidos na Seção 1.1. O sistema é composto, basicamente, por uma Cadeira de Rodas Robótica (CRR), introduzida na Subseção 1.3.1, e uma Interface Homem-Máquina (IHM) que permite ao usuário ditar comandos, conforme mostrado sucintamente na Subseção 1.3.2. Tais desenvolvimentos fazem parte de uma série de trabalhos prévios devidamente referenciados, os quais deram o suporte necessário para que se pudesse alcançar o objetivo almejado nesta tese (Seção 1.2), permitindo, finalmente, que pessoas com deficiência motora severa possam deslocar-se em ambientes conhecidos sem ajuda de terceiros.

1.3.1 **Cadeira de Rodas Robótica**

Uma cadeira de rodas elétrica *Freedom S* foi adquirida com o intuito de torná-la um veículo móvel autônomo para assistência a pessoas com deficiência motora severa. Para isso, foi agregado hardware para sensoriamento e acionamento do veículo, para comunicação entre usuário e sistema, e para processamento de informações, como mostra a Fig. 1. O hardware embarcado consiste de codificadores ópticos (um para cada roda de tração) para medição de postura e velocidades linear e angular relativas da CRR, sensores de ultrassom e/ou sensor laser para detecção de obstáculos, sensores magnéticos para

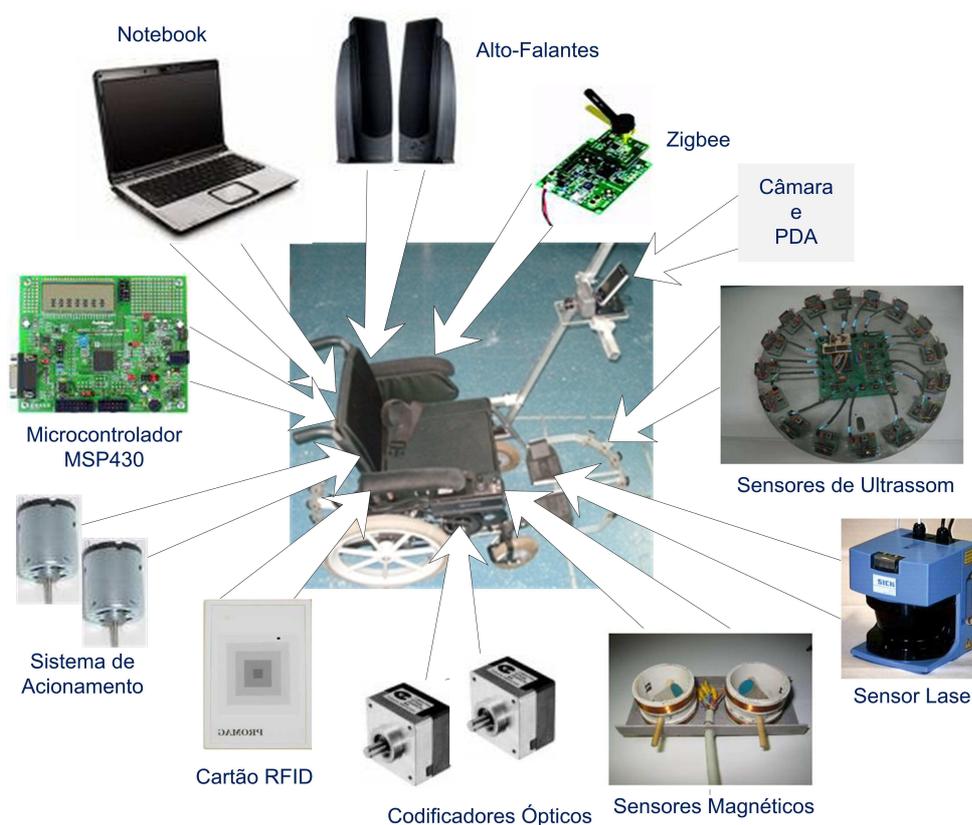


Figura 1: Hardware adicional embarcado na cadeira de rodas elétrica.

detecção de trilhas metálicas adequadamente fixadas no ambiente de navegação, como mostrado em (GUIMARÃES, 2008), e sensor de RFID (do inglês *Radio-Frequency IDentification*), que permite ao sistema saber quando ocorre uma transição entre um e outro ambiente (GUIMARÃES, 2008), além do sistema de acionamento dos motores CC, especialmente desenvolvido em (FILGUEIRA, 2005) para esta aplicação. Além disso, existem duas unidades de processamento, uma baseada no microcontrolador *MSP430*, para processamento de baixo nível (FILGUEIRA, 2005), e um *notebook* para processamento de alto nível. A cadeira de rodas conta ainda com uma câmara, cujo objetivo é servir a IHMs baseadas em visão, tais como aquela apresentada em (CAVALIERI, 2007), um PDA contendo uma interface gráfica que exibe comandos e permite uma realimentação audiovisual (SILVA, 2007), dois alto-falantes para amplificação do sinal de áudio enviado pelo PDA (permitindo uma melhor realimentação auditiva em ambientes com muito ruído sonoro), e, por fim, um módulo de comunicação via rádio, baseada na tecnologia *Zigbee*, para troca de informações entre o sistema embarcado na CRR e dispositivos remotos, quando for o caso. A Fig. 2 ilustra o sistema devidamente montado, dando destaque a alguns dos dispositivos agregados à CRR.

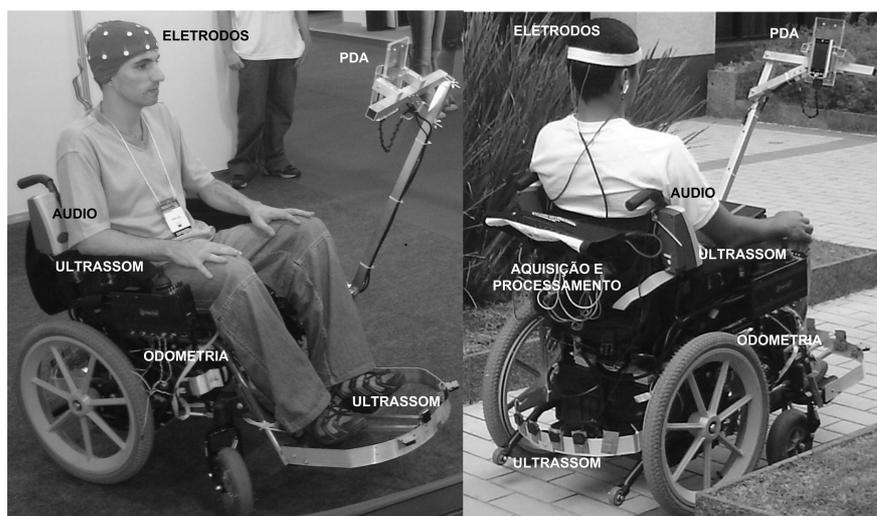


Figura 2: Cadeira de rodas para assistência a pessoas com deficiência motora severa.

É importante comentar que a escolha de ambas as unidades de processamento seguiu critérios bem definidos. No caso da Unidade de Processamento de Baixo Nível (UPBN), optou-se pelo microcontrolador *MSP430* devido ao fato de ele ser capaz de executar tarefas em tempo real¹ (o *MSP430* suporta o *kernel* de tempo real conhecido como *μC/OS II*), o que é fundamental em sistemas que envolvem múltiplos processos. Por outro lado, a escolha da Unidade de Processamento de Alto Nível (UPAN) teve como critério principal a praticidade proporcionada por um computador portátil (*notebook*) durante os experimentos envolvendo a CRR, uma vez que vários periféricos (monitor, disco rígido, portas de transmissão e recepção de dados, etc.) necessários para o acompanhamento de tais experimentos já estão convenientemente embutidos.

A Fig. 3 mostra como o hardware adicionado à cadeira de rodas se conecta. Observa-se que cada unidade de processamento consiste em um nó, onde se conectam as peças de hardware que são elementos de entrada e/ou saída do sistema. Assim, enquanto que a UPBN (microcontrolador *MSP430*) é responsável por tratar as informações vindas dos sensores embarcados na cadeira de rodas e de enviar os sinais para acionamento adequado do veículo móvel (FILGUEIRA, 2005), a UPAN (*notebook*) se responsabiliza por enviar/receber informações do usuário através dos dispositivos que compõem a IHM (CAVALIERI, 2007; FERREIRA et al., 2007). Além disso, a UPAN tem a possibilidade de comunicar-se com unidades remotas via conexão de rádio existente.

Por fim, pode-se ver na Fig. 3 que existe ainda uma conexão bilateral entre UPAN e UPBN. Tal conexão permite a comunicação entre as duas camadas de processamento, e,

¹A execução em tempo real não é tratada nesta tese.



Figura 3: Diagrama de conexão entre as peças de hardware da cadeira de rodas.

por consequência, o desenvolvimento do *Sistema de Navegação* (ponto central desta tese, mostrado em detalhes no Capítulo 2), o qual se processa na UPAN, contando tanto com as informações de usuário quanto com as informações sensoriais.

1.3.2 Interface Homem-Máquina

A Fig. 4 apresenta o diagrama de blocos do sistema para assistência a pessoas com deficiência motora em nível 4. Observa-se que o sistema subdivide-se em Interface Homem-Máquina (IHM) e dispositivo comandado (a CRR). A IHM é a responsável por permitir que pessoas com deficiência motora severa possam comandar a CRR. No lado esquerdo do bloco referente à IHM destaca-se, portanto, a pessoa com deficiência motora. A interação entre o comandante (a pessoa com deficiência motora) e o comandado (a CRR) só é possível devido à presença de uma realimentação audiovisual (representada também na parte esquerda do bloco correspondente à IHM). Deste modo, faz-se necessário que a pessoa com deficiência motora possua uma certa capacidade auditiva e visual, possibilitando, assim, a chamada realimentação biológica (SILVA, 2007).

Os sinais biomédicos gerados pelo usuário são capturados a partir de eletrodos adequadamente posicionados (de forma não-invasiva) no corpo da pessoa (no caso de captura de sinais cerebrais, há a possibilidade de se utilizar uma touca específica, cujos eletrodos são dispostos conforme o padrão 10-20, como mostrado na Fig. 4 à esquerda). A seguir, como pode ser observado no diagrama de blocos da Fig. 4, os sinais capturados são tratados por um hardware dedicado, responsável por filtrar, amplificar e realizar a conversão Analógica/Digital (A/D). Uma vez digitalizados, os sinais biomédicos são enviados para uma unidade de processamento que contém um software que os preprocessa (filtragem

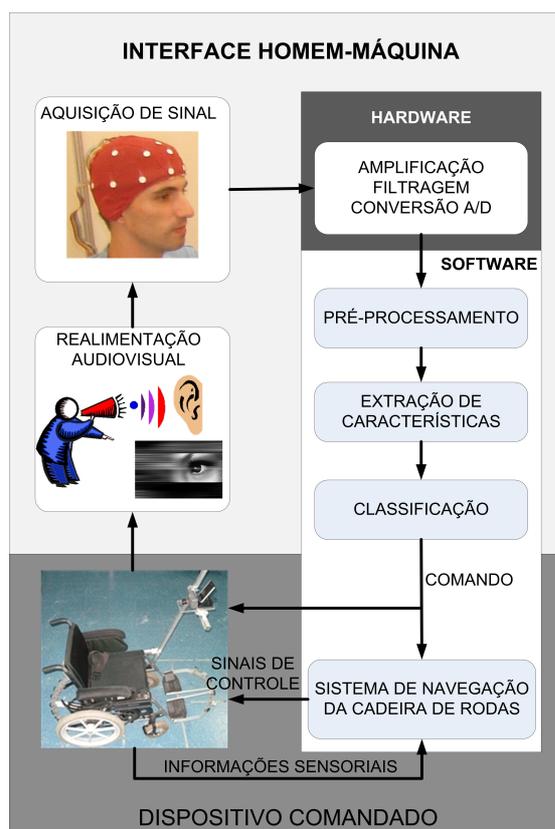


Figura 4: Diagrama de blocos do sistema para assistência a pessoas com deficiência motora em nível 4.

digital e armazenamento), e extrai deles características que são relevantes para o processo de classificação. A classificação (o último estágio da IHM) consiste em verificar se os sinais adquiridos representam ou não um comando de usuário. Detalhes sobre todos os estágios da IHM são mostrados em (FERREIRA, 2008).

Os comandos de usuário gerados pelo classificador podem ser do tipo direto ou indireto. Conforme ilustrado na Fig. 4, os comandos diretos não acionam o *Sistema de Navegação da Cadeira de Rodas*. É o caso daqueles exibidos na Fig. 5, cujos detalhes podem ser encontrados em (SILVA, 2007). Por outro lado, os comandos indiretos são aqueles que provocam o acionamento do *Sistema de Navegação da Cadeira de Rodas*. Tal sistema gera, então, sinais de controle que são enviados para a CRR. Enquanto isso, informações sensoriais provenientes da CRR realimentam o sistema de navegação, criando, assim, uma malha de controle de alto nível (detalhes são apresentados nos capítulos seguintes).

Os comandos indiretos podem também ser vistos como comandos de alto nível, comparados aos comandos diretos para navegação guiada. Isto porque o *Sistema de Navegação da Cadeira de Rodas* gera, a partir de um único comando indireto, uma série de ações

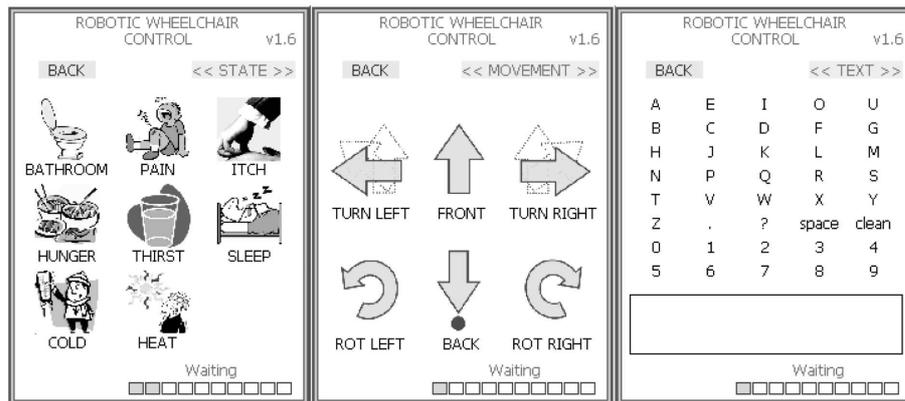


Figura 5: Comandos diretos para interação com pessoas (à esquerda), para navegação guiada (centro) e escrita de texto (à direita).



Figura 6: Comandos para navegação autônoma.

que substituem a necessidade de geração, por parte do usuário, de um conjunto de comandos diretos para desempenhar uma mesma tarefa de navegação da CRR. A Fig. 6 apresenta algumas opções de comandos de alto nível, que também podem ser chamados de comandos para navegação autônoma.

1.4 Trabalhos Relacionados

São apontados, nesta seção, alguns dos trabalhos relacionados com esta tese. Trata-se de um levantamento do estado da arte envolvendo pesquisas relativas a cadeiras de rodas robóticas e robótica móvel em geral. De fato, cadeiras de rodas robóticas são robôs móveis muito particulares. A particularidade está no fato de tais veículos serem tripulados, o que implica em problemas de dinâmica variante, bem como problemas de interatividade homem-máquina, de segurança, de autonomia do sistema, etc.

A idéia de fazer de uma cadeira de rodas elétrica um robô móvel para assistência a pessoas com deficiência motora tem sido explorada em trabalhos tais como o apresentado em (BECKER, 2000), onde foram investigados aspectos ergonômicos e biomecânicos, seguido de análise de estabilidade mecânica de diferentes configurações de cadeira de rodas. O autor realiza um estudo interessante sobre sistemas de acionamento, considerando pistas planas e inclinadas, e defende o ponto de vista de Bourhis e Pino (1996), de que o usuário de uma cadeira de rodas deve ter o direito de poder escolher o nível de interação (classificado naquele trabalho como sendo alto, médio e baixo) que deseja estabelecer com a CRR. Becker (2000) propõe ainda a utilização de mapas métricos (baseados em características físicas do ambiente) em vez de mapas topológicos (que representam o ambiente através de grafos, sendo que os nós são associados a pontos específicos do ambiente e os arcos à existência de um trajeto entre dois nós), após avaliação dos prós e contras de cada abordagem. O autor propõe também um sistema de navegação que contém comportamentos de controle de postura e de desvio de obstáculos. Ambos os comportamentos são baseados em lógica *fuzzy*, proporcionando, de acordo com o autor, grande robustez na presença de incertezas de medição. São apresentados diversos resultados de simulação, considerando várias técnicas de desvio de obstáculos presentes na literatura.

O método *Velocity Obstacle* foi anteriormente utilizado por Prassler, Scholz e Fiorini (1999) para navegação de uma cadeira de rodas autônoma em uma estação ferroviária movimentada. Embora tenha sido comprovada a eficiência de tal sistema de desvio de obstáculos, vale ressaltar que o método é altamente dependente de uma boa estimativa do movimento de cada obstáculo detectado, o que requer sensores de alto desempenho (tais como sensores laser e/ou sistema de visão artificial) que, em geral, possuem custo financeiro e/ou computacional considerável. Tais resultados são parte do projeto *MAid* (*Mobility Aid*) (PRASSLER; SCHOLZ; STROBEL, 1999), cujo objetivo central é permitir a mobilidade de pessoas com deficiência motora em ambientes públicos.

A interação entre usuário e CRR é a proposta apresentada por Rao et al. (2002) em seu projeto denominado *SmartChair*. Logo, o grande foco daquele projeto foi o desenvolvimento de uma interface visual que permitisse tal interação de uma forma direta. Tal possibilidade foi utilizada por Grassi (2006) em sua tese de doutorado, cuja proposta central era a de desenvolver um sistema híbrido, isto é, um sistema capaz de combinar modos distintos de navegação (deliberativo e reativo), além de comandos de movimento originados a partir de fontes variadas, tais como as provenientes do controlador deliberativo (responsável por levar o veículo ao objetivo desejado de forma autônoma), do controlador reativo (responsável por evitar obstáculos) e do próprio usuário, o qual conta com um *joystick* para comando e é auxiliado pela informação visual omnidirecional projetada em uma superfície plana à sua frente. Dessa forma, o sistema de controle proposto naquele trabalho permite a operação nos modos manual, autônomo ou semiautônomo (controle compartilhado), cabendo ao usuário a escolha do nível de interação desejado.

Grassi (2006) parte do princípio de que o mapa métrico do ambiente é conhecido e, além disso, considera uma dilatação dos objetos de tal ambiente (obstáculos em potencial à navegação da cadeira de rodas) na mesma proporção em que contrai a CRR até que ela se torne um ponto dentro do ambiente. Tal estratégia tem como objetivo principal diminuir o custo computacional necessário para se encontrar rotas de navegação livres de obstáculos. Por fim, o autor utiliza o método conhecido como *wave-front* para geração dinâmica do caminho de referência livre de obstáculos que conduz a CRR ao alvo através de uma rota mais curta. Entretanto, o próprio autor introduz uma importante desvantagem do método, que é o fato de ele poder apresentar uma grande complexidade computacional.

Em mais uma tese de doutorado, Yanco (2000) apresenta um outro projeto de CRR, denominado *Wheelesley*. A particularidade desse projeto está no fato de a CRR ser capaz de navegar em ambientes internos (*indoor*) e externos (*outdoor*), e de forma semi-autônoma. *Wheelesley* conta com algoritmos de navegação distintos para cada tipo de ambiente, os quais são chaveados automaticamente (mediante sinal de chaveamento enviado por um detector *indoor/outdoor*) quando o veículo móvel alterna entre um e outro tipo de ambiente. A idéia central é permitir que o usuário da cadeira de rodas possa ajudar o sistema quando ele não for capaz de interpretar uma determinada situação. O veículo autônomo conta com um sistema de visão estéreo (para navegação *outdoor*), e sensores de ultrassom e laser (para navegação *indoor*). As informações fornecidas por tais sensores são imprescindíveis para o funcionamento do sistema, uma vez que tanto o algoritmo para navegação *indoor* quanto o para navegação *outdoor* baseiam-se no método de navegação reativa, cuja grande vantagem é a eliminação de qualquer necessidade de

conhecimento *a priori* do ambiente de navegação. O sistema conta ainda com uma interface de usuário baseada em *joystick*, a qual permite a entrada de comandos tais como, *seguir em frente, girar à direita, girar à esquerda, parar, diminuir velocidade, e aumentar velocidade*. O sistema *Wheelesley* trabalha claramente no sentido de facilitar a mobilidade de pessoas com deficiência motora. Porém, a interface de usuário disponível não se adequa a pessoas com deficiência motora severa. Vale ressaltar ainda que o método de navegação puramente reativo pode provocar um consumo elevado de energia, pelo fato de não ser objetivo. Além disso, o método aumenta consideravelmente o risco de colisão, devido a uma forte dependência do sistema sensorial, o qual é impreciso e susceptível a falhas.

Dentre todos os trabalhos relacionados a CRRs, os quais pode-se verificar na literatura, cita-se o projeto *SIAMO (Integral System for Assisted Mobility)*, apresentado em (MAZO et al., 2002), como sendo o mais completo até então. Em tal projeto, os autores apresentam soluções que envolvem uma arquitetura flexível e modular de cadeira de rodas, bem como diversas interfaces de usuário que permitem a pessoas com distintos níveis de deficiência motora severa interagirem com o veículo autônomo, além de proporem soluções para o problema de posicionamento absoluto de veículos móveis, e de tratarem o problema de segurança do usuário com grande seriedade, a ponto de considerarem um sistema redundante a nível de hardware e de software. Entretanto, os próprios autores revelam que as soluções encontradas até o momento não resolvem completamente os vários problemas tratados, carecendo, ainda, de muito esforço de pesquisa.

NavChair é mais um projeto de cadeiras de rodas inteligente que tem como objetivo permitir a pessoas com deficiência motora que se veem incapazes ou apresentam uma imensa dificuldade de conduzir uma cadeira de rodas elétrica convencional. Embora os objetivos do projeto, apresentado em (LEVINE et al., 1999), sejam audaciosos, não se observa na literatura os resultados prometidos pelos autores. Entretanto, eles apresentaram uma estrutura básica que conta com três modos de operação, a saber: transpor portas, desviar de obstáculos e aproximação (de mesas, paredes, pessoas, etc.). Tais modos de operação contam com um algoritmo de desvio de obstáculos baseado em *Minimal Vector Field Histogram (MVFH)*, o qual consiste de uma variação do método *Vector Field Histogram (VFH)* proposto em (BORENSTEIN; KOREN, 1991). Além disso, Levine et al. (1999) desenvolveram uma forma de identificação automática do modo de operação necessário para realização de uma determinada tarefa, à qual deram o nome de *Stimulus Response Modeling (SRM)*. De acordo com os autores, SRM é uma alternativa à escolha manual do modo de operação feita pelo usuário, o que o coloca como um mecanismo crucial do *NavChair*, tendo em vista que grande parte dos usuários em potencial do sistema são

incapazes (devido à sua condição física) de ativar o modo correto no tempo requerido.

A preocupação com relação à autonomia e à segurança de sistemas envolvendo CRRs é o ponto central do trabalho apresentado em (FIORETTI; LEO; LONGHI, 2000). Aliás, vale ressaltar que a questão da eficiência energética em robótica móvel é pouco tratada na literatura, embora seja de fundamental importância na obtenção de sistemas práticos, uma vez que robôs móveis são normalmente alimentados via bateria.

Cadeiras de rodas robóticas introduzem questões importantes envolvendo o comportamento dinâmico (DING; COOPER, 2005). Isto porque tais veículos são utilizados para transportar pessoas, as quais representam uma carga pesada e móvel. Para se ter uma ideia, o usuário pode até mesmo triplicar a massa nominal de uma CRR. Logo, é evidente a grande influência do indivíduo a bordo do veículo, contribuindo para o surgimento tanto de incertezas modeláveis quanto não modeláveis. Ainda assim, são poucos os trabalhos envolvendo CRRs que tratam desse importante problema (os projetos previamente mencionados, relativos aos grupos de pesquisa mais avançados na questão de CRRs, não contemplam o problema de controle dinâmico). Por outro lado, a literatura envolvendo robótica móvel em geral (robôs terrestres, aéreos e aquáticos) apresenta algumas soluções ao problema de dinâmica incerta e variante no tempo (PATRE et al., 2008; JORDAN; BUSTAMANTE, 2008; DO; JIANG; PAN, 2004). Técnicas de controle não-linear (ISIDORI, 1989) bem consolidadas são normalmente aplicadas em tais soluções, mas invariavelmente se percebe também a aplicação de técnicas recentes, tais como, por exemplo, o integrador de *backstepping* (FIERRO; LEWIS, 1997; TANNER; KYRIAKOPOULOS, 2003), as quais são, normalmente, aplicáveis a classes específicas de sistemas dinâmicos não-lineares (*backstepping*, por exemplo, é aplicável a sistemas formados de subsistemas que se irradiam).

1.5 Contribuições

A busca por soluções que aumentem a autonomia, em seu dia-a-dia, de pessoas com nível 4 de deficiência motora (veja a Tabela 2) direcionou esta tese ao desenvolvimento de um sistema de navegação para cadeiras de rodas robóticas, de modo a permitir que tais veículos possam operar autonomamente em ambientes conhecidos semiestruturados. Por se tratar de uma questão relativamente recente envolvendo robótica móvel como tecnologia assistiva, e pelo fato de CRRs adicionarem características particulares tanto em termos de controle quanto de comportamento, é possível, então, destacar uma série de contribuições, as quais são listadas a seguir:

- proposição de um *Modelo Dinâmico Parametrizado* que contempla o comportamento dinâmico do sistema composto por CRR e usuário;
- projeto de um sistema de compensação dinâmica adaptativa e robusta de uma CRR;
- modificação de um algoritmo de controle para seguimento de caminho, tornando-o um gerador de sinais de comando limitados, de modo a proteger o sistema contra erros elevados de controle, capazes de saturar o sistema e até mesmo instabilizá-lo;
- projeto, análise e implementação de sistema de controle formado por controladores cinemáticos comutáveis, com compensação dinâmica adaptativa robusta incluída;
- proposta e implementação de um algoritmo de geração de caminho com baixo risco de colisão para conexão entre dois pontos distintos de um ambiente conhecido;
- proposta e implementação de estratégia para retorno a um caminho de referência após desvio de obstáculos usando o método de desvio tangencial (FERREIRA, 2004);
- proposta e implementação de um sistema supervisorio para gerenciamento estável dos vários módulos que compõem o sistema de navegação.

1.6 Estrutura da Tese

Esta tese está estruturada como segue: o Capítulo 2 é dedicado à apresentação do sistema de navegação proposto, onde os efeitos dinâmicos são desprezados. Em seguida, considera-se a dinâmica de cadeiras de rodas robóticas, no Capítulo 3, onde um modelo dinâmico para CRR é apresentado e uma compensação dinâmica adaptativa robusta é projetada e analisada em detalhes. Resultados de simulações e experimentações em um protótipo de CRR são apresentados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são feitas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

2 *Sistema de Navegação*

“O melhor uso da vida consiste em gastá-la por alguma coisa que dure mais que a própria vida.”

William James.

Este capítulo é dedicado à apresentação do sistema responsável por permitir a navegação de cadeiras de rodas robóticas em ambientes conhecidos. A Fig. 7 ilustra tal sistema através de um diagrama de blocos, do qual destaca-se o sistema de controle que, por sua vez, subdivide-se em um bloco baseado na cinemática e outro baseado na dinâmica de CRRs, sendo que o primeiro é apresentado em detalhes neste capítulo, enquanto que o sistema de controle dinâmico é tratado no Capítulo 3. Observa-se ainda no diagrama de blocos que o sistema de controle cinemático é composto por controladores responsáveis por realizar tarefas de *Seguimento de Caminho* (Seção 2.1), de *Orientação* (Seção 2.3), de *Desvio de Obstáculos* (Seção 2.4) e de *Retorno* (Seção 2.5) a um caminho de referência. Além disso, pode-se perceber que cada controlador cinemático está associado a uma referência específica gerada pelo *Planejador e Gerador de Referências* (Seção 2.2), que se utiliza de informações do ambiente de navegação, do estado corrente da CRR (postura e velocidades relativas), e de comandos de usuário para planejar e gerar objetivos de controle com baixo risco de colisão. Por fim, existe ainda um sistema *Supervisório* (Seção 2.6) responsável por comutar adequadamente os controladores cinemáticos, a fim de que se cumpra, de forma estável, a tarefa de navegação solicitada pelo usuário.

2.1 O Problema de Seguimento de Caminho

São apresentadas na literatura duas abordagens distintas para o problema de seguimento de caminho: uma mais clássica, tratada em (WIT; SICILIANO; BASTIN, 1997) e outra mais recente, apresentada em (SOETANTO; LAPIERRE; PASCOAL, 2003).

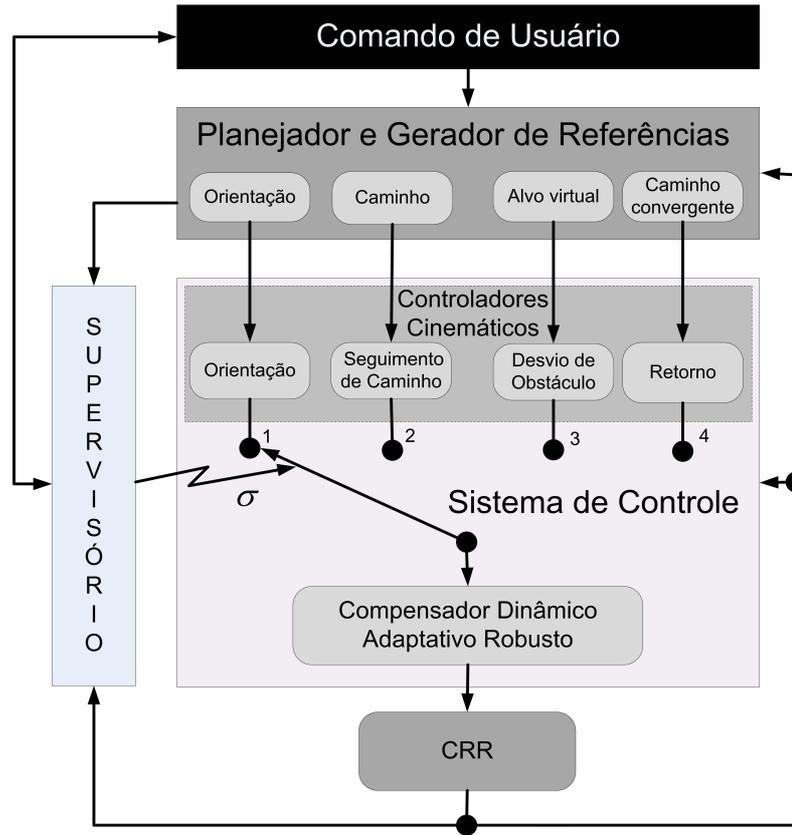


Figura 7: Diagrama de blocos do sistema de navegação.

Da primeira abordagem (Fig. 8(a)), obtém-se o modelo da cinemática de movimento, dado por

$$\begin{cases} \dot{\rho} = v \sin \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} = \omega - \frac{c(s) v \cos \tilde{\psi}}{1 - c(s) \rho} \end{cases}, \quad (2.1)$$

onde v e ω são as velocidades linear e angular desenvolvidas pelo veículo móvel; $c(s)$ é a curvatura do caminho, sendo s a abscissa curvilínea do ponto P ; ρ e $\tilde{\psi}$ são as variáveis de estado do sistema, sendo ρ a menor distância entre os pontos Q (ponto central do eixo virtual que conecta as duas rodas de tração do robô) e P (a origem de $\{T\}$), e $\tilde{\psi}$ o erro de orientação, dado por

$$\tilde{\psi} = \psi_d - \psi, \quad (2.2)$$

onde ψ e ψ_d são orientações do veículo móvel e da reta que tangencia Γ no ponto mais próximo ao robô (ou seja, em P), respectivamente.

A variável de controle do sistema é dada por

$$\omega_{ref}^c = u(\rho, \tilde{\psi}), \quad (2.3)$$

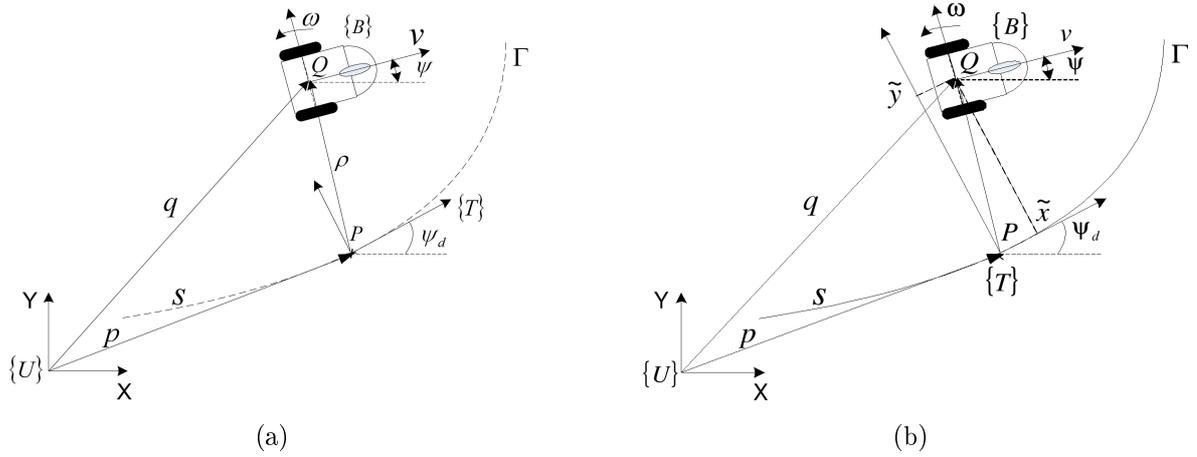


Figura 8: Cinemática de movimento para seguimento de caminho.

onde ω_{ref}^c é a velocidade angular de referência e

$$u = -k_1 v \rho \frac{\text{sen} \tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} - k(v) \tilde{\psi} \quad (2.4)$$

é a lei de controle não linear definida em (WIT; SICILIANO; BASTIN, 1997) que estabiliza assintoticamente o sistema, sendo k_1 uma constante positiva e $k(v)$ uma função contínua estritamente positiva quando $v \neq 0$.

Nota 2.1. Vale ressaltar que o problema de seguimento de caminho consiste em controlar a orientação do veículo (a partir de ω_{ref}^c), enquanto que a velocidade linear de referência, v_{ref}^c , é mantida distinta de zero (WIT; SICILIANO; BASTIN, 1997).

Nota 2.2. Pode ser observado em (2.1) que o sistema apresenta uma singularidade quando $1 - c(s) \rho = 0$, ou seja, quando $\rho = (1/c) = R_c$, onde, por definição, R_c é o raio do maior círculo possível que tangencia Γ exatamente em P .

Soetanto, Lapierre e Pascoal (2003) propõem uma abordagem ligeiramente diferente daquela anterior, como pode ser visto na Fig. 8(b). Daí, o modelo da cinemática de movimento torna-se

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = c(s) \tilde{y} \dot{s} - \dot{s} + v \cos \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{y}} = -c(s) \tilde{x} \dot{s} + v \text{sen} \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} = \omega - c(s) \dot{s} \end{cases}, \quad (2.5)$$

onde \tilde{x} , \tilde{y} e $\tilde{\psi}$ são as variáveis de estado do sistema, sendo \tilde{x} e \tilde{y} as coordenadas da distância entre Q e P (agora, um ponto arbitrário do caminho) projetada no sistema referencial $\{T\}$, e $\tilde{\psi}$ dado por (2.2).

Logo, percebe-se que, ao contrário do modelo dado em (2.1), nenhum tipo de singularidade é observado em (2.5). Assim, o modelo dado em (2.5) e as leis de controle propostas em (SOETANTO; LAPIERRE; PASCOAL, 2003) são utilizados neste trabalho para resolver o problema de seguimento de caminho.

Lema 2.1. (SOETANTO; LAPIERRE; PASCOAL, 2003): *Sejam o modelo da cinemática de movimento de um veículo móvel uniciclo dado em (2.5) e as suposições seguintes:*

Suposição 2.1. A velocidade linear $v(t)$ é tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) \neq 0;$$

Suposição 2.2. Existe uma função $\phi(\tilde{y}, v)$, tal que

$$\begin{cases} \phi(0, v) = 0 \\ \tilde{y}v \text{sen} \phi(\tilde{y}, v) \leq 0, \forall \tilde{y} e \forall v \neq 0 \end{cases} .$$

Então, as leis de controle

$$\begin{cases} \dot{s} = v \cos \tilde{\psi} + k_{\tilde{x}} \tilde{x} \\ \dot{\tilde{\psi}} = \dot{\phi} - \gamma \tilde{y} v \frac{\text{sen} \tilde{\psi} - \text{sen} \phi}{\tilde{\psi} - \phi} - k_{\tilde{\psi}} (\tilde{\psi} - \phi) \end{cases} \quad (2.6)$$

estabilizam assintoticamente o sistema, onde $v \neq 0$ e os ganhos $k_{\tilde{x}}$, $k_{\tilde{\psi}}$ e γ são constantes e positivos.

Prova. Seja a função candidata de Lyapunov

$$V_s(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{\psi}) = \frac{1}{2} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \frac{1}{2\gamma} (\tilde{\psi} - \phi)^2 \quad (2.7)$$

e sua primeira derivada no tempo

$$\dot{V}_s = \tilde{x} \dot{\tilde{x}} + \tilde{y} \dot{\tilde{y}} + \frac{1}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi) (\dot{\tilde{\psi}} - \dot{\phi}). \quad (2.8)$$

Então, substituindo $\dot{\tilde{x}}$ e $\dot{\tilde{y}}$ de (2.5) em (2.8), obtém-se

$$\dot{V}_s = \tilde{x} (-\dot{s} + v \cos \tilde{\psi}) + \tilde{y} v \text{sen} \tilde{\psi} + \frac{1}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi) (\dot{\tilde{\psi}} - \dot{\phi}),$$

o qual pode ser reescrito como

$$\dot{V}_s = \tilde{x} (-\dot{s} + v \cos \tilde{\psi}) + \tilde{y} v \text{sen} \phi + \frac{1}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi) \left(\dot{\tilde{\psi}} - \dot{\phi} + \gamma \tilde{y} v \frac{\text{sen} \tilde{\psi} - \text{sen} \phi}{\tilde{\psi} - \phi} \right). \quad (2.9)$$

Agora, substituindo as ações de controle dadas em (2.6) em (2.9), tem-se que

$$\dot{V}_s = -\tilde{x}^2 + \tilde{y}v\text{sen}\phi - \frac{k_{\tilde{\psi}}}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi)^2. \quad (2.10)$$

Ao considerar

$$\phi(\tilde{y}, v) = -\text{sign}(v) k_{\phi} \tanh(\tilde{y}), \quad k_{\phi} > 0 \quad (2.11)$$

(que torna a Suposição 2.2 verdadeira), conclui-se, finalmente, que $\dot{V}_s < 0, \forall \tilde{x} \neq 0, \tilde{y} \neq 0$ e $\tilde{\psi} \neq 0$, o que significa dizer que o sistema é assintoticamente estável (ver Apêndice A). \square

Logo, do Lema 2.1, tem-se que

$$\begin{cases} v_{ref}^c \neq 0 \\ \omega_{ref}^c = \dot{\tilde{\psi}} + c(s) \dot{s} \end{cases} \quad (2.12)$$

são os comandos de controle adequados para fazer com que um veículo móvel tipo uniciclo siga um caminho de referência, onde v_{ref}^c e ω_{ref}^c são as velocidades linear e angular de referência.

Algumas simulações foram realizadas para comprovação do Lema 2.1, onde considerou-se um caminho circular de referência, de raio igual a $1m$ e centrado na origem do sistema inercial. Os ganhos dos controladores foram ajustados para $k_{\tilde{x}} = 1, k_{\tilde{\psi}} = 5, \gamma = 3$ e $k_{\phi} = \pi/4$. A Fig. 9 mostra que o veículo móvel seguiu efetivamente o caminho de referência, com erros de controle (distância e orientação) tendendo a zero, como esperado. Entretanto, percebe-se na Fig. 10(a) que quando o robô parte de um ponto mais afastado do caminho de referência, a estabilidade garantida pelo Lema 2.1 não é mais verificada. A explicação encontrada nesta tese para essa divergência está no fato de que existem suposições implícitas em (SOETANTO; LAPIERRE; PASCOAL, 2003) as quais não concordam com condições gerais e reais de funcionamento. Tais suposições são:

Suposição 2.3. O veículo móvel nunca assumirá uma distância maior do que um limite preestabelecido, para o qual os ganhos são ajustados a fim de manter o sistema estável.

Suposição 2.4. O veículo móvel é capaz de responder rapidamente a qualquer sinal de excitação, sem que haja saturação dos atuadores.

Do ponto de vista prático, é razoável considerar a Suposição 2.3. Por outro lado, a Suposição 2.4 indica uma situação que foge da realidade. Quando nenhuma das duas

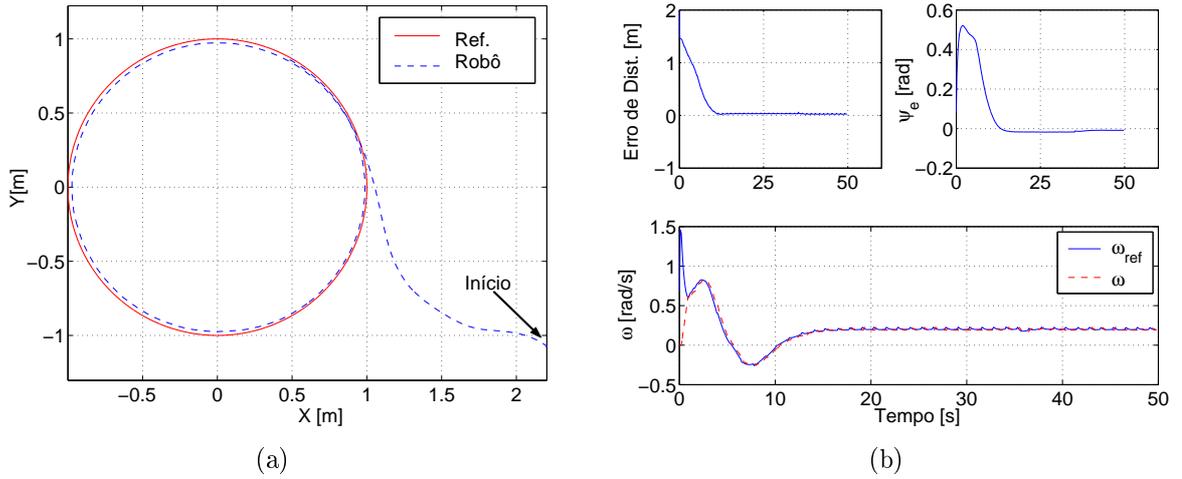


Figura 9: Simulação: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação (acima), e velocidades angulares de referência e de resposta (abaixo).

suposições são verdadeiras, o sistema pode tornar-se instável, tal como mostram os resultados da Fig. 10. Portanto, ao simular o veículo móvel partindo de uma distância muito maior do que aquela em que os ganhos dos controladores foram ajustados para manter o sistema estável (Suposição 2.3 violada), a variável de controle ω_{ref}^c assumiu valores muito elevados e com variações bruscas (veja na Fig. 10(b)), não alcançáveis pelo robô móvel (pois a Suposição 2.4 também é violada).

2.1.1 Limitação dos Sinais de Controle

O problema de instabilidade verificado anteriormente ocorre devido à não limitação em (2.6) das variáveis de estado \tilde{x} e \tilde{y} ($\tilde{\psi}$ é naturalmente limitada ao intervalo $[-\pi, \pi]$). O Lema a seguir apresenta uma solução para tal problema.

Lema 2.2. *Sejam o modelo da cinemática de movimento de um veículo móvel unicycle (2.5) e as Suposições 2.1 e 2.2. Então, as leis de controle*

$$\begin{cases} \dot{s} = v \cos \tilde{\psi} + \tilde{X}_{\max} \tanh \left(\frac{k_{\tilde{x}}}{\tilde{X}_{\max}} \tilde{x} \right) \\ \dot{\tilde{\psi}} = \dot{\phi} - \gamma \tilde{y} v \frac{\text{sen} \tilde{\psi} - \text{sen} \phi}{\tilde{\psi} - \phi} - k_{\tilde{\psi}} (\tilde{\psi} - \phi) \end{cases} \quad (2.13)$$

estabilizam assintoticamente o sistema, sendo $v \neq 0$, $\tilde{X}_{\max} \in \mathfrak{R}^+$ uma constante de saturação, $k_{\tilde{x}} \in \mathfrak{R}^+$ e $k_{\tilde{\psi}} \in \mathfrak{R}^+$ ganhos constantes, e

$$\gamma \equiv \frac{\Gamma_{\max}}{1 + |\tilde{y}|} \quad (2.14)$$

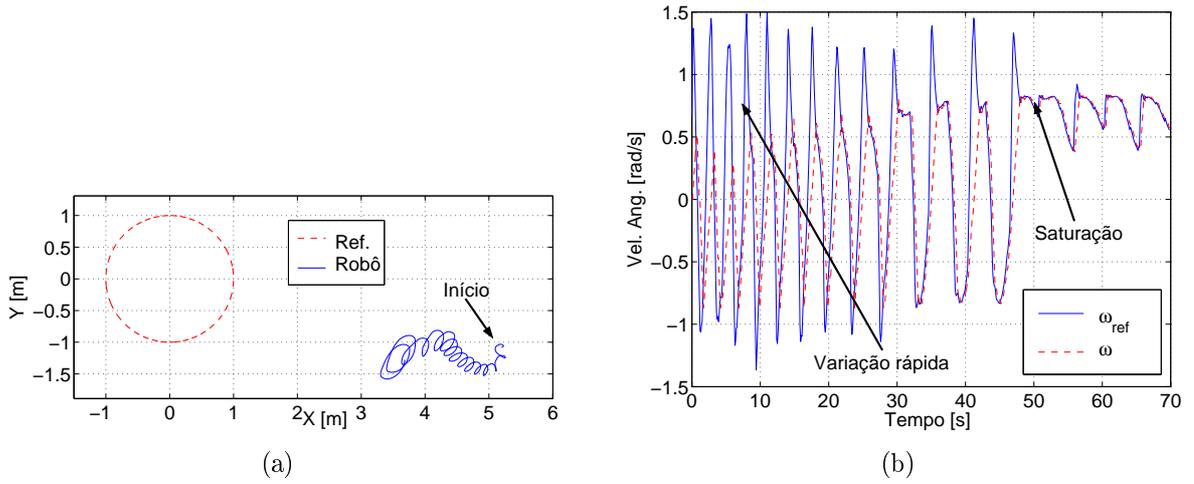


Figura 10: Simulação: a) Caminho seguido; b) Velocidades angulares de referência e de resposta.

um ganho variável estritamente positivo, sendo que $\Gamma_{\max} \in \mathfrak{R}^+$.

Nota 2.3. Observa-se que todos os termos das leis de controle em (2.13) são limitados, de modo que o comando de velocidade angular dado em (2.12) é também limitado.

Prova. Seja a função candidata de Lyapunov

$$V_s = \frac{1}{2} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \int_0^{(\tilde{\psi}-\phi)} \frac{1}{\gamma} \varsigma d\varsigma, \quad (2.15)$$

onde ς é uma variável independente. Então, substituindo $\dot{\tilde{x}}$ e $\dot{\tilde{y}}$, dados em (2.5), na primeira derivada temporal de (2.15), tem-se que

$$\dot{V}_s = \tilde{x} (-\dot{s} + v \cos \tilde{\psi}) + \tilde{y} v \sin \tilde{\psi} + \frac{1}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi) (\dot{\tilde{\psi}} - \dot{\phi}), \quad (2.16)$$

onde alguns termos foram simplificados.

Na sequência, reescreve-se (2.16) como

$$\dot{V}_s = \tilde{x} (-\dot{s} + v \cos \tilde{\psi}) + \tilde{y} v \sin \phi + \frac{1}{\gamma} (\tilde{\psi} - \phi) \left(\dot{\tilde{\psi}} - \dot{\phi} + \gamma \tilde{y} v \frac{\sin \tilde{\psi} - \sin \phi}{\tilde{\psi} - \phi} \right). \quad (2.17)$$

Considerando que somente velocidades lineares positivas são enviadas como referência à CRR, então (2.11) se resume a

$$\phi(\tilde{y}) = -k_\phi \tanh(\tilde{y}). \quad (2.18)$$

Pode-se perceber de (2.18) que $\exists \dot{\phi} \forall t$, de modo que as leis de controle dadas em

(2.13) são válidas para todo tempo.

Substituindo (2.13) em (2.17), obtém-se

$$\dot{V}_s = -\tilde{x}\tilde{X}_{\max}\tanh\left(\frac{k_{\tilde{x}}}{\tilde{X}_{\max}}\tilde{x}\right) + \tilde{y}v\text{sen}\phi - \frac{1}{\gamma}\left(\tilde{\psi} - \phi\right)^2,$$

a qual é negativa $\forall \tilde{x} \neq 0, \forall \tilde{y} \neq 0$ e $\forall \tilde{\psi} \neq 0$, concluindo, finalmente, que o sistema é assintoticamente estável. \square

Nota 2.4. Manobras de marcha-à-ré (velocidades lineares de referência negativas) em CRRs são indesejadas por fazerem com que a pessoa a bordo do veículo se sinta desconfortável e até mesmo insegura. Isto também exige um sensoriamento na parte traseira do veículo autônomo tão eficiente quanto aquele implementado na parte dianteira, a fim de manter a segurança do sistema durante a navegação, o que representa um aumento considerável no custo financeiro e computacional do sistema.

Simulações partindo com o veículo móvel cada vez mais distante do caminho de referência foram realizadas, considerando agora a lei estabilizante do Lema 2.2. Utilizou-se o mesmo caminho de referência e os mesmos valores de ganhos e constantes considerados nas simulações anteriores (para efeito de comparação de resultados). Além disso, ajustou-se $X_{\max} = 1$ e $\Gamma_{\max} = 3$ (constantes de saturação adicionadas ao sistema de controle). A Fig. 11 mostra um dos resultados de simulação, com o robô móvel inicialmente posicionado a aproximadamente $20m$ do caminho de referência (quatro vezes a distância que fez com que o controlador proposto por Soetanto, Lapierre e Pascoal (2003) se tornasse instável),

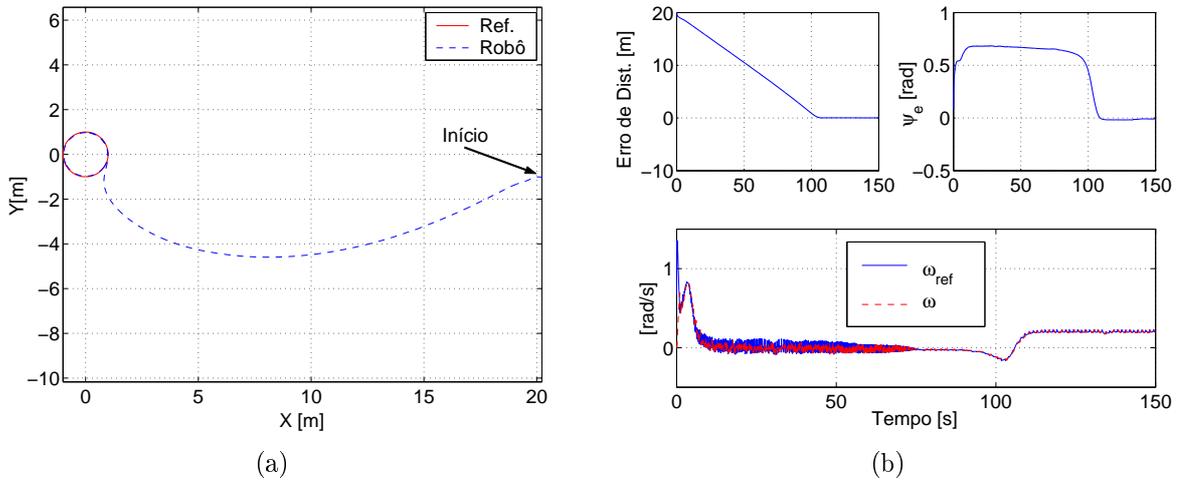


Figura 11: Simulação: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação, e velocidades angulares de referência e de resposta.

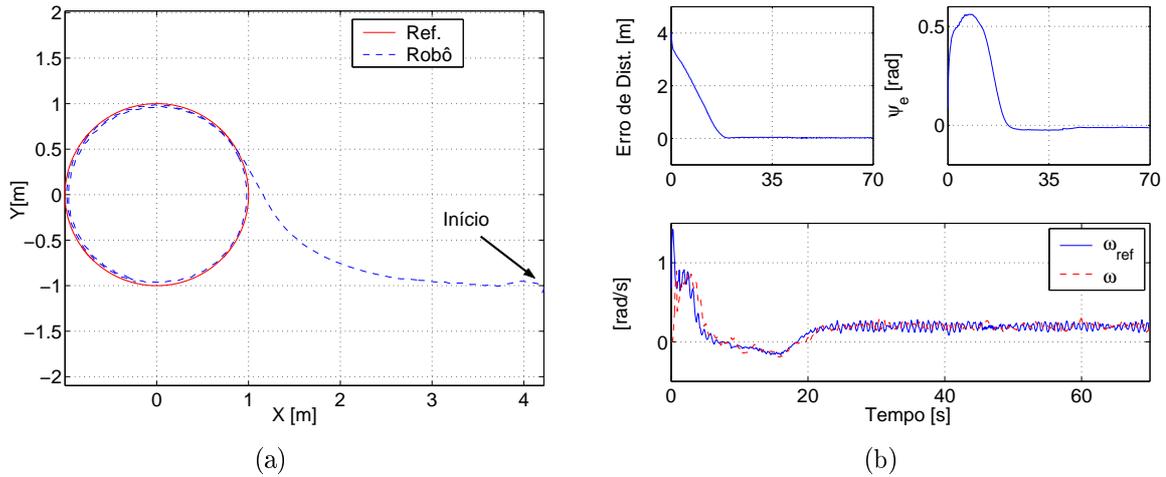


Figura 12: Experimento: a) Caminho seguido; b) Erros de distância e orientação, e velocidades angulares de referência e de resposta.

o que implica em erros iniciais de distância de aproximadamente $20m$. Como pode ser visto na figura, o veículo móvel, ainda assim, alcançou e seguiu com sucesso o caminho de referência, mostrando que as limitações introduzidas nas leis de estabilização surtiram o efeito desejado.

Experimentos foram realizados em uma CRR para completar o processo de validação. Mais uma vez, considerou-se o mesmo caminho de referência e os mesmos ajustes de ganhos e constantes do controlador. A Fig. 12 mostra que o veículo móvel foi capaz de alcançar e seguir o caminho de referência localizado inicialmente a aproximadamente $4m$ (maior distância testada devido a limitações de espaço físico).

2.1.2 Ajuste da Velocidade Linear

O Lema 2.2 introduzido na subseção anterior estabelece leis de controle limitadas, capazes de estabilizar um veículo móvel uniclo (em especial, uma CRR) durante o seguimento de um caminho de referência. Foi mostrado que tal estabilização é verificada se a Suposição 2.1, isto é $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) \neq 0$, é correta. Ao ajustar a velocidade linear de referência a valores positivos e não nulos, garante-se que tal suposição é atendida.

Um bom ajuste de velocidade linear pode trazer vantagens ao sistema tanto em termos de segurança quanto em termos de conforto para o usuário. Imagine, por exemplo, a sensação de desconforto de um indivíduo em seu automóvel quando este ataca uma curva relativamente fechada, com uma velocidade linear razoavelmente elevada. Além disso, dependendo da curva a ser efetuada e da velocidade linear desenvolvida, o motorista pode,

até mesmo, perder o controle do veículo. Para evitar tal situação, um bom motorista avalia a curvatura do caminho momentos antes de executar a manobra, ajustando a velocidade linear do veículo para um valor adequado para aquela situação, ou seja, uma velocidade que permita curvar com suavidade, sem correr o risco de perder o controle do automóvel. Uma ideia semelhante é aplicada aqui. Entretanto, em vez de avaliar a curvatura isoladamente, leva-se em consideração a velocidade angular a ser imposta ao veículo móvel, isto é ω_{ref}^c , a qual, conforme pode ser visto em (2.12), leva em conta não somente a curvatura de parte do caminho percorrido, dado por $c\dot{s}$, mas também a taxa de variação do erro de orientação, dado por $\dot{\psi}$. Assim, propõe-se

$$v_{ref}^c = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{\cosh(L_\omega \omega_{ref}^c)} + V_{\min}, \quad (2.19)$$

onde $V_{\max} \in \mathfrak{R}^+$ e $V_{\min} \in \mathfrak{R}^+$ são o máximo e o mínimo valor de velocidade linear admissíveis, e $L_\omega \in \mathfrak{R}^+$ é uma constante de calibração.

A Fig. 13(a) apresenta a velocidade linear ajustada em função de ω_{ref}^c , considerando diferentes valores para L_ω . Observa-se que somente velocidades lineares positivas são geradas. Além disso, $V_{\min} \leq v_{ref}^c \leq V_{\max} \forall \omega_{ref}^c \in [-\Omega_{sat}, \Omega_{sat}]$, sendo Ω_{sat} o valor absoluto da velocidade angular de saturação do veículo móvel.

Agora imagine uma outra situação prática: um motorista está conduzindo seu automóvel por uma rodovia, quando, de repente, ele avista um animal no meio da pista. Uma situação bastante comum e que de vez em quando tem proporcionado colisões graves. Isto porque, em muitos casos, o motorista não tem a prudência de diminuir a velocidade do veículo enquanto há tempo. Situação análoga pode acontecer com uma CRR. Na Seção 2.4 será tratado o caso em que existem obstáculos na rota de referência da cadeira de rodas. Como o veículo possui sensores capazes de determinar a distância ao obstáculo, d_{obst} , então é possível reduzir a velocidade linear da CRR à medida que ela se aproxima do obstáculo, de modo que quando o sistema de navegação entender que o obstáculo deve ser contornado (veja as Seções 2.4 e 2.6), o veículo estará numa velocidade compatível para a realização de tal manobra. Logo, propõe-se que

$$v_{ref}^c = (V_{\max} - V_{\min}) \tanh(L_{dist} d_{obst}) + V_{\min}, \quad (2.20)$$

onde $L_{dist} \in \mathfrak{R}^+$ é uma constante de calibração.

A Fig. 13(b) apresenta a velocidade linear ajustada em função da distância veículo-obstáculo, considerando diferentes valores para L_{dist} . Observa-se que somente velocidades positivas são geradas. Além disso, $V_{\min} \leq v_{ref}^c \leq V_{\max} \forall d_{obst} \in [d_{\min}, d_{\max}]$, sendo

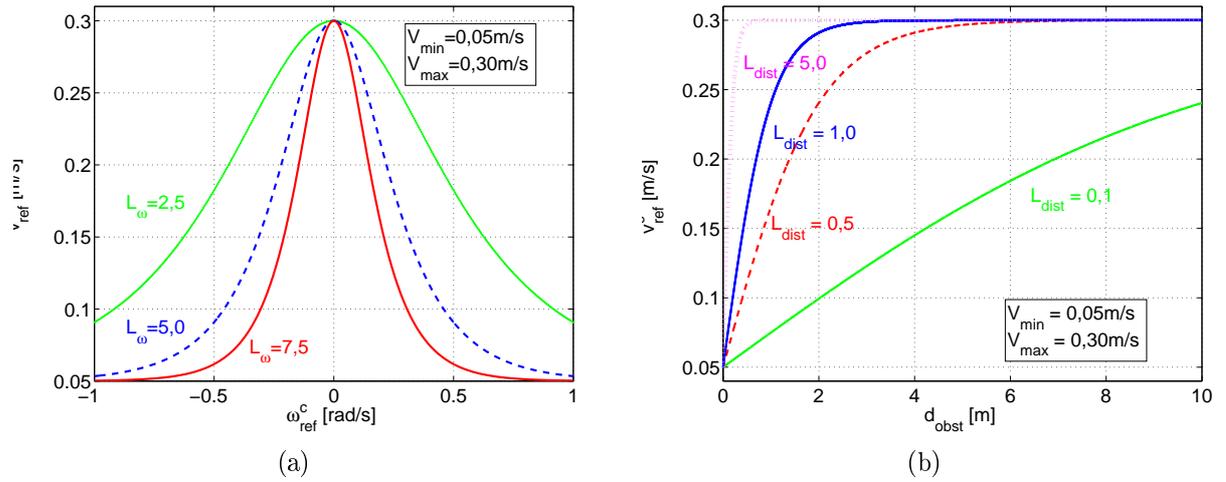


Figura 13: Ajuste da velocidade linear a) com base em ω_{ref}^c b) com base na distância veículo móvel-obstáculo.

$d_{\min} \in \mathfrak{R}^+$ a mínima distância de aproximação permitida e $d_{\max} \in \mathfrak{R}^+$ a maior distância em que o sensor é capaz de detectar o obstáculo com precisão.

Para combinar os ajustes proporcionados por (2.19) e (2.20), considera-se

$$v_{ref}^c = (V_{\max} - V_{\min}) \frac{\tanh(L_{dist}d_{obst})}{\cosh(L_{\omega}\omega_{ref}^c)} + V_{\min}, \quad (2.21)$$

cujo efeito pode ser visto na Fig. 14, para $L_{dist} = 1m^{-1}$, $L_{\omega} = 5s/rad$, $V_{\min} = 0,05m/s$, $V_{\max} = 0,3m/s$, $d_{\min} = 0m$, $d_{\max} = 10m$ e $\Omega_{sat} = 1rad/s$.

Nota 2.5. Define-se $d_{obst} \equiv \infty$ para caracterizar a ausência de obstáculo. Neste caso, $\tanh(L_{dist}d_{obst}) = 1$, ou seja, o ajuste de velocidade dependerá somente de ω_{ref}^c .

2.1.3 Deslocamento do Ponto de Controle

Os modelos da cinemática de movimento para seguimento de caminho apresentados até então consideram um caso muito particular onde o ponto de interesse (ou ponto de controle) é sempre o ponto médio do eixo imaginário que une as duas rodas de tração do veículo móvel (o ponto Q da Fig. 15). Deste modo, é apresentada a seguir uma formulação do problema, a qual dá origem a uma interessante flexibilidade no que diz respeito a tal ponto de interesse, possibilitando, assim, que no caso de um veículo com um braço robótico acoplado (ALQASEMI et al., 2007), por exemplo, seja possível a utilização de um ponto referente a tal braço (o ponto H da Fig. 15) como sendo o ponto a ser controlado.

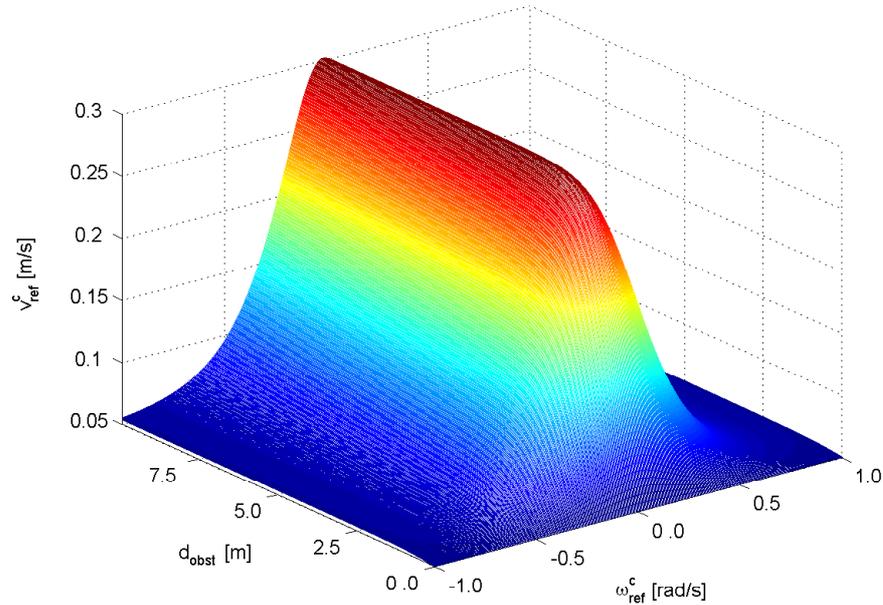


Figura 14: Ajuste da velocidade linear.

Tal formulação se baseia em algumas considerações (as quais podem ser mais bem entendidas observando a Fig. 16), a saber: o ponto H passa a ser o ponto médio da reta que une as rodas de tração de um robô virtual; uma haste rígida (também virtual) de comprimento a conecta o robô real ao robô virtual através dos pontos Q e H ; para manter o ângulo α constante (Fig. 16), considera-se que a haste rotaciona juntamente com o robô real (produzindo um arrasto no robô virtual), enquanto que a rotação do robô

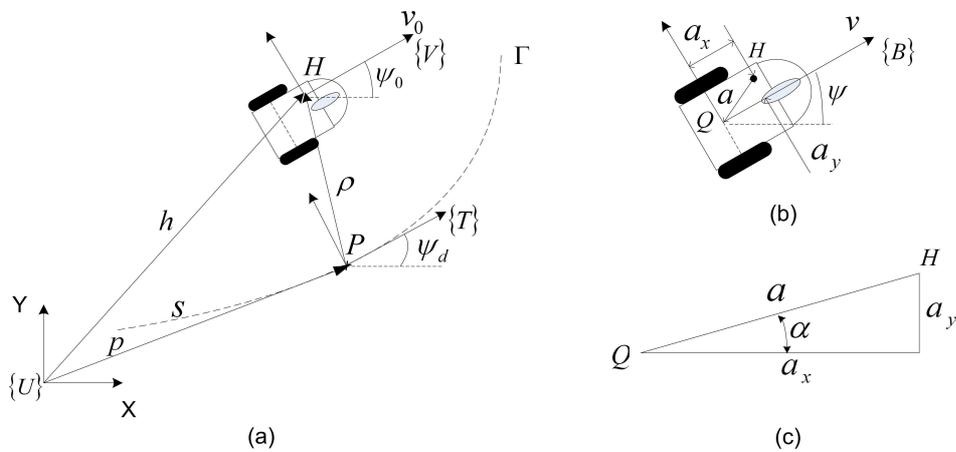


Figura 15: a) Ilustração do problema de seguimento de caminho com o ponto de interesse em uma posição qualquer do robô; b) Representação dos pontos Q e H do robô; c) Detalhamento da distância a entre os pontos Q e H do robô.

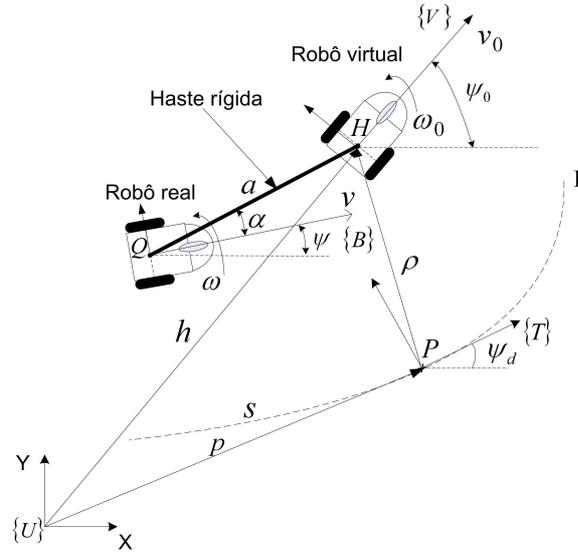


Figura 16: Ilustração do problema de seguimento de caminho com o ponto de interesse em uma posição qualquer do robô móvel: *trailer* entre os robôs real e virtual.

virtual não provoca qualquer alteração na orientação de tal haste. Trata-se, portanto, de uma configuração em forma de *trailer* (PARK et al., 2004), onde o movimento de um robô virtual influencia no movimento do robô real, isto é

$$\begin{cases} v_{ref}^c = v_{ref}^0 \cos(\psi_0 - \psi - \alpha) \cos \alpha \\ \omega_{ref}^c = \frac{v_{ref}^0}{a_x} \sin(\psi_0 - \psi) \end{cases}, \quad (2.22)$$

onde $\alpha = \arctan(a_y/a_x)$, ψ_0 é a orientação do robô virtual e v_{ref}^0 é sua velocidade linear, enquanto que v_{ref}^c e ω_{ref}^c são as velocidades linear e angular de referência transmitidas ao robô real.

Assim, o Lema 2.2 pode ser aplicado ao robô virtual, garantindo que este (e, portanto, o ponto H do robô real) tenderá assintoticamente ao caminho de referência e o seguirá, conforme é constatado no resultado de simulação mostrado na Fig. 17.

2.2 Planejamento e Geração de Referências

Esta seção dedica-se a mostrar um sistema de planejamento e geração de caminhos de referência. Para isto, é suposto primeiramente que o ambiente de navegação conhecido é também estático, de modo que os caminhos gerados são ditos livres de obstáculos. Tal suposição é relaxada na Seção 2.4, de maneira que os caminhos aqui gerados passam a ser chamados de caminhos com baixo risco de colisão.

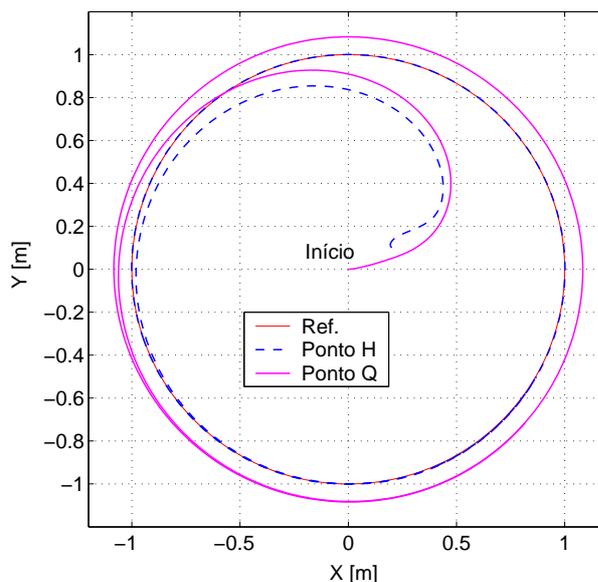


Figura 17: Ponto H (deslocado do centro do eixo que une as rodas de tração, isto é, o ponto Q) seguindo caminho de referência.

O conhecimento do ambiente de navegação é proporcionado por mapas contendo informações relevantes do mesmo. A geração automática de mapas de ambientes consiste em uma tarefa bastante árdua, de modo que tem sido alvo de muita pesquisa visando seu aprimoramento. Alguns resultados relevantes na área podem ser vistos em (AUAT et al., 2007; CHANG et al., 2007; PAZ; TARDÓS; NEIRA, 2008). Por outro lado, tal tarefa pode ser desempenhada com relativa facilidade e grande precisão por um ser-humano, desde que o ambiente não seja demasiadamente complexo, como é o caso, em geral, de ambientes domésticos por onde devem navegar as CRRs. Assim, optou-se por utilizar tal capacidade humana e o apoio de ferramentas computacionais, conforme é mostrado na Subseção 2.2.1.

As informações contidas no mapa do ambiente de navegação são úteis para a autolocalização da CRR, além de permitir ao usuário do veículo móvel apontar a localização de destino requerida, através de uma IHM (veja a Subseção 1.3.2), dentro do ambiente em questão, e, finalmente, permitir o planejamento e a geração de rotas supostamente livres de colisão, como apresentado na Subseção 2.2.2.

2.2.1 Mapa de Ambiente

Uma ferramenta gráfica computacional denominada *Mapper* foi desenvolvida com o intuito de simplificar a tarefa de levar ao sistema de navegação as informações relevantes do ambiente, como as dimensões do ambiente e as localizações e dimensões de objetos

do ambiente, tais como portas, móveis e áreas de risco (escadas, corredores estreitos, etc.). Todas essas informações são descritas de forma gráfica em um plano 2D, utilizando, para isto, formas geométricas básicas, como retângulos, círculos e triângulos. A Fig. 18 mostra um exemplo, onde a ferramenta *Mapper* é utilizada para descrever um ambiente hipotético com dois cômodos, sendo que em um deles há um objeto denominado TV, o qual é representado por um retângulo de dimensões iguais a $0,3\text{m}$ por $0,8\text{m}$, enquanto que no outro cômodo existe uma porta com visão para o exterior. Os círculos pontilhados representam regiões de interesse, cujos centros estabelecem posições de interesse. Além disso, a cada região de interesse está associada uma orientação de interesse. As regiões de interesse cumprem, ainda, um importante papel que é o de estabelecer uma zona de segurança, onde o veículo móvel poderá rotacionar livremente (recordando a suposição inicial de ambiente estático), sem correr risco iminente de colisão.

O conjunto de regiões de interesse indicadas no mapa do ambiente é exibido ao usuário da cadeira de rodas através de um PDA, na forma de símbolos pictográficos (SILVA, 2007). Cada símbolo está associado a uma dada postura a ser assumida pelo veículo móvel robótico dentro do ambiente de navegação. A Fig. 19 mostra um exemplo de como as

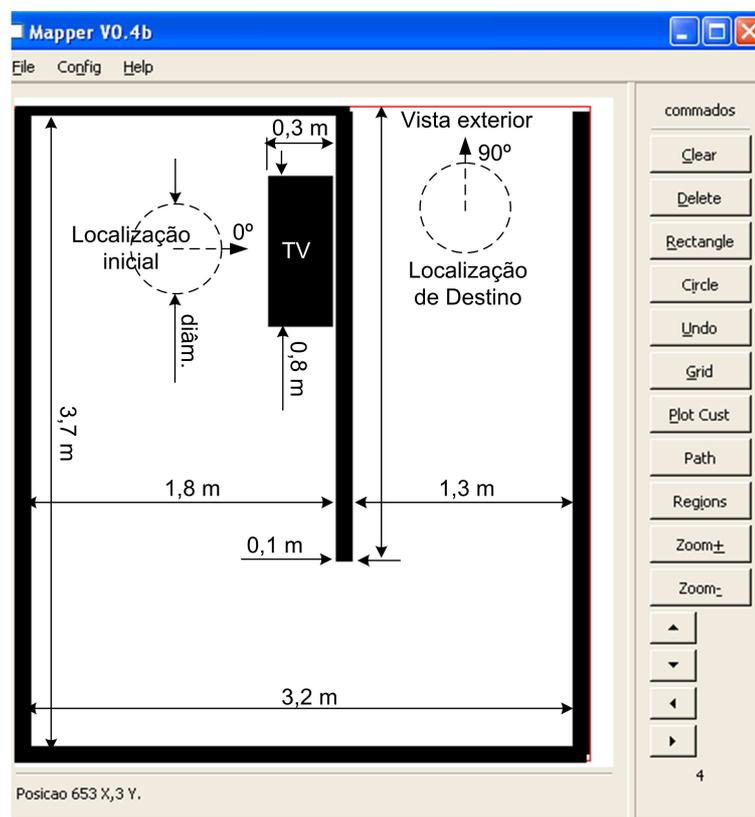


Figura 18: Ambiente hipotético descrito através do *Mapper*.



Figura 19: PDA exibindo símbolos pictográficos que indicam as possíveis regiões de interesse em um ambiente doméstico.

opções de objetivos de navegação são apresentadas ao usuário. À esquerda da figura, percebe-se um retângulo envolvido os ícones da segunda linha. Tal retângulo varre cada linha de forma automática e por um tempo suficiente para que o usuário possa expressar sua intenção de seleção. Quando uma linha é selecionada, o processo de varredura passa a ser executado nas células daquela linha, como mostrado à direita da Fig. 19.

Mapper, por fim, discretiza toda a área do ambiente de navegação descrito (de acordo com uma grade de discretização preestabelecida), de forma que as células da grade gerada que contêm parte das formas geométricas sólidas (representadas em negro na Fig. 18) recebem valor 1, enquanto que as células completamente livres recebem valor 0.

Todo o processo envolvendo a ferramenta *Mapper* é realizado *offline*, de modo que as informações relevantes para o funcionamento do sistema de assistência a pessoas com deficiência motora severa (o mapa discretizado do ambiente e as posturas de interesse definidas nas regiões de interesse) são gravadas em arquivo de texto e, assim, disponibilizadas para uso posterior. Vale ressaltar também que o fato de *Mapper* ser uma ferramenta gráfica simplificada faz com que ela seja de fácil utilização por pessoas não especialistas, tais como membros da família do usuário da CRR.

2.2.2 Algoritmo de Geração de Caminho Livre

Desde que se conheçam detalhes do ambiente de navegação e se saiba a posição atual da CRR e a posição de destino requerida para ela, pode-se estabelecer um caminho, supostamente livre de obstáculos, que servirá de referência para o veículo móvel robótico. A Fig. 20 apresenta um fluxograma do sistema proposto para geração de caminho de referência, o qual divide-se em dois processos: um executado juntamente com a inicialização do sistema de navegação e outro executado a cada comando de usuário. Para apresentar as etapas do processo de inicialização, é considerado o ambiente da Fig. 18, cujo mapa métrico discretizado é mostrado na Fig. 21(a). Ao gerar tal mapa, considerou-se uma grade com granularidade igual a $0,1m$, a qual é ajustável no próprio *Mapper*.

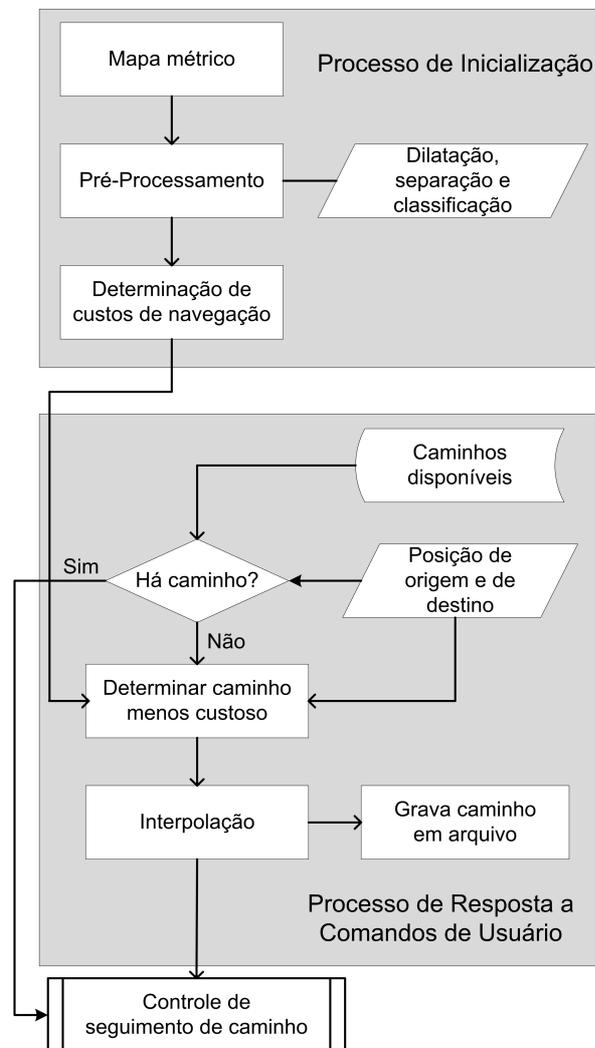


Figura 20: Fluxograma do sistema de geração de caminho de referência.

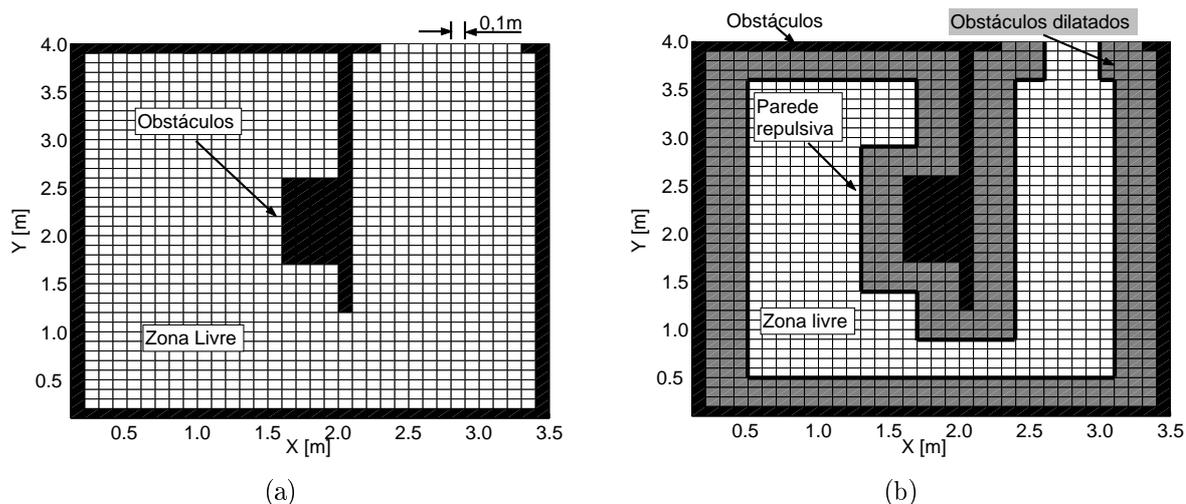


Figura 21: Mapa de um ambiente hipotético a) discretizado e b) dilatado.

Na sequência, a informação contida no mapa discretizado passa por uma etapa de pré-processamento, onde as áreas ocupadas (veja a Fig. 21(b)) são dilatadas, e, logo, as células ocupadas (considerando, inclusive, a ocupação devido à dilatação) são separadas das não-ocupadas. Por fim, das células ocupadas separam-se aquelas classificadas como células repulsivas, as quais formam a parede repulsiva mostrada na Fig. 21(b).

A dilatação traz duas grandes vantagens ao sistema: a primeira é que ela reduz consideravelmente o custo computacional para obtenção de caminho livre (ao dilatar, reduz-se os espaços por onde o veículo móvel poderá navegar, como pode ser visto na Fig. 21); além disso, ela pode aumentar a segurança durante a navegação.

A Fig. 22 ajuda a entender como isto é possível. Nela está ilustrado um robô móvel com diâmetro igual a $0,4m$. Se se considera uma dilatação das paredes e objetos do ambiente igual à metade do diâmetro do robô, ou seja, $0,2m$, então o robô poderá ser considerado como um ponto. Por outro lado, se se define uma região de segurança com

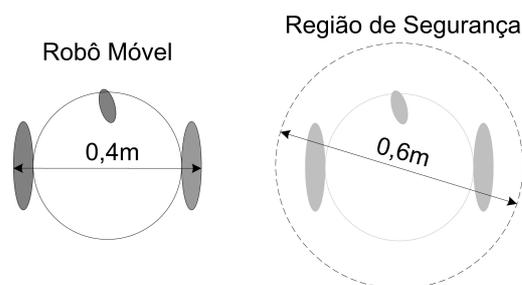


Figura 22: Definição de região de segurança.

diâmetro superior ao do robô móvel (no caso, $0,6m$ como mostra a Fig. 22), e se se aplica o processo de dilatação considerando a metade do diâmetro da região de segurança, então, não só o robô móvel, mas toda aquela região que o envolve, poderão ser tratados como um ponto dentro do ambiente.

Vale frisar que a dilatação mostrada na Fig. 21(b) está de acordo com as dimensões apresentadas na Fig. 22, onde se considera um robô móvel padrão e uma região de segurança capaz de permitir um erro de posicionamento absoluto de $\pm 0,1m$. Vale comentar ainda que quanto maior a dilatação exercida (isto é, quanto maior a região de segurança) maior também será a distância que o veículo móvel manterá com relação a localizações do ambiente de navegação onde podem ocorrer colisões ou serem geradas situações de risco. Em contrapartida, uma dilatação exagerada pode provocar uma grande limitação do espaço disponível para a navegação do veículo. Logo, existe um compromisso que deve ser levado em conta.

Observa-se que o robô móvel padrão possui uma forma geométrica que pode ser aproximada a uma circunferência (veja a Fig. 22). Já a CRR utilizada nos experimentos subsequentes pode ser melhor aproximada a uma forma retangular, como mostra a Fig. 23. Além disso, o ponto de rotação Q e o centro geométrico H são não coincidentes (obedecendo o caso geral), o que dá origem à região de segurança também mostrada na Fig. 23. É importante notar que o formato da cadeira de rodas faz com que a região de segurança tenha um raio de aproximadamente $1,0m$. Trata-se de um raio elevado quando se considera ambientes para navegação de cadeiras de rodas, tal como o mostrado na Fig.24, pois, ao aplicar o método de dilatação (até que a região de segurança possa ser considerada como um ponto no ambiente), percebe-se o surgimento de zonas livres

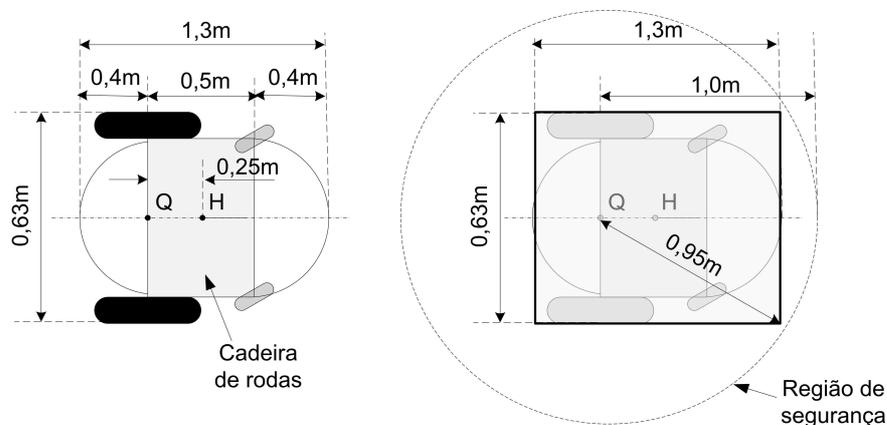


Figura 23: Geometria da cadeira de rodas.

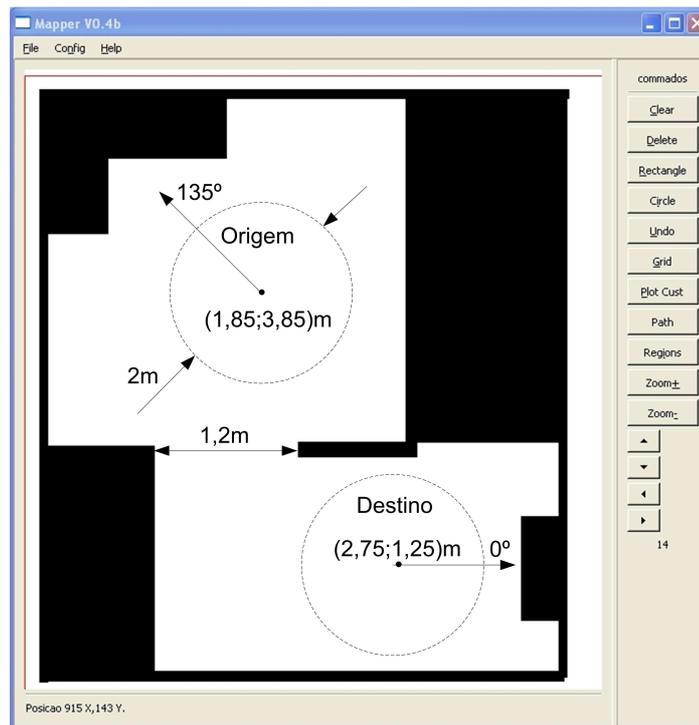


Figura 24: Ambiente gerado em *Mapper*.

isoladas (ou ilhas), como pode ser visto na Fig. 25(b). Tais ilhas são indesejáveis, pois o sistema de navegação não será capaz de criar caminhos que permitam ao veículo móvel alcançar todas as regiões navegáveis do ambiente.

Um sistema baseado em sensores de indução magnética que permite a veículos móveis autônomos guiarem-se através de trilhas metálicas dispostas no piso é apresentado em (GUIMARÃES, 2008). Logo, as trilhas metálicas podem ser utilizadas para conectar ilhas, o que é uma boa solução para o problema gerado pela dilatação.

No entanto, a solução aqui adotada é evitar o fenômeno de zonas livres isoladas. Para isso, implementou-se uma máquina de estados capaz de identificar a formação de tais ilhas, de modo a permitir uma redução gradual da dilatação aplicada, até que nenhuma ilha seja verificada. A Fig. 26 mostra o diagrama de estados do referido sistema, cuja entrada é a indicação de obstrução ou não obstrução de cada linha/coluna da matriz binária que representa o mapa do ambiente dilatado, enquanto que a saída é a indicação da ausência/presença de ilhas. Os estados estão associados à sequência de linhas/colunas obstruídas (L/C) e não obstruídas ($\underline{L/C}$). Assim, as ilhas são caracterizadas quando a máquina de estados identifica uma sequência $\underline{L/C} \rightarrow L/C \rightarrow \underline{L/C}$ (Estado 6 ou 7), o que leva o sistema a reduzir a dilatação e reiniciar o processo.

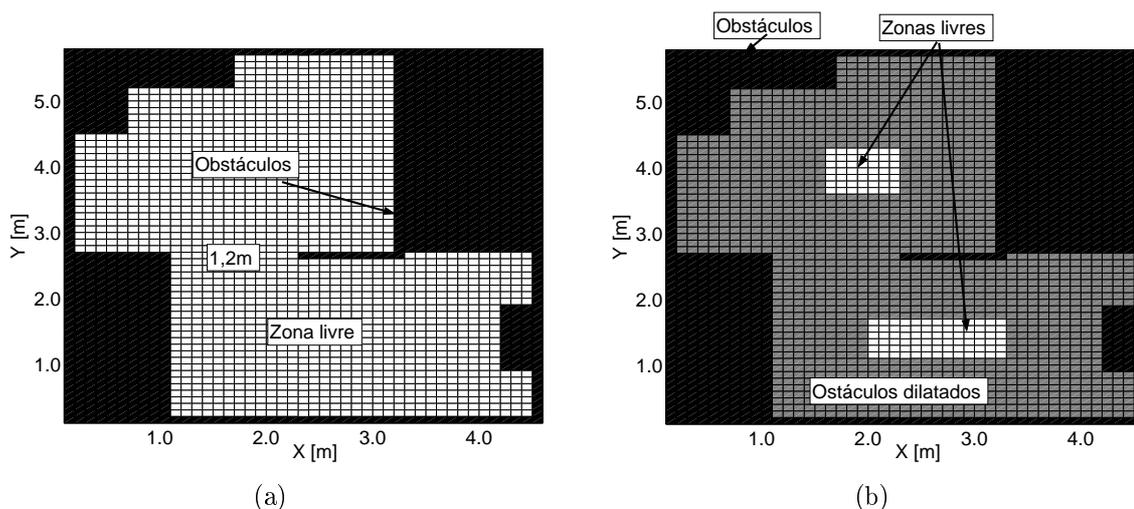


Figura 25: Mapa de um ambiente hipotético a) discretizado e b) dilatado.

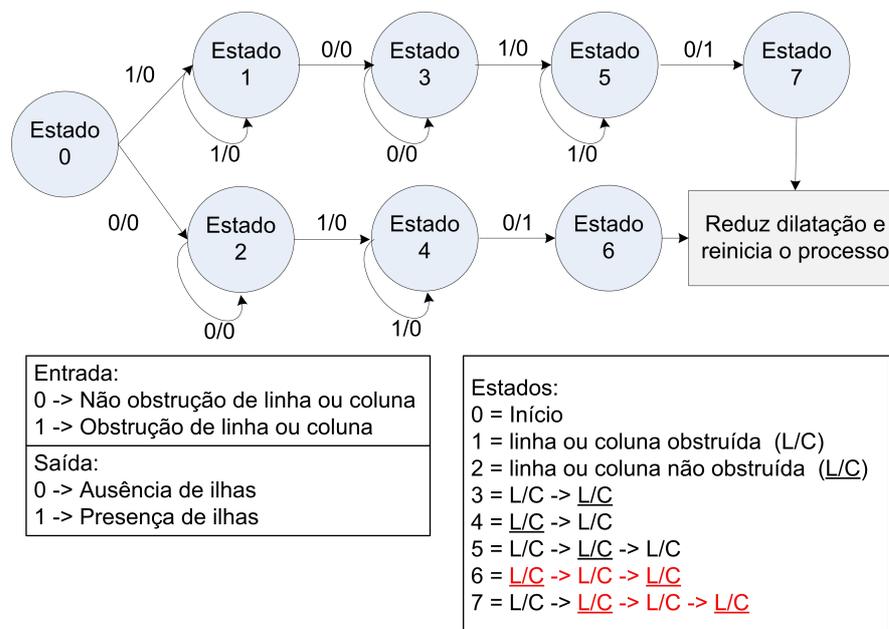


Figura 26: Diagrama de estados do sistema de prevenção contra criação de ilhas devido à dilatação.

A Fig. 27(a) mostra o ambiente dilatado após a introdução do sistema descrito. Observa-se que as ilhas verificadas na Fig. 25(b) já não existem. Por outro lado, elas voltam a aparecer na Fig. 27(b), onde considera-se o mesmo ambiente, porém com uma passagem de $0,8m$ (observa-se na Fig. 25(a) que a passagem anterior era de $1,2m$). O motivo disso é que a redução da dilatação possui um limite mínimo estabelecido igual a, aproximadamente, metade da largura do veículo ($0,315m$ no caso da cadeira de rodas considerada), somado a uma incerteza devido a erros de posicionamento absoluto. Para o

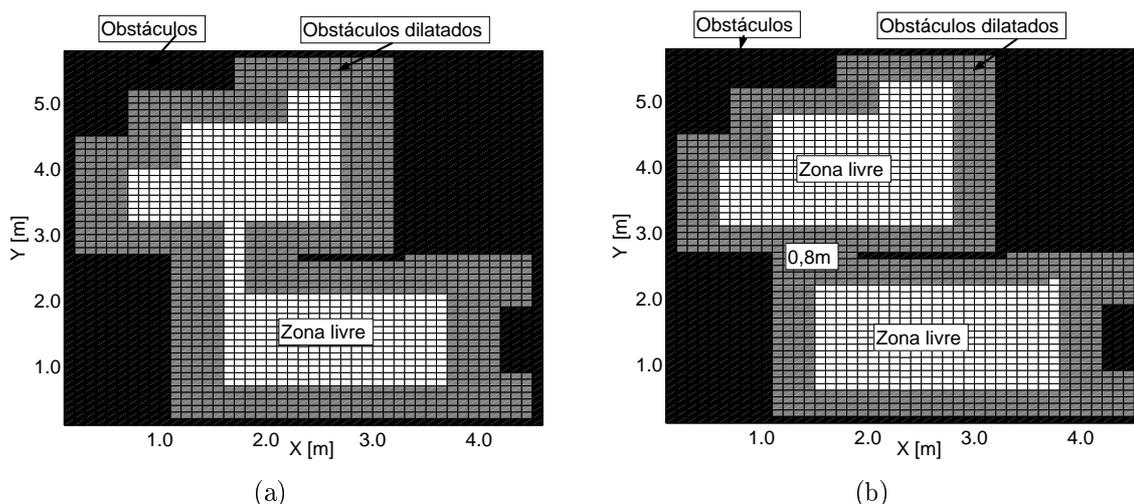


Figura 27: Mapas de ambientes hipotéticos: a) dilatação sem criação de ilhas; b) ambiente com passagem estreita.

caso em questão, tal limite foi ajustado para $0,4m$. Logo, embora o sistema de detecção de ilhas estivesse acionado, a necessidade de uma dilatação mínima fez com que elas surgissem ainda assim, mostrando que o mapa, e, portanto, o ambiente de navegação com a passagem de $0,8m$ é inapropriado para a navegação do veículo em questão. Quando isto ocorre, o sistema de navegação simplesmente restringe o ambiente original à ilha que contém o veículo móvel autônomo.

Com isso, o sistema de navegação passa a contar com um mapa válido do ambiente. Porém, ele ainda não é capaz de decidir, com base em tal mapa, a rota mais segura (com menor risco de colisão) que conecta dois pontos da zona livre, uma vez que não há, ainda, uma informação quantitativa do risco de colisão. Numa situação ideal, onde os erros de controle e de medição são nulos e, além disso, a possibilidade de falhas do sistema em geral é inexistente, seria correto dizer que o risco de colisão é igualmente nulo em qualquer rota que passe estritamente por zonas livres do ambiente. Por outro lado, numa situação real onde tais erros e/ou falhas podem ocorrer, intui-se que existe um risco maior de colisão quando o veículo móvel navega próximo a paredes e/ou objetos do que quando ele está navegando no centro da zona livre. Com base nisso, propõe-se a utilização do conceito de força de repulsão (SECCHI, 1998), ilustrado na Fig. 28. Trata-se de uma força virtual que age sobre o veículo móvel, a qual é tão maior quanto mais próximo o veículo móvel está de paredes e/ou objetos do ambiente, de modo a fazer com que tal veículo tenda a navegar no centro de zonas livres.

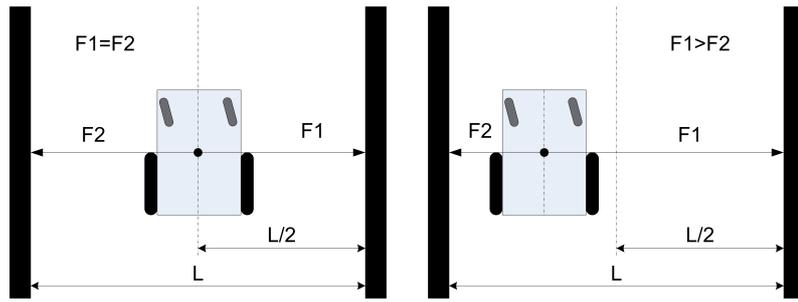


Figura 28: Ilustração de forças virtuais de repulsão atuando sobre o veículo móvel.

Definição 2.1. Seja M o conjunto das células de um mapa métrico discretizado, as quais são distribuídas em C_N , C_O e C_R , que são os subconjuntos que reúnem as células navegáveis, ocupadas e repulsivas, respectivamente, de tal forma que $C_N \cup C_O = M$, $C_N \cap C_O = \emptyset$ e $C_O \cap C_R = C_R$.

Considera-se como células ocupadas aquelas que possuem paredes e/ou objetos do ambiente, bem como aquelas cobertas pela dilatação. Já as células repulsivas são as que formam a parede repulsiva ilustrada na Fig. 29(a). Assim, o risco de colisão (ou custo de navegabilidade em células livres) é definido como segue:

Definição 2.2.

$$\begin{cases} c(n_i) = \left(\frac{1}{K} \sum_{r_k=1}^K e^{-K_o \text{dist}(n_i, r_k)} \right) \times 100\% \\ c(o_j) = 100\% \end{cases}, \quad (2.23)$$

onde $n_i \in C_N$, $o_j \in C_O$, $r_k \in C_R$, K é o número de células repulsivas, K_o é uma constante positiva utilizada para calibração, e $c(\cdot)$ é o risco de colisão estabelecido para cada célula do ambiente de navegação.

A determinação do risco de colisão de cada célula livre é, de fato, a última etapa do processo de inicialização (veja a Fig. 20). O resultado da aplicação de tal etapa ao ambiente da Fig. 29(a) é mostrado na Fig. 29(b). Trata-se de um mapa contendo o risco de colisão em cada célula do ambiente. É essa informação que, de fato, serve ao sistema de navegação após sua inicialização, de modo que ela é gravada em arquivo de texto e utilizada cada vez que o veículo móvel autônomo acessa o ambiente associado, o qual é identificado automaticamente a partir do sistema apresentado em (GUIMARÃES, 2008).

Na sequência, o sistema entra em estado de espera por um comando de usuário. Trata-se do processo de resposta a comandos de usuário, conforme pode ser visto no fluxograma apresentado na Fig. 20. Ao receber o comando de usuário (associado a uma nova postura

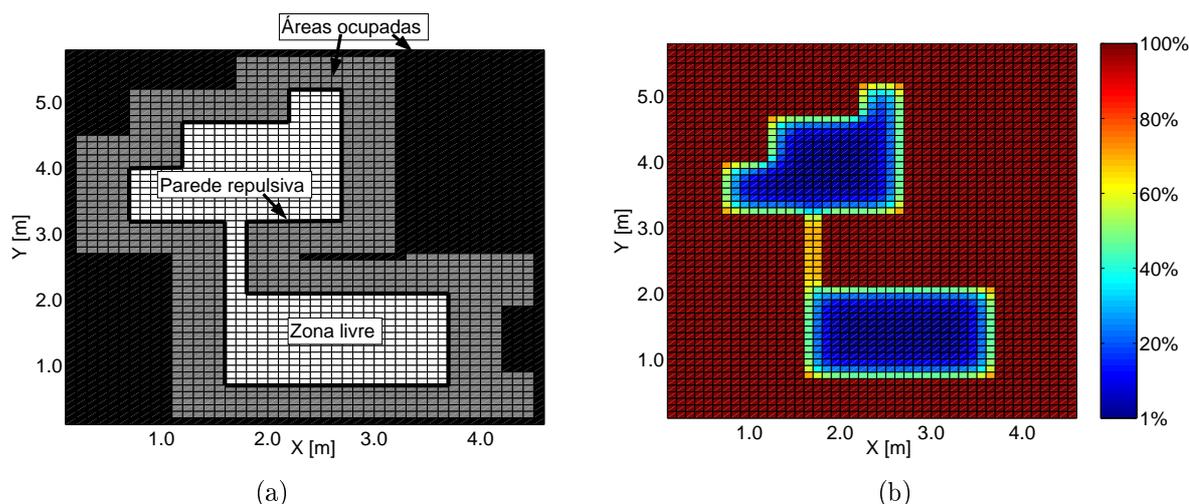


Figura 29: Mapa de ambiente hipotético: a) formação da parede virtual repulsiva; b) risco de colisão.

para a CRR), o sistema primeiramente procura na base de dados por um caminho que conecta a posição atual (origem) à posição requerida (destino). Se tal caminho (único para cada par origem-destino) existe, então o sistema de geração de caminhos simplesmente retorna ao estado de espera, enquanto que o sistema de controle (veja a Fig. 7) dá início à navegação, tendo como referência aquele caminho. Caso contrário, o sistema de geração utiliza-se da posição atual da CRR (dada pelos sensores de posicionamento do veículo), da posição desejada (extraída do comando de usuário) e do mapa com o risco de colisão em cada célula do ambiente.

As células livres (com risco de colisão menor do que 100%) de um ambiente de navegação podem ser mapeadas em uma estrutura de grafo, como ilustra a Fig. 30, onde $c(n)$ é o risco de colisão, estando o veículo móvel na n -ésima célula livre. Tal mapeamento possibilita o uso de algoritmos capazes de encontrar uma rota ótima (no caso presente, rota ótima vem a ser o caminho mais curto com menor risco de colisão), tais como o *algoritmo de Dijkstra* (TANENBAUM, 2003) e o *diagrama de Voronoi* (BERG et al., 2008). Assim, optou-se por utilizar o *algoritmo de Dijkstra* pela simplicidade de implementação, baixo custo computacional e reconhecida eficiência. O caminho resultante para o ambiente mostrado na Fig. 24 pode ser visto na Fig. 31(a), sendo que as localizações de origem e de destino para a CRR são os extremos do caminho gerado.

A etapa seguinte do processo de geração de caminho consiste em interpolar os pontos que representam cada célula (os centros de massa de cada célula) que compõe o vetor de caminho obtido. Dentre as várias possibilidades de se promover tal interpolação (KNOTT,

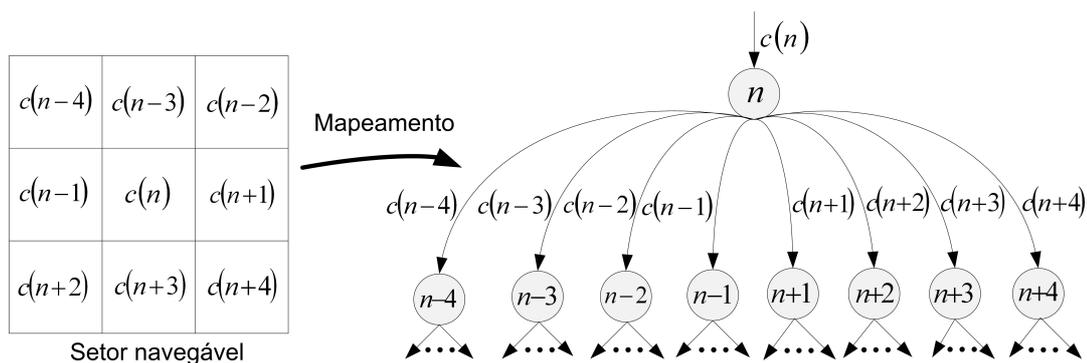


Figura 30: Mapeamento de células livres para navegação em uma estrutura de grafos.

1999), optou-se por utilizar o método *Spline-Cúbica*, devido ao fato de ele garantir uma boa precisão. Além disso, trechos do caminho interpolado que apresentam não-linearidades são automaticamente substituídos por *curvas de Bezier* (SHAO; ZHOU, 1996), garantindo a suavidade do caminho interpolado. A Fig. 31(b) apresenta o resultado da interpolação do caminho mostrado na Fig. 31(a). Tal caminho resultante é, por fim, gravado em arquivo de texto e disponibilizado ao sistema de controle da cadeira de rodas.

Nota 2.6. Vale ressaltar que os caminhos obtidos são válidos enquanto não houver modificação no mapa do ambiente. Assim, em caso de alteração em um mapa, os caminhos relacionados a ele devem ser deletados.

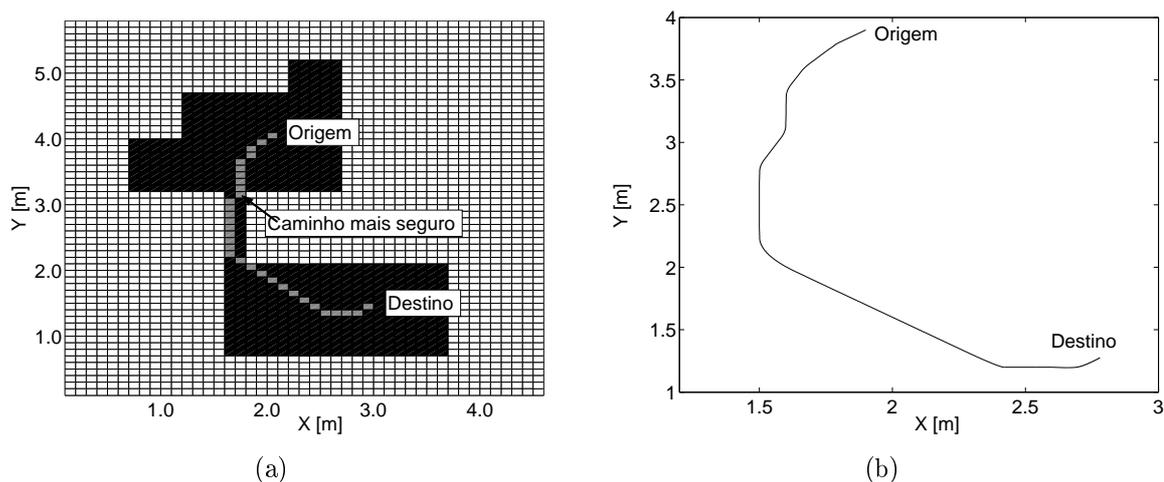


Figura 31: Representação do caminho mais seguro a) discretizado e b) interpolado.

2.3 Orientação do Veículo

O sistema de navegação apresentado até então permite que uma cadeira de rodas robótica vá desde sua posição atual até uma posição desejada, passando por um caminho com baixo risco de colisão. A proposta, entretanto, é que o veículo não somente alcance uma posição desejada, mas sim uma pose (veja na Fig. 24 que cada região de interesse está associada a uma pose). Logo, propõe-se, como solução, um controle de orientação, o qual deve ser acionado toda vez que o veículo móvel alcançar a posição alvo.

2.3.1 Modelagem

A cadeira de rodas utilizada como plataforma de desenvolvimento é classificada como sendo um veículo móvel uniclo, cuja postura é como ilustrada na Fig. 32. O modelo cinemático que descreve a postura de tais tipos de veículos é o seguinte (WIT; SICILIANO; BASTIN, 1997):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}, \quad (2.24)$$

onde a velocidade linear v e angular ω são as entradas de controle, enquanto que x , y e ψ são as variáveis de estado, as quais definem a pose do veículo móvel.

Agora, seja ψ_d a orientação a ser assumida pelo veículo móvel. Logo, de acordo com o ilustrado na Fig. 33, é possível definir o erro de orientação

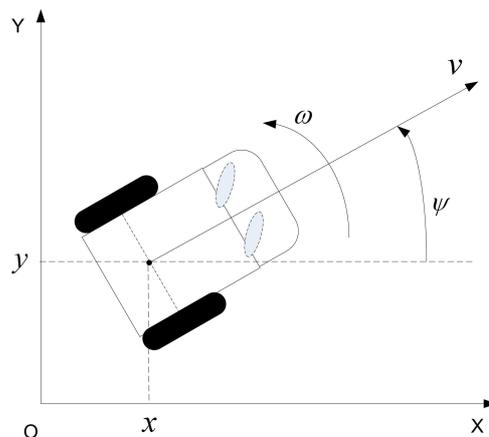


Figura 32: Postura de veículos móveis uniclo.

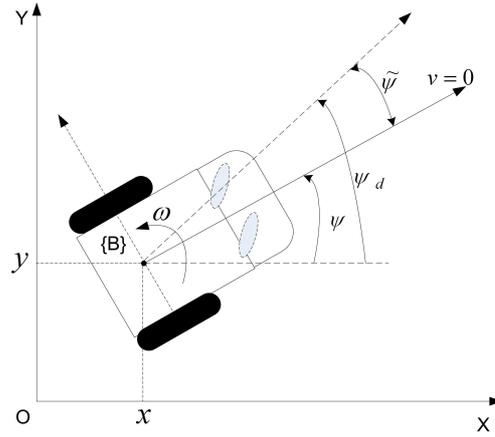


Figura 33: Cinemática de movimento para alcance de ângulo desejado.

$$\tilde{\psi} \equiv \psi_d - \psi. \quad (2.25)$$

É razoável supor que a orientação desejada ψ_d é constante. Além disso, supõe-se também que o movimento de rotação do veículo móvel uniciclo é restringido de tal forma que os estados x e y não se alteram, porém o estado ψ pode sofrer alterações. Daí, a Eq. (2.24) resume-se a $\dot{\psi} = \omega$, enquanto que de (2.25), tem-se que $\dot{\tilde{\psi}} = -\dot{\psi}$, o que permite obter o modelo cinemático para o movimento de orientação, dado por

$$\dot{\tilde{\psi}} = -\omega_{ref}^c, \quad (2.26)$$

onde $\tilde{\psi}$ e ω_{ref}^c são o estado a ser controlado e a entrada de controle, respectivamente.

2.3.2 Controlador de Orientação

Lema 2.3. (SECCHI, 1998) *Seja o modelo da cinemática de movimento envolvendo a orientação de um veículo móvel uniciclo dado em (2.26). Então, a lei de controle*

$$\dot{\tilde{\psi}} = -k_{\tilde{\psi}} \tilde{\psi} \quad (2.27)$$

estabiliza assintoticamente o sistema, sendo $k_{\tilde{\psi}} \in \mathbb{R}^+$ um ganho constante.

Prova. Seja a função candidata de Lyapunov

$$V_o = \frac{1}{2} \tilde{\psi}^2. \quad (2.28)$$

orientado a 135° e seu ponto Q (veja a Fig. 23) possui coordenadas $(1, 85m; 3, 85m)$. Por outro lado, percebe-se na Fig. 34(b) que o caminho de referência possui uma orientação inicial que é de aproximadamente 225° , começando exatamente em $(1, 85m; 3, 85m)$. Isto significa dizer que o erro de posição é inicialmente nulo, porém o erro de orientação não o é. Assim, acionar o controle de seguimento de caminho em tais condições fará com que o veículo realize um movimento que pode levá-lo à colisão (tendo em vista que a velocidade linear é sempre não nula naquele controlador) antes que ele consiga orientar-se aproximadamente com o caminho de referência. Portanto, é desejável que o veículo móvel assuma, primeiramente, uma orientação próxima àquela apresentada pelo trecho inicial do caminho de referência, e só então comece a segui-lo, o que é resolvido a partir de uma coordenação adequada dos controladores envolvidos realizada pelo sistema supervisorio mostrado na Seção 2.6.

2.4 Desvio de Obstáculos

Embora os ambientes de navegação para CRRs sejam semiestruturados e conhecidos pelo sistema inteligente que governa tais veículos, tem-se que levar em consideração que esses ambientes são susceptíveis a alterações, as quais são aqui classificadas em duas categorias: estáticas e dinâmicas. As primeiras são tratadas como sendo uma reestruturação do ambiente, exigindo a reedição de suas informações básicas, isto é, o que são zonas livres e o que são zonas ocupadas. Já as alterações dinâmicas são variações momentâneas do *layout* padrão do ambiente, não exigindo, assim, a reavaliação de suas informações, e sim a necessidade de um sistema extra capaz de identificar tais variações (se necessário for) e considerá-las durante a tomada de decisão na busca pelo cumprimento do objetivo de navegação.

As alterações estáticas exigem uma revisão das informações básicas do ambiente, conforme comentado anteriormente. Tais revisões podem ser realizadas a partir de um processo *offline* ou um processo *online*. No primeiro tipo de processo, é possível utilizar-se da alta capacidade humana de identificação de tais mudanças, com um nível de eficiência até então não reproduzido por sistemas de inteligência artificial. Entretanto, o método *offline* é inviável quando tais mudanças são muito frequentes, ou o ambiente a ser mapeado possui dimensões elevadas e/ou é altamente complexo em sua forma. Neste caso, sistemas que operam *online*, conhecidos como SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) (AUAT et al., 2007; CHANG et al., 2007; PAZ; TARDÓS; NEIRA, 2008), levam grande vantagem sobre os que se utilizam do método *offline*.

Com base nas observações realizadas, e por considerar que mudanças estáticas não são tão frequentes em ambientes domésticos semiestruturados, e levando em conta que tais ambientes não possuem dimensões elevadas (um ambiente maior poderá ser sempre particionado em ambientes menores), além de poderem ser descritos, de maneira aproximada, como formas regulares (tais como, retângulos e triângulos), propõe-se, nesta tese, que tais informações sejam passadas por uma pessoa (alguém que convive com o usuário da CRR), a qual pode contar com uma ferramenta gráfica desenvolvida para este fim (veja a Subseção 2.2.1).

Logo, as mudanças estáticas já não são um problema, restando tratar daquelas que possuem natureza dinâmica. Mais especificamente, serão consideradas aquelas mudanças dinâmicas no ambiente de navegação identificadas pelo sistema sensorial do veículo móvel, as quais serão denominadas *obstáculos* de agora em diante.

Um obstáculo pode ser classificado como estático ou móvel. Móveis e brinquedos são alguns exemplos típicos de obstáculos estáticos em ambientes domésticos, enquanto que pessoas e animais de estimação podem constituir-se em obstáculos móveis. Independente da natureza do obstáculo, uma colisão deve ser sempre evitada, a fim de preservar a integridade do usuário da cadeira de rodas, das pessoas, e do próprio veículo móvel e objetos materiais do ambiente, entre outros.

A Fig. 35 apresenta o resultado de simulação para o sistema até então (ou seja, aquele desenvolvido sob a suposição de que os ambientes são estáticos). Observa-se na figura que

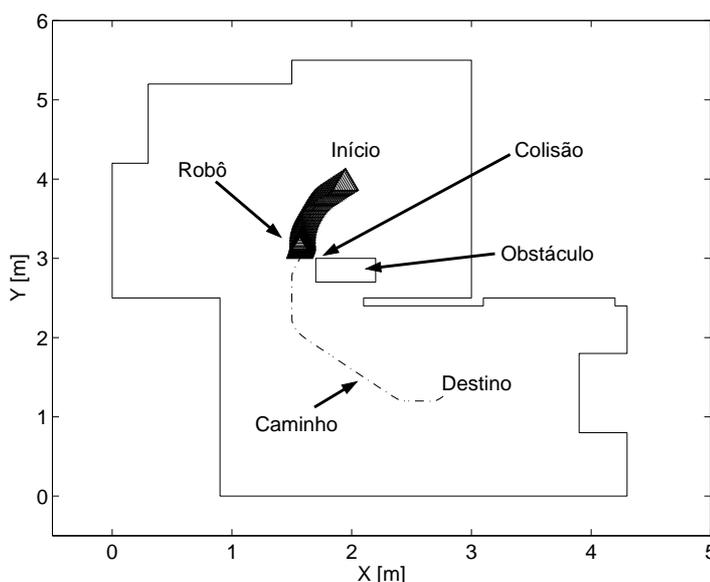


Figura 35: Sensor de proximidade desligado: colisão com obstáculo inesperado.

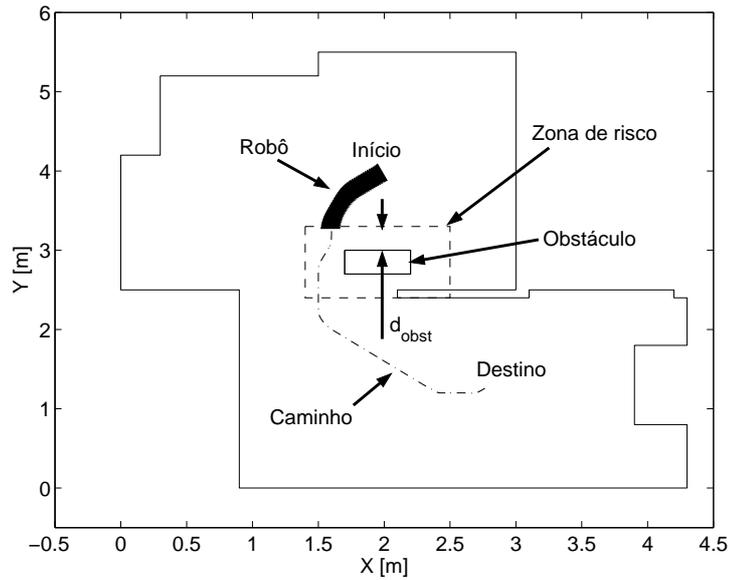


Figura 36: Sensor ligado: o veículo se aproxima do obstáculo, mas não se choca.

o veículo vem cumprindo sua tarefa (seguir o caminho que o leva ao destino) até que, em um determinado ponto do caminho percorrido, ele se depara com um obstáculo, ocorrendo a colisão. Isto aconteceu devido ao fato de o sistema de detecção de obstáculos (baseado em sensores de ultrassom (FILGUEIRA, 2005)) está propositalmente desligado. Já a Fig. 36 mostra que, estando o sistema de detecção de obstáculos acionado, o veículo interrompe a tarefa de seguimento assim que ele atinge a zona de risco.

A zona de detecção é determinada a partir da distância d_{obst} (Fig. 36) na qual o veículo móvel percebe que está em rota de colisão com um obstáculo. Tal distância é ajustável e deve obedecer à relação

$$d_{obst} \geq -\frac{V_{\max}^2}{2a_{frenagem}}, \quad (2.31)$$

obtida diretamente do *Teorema do Trabalho-Energia* (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2008), onde V_{\max} é a máxima velocidade linear alcançável pelo veículo e $a_{frenagem} \in [a_{\max}, 0)$ é a desaceleração constante aplicada ao veículo móvel, com $a_{\max} < 0$ sendo a máxima desaceleração permitida.

Logo, para uma frenagem rápida, deve-se aplicar a máxima desaceleração possível, isto é, $a_{frenagem} = a_{\max}$, reduzindo a distância d_{obst} mínima para detecção de obstáculo. Entretanto, tal manobra pode provocar desconforto ao usuário da CRR, exigindo assim uma desaceleração mais suave, o que aumenta a distância d_{obst} mínima para detecção de obstáculo. Desse modo, para $V_{\max} = 0,2m/s$ e $a_{frenagem} = -0,05m/s^2$ (valores definidos

experimentalmente para a CRR), tem-se $d_{obst} \geq 0,4m$. Deve-se assegurar ainda que $d_{obst} \leq d_{dilatacao}$, evitando, assim, a criação de zonas isoladas (fenômeno discutido na Subseção 2.2.2). Por fim, a desaceleração deve ser cessada assim que o veículo interrompe o movimento que o levaria à colisão.

Uma vez que o veículo móvel identifica um obstáculo durante sua navegação através de um caminho de referência, surge então a necessidade de ele executar uma manobra de fuga. Ferreira (2004) apresenta, em sua dissertação de mestrado, um estudo minucioso sobre as diversas propostas de desvio de obstáculos presentes na literatura. Após analisar as vantagens e desvantagens de cada método, o autor propõe, finalmente, um novo método, o qual é batizado como *Desvio Tangencial* (DT). O DT baseia-se em um método já consagrado na literatura, conhecido como *Campo de Forças Virtuais* (VFF, do inglês *Vector Field Force*) (BORENSTEIN; KOREN, 1989). VFF apresenta um problema importante que é o desenvolvimento de grandes variações nas velocidades linear e angular do veículo móvel durante fuga de obstáculos, aumentando o gasto energético e contribuindo para a diminuição da vida útil dos motores. DT, por outro lado, é capaz de evitar tais problemas, de acordo com Ferreira (2004). Entretanto, escapar de obstáculos em formato de U só foi possível a partir de uma modificação no método DT posteriormente proposta em (BRANDÃO, 2008).

2.4.1 Desvio Tangencial Modificado

O método de *Desvio Tangencial Modificado* (DTM) é ilustrado na Fig. 37. A diferença do DT para o DTM é que no primeiro define-se uma distância crítica, L_y , enquanto que no segundo define-se uma região crítica, dada pelas dimensões L_x e L_y , o que mostra que DT é um caso particular de DTM. Observa-se ainda na Fig. 37 a presença das distâncias d_{min} e d_{90} , onde a primeira é a distância mínima entre veículo móvel e obstáculo, e d_{90} é a distância observada pelo sensor posicionado a 90° (ou o mais próximo possível) daquele que detecta o obstáculo à distância d_{min} . Assim, quando $d_{min} < L_y$, rotaciona-se o alvo real de um ângulo φ , dado por

$$\varphi = \beta - \vartheta - \text{sign}(\beta) \frac{\pi}{2}, \quad (2.32)$$

originando assim o *alvo virtual 1*, que passa a ser buscado pelo veículo móvel. Neste caso, o veículo se mantém em uma rota tangente ao obstáculo e a uma distância igual a L_y .

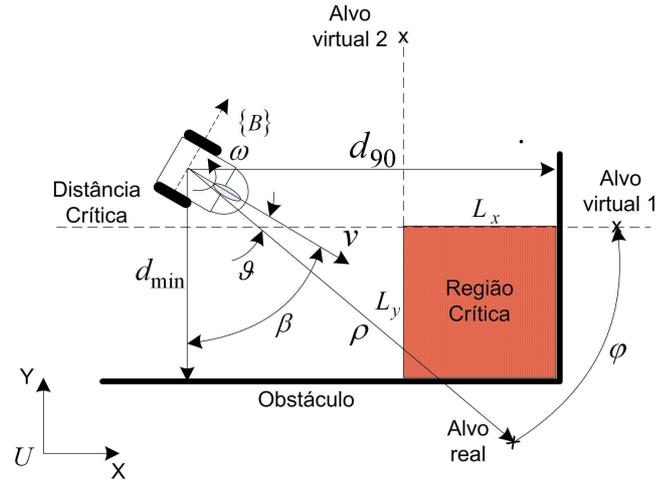


Figura 37: Desvio Tangencial Modificado: Determinação do ângulo de rotação.

A invasão da região crítica por parte do veículo móvel é caracterizada quando $d_{\min} < L_y$ e $d_{90} < L_x$. Neste caso, o alvo real sofre uma rotação, dada por

$$\varphi = \beta - \vartheta - \text{sign}(\beta) \pi, \quad (2.33)$$

originando, desta vez, o *alvo virtual 2*, o qual deve, então, ser buscado pelo veículo móvel. Assim, uma distância igual a L_x com relação ao obstáculo é mantida.

2.4.2 Posicionamento

O método de DTM exige um controle estável durante a busca de um ponto, isto é, o alvo virtual. Logo, o mesmo sistema de controle de posicionamento usado em (BRANDÃO, 2008) é considerado aqui. Tal sistema é baseado no modelo cinemático

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -v \cos \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} = -\omega + v \frac{\text{sen} \tilde{\psi}}{\rho} \end{cases} \quad (2.34)$$

obtido a partir do diagrama esquemático da Fig. 38, onde v e ω são as velocidades linear e angular do veículo móvel, e os erros de distância e de orientação, dados por

$$\rho = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2} \quad (2.35)$$

e

$$\tilde{\psi} = \psi - \psi_d, \quad (2.36)$$

respectivamente, são os estados a serem controlados.

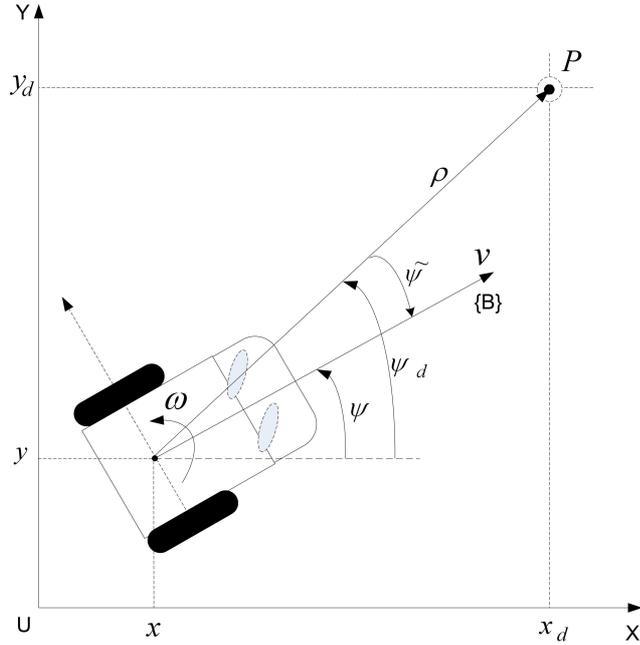


Figura 38: Cinemática de movimento para alcance de uma postura desejada.

Lema 2.4. (SECCHI, 1998): *Seja o modelo da cinemática de movimento para posicionamento de um veículo móvel unicyclo dado em (2.34). Então, as leis de controle*

$$\begin{cases} v_{ref}^c = V_{max} \tanh(k_p \rho) \cos \tilde{\psi} \\ \omega_{ref}^c = k_\omega \tilde{\psi} + V_{max} \frac{\tanh(\rho)}{\rho} \text{sen} \tilde{\psi} \cos \tilde{\psi} \end{cases} \quad (2.37)$$

estabilizam assintoticamente o sistema, onde k_p e k_ω são ganhos constantes positivos e V_{max} é o valor absoluto da velocidade linear máxima do veículo móvel.

Prova. Secchi (1998) propõe a função candidata de Lyapunov

$$V_p(\rho, \tilde{\psi}) = \frac{1}{2} \rho^2 + \frac{1}{2} \tilde{\psi}^2 \quad (2.38)$$

para análise de estabilidade.

Substituindo o modelo cinemático, dado em (2.34), na primeira derivada temporal de (2.38), obtém-se

$$\dot{V}_p = -\rho v \cos \tilde{\psi} + \tilde{\psi} \left(v \frac{\text{sen} \tilde{\psi}}{\rho} - \omega \right). \quad (2.39)$$

Levando, então, as leis de controle dadas por (2.37) em (2.39), resulta que

$$\dot{V}_p = -V_{max} \tanh(k_p \rho) \cos^2 \tilde{\psi} - k_\omega \tilde{\psi}^2, \quad (2.40)$$

a qual é uma função claramente negativa para todo $\rho \neq 0$ e $\tilde{\psi} \neq 0$, concluindo, assim, que o sistema é assintoticamente estável. \square

Nota 2.7. É importante observar que embora o erro de distância ρ possa assumir um valor elevado, ainda assim as leis de controle (2.37) dão origem a sinais de controle de valores limitados, graças à consideração de funções de saturação do tipo $\tanh(\cdot)$.

Nota 2.8. Embora seja verificada a estabilidade assintótica do sistema, observa-se que (2.37) apresenta uma singularidade exatamente quando $\rho = 0$. A solução adotada em (SECCHI, 1998) para tratar tal problema é a de estabelecer uma região circular de raio δ , centrada no ponto dado como objetivo de controle, de modo que quando o veículo alcança tal região, assume-se que o objetivo de controle é atingido. Em outras palavras, permite-se cometer um erro máximo de posicionamento, cujo módulo é igual a δ .

2.5 Arcos Convergentes

A Fig. 59 apresenta uma simulação onde se considera um obstáculo posicionado sobre o caminho de referência. Observa-se que o veículo autônomo começa a seguir tal caminho, identificando o obstáculo momentos antes de alcançar a zona de risco. Na sequência, o veículo móvel autônomo executa a manobra de fuga, evitando uma colisão iminente. Após alguns instantes, ele se vê livre do obstáculo, e o movimento é então interrompido.

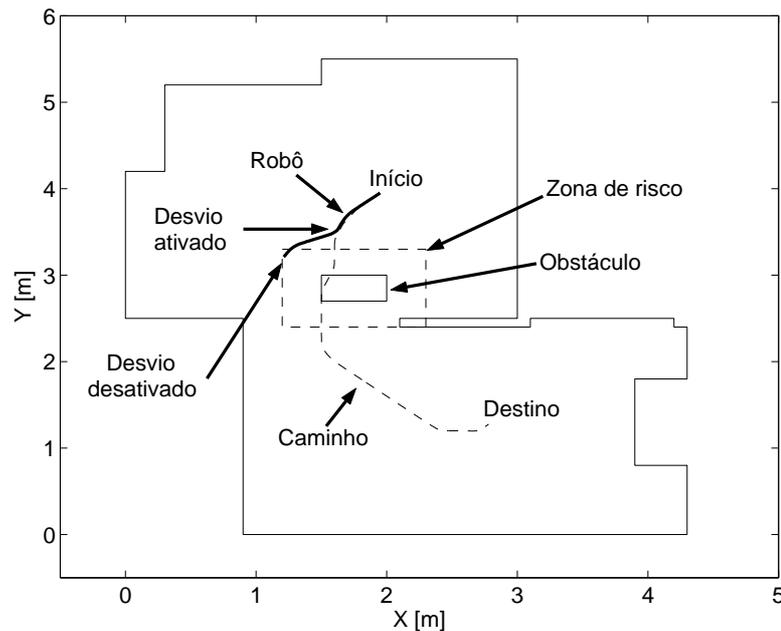


Figura 39: Escape tangencial.

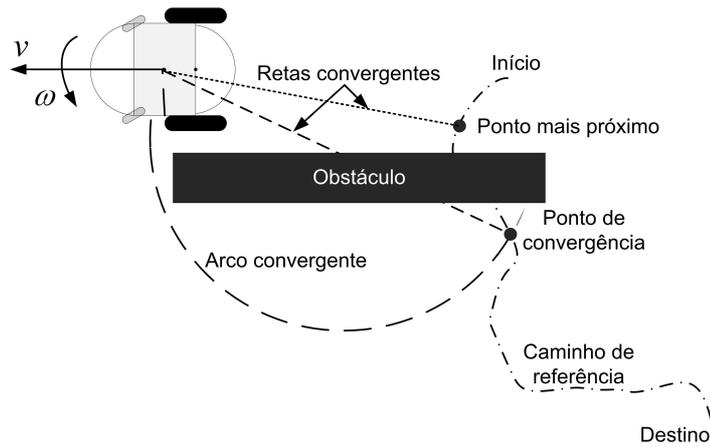


Figura 40: Estratégias de retorno ao caminho de referência.

O que se deseja na sequência é que o veículo móvel volte a seguir o caminho de referência, onde se supõe que a chance de ele se deparar com outro obstáculo é baixa. A Fig. 40 ilustra três estratégias para realização de tal retorno. A primeira é a de seguir a reta que leva o veículo ao ponto do caminho que está mais próximo a ele. Embora tal estratégia possa funcionar para alguns casos, ela pode também fazer com que o veículo não consiga superar o obstáculo, como ilustra a Fig. 40. Problema idêntico pode ser observado quando se estabelece como estratégia o seguimento de um caminho reto conectando o veículo a um ponto de convergência no caminho de referência (um ponto do caminho que está a uma determinada distância à frente daquele considerado como objetivo no momento em que o veículo móvel se deparou com o obstáculo). Já a estratégia baseada na geração de arcos convergentes (Fig. 40) provê uma forma suave e conveniente de retorno ao caminho de referência, de modo que esta é a estratégia adotada nesta tese.

A Fig. 41 permite estabelecer um mecanismo de geração de arcos convergentes. Observa-se na Fig. 41(a) a presença dos pontos $\mathbf{P}_{robo} = [x, y]$ e $\mathbf{P}_{cam} = [x_d, y_d]$. O primeiro determina a posição do veículo móvel no momento em que ele se vê livre do obstáculo, enquanto que o segundo consiste em um ponto do caminho de referência estabelecido como ponto de convergência (ou ponto de retorno) do veículo móvel. A Fig. 41(a) destaca ainda o *raio* e o *centro*, dados por

$$\begin{cases} \mathbf{centro} = (\mathbf{P}_{robo} + \mathbf{P}_{cam})/2 \\ \mathbf{raio} = \|\mathbf{P}_{robo} - \mathbf{P}_{cam}\|/2 \end{cases}, \quad (2.41)$$

que são as informações necessárias e suficientes para geração da circunferência mostrada na Fig. 41(a).

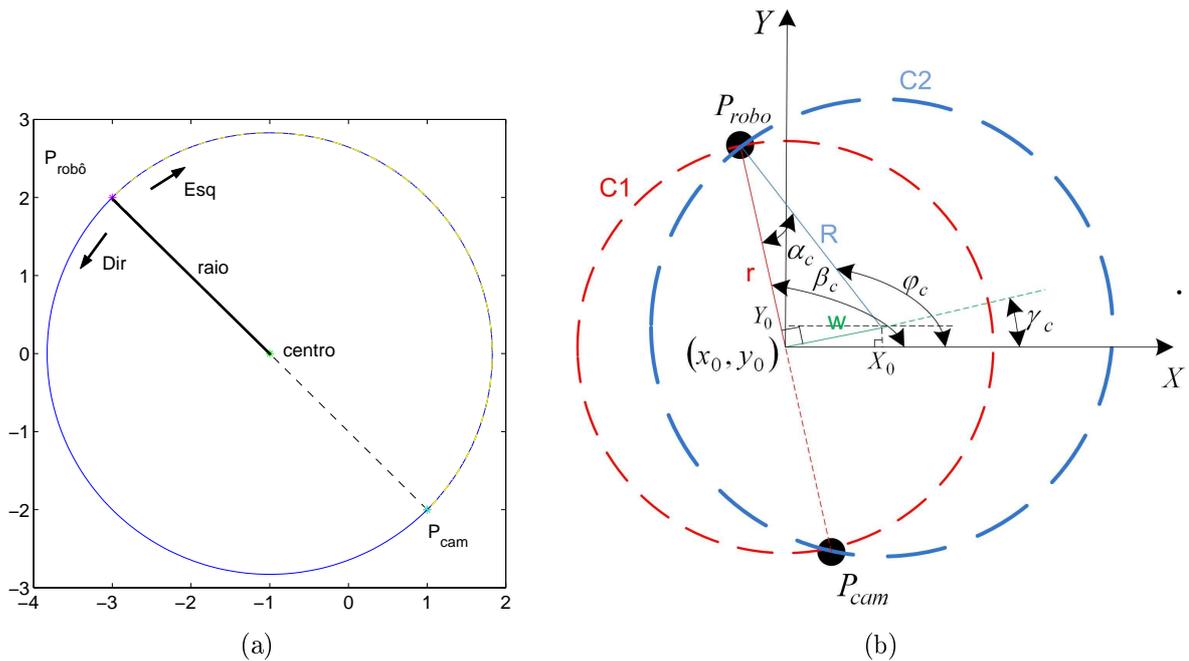


Figura 41: Geração de arcos convergentes.

Vale ressaltar que para alcançar o ponto de destino P_{cam} , não é necessário gerar toda a circunferência, mas apenas um arco (no caso, uma semicircunferência), cujo sentido de rotação está intimamente ligado ao sentido em que o veículo móvel contorna o obstáculo (a seção seguinte detalha a questão do sentido assumido pelo veículo autônomo para contorno de um obstáculo).

Entretanto, é notório que circunferências com raios pequenos dão origem a seguimentos com curvaturas elevadas, uma vez que, por definição, $curvatura \equiv 1/raio$. O fato é que caminhos com curvaturas elevadas são indesejáveis, por comprometerem a suavidade de movimento do veículo móvel (INDIVERI; NUCHTER; LIGEMANN, 2007). O problema é que, com a abordagem baseada em arcos convergentes até então mostrada, a única forma de se obter circunferências com raios praticáveis é tomando pontos do caminho, P_{cam} , adequadamente distantes do veículo móvel, o que nem sempre é possível, tendo em vista que o caminho é finito. Além disso, tal prática vai de encontro à filosofia adotada nesta tese, que é a de estar o mais próximo possível do caminho de referência (onde acredita-se que a possibilidade de encontrar novos obstáculos é baixa), de modo que é desejável que o veículo móvel retorne a tal caminho assim que possível.

A solução adotada para tal problema está ilustrada na Fig. 41(b), onde verifica-se a presença das circunferências C_1 , com raio r_1 e coordenadas do centro (x_0, y_0) dados em (2.41), e C_2 , com raio r_2 e coordenadas do centro (X_0, Y_0) . Observa-se que a corda

diagonal de C_1 une os pontos \mathbf{P}_{robo} e \mathbf{P}_{cam} (como no caso mostrado na Fig. 41(a)). Entretanto, o interesse agora está na circunferência C_2 , pois, além de ela também passar pelos pontos \mathbf{P}_{robo} e \mathbf{P}_{cam} , seu raio pode ser ajustado, permitindo a geração de curvas tão suaves quanto se queira. Isto porque

$$\begin{cases} r_2 = r_1 / \cos \alpha_c \\ X_0 = x_0 + w (\cos \gamma_c) \\ Y_0 = y_0 + w (\sin \gamma_c) \end{cases}, \quad (2.42)$$

sendo $w = r_1 \tan \alpha_c$, com $\alpha_c \in [0, \pi/2)$, e

$$\gamma_c = \beta_c \pm \pi/2, \quad (2.43)$$

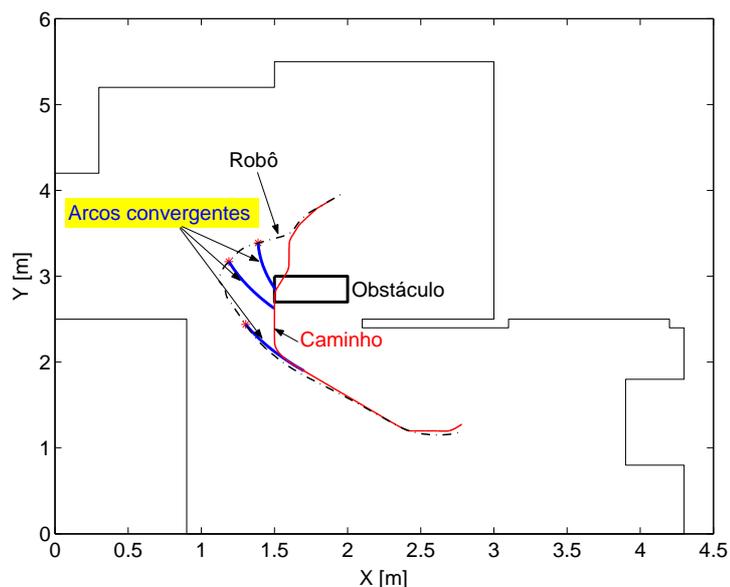
onde o sinal positivo em (2.42) estabelece que o arco da circunferência que leva o veículo até \mathbf{P}_{cam} está à direita do veículo (rotação no sentido anti-horário), enquanto que o sinal negativo implica que o arco está à esquerda (rotação no sentido horário).

Sejam $\mathbf{z} = [r_1, x_0, y_0]$ e $\mathbf{Z} = [r_2, X_0, Y_0]$ vetores com as características que definem C_1 e C_2 , respectivamente. Então, $\lim_{\alpha_c \rightarrow 0} \mathbf{Z}(\alpha_c) = \mathbf{z}$. Além disso, a curvatura de C_2 é definida como $\kappa_2 \equiv 1/r_2 = \cos \alpha_c / r_1$. Logo, $\lim_{\alpha_c \rightarrow \pi/2} \kappa_2(\alpha_c) = 0$ (uma reta), concluindo que agora é possível gerar circunferências com curvaturas suaves, independente da distância entre \mathbf{P}_{robo} e \mathbf{P}_{cam} .

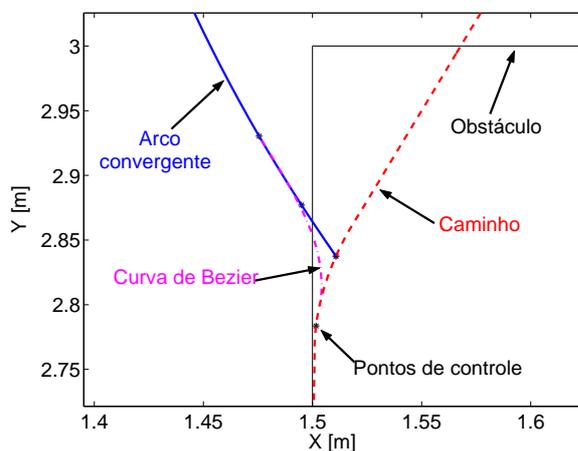
Nota 2.9. A escolha de um valor adequado para α deve levar em consideração as dimensões do ambiente, do veículo móvel e dos possíveis obstáculos que podem surgir. Trata-se, portanto, de um critério de compromisso para se ter um caminho convergente com curvatura suficiente para escapar de obstáculos comuns em um determinado ambiente.

A Fig. 42(a) mostra o resultado de uma simulação, onde observa-se que o veículo móvel está seguindo um caminho de referência, quando detecta um obstáculo em rota de colisão, executando, a seguir, uma manobra de desvio. Quando o veículo móvel autônomo se vê livre do obstáculo, o sistema de navegação gera um arco convergente, o qual passa a fazer parte do caminho de referência a ser seguido pelo robô móvel. Observa-se na simulação em questão que o veículo efetua três tentativas de retorno ao caminho de referência, onde, em cada tentativa, gera-se um novo arco convergente.

Um *zoom* na Fig. 42(a) revela detalhes sobre a junção entre um arco convergente e o caminho, o qual é mostrado na Fig. 42(b). Observa-se que a junção caminho/arco convergente apresenta uma não linearidade, a qual se traduz em uma transição não suave, o que é indesejável para um caminho de referência. Para resolver o problema, substituiu-se o trecho que contém a transição por uma curva de Bezier (KNOTT, 1999), garantindo a suavidade do caminho.



(a)



(b)

Figura 42: Conexão suave entre arcos convergentes e caminho a) visão geral b) detalhe.

2.6 Sistema Supervisório

É mostrado ao longo deste capítulo que o sistema de navegação é formado por diversos subsistemas. A ideia defendida nesta tese é de que cada subsistema deve atuar em um determinado momento, a fim de cumprir um objetivo específico (a referência gerada para um módulo de controle). Assim, um objetivo geral (o comando de usuário) será cumprido, desde que cada subsistema seja adequadamente acionado por um sistema supervisorio comutador, tal como visto no diagrama de blocos da Fig. 43.

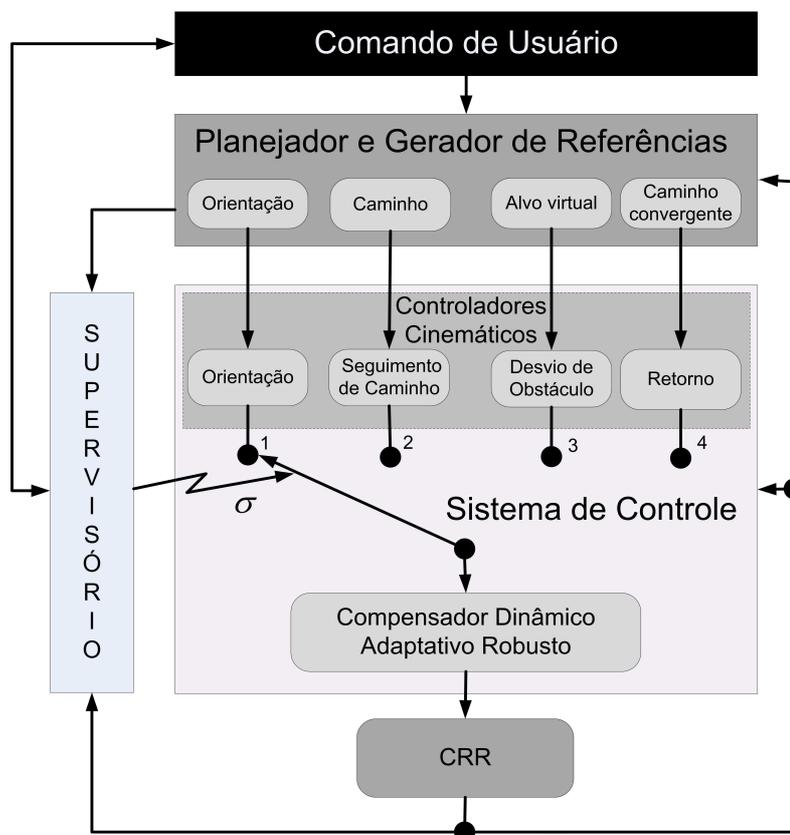


Figura 43: Diagrama de blocos do sistema de navegação.

O comando de usuário estabelece uma pose de destino para o veículo móvel dentro de um ambiente conhecido. Logo, o objetivo geral é o de alcançar tal pose desejada. Para isso, é requerido que o veículo siga uma rota com baixo risco de colisão. Caso haja um obstáculo na rota do veículo, este deve desviar-se de tal obstáculo, retornar ao caminho com baixo risco de colisão e segui-lo até o fim. Ao alcançar a extremidade final do caminho, o veículo deve orientar-se conforme solicitado pelo usuário.

Essa é, em linhas gerais, a descrição de como o sistema supervisório deve proceder. Tal procedimento é descrito na Subseção 2.6.1 através de uma máquina de estados, cuja saída de alguns estados funcionará como sinal de comutação σ entre controladores cinemáticos. Uma vez que há comutação entre controladores, faz-se necessário avaliar sua estabilidade, o que é feito na Subseção 2.6.2.

2.6.1 A Máquina de Estados

O sistema supervisório proposto neste trabalho consiste em uma máquina composta de onze estados, conforme mostrado na Fig. 44, cujo funcionamento começa a partir de um comando de usuário (uma pose de destino), fazendo com que o sistema supervisório assumira o estado *Início*. Logo, ele procura saber se a CRR está ou não (aproximadamente) orientada com o seguimento inicial do caminho de referência (veja a Subseção 2.3.3). Se sim, então o supervisório entra no estado *Seguir caminho*, acionando o controle de seguimento de caminho ($\sigma = 2$). Se não, seu estado passa a ser o *Orientar-se com caminho*, onde o controle de orientação é acionado ($\sigma = 1$). Uma vez que a CRR esteja orientada com o caminho, o supervisório vai para o estado *Seguir caminho*, onde ele aguarda o aviso de chegada ao destino. Quando isto acontece, ele passa imediatamente para o estado *Orientar-se no destino*, onde o controle de orientação é mais uma vez acionado, de modo a fazer com que o veículo assumira a orientação estabelecida pelo usuário. Ao receber a informação de veículo móvel finalmente orientado, o supervisório transita para o estado de *Parar*, onde velocidades nulas de referência são enviadas para a CRR ($\sigma = 0$), mantendo-a parada até que um novo comando de usuário reinicie o processo descrito.

Como se percebe, apenas uma parte do sistema supervisório foi descrita até então. Trata-se da coordenação de ações de uma navegação “limpa”, isto é, sem a presença de obstáculos não previstos no mapa do ambiente. Entretanto, quando há tais obstáculos, o sistema supervisório entra imediatamente no estado denominado *Criar ponto de restauração e Esperar*. Como o próprio nome diz, duas coisas são realizadas neste estado: cria-se um ponto de restauração, e, em seguida, espera. A primeira ação consiste simplesmente

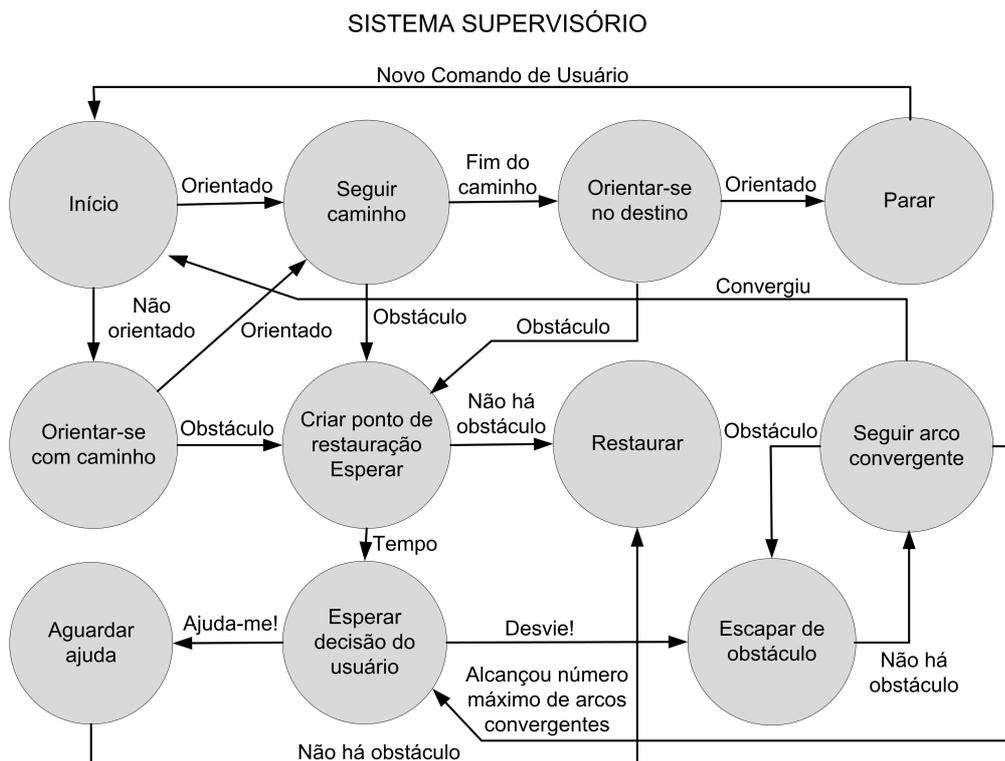


Figura 44: Máquina de estados finitos do sistema supervisório.

em guardar o estado anterior, que pode ser: *Seguir Caminho*, *Orientar-se com caminho* ou *Orientar-se no destino*. Já na outra ação (espera), a CRR é desacelerada até parar ($\sigma = 0$), prosseguindo em uma espera cronometrada (alguns segundos). Tal espera vem a ser um importante mecanismo para evitar a ação de escape ao detectar obstáculos dinâmicos, tais como pessoas transitando próximas ao veículo, os quais não impedem a navegação. Assim, se a CRR passar a não perceber o obstáculo dentro de um intervalo de tempo preestipulado, então o supervisório entra no estado *Restaurar*, que simboliza a volta ao estado em que o sistema estava antes que o obstáculo fosse identificado. Se, por outro lado, o tempo de espera se esgota e o supervisório continua tendo a confirmação de obstáculo presente, então ele entra no estado *Esperar decisão do usuário*.

Esperar decisão do usuário consiste em um estado interessante, pois nele o sistema abre um canal de comunicação bidirecional com o usuário. Como mostra o Capítulo 1, a comunicação entre usuário e CRR é facilitada pelo uso de símbolos pictográficos dispostos em um PDA, onde cada símbolo está relacionado a um comando de usuário. Assim, o sistema supervisório é capaz de solicitar a opinião do usuário (através de solicitação ao PDA para exibição de determinado(s) símbolo(s) pictográfico(s)) e receber um comando (associado a um símbolo pictográfico) equivalente a tal opinião. A grande vantagem desse

mecanismos é que com ele reduz-se a complexidade do sistema necessário para executar manobras de desvio.

Uma manobra de desvio não é tão trivial quanto parece. Para executá-la com eficiência, o sistema deve não somente detectar a presença do obstáculo, mas avaliar todo o entorno. Para tornar isso mais claro, considera-se o seguinte caso: a CRR se depara com um obstáculo próximo a uma porta, bloqueando qualquer possibilidade de passagem. Para um sistema baseado em inteligência artificial, pode ser bastante custoso e complexo identificar que a porta está, de fato, bloqueada, enquanto que para uma pessoa (o usuário da CRR, por exemplo), trata-se de uma tarefa muito simples, bastando que o sistema solicite sua opinião.

No sistema em questão, exibem-se três opções na tela do PDA (solicitação de opinião do usuário), a saber: *desviar pela direita*, *desviar pela esquerda* e *ajuda-me!*. Selecionando uma das duas primeiras opções, o usuário está dizendo ao sistema que não só deseja que o veículo proceda com a manobra de fuga, mas que a faça por um lado específico, pois o usuário é capaz de avaliar com mais eficiência do que qualquer sistema artificial inteligente qual lado é a melhor opção de manobra. Por outro lado, se o usuário seleciona a opção de ajuda, é porque ele chegou à conclusão de que a manobra de desvio não pode ser realizada.

Assim, a decisão do usuário leva o sistema supervisório a um dos dois estados: *Aguardar ajuda* ou *Escapar de obstáculo*. No primeiro, a CRR permanece parada e emitindo um sinal sonoro, de modo que se o obstáculo é uma pessoa, esta poderá dar passagem ao veículo, e se não, se for uma mobília, por exemplo, alguém próximo pode escutar o pedido de auxílio, e remover a obstrução. Em ambas as situações, o sistema supervisório entrará no estado *Restaurar* (já comentado) assim que não houver obstáculos.

Na sequência, estando o supervisório no estado *Escapar de obstáculo*, o sistema de controle dará início à manobra de escape ($\sigma = 3$), e somente a interromperá quando o obstáculo for vencido. Nesse caso, o supervisório transita para o estado *Seguir arco convergente*, onde é gerado um arco curvilíneo que conecta o veículo móvel ao caminho de referência (veja a Seção 2.5), prosseguindo com a manobra de retorno ao caminho de referência ($\sigma = 4$) através do arco introduzido. Durante tal manobra, duas coisas poderão acontecer: o veículo alcança o caminho de referência original, o que faz com que o supervisório passe para o estado *Início* ($\sigma = 1$); ou então, o veículo volta a detectar obstáculos, o que faz com que o supervisório retorne ao estado *Escapar de obstáculo*. Percebe-se, portanto, a existência de um ciclo estabelecido por uma possível alternância entre os estados *Escapar de obstáculo* e *Seguir arco convergente*, onde cada volta em tal

ciclo produz um novo arco convergente (conforme a Seção 2.5). Tal mecanismo é de extrema importância para o propósito desta tese, pois ele evita que o sistema solicite constantemente a opinião do usuário, o qual supõe-se possuir uma grande dificuldade em gerar comandos para o sistema.

Entretanto, tendo em vista a possibilidade de o sistema ficar preso em tal ciclo, seja por uma mudança inesperada na configuração do ambiente ou seja por um equívoco do usuário ao gerar o comando de solicitação de desvio, adicionou-se um mecanismo de contagem de voltas do referido ciclo, de modo que ao estabelecer um número máximo de voltas (ou número máximo de arcos convergentes gerados), é possível interromper a alternância entre os estados *Escapar de obstáculos* e *Seguir arco convergente*, remetendo-se para o estado *Esperar decisão do usuário*, onde novos comandos poderão ser emitidos.

2.6.2 Estabilidade da Comutação

Percebe-se que a comutação entre controladores é a base do sistema de navegação aqui proposto. Embora os controladores de seguimento de caminho (Seção 2.1), de orientação (Seção 2.3), e de posicionamento (Subseção 2.4.2) utilizados sejam comprovadamente estáveis, é possível que a comutação entre um e outro controlador torne o sistema instável¹ (LIBERZON, 2003). Logo, é de extrema importância a verificação da estabilidade da comutação entre controladores, o que pode ser verificado a partir dos teoremas seguintes:

Teorema 2.1. (LIBERZON, 2003): *Seja uma família f_p , $p \in P$ de funções (pelo menos localmente Lipschitz) de \mathbb{R}^n a \mathbb{R}^n , onde P é um conjunto de índices, a qual dá origem a uma família de subsistemas*

$$\dot{\mathbf{x}} = f_p(\mathbf{x}) \quad (2.44)$$

evoluindo em \mathbb{R}^n . Se todos os subsistemas da família (2.44) compartilham uma função de Lyapunov comum, então o sistema comutado (2.44) é estável.

Prova. A prova do Teorema 2.1 é idêntica àquela apresentada no Apêndice A.3 que considera o método direto de Lyapunov. Isto porque a taxa de decremento da função comum de Lyapunov não é afetada pela comutação (LIBERZON, 2003). \square

Teorema 2.2. (LIBERZON, 2003): *Seja (2.44) uma família finita de sistemas estáveis e V_p , $p \in P$ uma família de funções de Lyapunov correspondentes. Suponha que existe uma família de funções contínuas definidas positivas W_p , $p \in P$ com a propriedade que para*

¹A recíproca também pode ser verdadeira, isto é, a comutação pode estabilizar um sistema composto de subsistemas instáveis.

cada par de tempos de comutação (t_i, t_j) , $i < j$ tal que $\sigma(t_i) = \sigma(t_j) = p \in P$ e $\sigma(t_k) \neq p$ para $t_i < t_k < t_j$, tem-se

$$V_p(\mathbf{x}(t_j)) - V_p(\mathbf{x}(t_i)) \leq -W_p(\mathbf{x}(t_i)). \quad (2.45)$$

Então, o sistema comutado (2.44) é estável.

Prova. A prova deste teorema pode ser vista em (LIBERZON, 2003). \square

Logo, para se provar a estabilidade de um sistema comutável, deve-se, primeiramente, tentar aplicar o Teorema 2.1. Se este teorema falha, então tenta-se aplicar o Teorema 2.2. Se ambos os teoremas falham, então nada se pode concluir sobre a estabilidade da comutação do sistema tal como proposto.

No caso em questão, as comutações existentes resumem-se na alternância entre os controladores de orientação, de posicionamento e de seguimento de caminho. A aplicação do Teorema 2.1 exige a avaliação das funções de Lyapunov utilizadas para se provar a estabilidade de cada sistema de controle, as quais são, por conveniência, mostradas em (2.46), (2.47) e (2.48).

$$V_o = \frac{1}{2}\tilde{\psi}^2 \quad (2.46)$$

$$V_p = \frac{1}{2}\rho^2 + \frac{1}{2}\tilde{\psi}^2 \quad (2.47)$$

$$V_s = \frac{1}{2}(\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \int_0^{(\tilde{\psi}-\phi)} \frac{1}{\gamma}\varsigma d\varsigma \quad (2.48)$$

A Eq. (2.48) pode ser reescrita como

$$V_s = \frac{1}{2}\rho^2 + \int_0^{\tilde{\psi}} \frac{1}{\gamma}\varsigma d\varsigma = \frac{1}{2}\rho^2 + \frac{1}{2}\tilde{\psi}^2, \quad (2.49)$$

para $\phi = 0$ e $\gamma = 1$, onde $\rho^2 = \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2$ (veja (2.35)) e ς é uma variável independente.

Fazendo agora $\rho = 0$, então (2.49) fica como segue:

$$V_s = \frac{1}{2}\tilde{\psi}^2. \quad (2.50)$$

Observa-se, portanto, em (2.49) que V_p (a função de Lyapunov que permite provar a estabilidade do sistema de controle de posicionamento, dada em (2.47)) é um caso

particular de V_s (a função de Lyapunov que permite provar a estabilidade do sistema de controle de seguimento de caminho, dada em (2.48)), isto é, $V_p = V_s$ quando $\phi = 0$ e $\gamma = 1$. Observa-se em (2.50) que V_o (a função de Lyapunov que permite provar a estabilidade do sistema de controle de orientação) é, também, um caso particular de V_s , isto é, $V_o = V_s$ quando $\phi = 0$, $\gamma = 1$ e $\rho = 0$. Daí, conclui-se que (2.48) é uma função comum de Lyapunov. Portanto, de acordo com o Teorema 2.1, o sistema comutado é estável.

Nota 2.10. No caso em questão, não foi necessária a aplicação do Teorema 2.2. Entretanto, um caso onde tal teorema é utilizado pode ser visto em (TOIBERO; CARELLI; KUCHEN, 2007).

2.7 Discussão

Este capítulo foi dedicado a mostrar, em detalhes, todo o desenvolvimento do sistema de navegação autônoma para CRRs pensadas para pessoas com limitação motora severa. O sistema desenvolvido conta com um sistema de controle, formado por controladores de posicionamento, de orientação, e de seguimento de caminho, os quais são comprovadamente estáveis. O funcionamento do sistema de controle depende de comutações entre os distintos módulos de controle, as quais são coordenadas por um sistema supervisor. Logo, foi necessário provar formalmente que tais comutações não instabilizam o sistema.

Além do sistema de controle, foram mostrados ainda detalhes do desenvolvimento do sistema de geração de referências. Tal sistema baseia-se no conhecimento a priori do ambiente de navegação, na informação sobre o posicionamento atual da CRR, e em um comando de usuário que estabelece uma pose de destino para o veículo. Em um primeiro instante, supõe-se que o ambiente é estático, o que permite afirmar que as referências geradas guiam a CRR por rotas livres de obstáculos. Na sequência, consideram-se variações no mapa original, as quais podem vir a criar obstáculos para o deslocamento da CRR. Neste caso, as referências geradas já não guiam o veículo por rotas livres de obstáculos, mas sim por rotas com baixa possibilidade de se deparar com obstáculos. Com isso, um sistema de desvio de obstáculos e uma proposta de retorno estável à rota original (após o veículo móvel escapar do obstáculo) foram, então, implementados.

O sistema de navegação autônoma estaria completo se a cadeira de rodas robótica não fosse um sistema com efeitos dinâmicos altamente consideráveis. Sua enorme massa, somada à massa do usuário (que no melhor caso é similar à massa da CRR, podendo ser

até duas vezes maior), e o fato de possuir uma carga viva (a pessoa a bordo) que pode mudar de postura a qualquer momento, comprometendo todo o equilíbrio dinâmico do sistema, são exemplos do quão importante é o fato de considerar a dinâmica do sistema, o que é feito no próximo capítulo.

3 *Dinâmica da Cadeira de Rodas Robótica*

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton.

Uma CRR é um veículo móvel com comportamento dinâmico particular, pelo fato de transportar uma pessoa que representa uma carga pesada e móvel. Para se ter uma ideia, a massa nominal de uma cadeira de rodas elétrica comercial é de aproximadamente $65kg$, podendo transportar um usuário com massa de até $130kg$. Daí a grande necessidade de se considerar a presença do usuário durante a modelagem da dinâmica do veículo móvel, permitindo, assim, uma compensação mais precisa dos efeitos dinâmicos do sistema (o conjunto CRR mais usuário).

3.1 Modelagem

Considera-se a Fig. 45 para a obtenção de um modelo dinâmico que representa adequadamente uma CRR e seu usuário. Na figura, G é o centro de massa do sistema, Q é o ponto central do eixo virtual que une as rodas de tração da cadeira de rodas, $\mathbf{h} = [x \ y]^T$ é o ponto de interesse (o ponto que servirá como referência de controle cinemático), v' e \bar{v} são as velocidades longitudinal e lateral do centro de massa do sistema, v e ω são as velocidades linear e angular do sistema, e ψ é a orientação da cadeira de rodas com relação ao referencial inercial definido. A figura mostra ainda as distâncias a_h, b_1, b_2, c_1, c_2 e d , as forças longitudinais e laterais $F_{rrx'}$, $F_{rry'}$, $F_{rlx'}$ e $F_{rly'}$ atuando sobre as rodas de tração (rodas acopladas a motores elétricos independentes), as forças longitudinais e laterais $F_{clx'}$, $F_{cly'}$, $F_{crx'}$ e $F_{cry'}$ atuando sobre as rodas livres, além das forças externas $F_{ex'}$ e $F_{ey'}$ e do torque externo τ_p (incluindo os momentos gerados pelas forças devido o contato das rodas livres com a superfície de navegação).

Da Fig. 45, obtém-se a cinemática do ponto **h**, dada por

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi - \bar{v} \operatorname{sen} \psi - (a_h - b_1) \omega \operatorname{sen} \psi \\ \dot{y} = v \operatorname{sen} \psi + \bar{v} \cos \psi + (a_h - b_1) \omega \cos \psi \end{cases}, \quad (3.1)$$

sendo

$$v = v' + b_2 \omega. \quad (3.2)$$

De acordo com (ZHANG et al., 1998),

$$\begin{cases} v = (r(\omega_r + \omega_l) + (v_r^s + v_l^s)) / 2 \\ \omega = (r(\omega_r - \omega_l) + (v_r^s - v_l^s)) / d \\ \bar{v} = b_1 \omega + \bar{v}^s \end{cases}, \quad (3.3)$$

onde r é o raio das rodas de tração, ω_r e ω_l são as velocidades angulares das rodas de tração esquerda e direita, v_r^s e v_l^s são as velocidades de deslizamento longitudinal de tais rodas, e \bar{v}^s é a velocidade de deslizamento lateral de ambas as rodas de tração.

Substituindo a velocidade de deslizamento lateral, dada em (3.3), em (3.1), obtém-se o comportamento cinemático da cadeira de rodas, dado por

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi - a_h \omega \operatorname{sen} \psi + \delta_x \\ \dot{y} = v \operatorname{sen} \psi + a_h \omega \cos \psi + \delta_y \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}, \quad (3.4)$$

onde $\delta_x = -\bar{v}^s \operatorname{sen} \psi$ e $\delta_y = \bar{v}^s \cos \psi$ são distúrbios provocados pelo deslizamento lateral das rodas de tração do veículo móvel.

As equações de força e momento, dadas por

$$\sum F_{x'} = 0 \Rightarrow m(\dot{v}' - \bar{v} \omega) = F_{rlx'} + F_{rrx'} + F_{px'} \quad (3.5)$$

$$\sum F_{y'} = 0 \Rightarrow m(\dot{\bar{v}} + u' \omega) = F_{rly'} + F_{rry'} + F_{py'} \quad (3.6)$$

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow I_z \dot{\omega} = \frac{d}{2} (F_{rrx'} - F_{rlx'}) + b_2 (F_{rrx'} + F_{rlx'}) - b_1 (F_{rly'} + F_{rry'}) + \tau_p, \quad (3.7)$$

descrevem o comportamento dinâmico do sistema, onde

$$\begin{cases} F_{px'} = F_{clx'} + F_{crx'} + F_{ex'} \\ F_{py'} = F_{cly'} + F_{cry'} + F_{ey'} \end{cases} \quad (3.8)$$

são forças externas causadoras de distúrbios, m é a massa total do sistema e I_z é o momento de inércia no eixo vertical localizado em G .

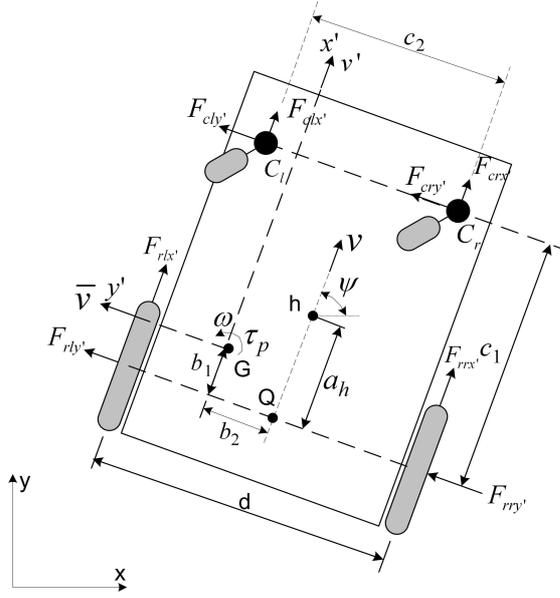


Figura 45: Descrição de efeitos cinemáticos e dinâmicos sobre uma CRR.

Os motores da cadeira de rodas são modelados como segue:

$$\begin{cases} \tau_r = (u_r - k_b \omega_r) k_a / R_a \\ \tau_l = (u_l - k_b \omega_l) k_a / R_a \end{cases}, \quad (3.9)$$

onde u_r e u_l são as tensões de entrada aplicadas aos motores CC direito e esquerdo, k_b é igual à constante de tensão dos motores multiplicada pela relação de transmissão entre engrenagens, R_a é a resistência elétrica dos motores, τ_r e τ_l são os torques dos motores direito e esquerdo multiplicados pela relação de transmissão entre engrenagens, e k_a é a constante de torque, também multiplicada pela relação de transmissão entre engrenagens.

Nota 3.1. As indutâncias dos motores são desprezadas por serem de baixo valor.

A dinâmica entre motores e as respectivas rodas por eles acionadas é descrita pelas equações

$$\begin{cases} I_e \dot{\omega}_r + B_e \omega_r = \tau_r - F_{rrx'} r \\ I_e \dot{\omega}_l + B_e \omega_l = \tau_l - F_{rlx'} r \end{cases}, \quad (3.10)$$

onde I_e e B_e são o momento de inércia e o coeficiente de fricção viscosa de cada combinação rotor-transmissão-roda.

A velocidade angular de cada roda de tração da CRR é controlada por controladores PID. Entretanto, o efeito integrativo de tais controladores é desprezado, a fim de simplificar o modelo dinâmico do sistema. Logo, os controladores de baixo nível são modelados

como

$$\begin{cases} u_v = k_{PT}(v_{ref} - v_{me}) - k_{DT}\dot{v}_{me} \\ u_\omega = k_{PR}(\omega_{ref} - \omega_{me}) - k_{DR}\dot{\omega}_{me} \end{cases}, \quad (3.11)$$

onde k_{PT} , k_{PR} , k_{DT} e k_{DR} são ganhos constantes do controlador de baixo nível, v_{ref} e ω_{ref} são velocidades linear e angular geradas por um controlador dinâmico,

$$\begin{cases} v_{me} = (\omega_r + \omega_l) r/2 \\ \omega_{me} = (\omega_r - \omega_l) r/d \end{cases}, \quad (3.12)$$

são as velocidades linear e angular medidas na CRR, e

$$\begin{cases} u_v = (u_l + u_r)/2 \\ u_\omega = (u_r - u_l)/2 \end{cases}, \quad (3.13)$$

são as tensões elétricas geradas pelos controladores de baixo nível para controlar a velocidade de cada roda de tração.

Nota 3.2. Observa-se em (3.11) que as acelerações de referência \dot{v}_{ref} e $\dot{\omega}_{ref}$ para a cadeira de rodas são desprezadas, no intuito de se obter um modelo dinâmico mais simples.

Nota 3.3. As simplificações consideradas agregam incertezas não estruturadas ao modelo dinâmico da CRR, as quais devem ser levadas em conta pelo seu sistema de controle de alto nível.

Das duas primeiras expressões de (3.3), extraem-se

$$(\omega_r + \omega_l) = (2v - (v_r^s + v_l^s))/r \quad (3.14)$$

e

$$(\omega_r - \omega_l) = (d\omega - (v_r^s - v_l^s))/r. \quad (3.15)$$

Substituindo (3.14), (3.15) e a primeira derivada temporal de ambas as equações em (3.11), chega-se às relações

$$(u_r + u_l) = 2k_{PT}(v_{ref} - v + (v_r^s + v_l^s)/2) - 2k_{DT}(\dot{v} - (\dot{v}_r^s + \dot{v}_l^s)/2) \quad (3.16)$$

e

$$(u_r - u_l) = 2k_{PR}(\omega_{ref} - \omega + (v_r^s - v_l^s)/d) - 2k_{DR}(\dot{\omega} - (\dot{v}_r^s - \dot{v}_l^s)/d). \quad (3.17)$$

Na sequência, obtém-se as relações $(F_{rrx'} + F_{rlx'})$ e $(F_{rry'} + F_{rly'})$ de (3.5) e (3.6), respectivamente, enquanto que ao substituir (3.9) em (3.10) e subtrair a primeira expressão

resultante da segunda, obtém-se finalmente

$$(F_{rrx'} - F_{rlx'}) = \frac{k_a}{rR_a} (u_r - u_l) - \frac{k_a k_b}{rR_a} (\omega_r - \omega_l) - \frac{I_e}{r} (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_l) - \frac{B_e}{r} (\omega_r - \omega_l). \quad (3.18)$$

Logo, levando (3.15), (3.17) e (3.18) a (3.7), considerando ainda as velocidades v' e \bar{v} extraídas de (3.2) e (3.3), respectivamente, chega-se a

$$\omega_{ref} = \theta_2 \dot{\omega} + \theta_5 v \omega + \theta_6 \omega + \theta_8 (-\dot{v}) - \delta_\omega, \quad (3.19)$$

onde

$$\begin{cases} \theta_2 = \frac{k_{DR}}{k_{PR}} + \frac{R_a r}{k_{PR} k_a d} \left(\frac{I_e d^2}{2r^2} + I_z + m(b_1^2 + b_2^2) \right) \\ \theta_5 = \frac{R_a r b_1 m}{d k_{PR} k_a} \\ \theta_6 = 1 + \frac{d k_b}{2r k_{PR}} + \frac{R_a B_e d}{2r k_{PR} k_a} \\ \theta_8 = \frac{b_2 m R_a r}{k_a k_{PR} d} \end{cases} \quad (3.20)$$

e

$$\delta_\omega = \left(\frac{1}{d} + \frac{k_b}{2k_{PR} r} + \frac{R_a B_e}{2k_a k_{PR} r} \right) (v_r^s - v_l^s) + \left(\frac{k_{DR}}{d k_{PR}} + \frac{R_a I_e}{2k_a k_{PR} r} \right) (\dot{v}_r^s - \dot{v}_l^s) + \frac{r R_a}{d k_{PR} k_a} (\tau_p + b_1 F_{py'} - b_1 m \dot{v}^s - b_2 m \bar{v}^s \omega - b_2 F_{px'}). \quad (3.21)$$

Ao substituir, mais uma vez, (3.9) em (3.10) e por considerar desta vez a soma entre ambas as expressões resultantes, obtém-se agora

$$(F_{rrx'} + F_{rlx'}) = \frac{k_a}{rR_a} (u_r + u_l) - \frac{k_a k_b}{rR_a} (\omega_r + \omega_l) - \frac{I_e}{r} (\dot{\omega}_r + \dot{\omega}_l) - \frac{B_e}{r} (\omega_r + \omega_l). \quad (3.22)$$

Igualando (3.22) à força resultante ($F_{rrx'} + F_{rlx'}$) obtida a partir de (3.5), considerando ainda (3.14), (3.16) e as velocidades v' e \bar{v} extraídas de (3.2) e (3.3), respectivamente, chega-se à expressão

$$v_{ref} = \theta_1 \dot{v} + \theta_3 (-\omega^2) + \theta_4 v + \theta_7 (-\dot{\omega}) - \delta_v, \quad (3.23)$$

onde

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{k_{DT}}{k_{PT}} + \frac{R_a r}{2k_{PT} k_a} \left(\frac{2I_e}{r^2} + m \right) \\ \theta_3 = \frac{R_a r m b_1}{2k_{PT} k_a} \\ \theta_4 = 1 + \frac{k_b}{k_{PT} r} + \frac{B_e R_a}{k_{PT} k_a r} \\ \theta_7 = \frac{b_2 m R_a r}{2k_{PT} k_a} \end{cases} \quad (3.24)$$

e

$$\delta_v = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_b}{2k_{PT} r} + \frac{R_a B_e}{2k_a k_{PT} r} \right) (v_r^s + v_l^s) + \left(\frac{k_{DT}}{2k_{PT}} + \frac{R_a I_e}{2k_a k_{PT} r} \right) (\dot{v}_r^s + \dot{v}_l^s) + \frac{r R_a}{2k_{PT} k_a} (m \bar{v}^s \omega + F_{px'}). \quad (3.25)$$

Logo, a dinâmica da CRR é completamente descrita pelas equações (3.19) e (3.23), as quais são equações linearmente parametrizadas, sendo que (3.20) e (3.24) descrevem

os parâmetros puramente dependentes de características físicas do sistema, enquanto que (3.21) e (3.25) descrevem parâmetros os quais dependem de velocidades e acelerações devido ao deslizamento das rodas de tração da CRR, bem como de forças e torque externos.

É conveniente representar o modelo dinâmico da CRR, dado por (3.19) e (3.23), na forma matricial, a saber,

$$\mathbf{T}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}})\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\delta} = \mathbf{u}_{ref}(t), \quad (3.26)$$

onde

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \dot{v} & 0 & -\omega^2 & v & 0 & 0 & -\dot{\omega} & 0 \\ 0 & \dot{\omega} & 0 & 0 & v\omega & \omega & 0 & -\dot{v} \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_8]^T, \ \boldsymbol{\delta} = [-\delta_v \ -\delta_\omega]^T, \ \mathbf{u} = [v \ \omega]^T \text{ e } \mathbf{u}_{ref} = [v_{ref} \ \omega_{ref}]^T,$$

ou na forma

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}}(t) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) + \boldsymbol{\delta} = \mathbf{u}_{ref}(t), \quad (3.28)$$

com

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \theta_1 & -\theta_7 \\ -\theta_8 & \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

e

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\omega^2 & v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v\omega & \omega & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta}. \quad (3.30)$$

3.1.1 Identificação de Parâmetros e Validação do Modelo

O modelo dinâmico apresentado em (3.26) é constituído por duas classes de parâmetros: os identificáveis (presentes no vetor $\boldsymbol{\theta}$) e os não identificáveis (presentes no vetor $\boldsymbol{\delta}$). Os parâmetros não identificáveis do modelo nada mais são do que descrições analíticas que consideram prováveis fontes de distúrbios (deslizamento das rodas de tração, forças externas e torque externo) em uma CRR.

Distúrbios estão sempre presentes em sistemas reais. Eles não obedecem uma relação conhecida de causa e efeito, fundamental para o processo de identificação, de modo que são desprezados em tais processos (ASTROM; WITTENMARK, 2008). Neste caso, o modelo dado em (3.26) pode ser aproximado para

$$\mathbf{T}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{Y}, \quad (3.31)$$

onde (3.31) consiste em uma estrutura clássica conhecida na literatura como *modelo de regressão* (ASTROM; WITTENMARK, 2008), sendo que \mathbf{T} recebe o nome de matriz de

regressão, $\mathbf{Y} = \mathbf{u}_{ref}$ é o vetor de saída e $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor com os parâmetros que se deseja identificar.

O modelo de regressão tal como mostrado em (3.31) apresenta uma complicação prática para o caso da CRR utilizada, pois a matriz de regressão \mathbf{T} depende de medidas de velocidade e aceleração do veículo móvel, como pode-se observar em (3.27). O sistema de odometria da cadeira de rodas considerada permite boas medições de sua pose e sua velocidade. Entretanto, as acelerações envolvidas a cada instante só são disponíveis através de estimativas, pelo fato de o veículo não estar equipado com sensores capazes de medir acelerações diretamente. O grande problema é que tais estimativas são extremamente ruidosas, o que pode provocar erros elevados de identificação.

Para resolver tal problema, adota-se aqui uma proposta apresentada inicialmente em (REYES; KELLY, 1997), que consiste em promover uma filtragem em (3.31), a partir de um filtro linear de primeira ordem. Assim, passa-se a considerar

$$\mathbf{T}_F \boldsymbol{\theta} = \mathbf{Y}_F \quad (3.32)$$

em vez de (3.31), onde \mathbf{T}_F é a matriz de regressão filtrada e \mathbf{Y}_F é o vetor de saída filtrado.

Logo, a estimativa por mínimos quadrados é dada por (ASTROM; WITTENMARK, 2008)

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{T}_k^T \mathbf{T}_k)^{-1} \mathbf{T}_k^T \mathbf{Y}_k, \quad (3.33)$$

sendo que $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ é o vetor de parâmetros estimados, $\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_F(1) & \mathbf{T}_F(2) & \cdots & \mathbf{T}_F(k) \end{bmatrix}^T$ e $\mathbf{Y}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_F(1) & \mathbf{Y}_F(2) & \cdots & \mathbf{Y}_F(k) \end{bmatrix}^T$, onde k é o número de amostras colhidas durante o processo de identificação.

De acordo com (ASTROM; WITTENMARK, 2008), os parâmetros estimados a partir de (3.33) convergem para os parâmetros reais, desde que o sistema seja persistentemente excitado. Neste caso, $\mathbf{T}_k^T \mathbf{T}_k$ será uma matriz quadrada não singular. Por outro lado, encontrar sinais que excitam um determinado sistema de forma persistente pode não ser uma tarefa fácil, uma vez que, em geral, não se sabe ao certo a quais frequências o sistema é capaz de responder efetivamente. Com isto em mente, optou-se por considerar sinais de velocidades linear e angular com variações em degrau, sabendo que todo o espectro de frequência se apresenta em tais variações. A Fig. 46 apresenta os sinais de excitação com os respectivos sinais de resposta. A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros identificados para os casos onde a CRR opera sem usuário e quando ela transporta um usuário de 125kg (Fig. 47), próxima da capacidade máxima do veículo, que é de 130kg.

Vale ressaltar que os parâmetros do modelo são linearmente independentes, de modo que não ocorre o problema indesejável de sobreparametrização (fenômeno responsável por fazer com que a qualidade da identificação paramétrica passe a depender do conjunto de dados de medição utilizado (ASTROM; WITTENMARK, 2008)). Um procedimento simples utilizado para verificar tal independência linear dos parâmetros dinâmicos da CRR é apresentado no Apêndice B.

Nota 3.4. Observe que a estimativa dos parâmetros dinâmicos, a partir de (3.33), consiste em um processo *offline*, de modo que possíveis erros paramétricos (também chamados de incertezas estruturadas) devem ser considerados por um sistema de controle de alto nível.

Tabela 3: Parâmetros Identificados

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
Sem usuário	0,4042	0,1877	-0,0069	1,0261	0,0405	0,9239	-0,0304	-0,1162
Usuário pesado	0,3241	0,0120	0,0092	0,9969	0,0634	0,9898	-0,0562	-0,0002

Sinais de excitação diferentes daqueles utilizados na identificação foram utilizados na sequência com o intuito de validar o modelo dinâmico obtido (AGUIRRE, 2000). A Fig. 48 apresenta a resposta da CRR e do modelo dado em (3.26). Observa-se que o modelo obtido responde às excitações de forma semelhante à CRR, embora com um pequeno atraso da velocidade linear, o que pode ser explicado pelas simplificações consideradas no modelo de controle de baixo nível. Tal imprecisão é compensada pelo controlador dinâmico adaptativo robusto apresentado na Seção 3.2.

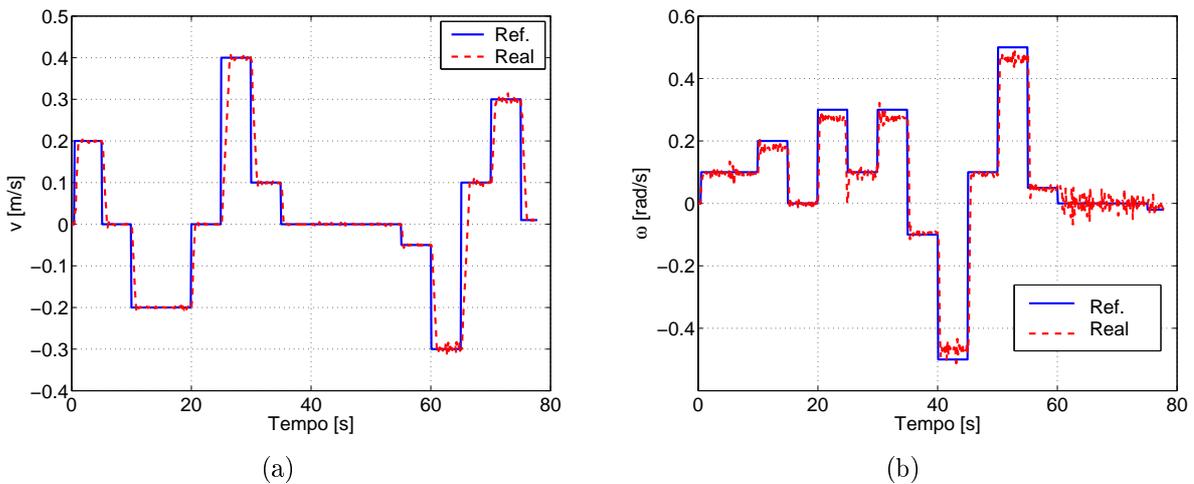


Figura 46: Excitações e respostas de sistema: a) velocidade linear b) velocidade angular.



Figura 47: Cadeira de rodas robótica transportando uma pessoa.

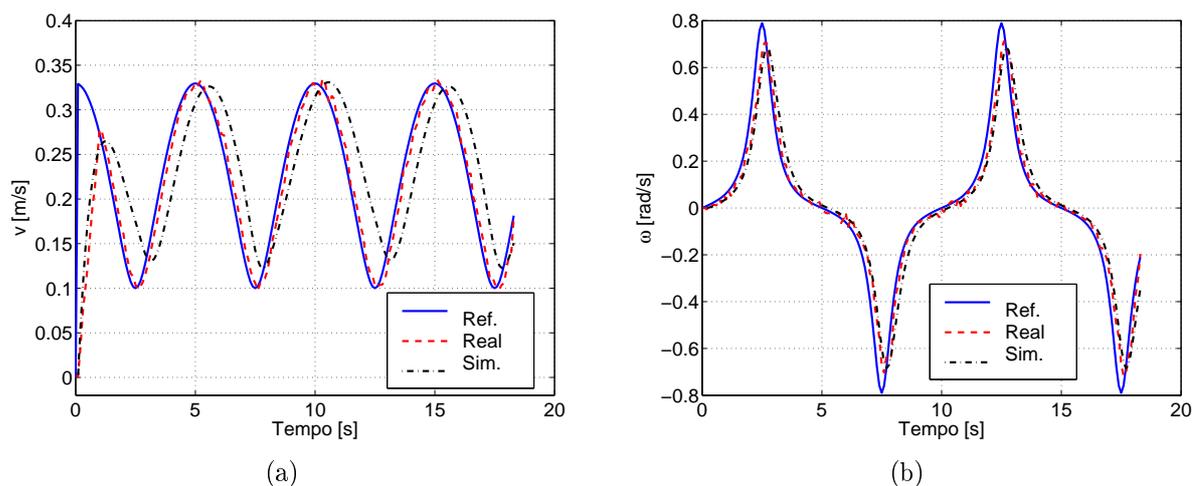


Figura 48: Excitações e respostas reais e simuladas: a) velocidade linear b) velocidade angular.

3.1.2 Propriedades do Modelo

As expressões analíticas dos parâmetros dinâmicos identificáveis da CRR, dados por (3.20) e (3.24), permitem observar algumas propriedades fundamentais para a análise de estabilidade do controlador dinâmico proposto na Seção 3.2. Tais propriedades são apresentadas na sequência.

Propriedade 3.1. $\theta_1 > 0$, $\theta_2 > 0$, $\theta_4 > 0$ e $\theta_6 > 0$.

Propriedade 3.2. $\text{sign}(\theta_3) = \text{sign}(\theta_5)$ e $\text{sign}(\theta_7) = \text{sign}(\theta_8)$.

Propriedade 3.3. $\text{sign}(\dot{\theta}_7) = \text{sign}(\dot{\theta}_8)$.

As Propriedades (3.1)-(3.3) são facilmente comprovadas através de uma inspeção nas expressões analíticas dos parâmetros. Deve-se considerar que, com exceção de b_1 e b_2 , os quais podem assumir valores positivos, negativos e nulos, todas as demais constantes e variáveis físicas envolvidas são positivas. Além disso, as distâncias b_1 e b_2 são variáveis reais que determinam a posição do centro de massa do sistema em função do deslocamento do usuário a bordo da CRR, o que justifica a Propriedade 3.3.

Propriedade 3.4. $\theta_1\theta_2 > \theta_7\theta_8$.

Prova. Considere a matriz \mathbf{M} dada em (3.29). Então,

$$\det(\mathbf{M}) = \theta_1\theta_2 - \theta_7\theta_8 = \left(\frac{k_{DT}}{k_{PT}} + \frac{R_a I_e}{r k_{PT} k_a} \right) \left(\frac{k_{DR}}{k_{PR}} + \frac{R_a r}{d k_{PR} k_a} \left(\frac{I_e d^2}{2r^2} + I_z + m(b_1^2 + b_2^2) \right) \right) > 0, \quad (3.34)$$

uma vez que somente termos positivos estão envolvidos. Logo, $\theta_1\theta_2 > \theta_7\theta_8$. \square

O fato de b_1 e b_2 poderem variar no tempo introduz, como consequência, a possibilidade de quase todos os parâmetros identificáveis também serem variantes no tempo, de modo que $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ e $\dot{\mathbf{M}}$ devem ser considerados não nulos.

As Propriedades (3.1)-(3.4) são utilizadas na sequência para verificar outras propriedades.

Propriedade 3.5. A matriz \mathbf{M} é diagonalizável e definida positiva.

Prova. Começa-se por verificar que \mathbf{M} é diagonalizável. Para isso, considera-se o seguinte lema.

Lema 3.1. (STRANG, 1988) *Uma matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é diagonalizável se, e somente se, todos os seus autovalores λ_i , $i = 1 \cdots n$ são reais e diferentes entre si.*

Prova. A demonstração do Lema 3.1 pode ser vista em (STRANG, 1988). \square

Os autovalores da matriz \mathbf{M} dada em (3.29) são

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{2} \left(\theta_1 + \theta_2 + \sqrt{(\theta_1 - \theta_2)^2 + 4\theta_7\theta_8} \right) \\ \lambda_2 = \frac{1}{2} \left(\theta_1 + \theta_2 - \sqrt{(\theta_1 - \theta_2)^2 + 4\theta_7\theta_8} \right) \end{cases}. \quad (3.35)$$

A Propriedade 3.2 garante que o termo dentro das raízes é positivo, de modo que tanto λ_1 quanto λ_2 são reais. Além disso, está claro em (3.35) que os referidos autovalores são distintos. Logo, de acordo com o Lema 3.1, \mathbf{M} é diagonalizável.

Para verificar que \mathbf{M} é uma matriz positiva, deve-se, primeiramente, ter em conta que \mathbf{M} é uma matriz não necessariamente simétrica. Em geral, \mathbf{M} é não-simétrica, o que torna necessária a introdução do seguinte lema.

Lema 3.2. *Seja $\mathbf{A} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ uma matriz não-simétrica. Então \mathbf{A} é definida positiva se, e somente se, seus autovalores λ_i , $i = 1 \cdots n$ são todos positivos e diferentes entre si.*

Prova. Como os autovalores de \mathbf{A} são todos reais e diferentes entre si, então \mathbf{A} é diagonalizável (veja o Lema 3.1), e sua forma diagonal é dada por (STRANG, 1988)

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{Q}, \quad (3.36)$$

onde $\mathbf{\Lambda} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ é uma matriz diagonal cujos elementos são os autovalores de \mathbf{A} , e $\mathbf{Q} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ é uma matriz ortogonal formada pelos autovetores \mathbf{x}_i , $i = 1 \cdots n$ de \mathbf{A} . Assim, se todos os autovalores de \mathbf{A} são positivos, então $\mathbf{\Lambda} > 0$ e $\mathbf{x}^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{x} > 0$, para todos os vetores \mathbf{x} não nulos. Portanto, a Eq. (3.36) pode ser reescrita como

$$\mathbf{x}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{Q} \mathbf{x} > 0. \quad (3.37)$$

Desde que \mathbf{Q} é uma matriz ortogonal, então $\mathbf{Q}^{-1} = \mathbf{Q}^T$. Ao fazer $\mathbf{y} = \mathbf{Q} \mathbf{x}$ em (3.37), obtém-se

$$\mathbf{y}^T \mathbf{A} \mathbf{y} > 0, \quad (3.38)$$

permitindo finalmente concluir que \mathbf{A} é definida positiva. \square

Agora, finaliza-se a verificação da Propriedade 3.5. Primeiramente, de acordo com a Propriedade 3.1, tem-se que λ_1 é positivo. Resta saber se λ_2 é também positivo. Para isso, a condição

$$\theta_1 + \theta_2 > \sqrt{(\theta_1 - \theta_2)^2 + 4\theta_7\theta_8} \quad (3.39)$$

deve ser verdadeira. Elevando ambos os lados de (3.39) ao quadrado, obtém-se $\theta_1\theta_2 > \theta_7\theta_8$. Observa-se, portanto, que a Propriedade 3.4 garante que a condição dada em (3.39) é verdadeira de fato, de modo que λ_2 é igualmente positivo. Logo, do Lema 3.2, conclui-se finalmente que \mathbf{M} é uma matriz positiva. \square

Propriedade 3.6. A matriz $\dot{\mathbf{M}}$ é diagonalizável.

Prova. A prova para esta propriedade é similar ao procedimento utilizado para provar parte da propriedade anterior. Entretanto, utiliza-se a Propriedade 3.3 em lugar da 3.2 para mostrar que o termo dentro das raízes de

$$\begin{cases} \lambda'_1 = \frac{1}{2} \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \sqrt{(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 + 4\dot{\theta}_7\dot{\theta}_8} \right) \\ \lambda'_2 = \frac{1}{2} \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \sqrt{(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 + 4\dot{\theta}_7\dot{\theta}_8} \right) \end{cases} \quad (3.40)$$

são positivos, de modo que λ'_1 e λ'_2 são autovalores reais e visivelmente distintos. \square

Nota 3.5. A Propriedade 3.6 é válida somente quando $\dot{\mathbf{M}} \neq 0$.

Propriedade 3.7. Cada vetor coluna que compõe a matriz \mathbf{T} , apresentada em (3.27), possui um elemento variável e um elemento nulo.

Nota 3.6. As propriedades apresentadas são referentes ao modelo dinâmico formado a partir de parâmetros reais e não pelos parâmetros estimados, os quais podem não respeitar tais propriedades por serem aproximações.

3.2 Projeto e Análise do Controlador Dinâmico

Supondo inicialmente que não há variação de parâmetros, então, por considerar o modelo dinâmico da CRR dado em (3.28), propõe-se a lei de compensação dinâmica

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}), \quad (3.41)$$

onde

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{u}}_{ref}^c + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{u}} \quad (3.42)$$

(com $\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_v & \sigma_\omega \end{bmatrix}^T$) são ações de controle linear que atuam sobre o erro de seguimento de velocidade $\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u}_{ref}^c - \mathbf{u}$, sendo $\mathbf{K} = \text{diag}(k_v, k_\omega) > 0$ uma matriz de ganho proporcional, e sendo $\mathbf{K}_r = \text{diag}(k_{rv}, k_{r\omega}) > 0$ a matriz de ganhos do termo de robustez, cujo objetivo é proteger o sistema de distúrbios, representados em (3.28) pelo vetor $\boldsymbol{\delta}$.

Vale ressaltar que o sobrescrito c em (3.42) indica a presença de sinais vindos de um controlador cinemático (projetos de controladores cinemáticos são apresentados no Capítulo 2), conforme ilustrado no diagrama de blocos da Fig. 49, onde \mathbf{x}_{ref} é o vetor com o objetivo de movimento cinemático e \mathbf{x} é o vetor que descreve a postura real do veículo móvel. Observa-se, ainda na figura, que o bloco *Lei de Ajuste de Parâmetros* é

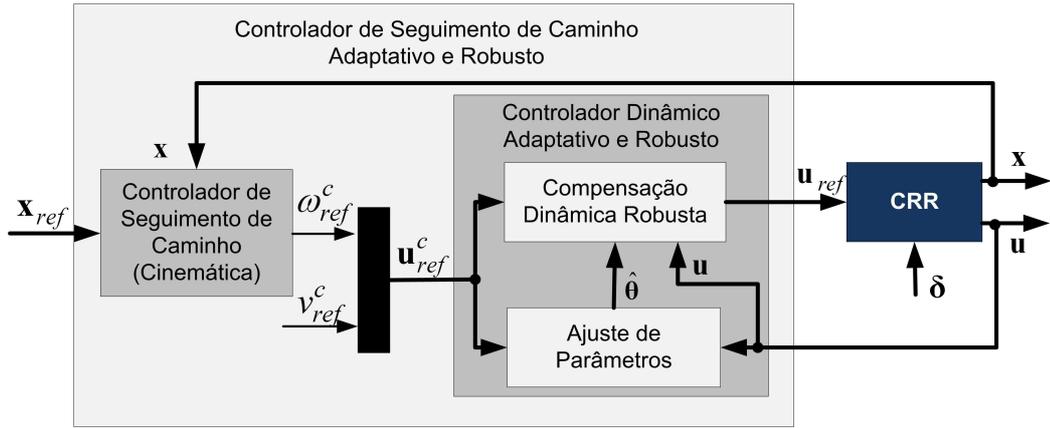


Figura 49: Diagrama de blocos da estrutura de controle.

desnecessário quando não há variação de parâmetros, tal como está sendo inicialmente suposto. Entretanto, essa suposição será relaxada na sequência, tornando necessária a capacidade de adaptação dinâmica.

Se se considera o modelo dinâmico tal como escrito em (3.26), tem-se que a lei de controle dada em (3.41) pode também ser escrita como

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{T}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma}) \boldsymbol{\theta} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}), \quad (3.43)$$

onde

$$\mathbf{T}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \sigma_v & 0 & -\omega^2 & v & 0 & 0 & -\sigma_\omega & 0 \\ 0 & \sigma_\omega & 0 & 0 & v\omega & \omega & 0 & -\sigma_v \end{bmatrix}.$$

Entretanto, a suposição inicial de que os parâmetros dinâmicos do sistema são constantes deve ser relaxada, uma vez que não se pode garantir que, por exemplo, a postura e a massa da pessoa sentada a bordo da CRR sejam as mesmas de quando o sistema foi identificado (ou seja, pode haver variações dinâmicas após um longo tempo de funcionamento). Logo, é desejável que o sistema seja capaz de adaptar-se a diferentes condições de funcionamento. Por esse motivo, considera-se a lei de controle dinâmico

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{T}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma}) \hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \quad (3.44)$$

ao invés daquela apresentada em (3.43), onde

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} \equiv \boldsymbol{\theta} + \tilde{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.45)$$

é o vetor de parâmetros estimados e $\tilde{\boldsymbol{\theta}} \in \mathfrak{R}^8$ é o vetor de erros paramétricos.

A Substituição de (3.45) em (3.44) resulta em

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{T}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{T}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \quad (3.46)$$

ou, como $\mathbf{T}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta}$ (da comparação entre (3.41) e (3.43)), então

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{T}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}). \quad (3.47)$$

De (3.28) e (3.47), obtém-se

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} + \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\delta} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{T}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}), \quad (3.48)$$

que é equivalente a

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{u}}) = \boldsymbol{\delta} - \mathbf{T}\tilde{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}). \quad (3.49)$$

De (3.42), tem-se que $\boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{u}} = \dot{\tilde{\mathbf{u}}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{u}}$, que substituído em (3.49) resulta na equação de erro em malha fechada

$$\dot{\tilde{\mathbf{u}}} = \mathbf{M}^{-1} \left(\boldsymbol{\delta} - \mathbf{T}\tilde{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \right) - \mathbf{K}\tilde{\mathbf{u}}. \quad (3.50)$$

Nota-se que como $\mathbf{M} > 0$ (Propriedade 3.5), então $\exists \mathbf{M}^{-1}$, isto é, a equação de erro dada em (3.50) é não-singular.

É mostrado na sequência que a lei de controle dinâmico (3.44) pode levar o erro em malha fechada a um valor limitado, desde que uma lei de adaptação de parâmetros seja convenientemente adotada. Para isso, define-se a matriz

$$\mathbf{P} \equiv \begin{bmatrix} 2k_{PT} & 0 \\ 0 & dk_{PR} \end{bmatrix} > 0 \quad (3.51)$$

formada por parâmetros da CRR garantidamente constantes e positivos (ganhos do controlador de baixo nível).

Pode-se, então, verificar que o produto $\mathbf{P}\mathbf{M}$ resulta em uma matriz $\mathfrak{R}^{2 \times 2}$ não necessariamente simétrica, porém diagonalizável (veja o Lema 3.1) e definida positiva (Lema 3.2).

Proposição 3.1. $\mathbf{T}\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{P}\mathbf{T}$, onde $\bar{\mathbf{P}} = \text{diag}(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_8)$.

Prova. A Proposição 3.1 é diretamente verificada a partir da utilização da Propriedade 3.7. □

Como resultado da Proposição 3.1 e da definição em (3.51), tem-se que $\bar{\mathbf{P}} > 0$. Assim,

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \mathbf{M} \tilde{\mathbf{u}} + \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\mathbf{P}} \boldsymbol{\Xi} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.52)$$

é uma função candidata de Lyapunov, onde $\boldsymbol{\Xi} \in \mathfrak{R}^{8 \times 8}$ é uma matriz diagonal definida positiva. Então, a primeira derivada temporal de (3.52) é igual a

$$\dot{V} = \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \mathbf{M} \dot{\tilde{\mathbf{u}}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{M}} \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\mathbf{P}} \boldsymbol{\Xi} \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}. \quad (3.53)$$

Ao substituir (3.50) em (3.53), obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \mathbf{M} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \mathbf{T} \tilde{\boldsymbol{\theta}} - \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \mathbf{K}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) + \\ & \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\delta} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{M}} \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\mathbf{P}} \boldsymbol{\Xi} \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}, \end{aligned} \quad (3.54)$$

onde $\mathbf{P} \mathbf{M} \mathbf{K} \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$ é uma matriz não necessariamente simétrica, porém diagonalizável e definida positiva.

Proposição 3.2. A lei de adaptação de parâmetros

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = \boldsymbol{\Xi}^{-1} \left(\mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{u}} - \boldsymbol{\Gamma} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \right) \quad (3.55)$$

limita tanto os erros de seguimento quanto os erros paramétricos, onde $\boldsymbol{\Gamma} \in \mathfrak{R}^{8 \times 8}$ é uma matriz diagonal definida positiva.

Vale ressaltar que o primeiro termo de (3.55) é definido a partir de uma inspeção em (3.54), onde busca-se cancelar o termo dependente simultaneamente do erro de seguimento e do erro paramétrico (segundo termo de (3.54)). Por outro lado, o segundo termo de (3.55) introduz uma realimentação negativa dos parâmetros estimados, com o intuito de se evitar uma deriva paramétrica, a qual pode ser causada por erros de medição, ruído e/ou distúrbios (ASTROM; WITTENMARK, 2008). Tal técnica é conhecida na literatura como *modificação- σ* ou *leakage-term* (KAUFMAN; BARKANA; SOBEL, 1998; SASTRY; BODSON, 1989; NASISI; CARELLI, 2003).

Prova. Como a dinâmica do sistema (CRR mais usuário) pode variar no tempo, então, de (3.45) tem-se que

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = \hat{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} - \dot{\boldsymbol{\theta}}. \quad (3.56)$$

Substituindo (3.55) em (3.56), e considerando ainda (3.45), obtém-se

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = \boldsymbol{\Xi}^{-1} \left(\mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{u}} - \boldsymbol{\Gamma} \tilde{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\theta} \right) - \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (3.57)$$

que é levada a (3.54), resultando em

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{H} \tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\boldsymbol{\Gamma}} \tilde{\boldsymbol{\theta}} - \tilde{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{K}}_r \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) + \tilde{\mathbf{u}}^T \bar{\boldsymbol{\delta}} - \\ & \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\boldsymbol{\Gamma}} \dot{\boldsymbol{\theta}} - \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \bar{\boldsymbol{\Xi}} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}}^T \boldsymbol{\Pi} \tilde{\mathbf{u}}, \end{aligned} \quad (3.58)$$

onde $\mathbf{H} = \mathbf{P}\mathbf{M}\mathbf{K}$, $\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{P}\dot{\mathbf{M}}$, $\bar{\boldsymbol{\Gamma}} = \bar{\mathbf{P}}\boldsymbol{\Gamma}$, $\bar{\mathbf{K}}_r = \mathbf{P}\mathbf{K}_r$, $\bar{\boldsymbol{\delta}} = \mathbf{P}\boldsymbol{\delta}$ e $\bar{\boldsymbol{\Xi}} = \bar{\mathbf{P}}\boldsymbol{\Xi}$.

Define-se, então, as constantes $\mu_{Hmin} = \sqrt{\lambda_{min}(\mathbf{H}^T \mathbf{H})}$, $\mu_{Krmin} = \sqrt{\lambda_{min}(\bar{\mathbf{K}}_r^T \bar{\mathbf{K}}_r)}$, e $\mu_{\Gamma min} = \sqrt{\lambda_{min}(\bar{\boldsymbol{\Gamma}}^T \bar{\boldsymbol{\Gamma}})}$, as quais são valores singulares mínimos de \mathbf{H} , $\bar{\mathbf{K}}_r$ e $\bar{\boldsymbol{\Gamma}}$, além de $\mu_{\Gamma max} = \sqrt{\lambda_{max}(\bar{\boldsymbol{\Gamma}}^T \bar{\boldsymbol{\Gamma}})}$, $\mu_{\Xi max} = \sqrt{\lambda_{max}(\bar{\boldsymbol{\Xi}}^T \bar{\boldsymbol{\Xi}})}$ e $\mu_{\Pi max} = \sqrt{\lambda_{max}(\boldsymbol{\Pi}^T \boldsymbol{\Pi})}$, as quais são valores singulares máximos das matrizes $\bar{\boldsymbol{\Gamma}}$, $\bar{\boldsymbol{\Xi}}$ e $\boldsymbol{\Pi}$, sendo $\lambda_{min}(\cdot)$ e $\lambda_{max}(\cdot)$ o menor e o maior autovalor de uma matriz. Assim, tais valores singulares são convenientemente substituídos em (3.58), de modo que a desigualdade

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(\mu_{Hmin} - \frac{1}{2}\mu_{\Pi max}) \|\tilde{\mathbf{u}}\|^2 - \mu_{\Gamma min} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 - \\ & (\mu_{Krmin} - \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \|\bar{\boldsymbol{\delta}}\|) \|\tilde{\mathbf{u}}\| + \mu_{\Gamma max} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\boldsymbol{\theta}\| + \mu_{\Xi max} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\| \end{aligned} \quad (3.59)$$

é verificada, sendo $\|\cdot\|$ a norma euclideana de um vetor.

Considera-se o quadrado da diferença

$$\left(\frac{1}{\xi} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| - \xi \|\boldsymbol{\theta}\| \right)^2 = \frac{1}{\xi^2} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 - 2 \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\boldsymbol{\theta}\| + \xi^2 \|\boldsymbol{\theta}\|^2, \quad (3.60)$$

com $\xi \in \mathfrak{R}^+$, que pode ser reescrito como

$$\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\boldsymbol{\theta}\| = \frac{1}{2\xi^2} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 + \frac{\xi^2}{2} \|\boldsymbol{\theta}\|^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\xi} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| - \xi \|\boldsymbol{\theta}\| \right)^2. \quad (3.61)$$

Então, ao desprezar o termo negativo de (3.61), surge a desigualdade

$$\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\boldsymbol{\theta}\| \leq \frac{1}{2\xi^2} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 + \frac{\xi^2}{2} \|\boldsymbol{\theta}\|^2. \quad (3.62)$$

Ao aplicar um procedimento similar, pode-se concluir que

$$\|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\| \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\| \leq \frac{1}{2\chi^2} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 + \frac{\chi^2}{2} \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\|^2, \quad (3.63)$$

com $\chi \in \mathfrak{R}^+$.

Substituindo (3.62) e (3.63) em (3.59), obtém-se então

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \left(\mu_{Hmin} - \frac{1}{2} \mu_{\Pi max} \right) \|\tilde{\mathbf{u}}\|^2 - \left(\mu_{\Gamma min} - \frac{\mu_{\Gamma max}}{2\xi^2} - \frac{\mu_{\Xi max}}{2\chi^2} \right) \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 - \\ & \left(\mu_{K r min} - \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \|\bar{\boldsymbol{\delta}}\| \right) \|\tilde{\mathbf{u}}\| + \left(\mu_{\Gamma max} \frac{\xi^2}{2} \|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \mu_{\Xi max} \frac{\chi^2}{2} \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\|^2 \right). \end{aligned} \quad (3.64)$$

Definindo

$$\alpha_1 \equiv \mu_{Hmin} - \frac{1}{2} \mu_{\Pi max}, \quad (3.65)$$

$$\alpha_2 \equiv \mu_{\Gamma min} - \frac{\mu_{\Gamma max}}{2\xi^2} - \frac{\mu_{\Xi max}}{2\chi^2}, \quad (3.66)$$

$$\alpha_3 \equiv \mu_{K r min} - \text{sign}(\tilde{\mathbf{u}}) \|\bar{\boldsymbol{\delta}}\| \quad (3.67)$$

e

$$\zeta \equiv \mu_{\Gamma max} \frac{\xi^2}{2} \|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \mu_{\Xi max} \frac{\chi^2}{2} \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\|^2, \quad (3.68)$$

então

$$\dot{V} \leq -\alpha_1 \|\tilde{\mathbf{u}}\|^2 - \alpha_2 \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}\|^2 - \alpha_3 \|\tilde{\mathbf{u}}\| + \zeta. \quad (3.69)$$

Observa-se em (3.65) que a constante α_1 é positiva quando $\mu_{Hmin} > \frac{1}{2} \mu_{\Pi max}$, estabelecendo assim um valor mínimo para os ganhos proporcionais da ação de controle que atua sobre o erro de seguimento, dada em (3.42). Por outro lado, observa-se em (3.66) que a constante α_2 é positiva quando $\mu_{\Gamma min} - \frac{\mu_{\Gamma max}}{2\xi^2} > \frac{\mu_{\Xi max}}{2\chi^2}$ (o que é possível desde que ξ e χ sejam convenientemente selecionados), determinando um conjunto formado por um valor máximo para os ganhos da lei de adaptação de parâmetros apresentada em (3.55), e valores mínimo e máximo de ganhos relativos à *modificação- σ* aplicada a tal lei. Finalmente, observa-se em (3.67) que a constante α_3 é positiva quando $\mu_{K r min} > \|\bar{\boldsymbol{\delta}}\|$. Logo, estabelece-se, também, um valor mínimo para os ganhos relativos ao termo de robustez introduzido na lei de compensação dinâmica dada em (3.44), assumindo que os distúrbios amplificados, representados pelo vetor $\bar{\boldsymbol{\delta}}$, são fisicamente limitados, isto é, $\|\bar{\boldsymbol{\delta}}\| \leq \Delta$, com $0 \leq \Delta < \infty$.

Portanto, é possível garantir que os três primeiros termos de (3.69) são estritamente negativos, desde que os ganhos e as constantes do controlador dinâmico e da lei de adaptação de parâmetros sejam cuidadosamente escolhidos. Por outro lado, o quarto termo de (3.69) é estritamente positivo, conforme pode ser observado em (3.68). Porém, pode ser também observado que ζ depende dos parâmetros dinâmicos do sistema, $\boldsymbol{\theta}(t)$, e de sua derivada, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$, os quais são fisicamente limitados. Logo, ζ é uma variável limitada, o que permite concluir, a partir de (3.69), que $\tilde{\mathbf{u}}$ e $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ são erros finalmente limitados, o que significa dizer que o sistema é estável. \square

Observa-se em (3.68) que ζ pode ser feito tão pequeno quanto se queira, através da escolha de ganhos Ξ e Γ (relativos à lei de adaptação dada em (3.55)) cada vez menores. Entretanto, tais ganhos muito pequenos podem provocar, respectivamente, lentidão excessiva da adaptação paramétrica e deriva paramétrica (KAUFMAN; BARKANA; SOBEL, 1998; SASTRY; BODSON, 1989) devido a uma baixa robustez com relação a, por exemplo, erros de medição.

Percebe-se, também, que o controlador dinâmico adaptativo aqui proposto não garante que $\tilde{\theta}(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Em outras palavras, os parâmetros estimados podem convergir para valores distintos dos valores reais, a fim de fazer com que $\tilde{\mathbf{u}}$ convirja a um valor limitado.

Observa-se, finalmente, que a não variação paramétrica, isto é $\dot{\mathbf{M}} = 0$ e $\dot{\theta} = 0$, é um caso particular (neste caso, $\mu_{\Pi_{max}} = 0$ em (3.65) e o segundo termo de (3.68) é nulo), onde os erros de controle continuam sendo finalmente limitados.

4 *Resultados*

“Mostra-me um homem cem por cento satisfeito e eu mostrar-te-ei um fracassado.”

Thomas Edison.

A verificação de desempenho do sistema desenvolvido para navegação autônoma de cadeiras de rodas robóticas em ambientes conhecidos foi realizada a partir de simulações considerando um modelo o qual representa muito bem a dinâmica de um sistema composto por uma cadeira de rodas robótica (cujos processos de obtenção, identificação e verificação foram mostrados no capítulo anterior), além de experimentações em uma plataforma de testes. Dentre as diversas verificações possibilitadas pelos resultados obtidos, destacam-se: a capacidade de adaptação do sistema (durante seguimento de caminhos livres e com obstáculos) sob distintas condições de funcionamento dinâmico; e a robustez do sistema quanto a interferências provocadas pelo próprio usuário da CRR, bem como por eventos externos como, por exemplo, deslizamento das rodas de tração e atuação de forças externas.

Consideraram-se os parâmetros identificados quando a CRR operava a vazio e com carga elevada (veja a Tabela 3). Os parâmetros correspondentes à CRR funcionando a vazio são utilizados como estimativa paramétrica inicial, isto é $\hat{\theta}_1 = 0.4042$, $\hat{\theta}_2 = 0.1877$, $\hat{\theta}_3 = -0.0069$, $\hat{\theta}_4 = 1.0261$, $\hat{\theta}_5 = 0.0405$, $\hat{\theta}_6 = 0.9239$, $\hat{\theta}_7 = -0.0304$ e $\hat{\theta}_8 = -0.1162$. Já os parâmetros correspondentes ao veículo operando com carga elevada, isto é $\theta_1 = 0.3241$, $\theta_2 = 0.0120$, $\theta_3 = 0.0092$, $\theta_4 = 0.9969$, $\theta_5 = 0.0634$, $\theta_6 = 0.9898$, $\theta_7 = -0.0562$ e $\theta_8 = -0.0002$, são considerados no modelo utilizado durante as simulações. Tem-se, portanto, a presença de grandes incertezas paramétricas (também chamadas de incertezas estruturadas), as quais obrigam o sistema a adaptar-se, tendendo-se a uma melhor compensação dos efeitos dinâmicos modelados.

Foi utilizado o sistema de controle completo ilustrado no diagrama de blocos da Fig. 49 (mostrado em detalhes nos Capítulos 2 e 3). Assim, os controladores cinemáticos passam a ser geradores de sinais de referência para o controlador dinâmico mostrado em

(3.44), que conta com parâmetros estimados, cuja atualização é conforme a lei apresentada em (3.55). Os ganhos e constantes ajustados para o controlador cinemático no Capítulo 2 foram mantidos. Os ganhos do controlador dinâmico foram ajustados com base em uma variação aleatória de até 0,1% dos parâmetros do modelo que compõem a matriz \mathbf{M} , observando, a partir de (3.69), a condição necessária (mas não suficiente) para se concluir a estabilidade do sistema, isto é, $\alpha_1 > 0$. Os valores ajustados foram $k_v = 2$ e $k_\omega = 5$. Os ganhos associados à lei de atualização de parâmetros foram $\Xi_i = 0,01$ e $\Gamma_i = 0,001$, com $i = 1, 2, \dots, 8$.

As simulações também levaram em conta incertezas não estruturadas (devido a imprecisões do modelo considerado). Para isso, adicionou-se ruído branco de amplitude limitada às respostas de velocidades geradas pelo modelo. Os ganhos do termo de robustez da lei de controle dada em (3.44), isto é, os elementos não nulos de \mathbf{K}_r , foram então ajustados de modo a dominar tais incertezas causadoras de distúrbios. Trata-se de mais uma condição necessária para a estabilidade do sistema, isto é, $\alpha_3 > 0$ (veja (3.69)), sendo α_3 dada em (3.67). Os valores ajustados são $k_{rv} = 0,01$ e $k_{r\omega} = 0,01$.

A Fig. 50 mostra os resultados de uma simulação onde se considerou um caminho circular de referência de raio igual a $1m$. Observa-se na Fig. 50(a) que a CRR segue efetivamente o caminho de referência. Os erros de controle (erros de posição, orientação e de velocidades linear e angular) podem ser vistos na Fig. 50(b).

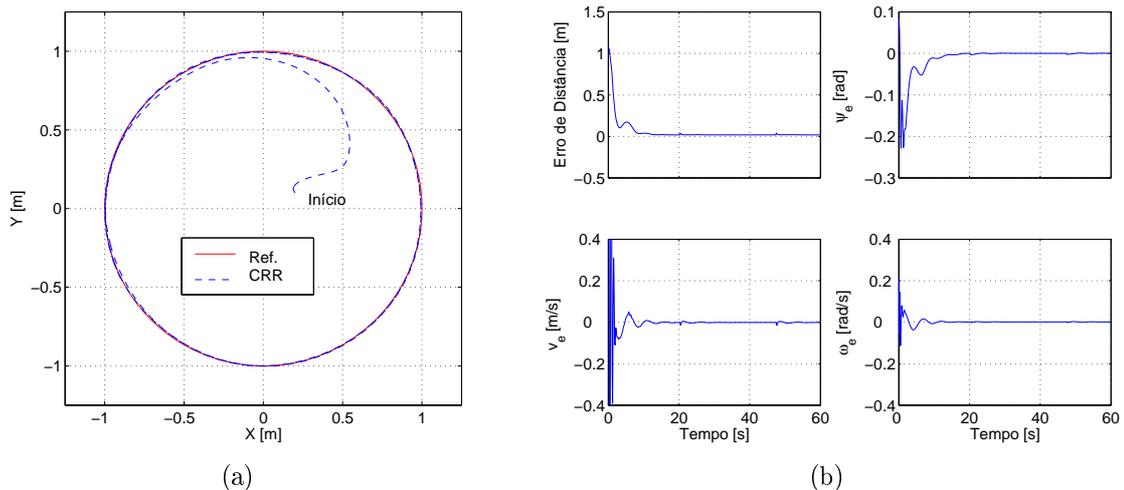


Figura 50: Simulação com lei de controle robusta considerando incertezas de modelo e parâmetros variantes no tempo: a) seguimento de caminho; b) erros de controle.

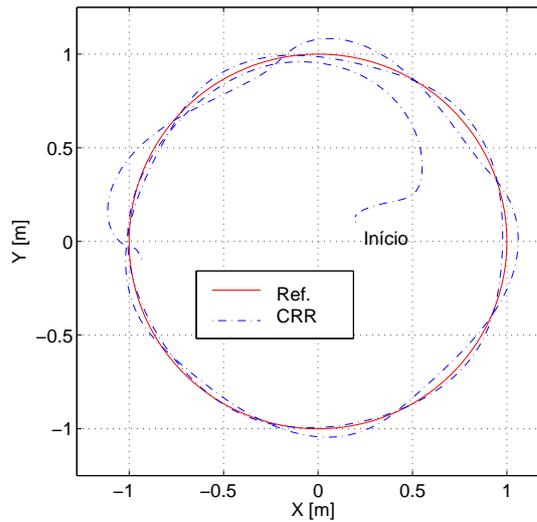


Figura 51: Simulação com lei de controle não robusta considerando incertezas de modelo e parâmetros variantes no tempo.

Na sequência, anulou-se o termo de robustez do compensador dinâmico (fazendo $k_{rv} = 0$ e $k_{r\omega} = 0$) e repetiu-se a simulação anterior. A Fig. 51 mostra uma degradação considerável na capacidade de a CRR seguir o caminho de referência. Tal degradação foi devido ao ruído embutido na resposta de velocidade do veículo móvel, o que mostra a grande importância da presença do termo de robustez na lei de compensação dinâmica.

Martins (2009) realizou comparações de experimentos feitos em robôs Pioneer considerando apenas a cinemática do veículo e considerando compensações de seus efeitos dinâmicos. Assim, o autor concluiu que, mesmo em veículos com massa tão pequena (o Pioneer transportando uma carga máxima pode chegar a ter uma massa de $32kg$) comparada a uma cadeira de rodas tripulada que pode chegar a ter uma massa de $195kg$, a não compensação da dinâmica do veículo pode aumentar consideravelmente os erros de controle. O autor conclui dizendo que embora seja possível ajustar os ganhos do controlador cinemático para minimização dos erros de controle, tal prática é não recomendada, pois pode afetar a estabilidade do sistema.

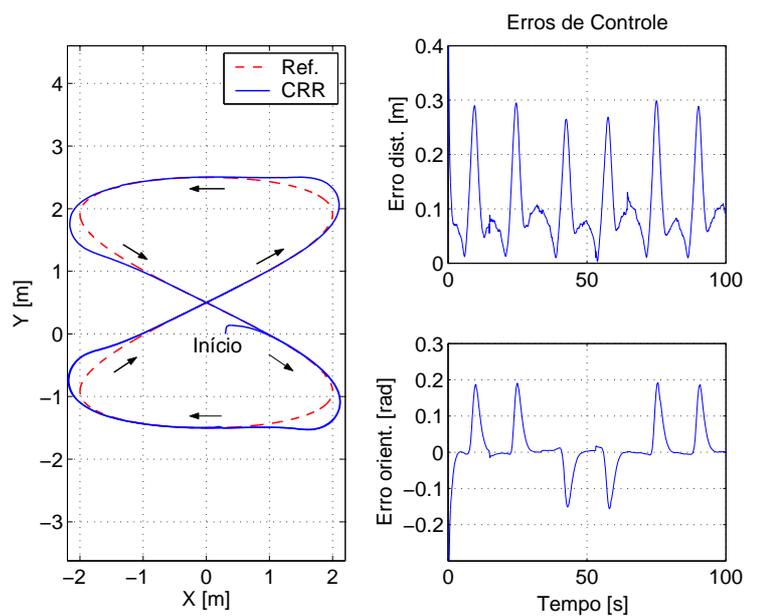
Um caminho em forma de oito foi também utilizado como referência. Tal tipo de caminho provoca uma excitação persistente da dinâmica do sistema, o que permite avaliar com maior precisão a capacidade de o sistema adaptar-se a mudanças paramétricas, as quais eram necessárias devido ao fato de os parâmetros estimados terem sido inicializados com os valores identificados quando a CRR operava a vazio, de forma semelhante ao considerado nas simulações. Além disso, foi solicitado ao usuário voluntário para se mover constantemente sobre o veículo móvel, ao mesmo tempo que forças limitadas eram aplicadas durante um curto período de tempo por uma pessoa externa a tal veículo, a fim

de provocar perturbações. Tais procedimentos tiveram a intenção de testar a robustez do sistema de controle em situações práticas de funcionamento.

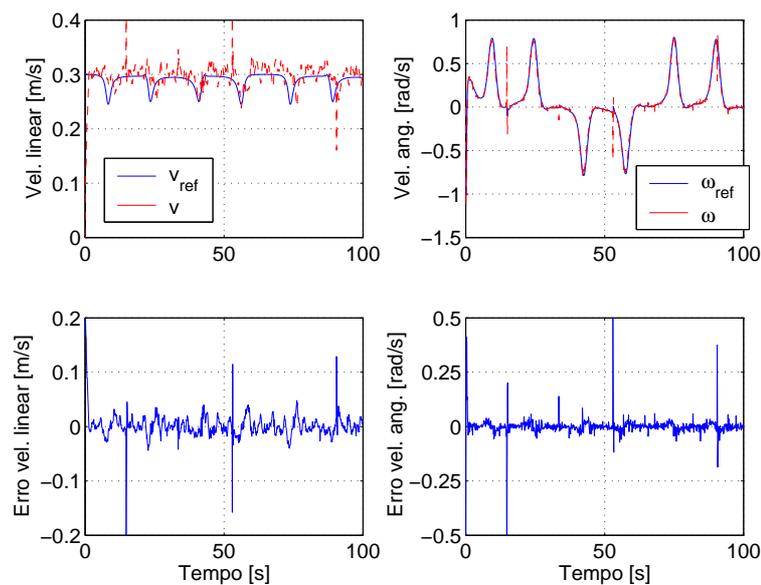
Vale ressaltar que apenas medidas obtidas a partir do sistema de odometria da CRR foram utilizadas nos experimentos aqui apresentados. A Fig. 52 mostra os resultados obtidos durante tais experimentos. Observa-se, na Fig. 52(a), que o controle da CRR durante o seguimento do caminho de referência é mantido, mesmo com todos os distúrbios e incertezas paramétricas introduzidos no sistema. Além disso, pode-se perceber na Fig. 52(b) que a medição de velocidade da CRR, a qual é baseada puramente na odometria do veículo, é bastante ruidosa. Ainda assim, o sistema de controle foi capaz de manter a estabilidade do veículo, conforme já mencionado. Outra questão importante que pode ser verificada nos resultados mostrados diz respeito ao aumento dos erros de controle em pontos do caminho seguido, os quais apresentam grande curvatura. Trata-se de uma característica do problema de seguimento de caminho para sistemas com restrições holonômicas, tal como é o caso da CRR. Entretanto, os erros de controle podem ser reduzidos a partir de um ajuste adequado da velocidade linear do veículo móvel, conforme pode ser visto nos resultados de um experimento, mostrados na Fig. 53. Daí, a grande importância de se considerar caminhos de referência tão suaves quanto possível, permitindo um avanço rápido rumo ao destino, mantendo os erros de controle dentro de limites aceitáveis.

A Fig. 54 mostra claramente que os parâmetros dinâmicos estimados ajustam-se efetivamente à medida que a CRR busca seguir seu caminho. Entretanto, a convergência paramétrica garantida durante a análise do controlador (veja o Capítulo 3) não é visível em tais resultados. Isto porque tal convergência é feita propositalmente lenta, como um compromisso para garantia de uma maior robustez com relação ao alto ruído de medição observado (Figs. 52(b) e 53(b)).

Foi realizada uma simulação por um período de tempo elevado, a fim de verificar a convergência paramétrica. A Fig. 55 mostra o resultado obtido, onde a resposta da primeira metade da simulação é apresentada no lado esquerdo da figura, enquanto que a resposta da segunda metade é apresenta no lado direito. Comparando ambas as respostas, observa-se que o lado direito apresenta um seguimento visivelmente melhor do caminho de referência. Isto porque os parâmetros estimados inicialmente são aqueles identificados para a CRR sem usuário, enquanto que os parâmetros considerados no modelo são aqueles identificados quando a cadeira levava uma pessoa pesada a bordo, ou seja, nos instantes iniciais da simulação havia uma incerteza paramétrica grande, que foi diminuindo à me-



(a)



(b)

Figura 52: Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto com velocidade linear alta: a) caminho seguido e erros de controle b) velocidades de excitação e de resposta, e erros de velocidade.

dida que o sistema se adaptava. Tal adaptação é evidenciada na Fig. 56, onde se percebe que todos os parâmetros estimados tendem a um valor limitado, conforme esperado.

Foram realizados, também, experimentos com a CRR transportando uma pessoa pesada ($125kg$), desta vez executando uma tarefa mais complexa de orientar-se inicialmente com o caminho, segui-lo até sua extremidade final e orientar-se uma vez mais, de forma a

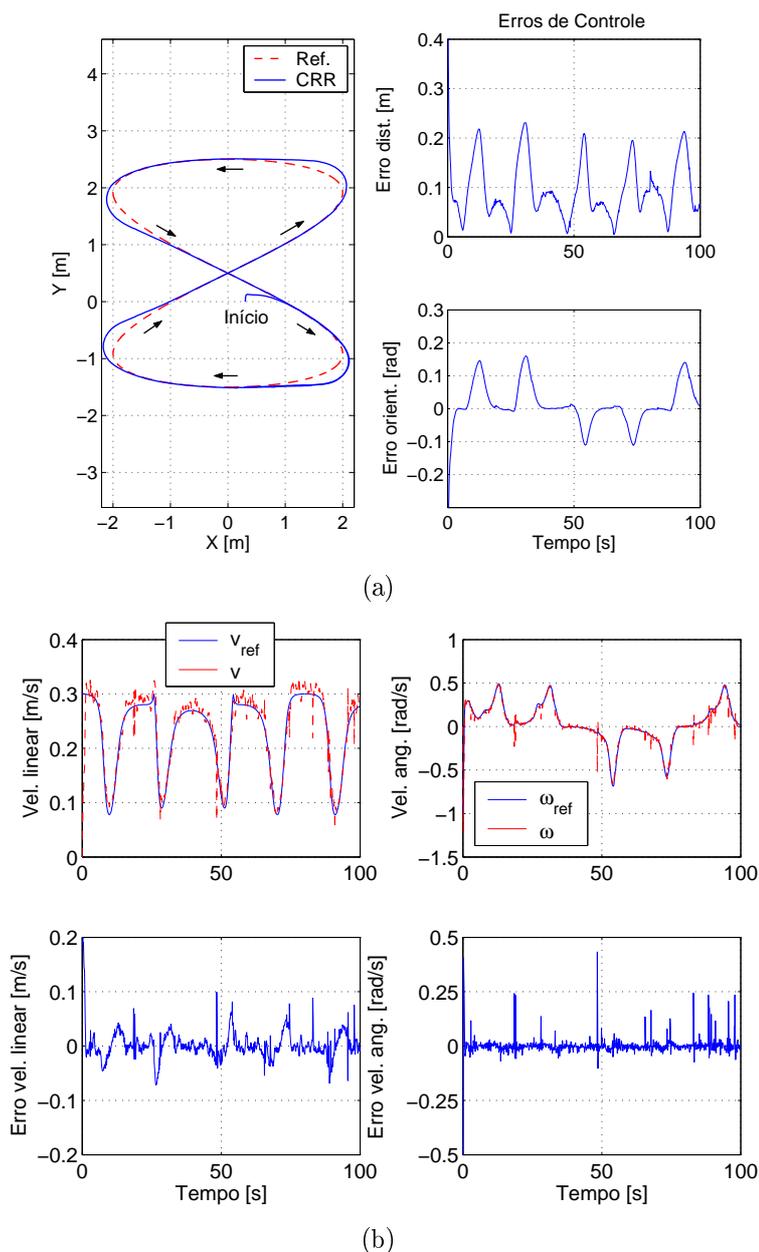


Figura 53: Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto com velocidade linear baixa: a) caminho seguido e erros de controle b) velocidades de excitação e de resposta, e erros de velocidade.

alcançar a pose desejada pelo usuário. A execução de cada parte da tarefa mencionada é visível na Fig. 57. A Fig. 58 apresenta alguns gráficos que permitem avaliar a evolução do sistema de controle, onde pode-se observar que a CRR alcança a pose final com um erro de distância de aproximadamente $0,1m$ e um erro de orientação nulo. Vale frisar que o erro final de distância pode ser tão pequeno quanto se queira. Entretanto, velocidades lineares cada vez menores devem ser enviadas ao veículo móvel à medida que ele se aproxima do objetivo final, provocando, como consequência, um aumento do tempo de convergência.

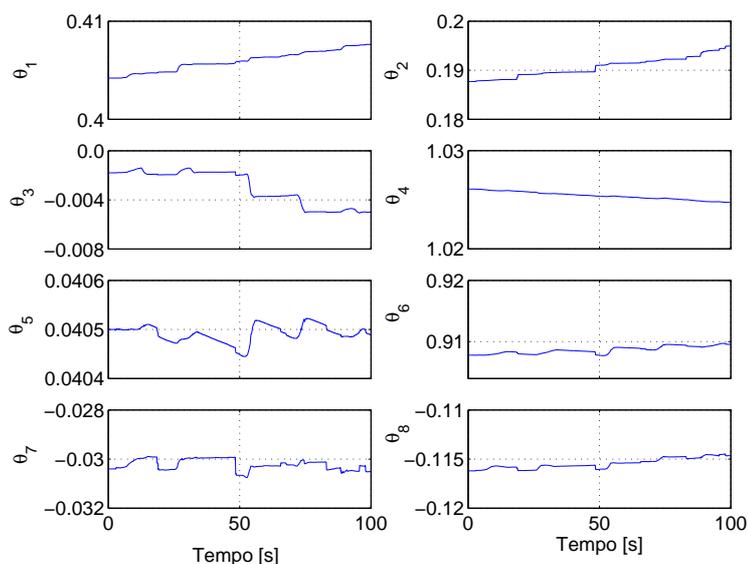


Figura 54: Experimento com controle de seguimento de caminho adaptativo e robusto: evolução dos parâmetros dinâmicos estimados.

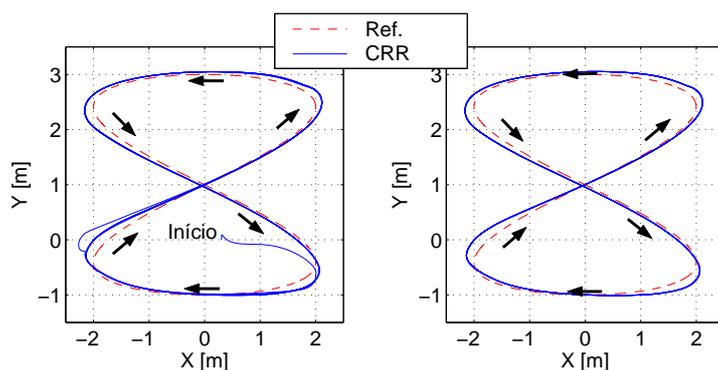


Figura 55: Simulação usando caminho de referência persistentemente excitante.

Por fim, foram realizados experimentos com obstáculo no caminho de referência do veículo móvel. A Fig. 59 mostra a manobra executada pelo veículo móvel, onde observa-se que ele contorna o obstáculo e, logo após, retorna ao caminho de referência, seguindo-o até o final. Os gráficos da Fig. 60 apresentam os erros de controle, onde se pode verificar que o veículo alcança a pose de destino, com um erro de distância de $0,1m$ e um erro de orientação nulo. Já a Fig. 61 mostra os sinais de chaveamento entre controladores enviados pelo sistema supervisor, ressaltando os instantes em que o obstáculo foi detectado e finalmente vencido.

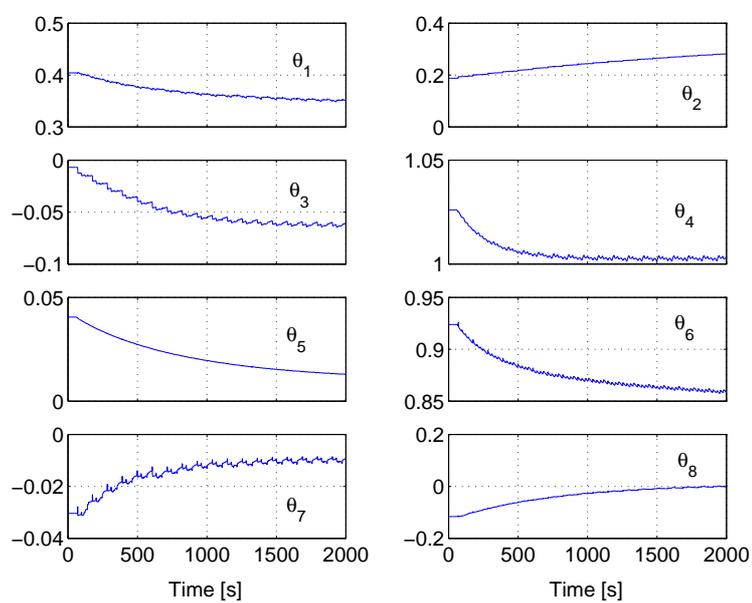


Figura 56: Evolução de parâmetros dinâmicos estimados.

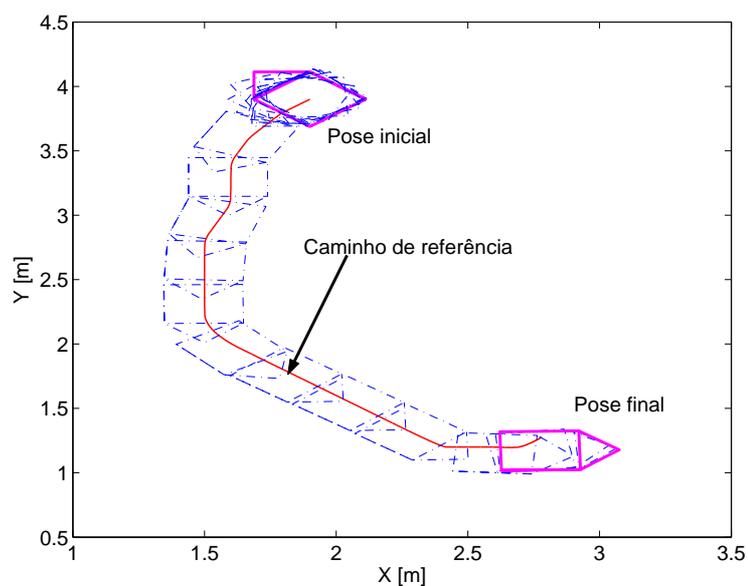


Figura 57: CRR transportando pessoa pesada para pose desejada através de um caminho de referência.

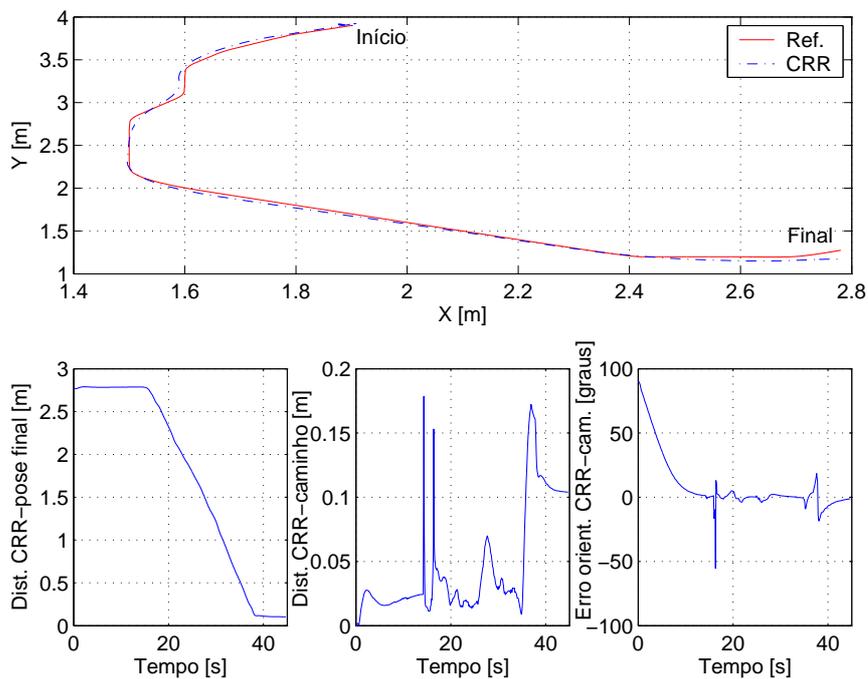


Figura 58: Gráficos de experimento com a CRR transportando pessoa pesada para pose desejada através de um caminho de referência.

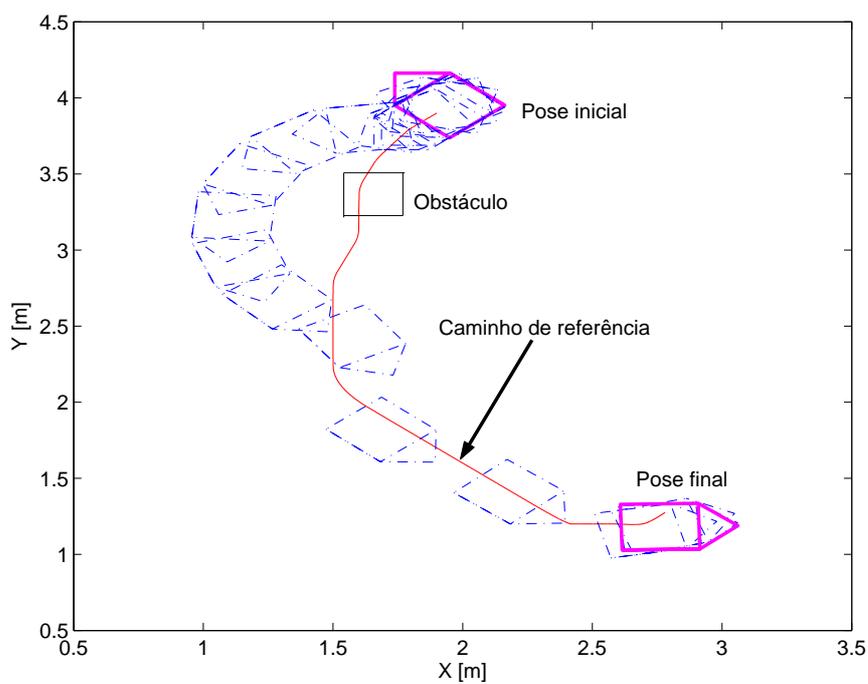


Figura 59: Experimento com desvio de obstáculo.

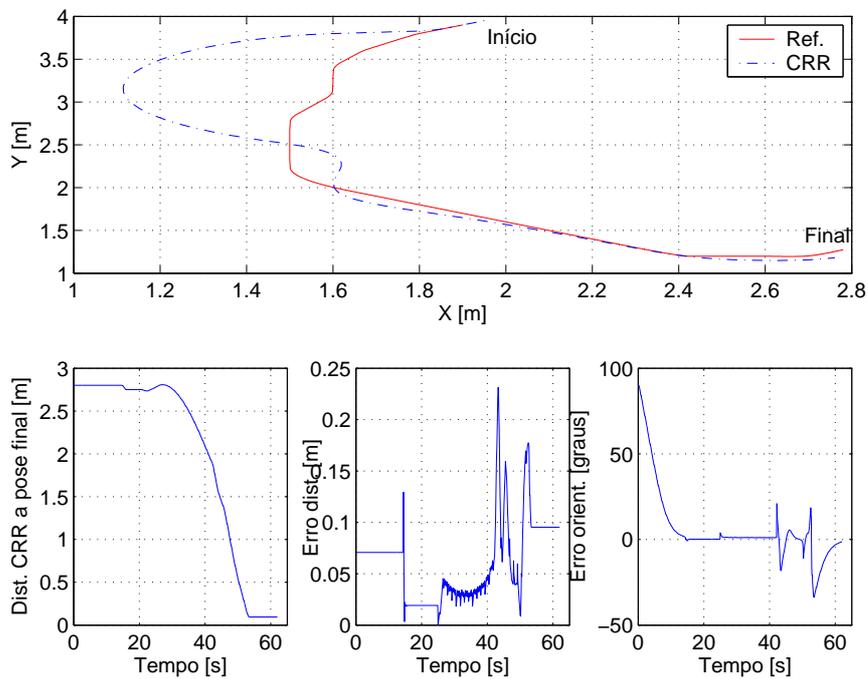


Figura 60: Gráficos do experimento com desvio de obstáculo.

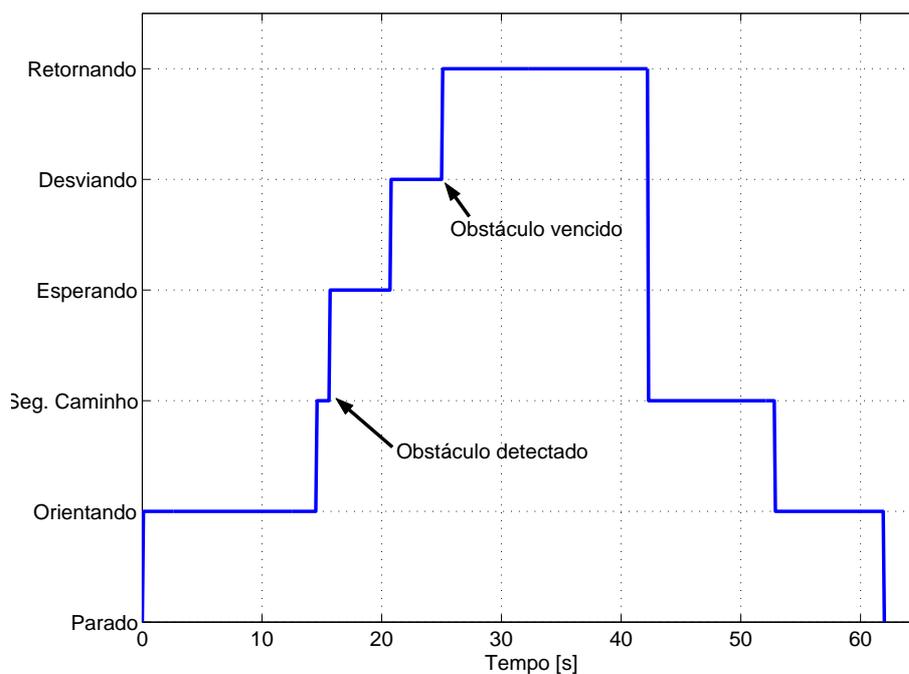


Figura 61: Sinais de chaveamento do supervisor.

5 *Conclusões*

“De tudo ficaram três coisas: a certeza de que ele estava sempre começando, a certeza de que era preciso continuar e a certeza de que seria interrompido antes de terminar. Fazer da interrupção um caminho novo. Fazer da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sono uma ponte, da procura um encontro.”

Fernando Sabino.

5.1 *Discussões Finais*

O objetivo central desta tese foi o de desenvolver um sistema de navegação para cadeiras de rodas robóticas capaz de proporcionar a tais veículos móveis a autonomia necessária para que eles sejam suportes motores adequados a pessoas com deficiência motora em nível 4, isto é, pessoas com deficiência motora severa.

O sistema de navegação desenvolvido recebe comandos de usuário como entrada. Tais comandos podem ser gerados com o auxílio de Interfaces Homem-Máquina, as quais têm sido, nesta última década, bastante reportadas na literatura sobre sistemas assistivos. O sistema de navegação conta, ainda, com informações de sensores localizados no veículo autônomo que permitem, por exemplo, o conhecimento da pose da CRR em tempo de execução, bem como a localização de possíveis obstáculos em um ambiente doméstico, tais como, mobília, pessoas, paredes, etc. Por fim, foi suposto nesta tese que o sistema de navegação possui o conhecimento a priori do ambiente, através de um conjunto de mapas métricos que discriminam áreas ocupadas e áreas livres para navegação.

Mostrou-se que o sistema de navegação é capaz de gerar rotas com baixo risco de colisão em um ambiente de navegação, de fazer com que a CRR se mantenha o mais próximo possível de uma dada rota de referência ao deslocar-se para uma posição de destino, de permitir que a CRR detecte uma obstrução não prevista (obstáculos dinâmicos) na rota de referência, e de evitar uma colisão tanto com obstáculos estáticos como móveis.

As rotas de referência são geradas com base na posição atual da CRR e na posição de destino para a CRR (determinada por seu usuário) dentro do ambiente de navegação. O sistema de navegação conta com um sistema de controle formado por controladores de orientação, de posicionamento e de seguimento de caminho, os quais são acionados adequadamente, a fim de fazer com que a tarefa de deslocar-se até uma pose desejada pelo usuário (seguindo uma rota de referência) seja cumprida. Tal sistema de controle é governado por um sistema supervisor, capaz de promover comutações estáveis entre os diferentes controladores.

O sistema de controle conta ainda com um sistema de compensação da dinâmica associada à CRR e seu usuário. Embora a compensação da dinâmica seja feita com base em um modelo dinâmico bastante completo, é notória a existência de imprecisões causadas por simplificações realizadas durante o processo de modelagem, necessárias para que se chegasse a um modelo sem complexidade demasiada. Além disso, o modelo obtido apresenta parâmetros os quais não podem ser identificados, por serem dependentes de efeitos físicos vistos como distúrbios, tais como deslizamento das rodas de tração e forças externas em geral. Por isso, o sistema de compensação da dinâmica apresenta uma certa robustez, desde que tais distúrbios sejam limitados.

A CRR é um caso particular em robótica móvel pelo fato de transportar uma pessoa a bordo. Essa pessoa consiste em uma carga móvel e pesada. Logo, é natural que os parâmetros dinâmicos identificáveis se alterem. Dois tipos distintos de variações paramétricas foram considerados nesta tese. Um provocado por mudanças nas características físicas do sistema envolvendo a CRR e o usuário, e outro provocado exclusivamente pelo usuário, mais precisamente por sua movimentação durante a navegação do veículo móvel. O primeiro tipo de mudança foi tratado como uma incerteza estruturada, corrigida a partir de ajustes paramétricos realizados em tempo de execução. Por outro lado, nenhum tipo de compensação foi estabelecido para o segundo tipo. Porém, provou-se que tais variações não comprometem a estabilidade do sistema, por serem fisicamente limitadas.

O ajuste paramétrico foi realizado com base em uma lei de adaptação que estima os parâmetros dinâmicos utilizados pelo sistema de compensação da dinâmica, promovida a partir da utilização do método de linearização por retroalimentação. A prova formal de estabilidade de cada módulo de controle foi realizada a partir da teoria de Lyapunov.

Então, concluiu-se que o sistema de controle da CRR é um sistema de controle dinâmico adaptativo robusto finalmente limitado. Isto significa dizer que os erros de seguimento tendem a um valor limitado. Tal valor é nulo se as incertezas não estrutu-

radas e as variações paramétricas provocadas pelo usuário forem igualmente nulas, o que não corresponde a uma situação prática. Entretanto, as análises realizadas permitiram verificar que o limite de convergência dos erros de seguimento pode ser tão pequeno quanto se queira. Por outro lado, ao minimizar o erro de seguimento, aumenta-se a possibilidade de os parâmetros estimados sofrerem com o fenômeno denominado deriva paramétrica, o qual é responsável por causar instabilidade em sistemas adaptativos.

Cadeiras de rodas robóticas também introduzem questões particulares no campo da robótica móvel por terem a incumbência de transportar pessoas com sérias restrições motoras. Tais questões podem ser resumidas em segurança e conforto do usuário. São vários os itens de sistema que se relacionam com a segurança de usuário, sendo que esta tese tratou o tema propondo e implementando soluções que permitissem uma navegação com o menor risco possível de a CRR colidir com objetos estáticos e/ou dinâmicos do ambiente. Entretanto, a garantia efetiva de um sistema seguro envolve muito mais esforço em outras linhas de pesquisa, que trabalhem, por exemplo, a questão de redundância de sistemas em situações de falhas e a capacidade de o sistema computacional que governa a CRR operar em tempo real.

O conforto de usuário foi também tratado nesta tese sob o ponto de vista de uma navegação autônoma (às vezes semiautônoma) cautelosa, considerando controladores que evitassem movimentos desconfortantes, tais como andar de marcha-a-ré e acelerar e desacelerar fortemente. Além disso, o sistema de navegação aqui apresentado foi projetado para que o usuário tenha que intervir o mínimo possível, minimizando a necessidade de se gerar comandos. Isto porque tais gerações de comandos requerem um grande esforço físico e/ou mental por parte da pessoa com deficiência, como é mencionado em vários trabalhos que tratam de IHMs.

Com isso, considera-se como contribuições importantes desta tese:

- a proposição de um modelo dinâmico que engloba a dinâmica da CRR com o usuário a bordo;
- a proposição e implementação de um sistema de compensação da dinâmica, capaz de adaptar-se na presença de mudanças paramétricas e de, além disso, manter-se estável frente a perturbações diversas;
- a proposição e implementação de um sistema de controle capaz de garantir o cumprimento de uma tarefa de navegação por uma rota com baixo risco de colisão, prezando pelo conforto e pela segurança do usuário durante a navegação;

- a proposição e implementação de um algoritmo para geração de caminhos com baixo risco de colisão para conectar dois pontos de um ambiente conhecido;
- a proposição e implementação de um sistema capaz de identificar um obstáculo na rota seguida pela CRR e de desviar de tal obstáculo, se for essa a vontade do usuário;
- a proposição e implementação de um sistema supervisorio para gerenciamento dos vários módulos do sistema de navegação.

Cada etapa de desenvolvimento desta tese foi devidamente publicada e apresentada em congressos e simpósios nacionais e internacionais, publicada em revistas internacionais, e em um capítulo de livro. A listagem de tais publicações pode ser vista no Apêndice C.

5.2 Trabalhos Futuros

É importante ressaltar que o uso de robótica móvel em sistemas assistivos tem sido um assunto bastante discutido em trabalhos recentes, onde cadeiras de rodas robóticas têm sido a “coluna vertebral” de tais discussões. Por outro lado, esta tese abordou uma questão pouco tratada até então nessas discussões, que é a consideração dos efeitos dinâmicos durante a elaboração dos mecanismos de controle necessários para se alcançar a autonomia e a precisão requeridas por um sistema desta natureza.

Embora o sistema de compensação dinâmica apresentado nesta tese tenha funcionado de maneira satisfatória, conforme ficou constatado tanto nos resultados de simulações quanto nos experimentos, cabe mencionar a grande dificuldade encontrada para ajuste dos diversos ganhos apresentados pelo sistema de controle adaptativo robusto. Além disso, não se pode afirmar que o ajuste realizado neste trabalho é ótimo, uma vez que nenhum estudo de otimização foi realizado. Portanto, muito se pode fazer no sentido de otimizar tal controlador, tornando possível um desempenho ainda melhor do que aquele aqui apresentado.

A otimização no sentido de se minimizar o gasto energético é mais uma interessante vertente que pode ser abordada em trabalhos futuros. Nesta linha, o controle comutável, tal como mostrado nesta tese, pode ser uma boa solução para se obter sistemas energeticamente mais econômicos. Se isso se confirmar, então o sistema de controle poderá ser ampliado, a fim de permitir a execução de tarefas mais complexas, aumentando, também, a complexidade do sistema supervisorio, inviabilizando seu projeto a partir de máquinas de estados, tal como considerado nesta tese. Neste caso, um sistema supervisorio baseado

em técnicas de inteligência artificial (um sistema neuro-fuzzy, por exemplo) pode ser mais adequado.

Acredita-se que o fato de os dados de medição serem extremamente ruidosos tenha dificultado consideravelmente o ajuste dos ganhos dos controladores, sobretudo da parte adaptativa, a qual baseia-se nos erros de velocidade. Assim, a fusão de novos sensores, aliada a uma filtragem adequada dos dados medidos podem vir a promover uma grande melhora no desempenho do sistema.

Finalmente, menciona-se a necessidade de um sistema capaz de promover o posicionamento absoluto da CRR, uma vez que foi constatado nos experimentos uma enorme discrepância entre o caminho que o sistema de navegação acredita que o veículo seguiu e o caminho efetivamente seguido por tal veículo. São muitas as alternativas para isso, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Uma nova alternativa proposta para CRRs é a utilização de marcas magnéticas dispostas em pontos conhecidos do ambiente. As vantagens de tal proposta em relação àquelas observadas na literatura (baseadas, por exemplo, em marcas visuais e triangulação de câmaras e/ou sensores de ultrassom) é a grande robustez, alta precisão e baixo custo financeiro e computacional. A desvantagem percebida é a necessidade de uma maior estruturação do ambiente, de modo a tornar-se inviável para ambientes com dimensões cada vez maiores.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas*. 1. ed. Minas Gerais, Brasil: Editora UFMG, 2000.
- ALQASEMI, R. M. et al. Wheelchair-mounted robotic arms: Analysis, evaluation and development. *Proceedings of 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, v. 1, 2007.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. *Adaptive Control*. 2. ed. New York, USA: Dover Publication, 2008.
- AUAT, F. et al. Maps managing interface design for a mobile robot navigation governed by a mobile robot. *Journal of Physics: Conference Series 90*, v. 1, 2007.
- BECKER, M. *Aplicação de Tecnologias Assistivas e Técnicas de Controle em Cadeiras de Rodas Inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico, Dezembro 2000.
- BERG, M. de et al. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. 3. ed. USA: Springer, 2008. 386 p.
- BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 19, n. 5, p. 1179–1187, 1989.
- BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 7, n. 3, p. 278–288, 1991.
- BOURHIS, G.; PINO, P. Mobile robotics and mobility assistance for people with motor impairments: Rational justification for the vahm project. *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, v. 4, n. 1, p. 7–12, 1996.
- BRANDÃO, A. S. *Controle Descentralizado com Desvio de Obstáculos para uma Formação Líder-Seguidor de Robôs Móveis*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Março 2008.
- CAVALIERI, D. C. *Interface Homem Máquina para uma Cadeira de Rodas Baseada no Movimento Ocular e Piscadas de Olhos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Agosto 2007.
- CHANG, H. J. et al. P-slam: Simultaneous localization and mapping with environmental-structure prediction. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 23, n. 2, p. 281–293, April 2007.

- DING, D.; COOPER, R. A. Electric-powered wheelchairs: A review of current technology and insight into the future directions. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 1, 2005.
- DO, K. D.; JIANG, Z. P.; PAN, J. Simultaneous tracking and stabilization of mobile robots: An adaptive approach. *IEEE Transaction on Automatic Control*, v. 49, n. 7, p. 1147–1151, 2004.
- FERREIRA, A. *Desvio Tangencial de Obstáculos para um Robô Móvel Navegando em Ambientes Semi-Estruturados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2004.
- FERREIRA, A. *Uma Proposta de Interface Cérebro-Computador para Comando de Cadeira de Rodas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Dezembro 2008.
- FERREIRA, A. et al. Human-machine interface based on emg and eeg signals applied to a robotic wheelchair. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1, 2007.
- FIERRO, R.; LEWIS, F. L. Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics. *Journal of Robotics Systems*, v. 14, n. 3, p. 149–163, 1997.
- FILGUEIRA, P. N. dos S. *Sistema de Controle de Baixo Nível para uma Cadeira de Rodas Robotizada*. Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, Dezembro 2005.
- FIORETTI, S.; LEO, T.; LONGHI, S. A navigation system for increasing the autonomy and the security of powered wheelchairs. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, v. 8, n. 4, p. 490–498, 2000.
- GRASSI, V. *Arquitetura híbrida para robôs móveis baseada em funções de navegação com interação humana*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Janeiro 2006.
- GUIMARÃES, E. B. *Sensores de Indução e RFID Aplicados à Navegação Auto-Guiada de Cadeiras de Rodas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Junho 2008.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. 8. ed. USA: Wiley, 2008.
- INDIVERI, G.; NUCHTER, A.; LIGEMANN, K. High speed differential drive mobile robot path following control with bounded wheel speed commands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v. 1, 2007.
- ISIDORI, A. *Nonlinear Control Systems*. 1. ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989.
- JORDAN, M. A.; BUSTAMANTE, J. L. A totally stable adaptive control for path tracking of time-varying autonomous underwater vehicles. *Proceedings of 17th IFAC World Congress*, v. 1, 2008.
- KAUFMAN, H.; BARKANA, I.; SOBEL, K. *Direct Adaptive Control Algorithms, Theory and Applications*. 2. ed. New York, USA: Springer, 1998. 182-184 p.

- KNOTT, G. D. *Interpolating Cubic Splines: Progress in Computer Science and Applied Logic*. 1. ed. USA: Birkhäuser Boston, 1999.
- LEVINE, S. et al. The navchair assistive wheelchair navigation system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, v. 7, n. 4, p. 443–451, 1999.
- LIBERZON, D. *Switching in Systems and Control*. USA: Birkhauser, 2003.
- MARTINS, F. N. *Modelagem e Compensação da Dinâmica de Robôs Móveis e sua Aplicação em Controle de Formação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Março 2009.
- MAZO, M. et al. Experiences in assisted mobility: the siamo project. *Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications*, v. 2, p. 766–771, 2002.
- NASISI, O.; CARELLI, R. Adaptive servo visual robot control. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 43, p. 51–78, 2003.
- PARK, M. et al. Control of mobile robot with passive multiple trailers. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation ICRA '04*, v. 5, n. 4369–4374, 2004.
- PATRE, P. M. et al. Asymptotic tracking for systems with structured and unstructured uncertainties. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 16, n. 2, 2008.
- PAZ, L.; TARDÓS, J. D.; NEIRA, J. *IEEE Transactions on Robotics*, (a aparecer), p. (a aparecer), 2008.
- PRASSLER, E.; SCHOLZ, J.; FIORINI, P. Navigating a robotic wheelchair in a railway station during a rush hour. *International Journal of Robotics Research*, v. 18, n. 7, p. 711–727, 1999.
- PRASSLER, E.; SCHOLZ, J.; STROBEL, M. Maid: Mobility assistance for elderly and disabled people. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society*, v. 4, p. 2493–2498, August 1999.
- RAO, R. S. et al. Human robot interaction: Application to smart wheelchairs. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. General Robotics, Automation, Sensing and Perception Laboratory, University of Pensilvany: IEEE, 2002. p. 3583–3588.
- REYES, F.; KELLY, R. On parameter identification of robot manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1910–1915, 1997.
- SASTRY, S.; BODSON, M. *Adaptive Control-Stability, Convergence and Robustness*. 1. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989. 253 p.
- SECCHI, H. A. *Control de Vehículos Autoguiados con Realimentación Sensorial*. Dissertação (Mestrado) — Facultad de Ingenieria de la Universidad Nacional de San Juan, Intstituto de Automática, San Juan - Argentina, 1998.
- SHAO, L.; ZHOU, H. Curve fitting with bezier cubics. *Graphical Models and Image Processing*, v. 58, p. 223–232, 1996.

- SILVA, R. L. *Desenvolvimento de uma Interface Homem-Máquina Aplicada a uma Cadeira de Rodas Robótica por Meio de PDA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, Novembro 2007.
- SOETANTO, D.; LAPIERRE, L.; PASCOAL, A. Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robots. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003.
- STRANG, G. *Linear Algebra and Its Applications*. 3. ed. USA: Thomson Learning, Inc., 1988.
- TANENBAUM, A. S. *Computer Networks*. 4. ed. USA: Prentice Hall, 2003.
- TANNER, H. G.; KYRIAKOPOULOS, K. J. Backstepping for nonsmooth systems. *Automatica*, v. 39, 2003.
- TOIBERO, J. M.; CARELLI, R.; KUCHEN, B. Switching control of mobile robots for autonomous navigation in unknown environments. *ICRA '07: International Conference on Robotics and Automation*, p. 1974–1979, 2007.
- WIT, C. C. de; SICILIANO, B.; BASTIN, G. *Theory of Robot Control*. Great Britain: Springer-Verlag London Limited, 1997.
- YANCO, H. A. *Shared User-Computer Control of a Robotic Wheelchair System*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, September 2000.
- ZHANG, Y. et al. Dynamic model based robust tracking control of a differentially steered wheeled mobile robot. *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, p. 850–855, June 1998.

Apêndice A

A.1 Definição de Estabilidade

Seja

$$\dot{x} = f(x), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (5.1)$$

uma sistema invariante no tempo, onde $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ é uma função localmente Lipschitz. Assume-se que a origem é um ponto de equilíbrio de (5.1), isto é, $f(0) = 0$. Assume-se ainda, sem perda de generalidade, que o tempo de início é $t_0 = 0$. Então, a origem é dita ser um equilíbrio estável de (5.1), no sentido de Lyapunov, se para todo $\epsilon > 0$ existe um $\delta > 0$ tal que

$$|x(0)| \leq \delta \Rightarrow |x(t)| \leq \epsilon \quad \forall t \geq 0. \quad (5.2)$$

Neste caso, a Eq. (5.1) é dita ser *estável*.

Se

$$|x(0)| \leq \delta \Rightarrow x(t) \rightarrow 0 \text{ quando } t \rightarrow \infty, \quad (5.3)$$

então (5.1) é dita ser *assintoticamente estável*.

O conjunto de todos os estados iniciais dos quais as trajetórias convergem à origem é chamado de região de atração. Logo, se a condição dada em (5.3) se mantém para todo δ , isto é, se a origem é um equilíbrio estável e sua região de atração é todo o espaço de estados, então (5.1) é dita ser *globalmente assintoticamente estável*.

Caso o sistema não seja necessariamente estável, mas todas as soluções com condições iniciais próximas à origem convergem à própria origem (localmente atrativa), então o sistema é dito ser *globalmente atrativo*.

Se a desigualdade

$$|x(t)| \leq c|x(0)|e^{-\lambda t} \quad \forall t \geq 0 \quad (5.4)$$

é satisfeita por todas as soluções de (5.1), onde $|x(0)| \leq \delta$, e δ , c e λ (ocasionalmente chamada de margem de estabilidade) são constantes positivas, então o sistema (5.1) é dito ser *exponencialmente estável*.

Caso o decaimento exponencial dado em (5.4) seja verificado para todo δ , então o sistema é dito ser *globalmente exponencialmente estável*.

A.2 Classes de Funções

Uma função $\alpha : [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ é dita ser de *classe K* se ela é contínua, estritamente crescente, e $\alpha(0) = 0$. Se, além disso, α é também não limitada, então ela é dita ser de *classe K_∞* , ou $\alpha \in K_\infty$.

Uma função $\beta : [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ é dita ser de *classe KL*, ou $\beta \in KL$, se $\beta(\cdot, t)$ é de *classe K* para cada $t \geq 0$ e $\beta(r, t)$ decresce a zero quando $t \rightarrow \infty$ para cada $r \geq 0$.

Tais definições de classe de uma função são aplicadas nas definições de estabilidade de um sistema do tipo dado em (5.1). Logo, o sistema (5.1) é: *estável* se todas as suas soluções satisfazem

$$|x(t)| \leq \alpha(|x(0)|) \quad \forall t \geq 0, \quad (5.5)$$

com $|x(0)| \leq \delta$, onde $\delta > 0$ e $\alpha \in K_\infty$; *assintoticamente estável* se todas as suas soluções satisfazem

$$|x(t)| \leq \beta(|x(0)|, t) \quad \forall t \geq 0, \quad (5.6)$$

com $|x(0)| \leq \delta$, onde $\delta > 0$ e $\beta \in KL$; *globalmente assintoticamente estável* se todas as soluções satisfazem (5.6) para todas as condições iniciais, isto é, para todo δ ; e *exponencialmente estável* se $\beta(r, t) = cre^{-\lambda t}$, onde c e λ são constantes positivas.

A.3 Método Direto de Lyapunov

Seja uma função $V : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ continuamente diferenciável. Tal função é *definida positiva* se $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$ para todo $x \neq 0$. Ela é *radialmente não-limitada* se $V(x) \rightarrow \infty$ quando $|x| \rightarrow \infty$. Quando V é definida positiva e radialmente não-limitada, então

$$\alpha_1(|x|) \leq V(x) \leq \alpha_2(|x|) \quad \forall x, \quad (5.7)$$

onde $\alpha_1 \in K_\infty$ e $\alpha_2 \in K_\infty$.

Teorema 1 (Lyapunov). *Seja*

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \quad (5.8)$$

a derivada primeira no tempo de V ao longo das soluções do sistema (5.1). Então tal

sistema é: **estável** se V é definida positiva e

$$\dot{V} \leq 0 \quad \forall x; \quad (5.9)$$

assintoticamente estável se V é definida positiva e

$$\dot{V} < 0 \quad \forall x \neq 0; \quad (5.10)$$

globalmente assintoticamente estável se (5.10) é satisfeita para o caso onde V é definida positiva e radialmente não-limitada.

Prova. Considere as regiões ilustradas na Fig. 62, as quais estão centradas na origem do sistema (5.1), onde a bola maior possui raio $\epsilon > 0$, a bola menor possui raio δ , e toma-se um número positivo $b < \min_{|x|=\epsilon} V(x)$. Observe que a bola menor está contida no conjunto $\{x : V(x) \leq b\}$. Assumindo que a condição dada em (5.9) é satisfeita, isto é, V decresce ao longo das soluções, então cada solução que inicia dentro da bola menor de raio δ satisfaz $V(x) \leq b$, permanecendo, portanto, dentro da bola maior de raio ϵ , o que prova que o sistema (5.1) é estável.

Considerando, agora, uma condição inicial arbitrária $|x(0)| \leq \delta$, onde δ é como definido previamente (para algum ϵ). Assumindo mais uma vez que V decresce ao longo das soluções até um limite $c \geq 0$ à medida que $t \rightarrow \infty$, então, se se pode provar que $c = 0$, prova-se, conseqüentemente, que a estabilidade é assintótica.

Supondo, agora, que $c > 0$, então a solução não pode pertencer a $\{x : V(x) < c\}$. Isto significa que a solução evolui em um conjunto compacto $S := \{x : r \leq |x| \leq \epsilon\}$ (para um $r > 0$ suficientemente pequeno) que não contém a origem. Seja $d := \max_{x \in S} \dot{V}(x)$, o qual

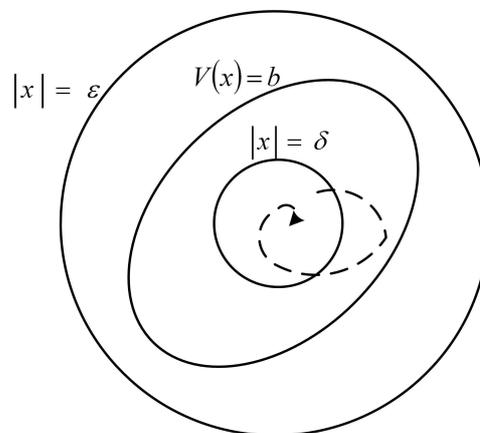


Figura 62: Estabilidade via método direto de Lyapunov.

é um valor bem definido e negativo, como pode ser visto em (5.10). Logo, $\dot{V} \leq -d$, de modo que $V(t) \leq V(0) - dt$, induzindo a concluir que V eventualmente será menor do que c , o que é uma contradição. Tal argumentação é válida localmente ao redor da origem, pois os conjuntos de V podem não ser todos limitados e então δ pode ficar limitada quando $\epsilon \rightarrow \infty$. Se V é radialmente não-limitada, então todos os seus conjuntos são limitados, de modo que $\delta \rightarrow \infty$ quando $\epsilon \rightarrow \infty$, o que prova a estabilidade assintótica global. \square

Apêndice B

Procedimento para Teste de Independência Linear

Seja $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_8]^T$ o vetor de parâmetros do modelo dinâmico linearmente parametrizado de uma cadeira de rodas robótica, onde cada parâmetro é analiticamente definido como

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \frac{k_{DT}}{k_{PT}} + \frac{R_a r}{2k_{PT}k_a} \left(\frac{2I_e}{r^2} + m \right) \\ \theta_2 = \frac{k_{DR}}{k_{PR}} + \frac{R_a r}{k_{PR}k_a d} \left(\frac{I_e d^2}{2r^2} + I_z + m(b_1^2 + b_2^2) \right) \\ \theta_3 = \frac{R_a r m b_1}{2k_{PT}k_a} \\ \theta_4 = 1 + \frac{k_b}{k_{PT}r} + \frac{B_e R_a}{k_{PT}k_a r} \\ \theta_5 = \frac{R_a r b_1 m}{dk_{PR}k_a} \\ \theta_6 = 1 + \frac{dk_b}{2rk_{PR}} + \frac{R_a B_e d}{2rk_{PR}k_a} \\ \theta_7 = \frac{b_2 m R_a r}{2k_{PT}k_a} \\ \theta_8 = \frac{b_2 m R_a r}{k_a k_{PR} d} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Embora uma inspeção nas equações que definem cada parâmetro leve a concluir que todos os parâmetros do modelo são linearmente independentes, existe, ainda, a possibilidade de uma dependência linear devido a simetrias, coincidências de eixos, paralelismos e condições operacionais restritivas. Assim, um procedimento simples para avaliar tal questão consiste em obter um conjunto de M identificações paramétricas, sendo $M \geq N$, onde N é a ordem do modelo (o número de parâmetros dinâmicos). É importante que alguma variação dinâmica (por exemplo, usando cargas de massas diferentes e mudanças no centro de massa do sistema) seja introduzida a cada processo de identificação. Logo, forma-se uma matriz de parâmetros \mathbf{P} de dimensões $M \times N$, a qual é linearmente independente se, e somente se, seu posto é igual a N .

Uma análise mais robusta é feita quando se trunca os valores de cada elemento da matriz \mathbf{P} normalizada. Deste modo, a análise é cada vez mais imune aos erros de identificação a cada casa decimal truncada. Para o caso específico da cadeira de rodas robótica, verificou-se que os parâmetros dinâmicos são linearmente independentes, considerando truncamentos até a segunda casa decimal, ou seja, para erros de identificação menores que 10%.

Apêndice C

Publicações

Artigos Completos Publicados em Periódicos:

1. MARTINS, F. N.; CELESTE, W. C.; CARELLI, R.; SARCINELLI FILHO, M.; BASTOS FILHO, T. F. An Adaptive Dynamic Controller for Autonomous Mobile Robot Trajectory Tracking. *Control Engineering Practice*, v. 16, p. 1354-1363, 2008.
2. FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; AUAT, F.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Human-Machine Interfaces Based on EMG and EEG Applied to Robotic Systems. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v. 5, p. 1-15, 2008.
3. FERREIRA, A.; SILVA, R. L.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Human-Machine Interface Based on EMG and EEG Signals Applied to a Robotic Wheelchair. *Journal of Physics. Conference Series*, v. 1, p. 1/012094-8, 2007.
4. AUAT, F.; CARELLI, R.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; DI SCIASIO, F. Maps Managing Interface Design for a Mobile Robot Navigation governed by a BCI. *Journal of Physics. Conference Series*, v. 1, p. 1/012088-10, 2007.

Artigos Completos Submetidos a Revistas:

1. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; DE LA CRUZ, C.; CARELLI, R. Robust Adaptive Path-Following Control of a Robotic Wheelchair. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
2. DE LA CRUZ, C.; CELESTE, W. C.; GUIMARÃES, E. B.; BASTOS FILHO, T. F. Navigation System for a Robotic Wheelchair Using an Inductive Sensor and a Switching Adaptive Control. *IFAC*.

Capítulos de Livros Publicados:

1. BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; SILVA, R. L.; MARTINS, V. R.; CAVALIERI, D. C.; FILGUEIRA, P. N. S.; ARANTES, I. B. *Case Study: Cognitive Control of a Robotic Wheelchair. In: J. L. Pons. (Org.). Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. Chapter 9, Section 9.6: Wiley, 2008, v. , p. 315-319.*

Capítulos de Livros Submetidos:

1. CELESTE, W. C.; FERREIRA, A.; DE LA CRUZ, C.; CAVALIERI, D. C.; FILGUEIRA, P. N. S.; ARANTES, I. B.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. *Robótica Assistiva. Em: Robótica Móvel (Org. SBA - Sociedade Brasileira de Automação). Cap. 14.*

Artigos Completos Publicados em Anais de Congressos:

1. BASTOS FILHO, T. F.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; CAVALIERI, D. C.; SARCINELLI FILHO, M.; DE LA CRUZ, C.; SORIA, C.; PEREZ, E.; KUMAR, D. K. Silla de Ruedas Robótica Multi-Accionada Inteligente con Capacidad de Comunicación. *Memorias del III Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos, Barcelona, Espanha, 2009.*
2. BASTOS FILHO, T. F.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; CAVALIERI, D. C.; SARCINELLI FILHO, M.; DE LA CRUZ, C.; SORIA, C.; PEREZ, E.; KUMAR, D. K. An Intelligent Multimodal Robotic Wheelchair with Communication Capabilities. *Proceedings of the III International Congress on Digital Homes, Robotics and Telecare for All, Barcelona, Espanha, 2009.*
3. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Controller Dynamic Switching for Robotic Wheelchair Navigation. *Proceedings of the International Conference on Automation, Robotics and Control Systems, Orlando, USA, 2009.*
4. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Dynamic Model and Control Structure for an Autonomous Wheelchair. *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, England, p. 1359-1364, 2008.*

5. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Controlador Dinâmico para Seguimento de Caminho Baseado em Trailer Virtual entre Robôs Móveis. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Brasil, 2008.
6. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Controle de Seguimento de Caminho com Sinais de Comando Limitados Aplicado a Robôs Móveis Uniciclos. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Brasil, 2008.
7. CELESTE, W. C.; ARANTES, I. B.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Chaveamento de Controladores Dinâmicos para Navegação de Cadeira de Rodas Robótica em Ambientes Conhecidos. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Brasil, 2008.
8. DE LA CRUZ, C.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Modelo Dinâmico e Controle de uma Cadeira de Rodas Robótica. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, Juiz de Fora, Brasil, 2008.
9. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Navegación de Sillas de Ruedas en Ambientes Conocidos Utilizando Controladores Conmutables y Compensación Dinámica. *Memorias de las Jornadas Argentinas de Robótica*, Bahia Blanca, Argentina, 2008.
10. CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Sistema de Navegación Autónomo para una Silla de Ruedas Robótica. *Memorias de las V Jornadas Iberoamericanas sobre Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad*, Cartagena de Indias, Colombia, 2008.
11. BASTOS FILHO, T. F.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; CAVALIERI, D. C.; PEREZ, E.; SORIA, C.; SARCINELLI FILHO, M. Silla de Ruedas Robótica Comandada por Parpadeos, Movimientos del Globo Ocular, Movimientos de Cabeza y Señales Cerebrales. *Memorias de las V Jornadas Iberoamericanas sobre Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad*, Cartagena de Indias, Colombia, p. 31-35, Colombia, 2008.
12. MARTINS, F. N.; CELESTE, W. C.; CARELLI, R.; SARCINELLI FILHO, M.; BASTOS FILHO, T. F. Kinematic and Adaptive Dynamic Trajectory Tracking Controller for Mobile Robots. *Proceedings of International Modeling and Simulation Multiconference*, Buenos Aires, Argentina, v. 1., p. 29-34, 2007.

- 13.FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; AUAT, F.; CARELLI, R. Development of Interfaces for Impaired People Based on EMG and EEG. In: International Congress on Domotics, Robotics and Remote-Assistance for All, *Proceedings of International Congress on Domotics, Robotics and Remote-Assistance for All*, Madrid, Espanha, p. 28-40, 2007.
- 14.FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; AUAT, F.; CARELLI, R. Desarrollo de Interfaces para Personas con Discapacidad Basadas en Señales EMG y EEG. *Actas del II Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos*, Madrid, Espanha, p. 35-47, 2007.
- 15.FERREIRA, A.; SILVA, R. L.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Interfaz Hombre-Máquina Basada en Señales Musculares y Cerebrales Aplicada a una Silla de Ruedas Robótica. *Memorias de las XVI Congreso Argentino de Bioingeniería SABI 2007 y V Jornadas de Ingeniería Clínica*, San Juan, Argentina, p. 629-632, 2007.
- 16.AUAT, F.; CARELLI, R.; CELESTE, W. C.; BASTOS FILHO, T. F.; DI SCIASIO, F. Maps Managing Interface Design for a Mobile Robot Navigation governed by a BCI. *Memorias de las XVI Congreso Argentino de Bioingeniería SABI 2007 y V Jornadas de Ingeniería Clínica*, San Juan, Argentina, p. 603-606, 2007.
- 17.MARTINS, F. N.; CELESTE, W. C.; SARCINELLI FILHO, M.; BASTOS FILHO, T. F. Controlador Dinâmico Adaptativo de Seguimento de Trajetória para Robôs Móveis. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Florianópolis, Brasil, 2007.
- 18.CELESTE, W. C.; FILGUEIRA, P. N. S.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; DE LA CRUZ, C. Modelo Dinâmico e Controle de uma Cadeira de Rodas Autônoma para Pessoas com Deficiência Motora Severa. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Florianópolis, Brasil, 2007.
- 19.CELESTE, W. C.; FILGUEIRA, P. N. S.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; DE LA CRUZ, C.; AUAT, F.; CARELLI, R. Modelo Dinâmico y Estructura de Control de una Silla de Ruedas Autónoma para Personas con Discapacidad Motora Severa. *Memorias de la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento y Control (RPIC 2007)*, Rio Gallegos, Argentina, 2007.
- 20.MARTINS, F. N.; CELESTE, W. C.; CARELLI, R.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Controlador Dinâmico Adaptable para Seguimiento de

- Trayectoria con Robots Móviles. *Memorias de la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento y Control (RPIC 2007)*, Rio Gallegos, Argentina, 2007.
21. BASTOS FILHO, T. F.; FRIZERA NETO, A.; AUAT, F.; CELESTE, W. C.; TONIOLO, C. C.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R. Navegação de um Veículo Móvel a Rodas em Ambientes Mapeados Utilizando Tabuleiro Eletrônico com Varredura Automática. *Anais do IV Congresso Ibero-Americano Sobre Tecnologias de Apoio a Portadores de Deficiência*, Vitória-ES, Brasil, v. 1., p. MO151-MO155, 2006.
22. BASTOS FILHO, T. F.; Bueno, L.; FRIZERA NETO, A.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; MARTINS, V. R. Desenvolvimento de Protótipos de Tecnologia Assistiva para Pessoas com Deficiência. *Anais do I Fórum de Tecnologia Assistiva e Inclusão Social da Pessoa com Deficiência e IV Simpósio Paraense de Paralisia Cerebral*, Belém do Pará, Brasil, v. 1., p. 71-90, 2006.
23. BASTOS FILHO, T. F.; CELESTE, W. C.; FERREIRA, A.; FRIZERA NETO, A.; MARTINS, V. R. Proposta de Adaptação de uma Cadeira de Rodas Motorizada para Pessoas Portadoras de Mobilidade Muito Reduzida ou Nula. *Anais do I Fórum de Tecnologia Assistiva e Inclusão Social da Pessoa com Deficiência e IV Simpósio Paraense de Paralisia Cerebral*, Belém do Pará, Brasil, v. 1., p. 91-110, 2006.
24. FRIZERA NETO, A.; CELESTE, W. C.; MARTINS, V. R.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Human-Machine Interface Based on Electro-Biological Signals for Mobile Vehicles. *Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2006)*, Montreal, Canada, v. 1., p. 2954-2959, 2006.
25. BASTOS FILHO, T. F.; FERREIRA, A.; CELESTE, W. C.; AUAT, F.; SARCINELLI FILHO, M. Human-Machine Interfaces Based on EMG and EEG Applied to Robotic Systems. *Proceedings of The Second International Workshop on Biosignal Processing and Classification - Biosignals and Sensing for Human Computer Interface / ICINCO (International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics)*, Setúbal, Portugal, v. 1. p., 116-125, 2006.
26. AUAT, F.; CELESTE, W. C.; CARELLI, R.; POSTIGO, J.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M. Doble Interface Músculo-Computadora para la Navegación de Robots Móviles en Entornos Conocidos. *Memorias del XX Congreso Argentino de Control Automático (AADECA 2006)*, Buenos Aires, Argentina, p. 280-285, 2006.

-
27. CELESTE, W. C.; MARTINS, V. R.; FRIZERA NETO, A.; AUAT, F.; BASTOS FILHO, T. F.; SARCINELLI FILHO, M.; CARELLI, R.. Interface Homem-Máquina Baseada em Sinais Eletro-biológicos para Controle de Veículo Móvel. *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática*, Salvador, Brasil, p. 144-149, 2006.
28. AUAT, F.; CARELLI, R.; FRIZERA NETO, A.; BASTOS FILHO, T. F.; CELESTE, W. C. Mapeo Probabilístico y Localización Simultáneas en un Robot Móvil Gobernado por una ICC. *Memorias de las IV Jornadas Argentinas de Robótica*, Córdoba, Argentina, 2006.