

RECONFIGURAÇÃO CINEMÁTICA QUASE-ESTÁTICA DE ROBÔS MÓVEIS  
EM TERRENOS IRREGULARES

Gustavo Medeiros Freitas

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

Aprovada por:

---

Prof. Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

---

Prof. Liu Hsu, Docteur d'Etat

---

Prof. Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

---

Prof. Marco Antonio Meggiolaro, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2008

FREITAS, GUSTAVO MEDEIROS

Reconfiguração Cinemática Quase-  
Estática de Robôs Móveis em Terrenos  
Irregulares [Rio de Janeiro] 2008

*XIII*, 156 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE

1. Reconfiguração Cinemática
2. Robótica Móvel
3. Controle de Estabilidade e Tração

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer à toda equipe do Laboratório de Robótica do Cenpes, Petrobras, coordenada pelo Engenheiro Ney Robinson. Parte da pesquisa aqui apresentada foi realizada no Cenpes, contando com a colaboração da equipe do Laboratório. Esta pesquisa foi financiada com uma bolsa de mestrado do programa UFRJ/CENPES.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Fernando Lizarralde e Professor Liu Hsu, pela constante ajuda durante o curso de mestrado e desenvolvimento desta dissertação.

Especiais agradecimentos aos meus familiares, que me incentivaram durante todo o curso de mestrado, custeando minhas despesas, permitindo minha permanência na academia.

Por fim, agradecimentos à minha namorada Andrea Dutra e todos os amigos, que compreenderam a ausência no convívio durante o mestrado, e o mau humor nos dias próximos à defesa de tese.

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

## RECONFIGURAÇÃO CINEMÁTICA QUASE-ESTÁTICA DE ROBÔS MÓVEIS EM TERRENOS IRREGULARES

Gustavo Medeiros Freitas

Junho/2008

Orientadores: Fernando Cesar Lizarralde

Liu Hsu

Programa: Engenharia Elétrica

Robôs móveis são empregados em tarefas que apresentam risco ao homem, como exploração e monitoramento de locais de difícil acesso. Tais dispositivos devem possuir sistema de locomoção eficiente, capaz de superar as diferentes adversidades presentes nos terrenos percorridos.

Uma solução consiste na utilização de robôs com reconfiguração ativa, capazes de alterar sua cinemática de maneira a se acomodar a obstáculos, reposicionar seu centro de gravidade e influenciar as forças de contato com o solo.

Nesta dissertação, diferentes abordagens são utilizadas, procurando melhorar o desempenho e a mobilidade de um robô, ao se deslocar em terrenos irregulares. Estratégias de controles são desenvolvidas, atuando na configuração cinemática do sistema de maneira a melhorar sua estabilidade e tração nos terrenos percorridos.

Esta pesquisa tem como principal diretriz a obtenção uma solução robusta, que necessite de poucos dados e informações do terreno e que seja aplicável em qualquer sistema com reconfiguração ativa.

O controle desenvolvido é validado por meio de simulações, e posteriormente aplicado ao Robô Ambiental Híbrido da Petrobras, comprovando a eficiência do algoritmo.

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

## QUASI-STATIC KINEMATIC RECONFIGURABILITY OF MOBILE ROBOT IN IRREGULAR TERRAINS

Gustavo Medeiros Freitas

June/2008

Advisors: Fernando Cesar Lizarralde

Liu Hsu

Department: Electrical Engineering

Mobile robots have been applied in several tasks, including exploring and monitoring places of difficult access, usually in hazardous areas. The mechanisms employed in these tasks must have an efficient locomotion system, capable of working in rough terrains.

This essay addresses actively reconfigurable robots, capable of varying their kinematics in order to accommodate for obstacles, reposition the center of gravity and influence the contact forces with the terrain.

Different approaches are considered in order to improve the mobility of a robot in rough terrain. This monograph presents a control strategy that improves stability and traction during locomotion, by changing the kinematic configuration of the system.

The aim of the work is to obtain a solution which is simple and robust, that requires little data of the terrain, and is applicable to any system with active reconfiguration.

The developed control was validated through simulations, and later on implemented in the Environmental Hybrid Robot from Petrobras S.A., to check the efficiency of the algorithm.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.1.1 Robô Ambiental Híbrido . . . . .	5
1.2 Objetivo . . . . .	7
1.3 Revisão Bibliográfica . . . . .	8
1.4 Organização da Dissertação . . . . .	12
<b>2 Locomoção em Terrenos Irregulares</b>	<b>14</b>
2.1 Robô <i>Wheel-Legged</i> . . . . .	15
2.2 O Terreno Irregular Percorrido . . . . .	16
2.3 Forças Aplicadas no Robô . . . . .	17
2.4 Critérios de Mobilidade do Sistema . . . . .	18
2.4.1 Estabilidade . . . . .	18
2.4.1.1 Margem de Estabilidade . . . . .	19
2.4.1.2 Gradiente da Margem de Estabilidade . . . . .	20
2.4.2 Tração . . . . .	22
2.4.2.1 Critério de Tração . . . . .	23
<b>3 Modelagem Cinemática</b>	<b>26</b>
3.1 Modelo Cinemático do Robô com Pernas Prismáticas . . . . .	27
3.1.1 Robô com Duas Pernas Prismáticas . . . . .	28
3.1.1.1 Graus de Liberdade do Robô com Duas Pernas . . . . .	29
3.1.2 Robô com Quatro Pernas Prismáticas . . . . .	30
3.1.2.1 Graus de Liberdade do Robô com Quatro Pernas . . . . .	31
3.1.3 Cinemática Direta do Robô com Pernas Prismáticas . . . . .	32
3.1.4 Cinemática Diferencial do Robô com Pernas Prismáticas . . . . .	33
3.2 Modelo Cinemático do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	34
3.2.1 Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	35
3.2.2 Graus de Liberdade do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	42
3.2.3 Cinemática Direta do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	43
3.2.4 Cinemática Diferencial do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	44

<b>4</b>	<b>Controle Proposto</b>	<b>47</b>
4.1	Análise Cinemática . . . . .	48
4.2	Arquitetura Descentralizada . . . . .	49
4.3	Controle Cinemático . . . . .	49
4.3.1	Controle de Altura . . . . .	52
4.3.2	Controle de Orientação . . . . .	54
4.3.3	Controle de Tração . . . . .	55
4.3.4	Controle de Estabilidade . . . . .	56
4.3.5	Controle com Múltiplos Objetivos . . . . .	58
4.3.6	Classificação das Estratégias de Controle . . . . .	59
4.4	Diferentes Estratégias já Desenvolvidas . . . . .	60
4.4.1	<i>Laboratoire de Robotique de Paris</i> . . . . .	60
4.4.2	<i>Jet Propulsion Laboratory</i> . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Simulações</b>	<b>65</b>
5.1	Biblioteca de Programas para Simulação . . . . .	66
5.1.1	Algoritmo de Controle . . . . .	67
5.1.2	Visualização do Robô . . . . .	71
5.1.3	Animação da Simulação . . . . .	71
5.1.4	Apresentação dos Resultados . . . . .	72
5.2	Resultado das Simulações . . . . .	73
5.2.1	Robô com Duas Pernas Prismáticas . . . . .	73
5.2.2	Robô com Quatro Pernas Prismáticas . . . . .	80
5.2.2.1	Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Constantes . . . . .	80
5.2.2.2	Terreno com Inclinações Variáveis . . . . .	85
5.2.3	Robô Ambiental Híbrido . . . . .	88
5.2.3.1	Terreno com Inclinação Longitudinal Constante . . . . .	89
5.2.3.2	Terreno com Inclinação Lateral Constante . . . . .	94
5.2.3.3	Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Constantes . . . . .	98
5.2.3.4	Terreno com Inclinações Variáveis . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Implementação do Controle no Robô Ambiental Híbrido</b>	<b>106</b>
6.1	Problemas de Mobilidade do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	107
6.1.1	Problemas de Tração . . . . .	108
6.1.2	Problemas de Estabilidade . . . . .	109
6.2	Implementação do Controle no Robô Ambiental Híbrido . . . . .	111
6.2.1	Equipamentos do Robô Ambiental Híbrido Utilizados . . . . .	111
6.2.2	Dados Utilizados no Controle . . . . .	112
6.2.3	Algoritmos Embarcados . . . . .	113
6.2.3.1	Algoritmo do Controle de Altura . . . . .	113
6.2.3.2	Algoritmo do Controle de Orientação . . . . .	114
6.2.3.3	Algoritmo do Controle de Tração . . . . .	114
6.2.3.4	Algoritmo do Controle de Estabilidade . . . . .	114
6.3	Testes Realizados com o Robô Ambiental Híbrido . . . . .	115
6.3.1	Testes em Laboratório . . . . .	117
6.3.1.1	Terreno com Inclinação Longitudinal Constante . . . . .	121

6.3.1.2	Terreno com Inclinação Lateral Constante . . . . .	123
6.3.1.3	Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Cons- tantes . . . . .	124
6.3.1.4	Terreno com Inclinações Variáveis . . . . .	126
6.3.1.5	Terreno Plano com Depressão . . . . .	129
6.3.2	Testes em Campo . . . . .	131
6.3.2.1	Obstáculo no Terreno . . . . .	132
6.3.2.2	Locomoção na Água . . . . .	134
6.3.2.3	Locomoção em Banco de Areia com Ondulações . . . .	140
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>143</b>
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	145
	<b>Apêndices</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>Resolução Cinemática do Mecanismo de Cinco Barras da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido</b>	<b>147</b>
A.1	Sub-Problema 1: Rotação em um Eixo . . . . .	148
A.2	Sub-Problema 3: Rotação a uma dada Distância . . . . .	148
A.3	Cinemática Direta do Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	150
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>154</b>

# Lista de Figuras

1.1	Funcionamento da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	6
1.2	Robô Ambiental Híbrido . . . . .	7
2.1	Robô <i>Wheel-Legged</i> Bidimensional . . . . .	16
2.2	Margem de Estabilidade de um Robô Móvel . . . . .	19
2.3	Gradiente da Margem de Estabilidade . . . . .	21
2.4	Crítério de Tração . . . . .	23
3.1	Modelo do Robô de Quatro Pernas Prismáticas . . . . .	28
3.2	Robô com Duas Pernas Prismáticas . . . . .	29
3.3	Arquitetura do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	34
3.4	Simplificação da Localização dos Pontos de Contato do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	35
3.5	Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	37
3.6	Espaço de Trabalho da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	41
3.7	Modelo do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	43
3.8	Singularidade do Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	45
3.9	Ângulos Máximos Compensados pelo Robô Ambiental Híbrido . . . . .	46
4.1	Malha de Controle Dedicada a Junta . . . . .	51
4.2	Malha de Controle Implementada em um Robô com Duas Pernas . . . . .	51
4.3	Cálculo da Altura de Robô Bidimensional . . . . .	52
4.4	Cálculo da Altura de Robô Tridimensional . . . . .	53
4.5	Ângulos de Balanço e Caturro do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	55
4.6	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido . . . . .	57
4.7	Controle de Orientação do Robô <i>Hylos</i> . . . . .	61
4.8	Funcionamento do Controle Implementado no Robô SSR . . . . .	63
4.9	Controle Implementado no Robô SSR . . . . .	63
5.1	Malha de Controle Simulada . . . . .	67
5.2	Robô com Duas Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinação Lateral Constante . . . . .	74
5.3	Deslocamento das Juntas do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles . . . . .	75

5.4	Configuração do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	75
5.5	Altura do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles . . . . .	76
5.6	Orientação do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles . . . . .	77
5.7	Distribuição de Forças no Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles	77
5.8	Distâncias de Tombamento do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles	78
5.9	Ângulos de Tombamento do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Utilizando Diferentes Controles . . . . .	79
5.10	Robô com Quatro Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinações Constantes . . . . .	80
5.11	Deslocamento das Juntas do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	81
5.12	Configuração do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	81
5.13	Orientação do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Diferentes Controles . . . . .	82
5.14	Ângulos de Tombamento do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	83
5.15	Robô com Quatro Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Orientação; (b) Ângulos de Tombamento. . .	86
5.16	Deslocamento das Juntas do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	86
5.17	Orientação do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Diferentes Controles . . . . .	87
5.18	Ângulos de Tombamento do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	88
5.19	Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante . . . . .	89
5.20	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	90
5.21	Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade;	91
5.22	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Diferentes Controles . . . . .	91

5.23	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	92
5.24	Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinação Lateral Constante . . . . .	94
5.25	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	95
5.26	Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	95
5.27	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles . . . . .	96
5.28	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	97
5.29	Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinações Constantes . . . . .	98
5.30	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	99
5.31	Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	99
5.32	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Diferentes Controles . . . . .	100
5.33	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade; . . . . .	101
5.34	Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Orientação; (b) Ângulos de Tombamento. . . . .	103
5.35	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	103
5.36	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Diferentes Controles . . . . .	104
5.37	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade. . . . .	105
6.1	Roda Dianteira do Robô Ambiental Híbrido sem Contato com o Solo . . . . .	108
6.2	Roda Traseira do Robô Ambiental Híbrido sem Contato com o Solo . . . . .	109
6.3	Capotagem do Robô Ambiental Híbrido Modelo Reduzido . . . . .	110
6.4	Tombamento do Robô Ambiental Híbrido Modelo Intermediário . . . . .	110
6.5	Pista Utilizada para Testes com o Robô <i>Hylos</i> . . . . .	118
6.6	Pista Utilizada para Testes com o Robô Ambiental Híbrido <i>Scarab</i> . . . . .	118
6.7	Plataforma para Emulação de Terrenos Irregulares . . . . .	119

6.8	Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.	121
6.9	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação .	121
6.10	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação . . . . .	122
6.11	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação .	123
6.12	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação . . . .	124
6.13	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação . . . . .	124
6.14	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação . . . .	125
6.15	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Controle de Orientação . . . . .	125
6.16	Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes . . . . .	126
6.17	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Controle de Orientação . . . . .	126
6.18	Orientação do Robô Ambiental Híbrido com Controle de Orientação em Terreno com Inclinações Variáveis . . . . .	127
6.19	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Controle de Orientação . . . . .	128
6.20	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação. . .	128
6.21	Robô Ambiental Híbrido em Terreno Plano com Depressão: (a) Sem Controle; (b) Controle de Tração. . . . .	129
6.22	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido com Controle de Tração . . . . .	130
6.23	Sensores de Deslocamento do Robô Ambiental Híbrido Durante Controle de Tração . . . . .	131
6.24	Deslocamento das Juntas do RAH ao se Deparar com um Obstáculo na Terra . . . . .	133
6.25	Configuração do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno . . . . .	133
6.26	Orientação do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno . . . . .	134
6.27	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno . . . . .	134
6.28	Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação . . . . .	135
6.29	Orientação do Robô Ambiental Híbrido Não Controlado se Locomovendo na Água . . . . .	136
6.30	Orientação do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água Utilizando Controle de Orientação . . . . .	137

6.31	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água . . . . .	137
6.32	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação. . . . .	138
6.33	Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado . .	140
6.34	Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado . . . . .	141
6.35	Orientação do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado . . . . .	141
6.36	Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.	142
A.1	Subproblema de <i>Paden-Kahan</i> 1 . . . . .	148
A.2	Subproblema de <i>Paden-Kahan</i> 3 . . . . .	149
A.3	Geometria do Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	150
A.4	Geometria do Mecanismo de Cinco Barras . . . . .	151

# Capítulo 1

## Introdução

A exploração e o monitoramento de áreas inacessíveis podem representar riscos, apresentando condições hostis, como temperaturas extremas, presença de radiação ou elemento tóxico, agentes infecciosos, caracterizando ambientes insalubres ao homem.

Uma solução cada vez mais utilizada nessas situações consiste no emprego de robôs móveis (Cunninghan, Corke, Durrant-White & Dalziel 1999, Mae, Yoshida, Arai, Inoue, Miyawaki & Adachi 2000, Osborn 1989). Um robô móvel pode ser dotado de sistemas e mecanismos que lhe permitam operar nos mais diversos tipos de terrenos, realizando as atividades estipuladas.

Ao realizar tarefas em terrenos acidentados, um sistema de locomoção eficiente se faz necessário, buscando melhorar o desempenho e a mobilidade do conjunto, minimizando o consumo de energia e garantindo a segurança operacional do robô.

Esta dissertação se concentra em mecanismos articulados com reconfiguração ativa, ou seja, que possuem atuadores acoplados às suspensões, adicionando graus internos de liberdade aos robôs.

Empregando tais mecanismos, um robô móvel é capaz de alterar sua cinemática de maneira a se acomodar a obstáculos, reposicionar seu centro de gravidade e influenciar as forças de contato com o solo (Sreenivasan 1994).

Controlando os múltiplos graus de liberdade de um robô com reconfiguração ativa, podemos melhorar de forma significativa o desempenho e mobilidade do sistema (Kumar & Waldron 1988).

Dessa forma, é desenvolvido um controle cinemático para um robô móvel, que atue nos graus de liberdade internos do sistema, não se preocupando em controlar os propulsores utilizados (que neste trabalho, serão rodas).

A reconfiguração cinemática é realizada visando aumentar a estabilidade e a tração do sistema, ao percorrer um terreno irregular. Uma importante simplificação adotada nesta pesquisa consiste em considerar os terrenos irregulares percorridos sendo representados por planos.

Um dos maiores riscos para a integridade de um robô móvel, ao percorrer um terreno acidentado, é o de tombamento. Tal evento pode danificar os equipamentos embarcados e ainda levar o sistema a uma configuração de imobilidade, onde o robô não consegue se locomover devido a ausência de pontos de contato com o solo.

Dependendo da inacessibilidade do local de operação, o resgate do robô pode ser inviável. Assim, o tombamento pode levar à perda total do sistema.

As suspensões devem ser comandadas de maneira a adaptar o sistema ao terreno percorrido, buscando uma configuração na qual o robô esteja mais estável.

Diferentes critérios podem ser utilizados para avaliar a estabilidade de um corpo. A escolha de um critério adequado como parâmetro de realimentação do controle cinemático é crucial para melhorar a mobilidade de um robô durante locomoção em terrenos acidentados.

Para se locomover com facilidade, é importante que os propulsores utilizados possuam capacidade de tração semelhante. Se uma roda não estiver em contato com o solo, ela não contribui para a mobilidade do sistema.

Podemos alterar a cinemática de um robô de maneira a distribuir as forças de contato do robô com o solo de maneira uniforme. Assim, nenhum componente é exigido em demasia, não é desperdiçada energia com patinamento de roda, e o sistema possui capacidade máxima de tração (Sreenivasan 1994).

Além de melhorar a estabilidade e a tração do sistema, a reconfiguração cinemática pode ser utilizada também para atingir requisitos de operação, como altura, garantindo sempre a mesma distância do robô em relação ao solo, e orientação, mantendo o corpo do robô paralelo à horizontal.

A velocidade de deslocamento de um robô móvel ao percorrer um terreno acidentado é geralmente reduzida. Adotando essa consideração, podemos desprezar os efeitos

dinâmicos do sistema, e desenvolver um controle cinemático.

Utilizamos um controle cinemático de velocidade descentralizado, no nível de junta, que busque uma configuração com melhor estabilidade e tração, aumentando a mobilidade do robô. Estratégias são desenvolvidas para cada junta, comandando-as de acordo com a variável a ser controlada.

A arquitetura descentralizada é bastante encontrada na natureza, utilizada por insetos que se locomovem utilizando pernas. Em (Schmitz, Dean, Kindermann, Schumm & Cruse 2001, Durr, Krause, Schmitz & Cruse 2003), pesquisas são realizadas com o inseto *Carausious morous*, conhecido como bicho-pau, analisando sua forma de locomoção. As mesmas estratégias utilizadas pelo inseto, como controle descentralizado e distribuição uniforme de forças, são implementadas e testadas em um robô que anda com seis pernas, buscando melhorar sua mobilidade.

A principal diretriz deste trabalho é obter uma solução de fácil aplicação, simples e robusta, que necessite de poucos dados e informações do terreno, e que seja viável de embarcar em qualquer sistema com reconfiguração ativa.

Os controles foram desenvolvidos considerando um modelo simplificado de robô, com pernas compostas por juntas prismáticas (RPP). Em seguida, eles foram adaptados a um robô real, que opera em terrenos acidentados e possui reconfiguração ativa: o Robô Ambiental Híbrido (RAH) da Petrobras, dispositivo utilizado para realizar o monitoramento da Região Amazônica (Santos 2007).

O desempenho das estratégias propostas é analisado inicialmente utilizando simulações, e em seguida por meio de testes com o Robô Ambiental Híbrido, tanto em laboratório quanto em campo.

## 1.1 Motivação

Robôs móveis vem sendo utilizados nas mais diversas tarefas, como exploração e monitoração, resgate e transporte de materiais. Muitas dessas tarefas são realizadas em locais que apresentam risco ao homem, como regiões vulcânicas, ou áreas com radiação elevada. Robôs são utilizados para combater incêndios, desarmar bombas, e até mesmo na mineração, poupando pessoas dessas tarefas insalubres.

Uma região explorada pode ser tão remota e inacessível, inhóspita ao homem, que exija a utilização de robôs. Esse é o caso dos robôs espaciais, como os famosos *Spirit* e *Opportunity*, projetados para trabalhar em Marte nas mais adversas condições, sem nenhum contato direto com seu operador. Os robôs estão em operação desde janeiro de 2004 (NASA 2007), já tendo se deparado com diversos obstáculos, incluindo grandes inclinações, rochas e terrenos arenosos.

A exploração e o monitoramento de florestas e matas podem ser tarefas mais complexas que a exploração espacial. Essas áreas podem apresentar grande biodiversidade. Além dos obstáculos já citados, são muitos os agentes externos a interferir no sistema, como ventos, chuvas, características da vegetação, hidrografia e até mesmo a fauna local. Esses fatores geram ambientes não estruturados.

A locomoção em superfícies desconhecidas envolve complexas interações entre o robô e o solo, que variam de acordo com o tipo de solo. Para realizar tal tarefa, os robôs móveis devem possuir um sistema de locomoção eficiente, capaz de superar os diversos obstáculos encontrados.

Os sistemas de locomoção podem ser classificados de acordo com a utilização de rodas ou pernas (Grand, BenAmar, Plumet & Bidaud 2004). As rodas possibilitam alta velocidade de deslocamento, baixo consumo de energia e capacidade de transportar carga. As pernas aumentam a mobilidade do sistema, permitindo a locomoção em terrenos com irregularidades acentuadas.

Buscando as vantagens de ambos sistemas, mecanismos híbridos foram desenvolvidos, denominados de *Wheel-Legged* (Grand et al. 2004). O objetivo é adotar um sistema que utilize rodas para propulsão e que possua pernas com graus de liberdade internos, comandados de maneira ativa, adaptando sua configuração.

Com um sistema ativo, é possível alterar a configuração cinemática do robô, de maneira adequada ao terreno percorrido. Tal sistema necessita de um controle eficiente, que busque melhor estabilidade e tração do robô durante a locomoção.

Para realizar o controle cinemático, são necessários dados sobre as condições de operação do robô e informações sobre o meio, fornecidos por diversos sensores embarcados. Entretanto, muitos sensores são pouco confiáveis em ambientes não estruturados, fornecendo dados imprecisos.

### 1.1.1 Robô Ambiental Híbrido

O Robô Ambiental Híbrido está sendo desenvolvido para realizar o monitoramento da região amazônica. Desenvolvido pela Petrobras, ele irá operar nas proximidades do gasoduto Coari-Manaus, ao longo das margens do Rio Solimões. O robô irá auxiliar na análise dos impactos ambientais causados pelo transporte de gás natural e petróleo na região.

Ele coletará diversas informações sobre o meio, que irão fazer parte de um banco de dados sobre a região Amazônica, a ser disponibilizado para centros de excelência e universidades.

Diferentes dispositivos serão utilizados ao longo do rio Solimões, criando uma rede de informações e dados abrangente sobre a região. Três modelos de robôs estão sendo desenvolvidos: modelo reduzido (escala 1:4), modelo intermediário (escala 1:2) e modelo tripulado (escala 1:1). Nesta dissertação, iremos propor estratégias de reconfiguração cinemática para o modelo intermediário. À partir de agora, quando citado o Robô Ambiental Híbrido, estaremos nos referindo ao modelo intermediário.

Atualmente, pesquisadores realizam medições e coletas de amostras na região. Esses profissionais estão expostos aos mais diversos riscos, incluindo o contato com insetos transmissores de doenças (febre amarela, malária, dengue, leishmaniose, entre outros) e animais selvagens.

O sistema busca evitar o contato direto do homem com o meio. Assim, tanto homem quanto o meio ambiente serão preservados. Atividades serão realizadas em áreas inacessíveis à presença humana e conseqüentemente pouco conhecidas e estudadas. Locais onde o homem não pode permanecer ou mesmo acessar deverão ser monitorados e, em casos extremos, ser atendidos com recursos de contingência.

O Robô Ambiental Híbrido irá realizar medições, coletar dados e amostras e executar tarefas nestes ambientes inóspitos, e para tal deve ser capaz de superar obstáculos, podendo se locomover sobre água, terra firme, pântanos, brejos, terrenos alagadiços e arenosos.

Um sistema de locomoção inovador está sendo desenvolvido, de acordo com as condições encontradas na Amazônia. A arquitetura *Wheel-Legged* foi adotada, permi-

tindo ao robô transportar carga e economizar energia, e também percorrer terrenos com adversidades.

O robô utiliza quatro rodas para se locomover. Buscando flutuabilidade na água, as rodas possuem grande volume e são confeccionadas com material de baixa densidade. Cada roda possui aletas dispostas de forma a aumentar o arrasto ao se locomover na água.

Cada roda está acoplada a um sistema de suspensão independente, denominado também de perna, composto por mola mais atuador elétrico. Comandando esse dispositivo, é possível alterar a posição da roda, e também seu ângulo em relação ao solo. A figura 1.1 ilustra o mecanismo.

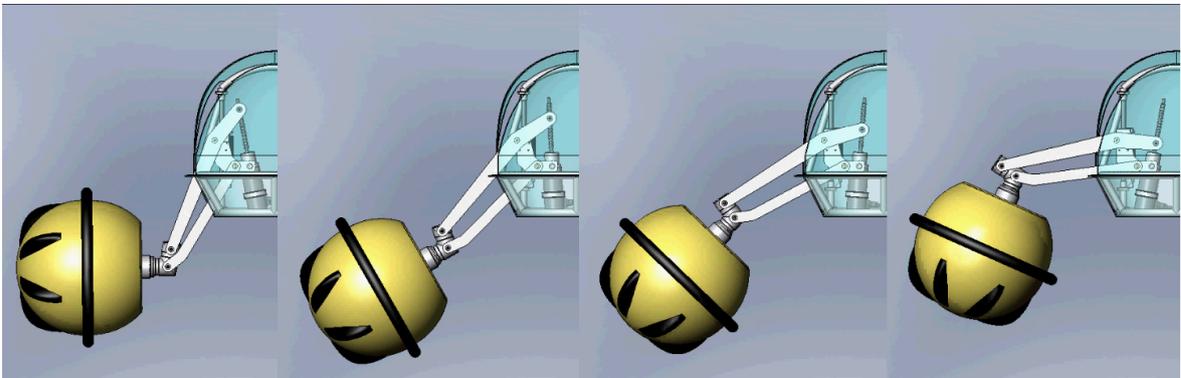


FIGURA 1.1: Funcionamento da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido

O modelo intermediário pesa aproximadamente 150 kg, isto principalmente pela grande quantidade de equipamentos embarcados, visando cumprir todas as tarefas estipuladas.

Ao se locomover em terra, pode ser necessário ultrapassar obstáculos com grandes dimensões. Nas operações em rios e lagoas, é indispensável manter os equipamentos embarcados protegidos da água. Assim, o corpo do robô e conseqüentemente seu centro de massa devem permanecer afastados da superfície de sustentação, com valor superior a uma distância mínima de segurança.

O Robô Ambiental se locomove em regiões com características muito distintas, como terra, água, brejos, áreas com grande densidade de vegetação. Obstáculos são constantemente encontrados, incluindo troncos e galhos caídos, arbustos, vegetação flutuante densa, irregularidades do terreno.

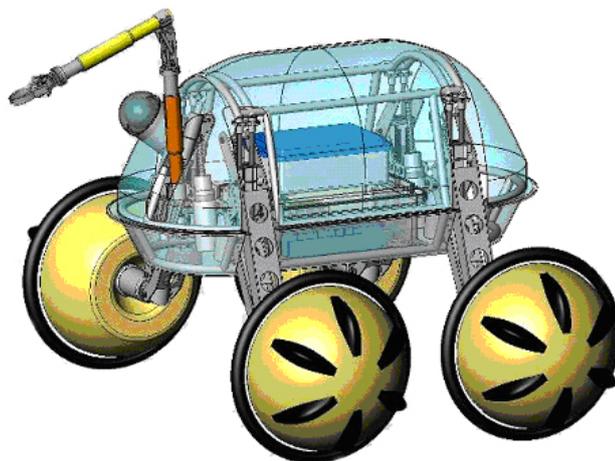


FIGURA 1.2: Robô Ambiental Híbrido

Apesar de ser uma planície, a região amazônica apresenta áreas inclinadas e acidentadas, principalmente nas margens dos rios durante as secas, período no qual o nível da água pode descer até 15 metros.

Sem controle das suspensões, o robô se depara constantemente com problemas de locomoção, principalmente em regiões acidentadas. Nesses casos, é comum encontrar uma das rodas sem contato com o terreno, o que prejudica a tração do sistema. O robô pode tombar ao se deparar com inclinações mínimas de  $35^\circ$ .

Cada roda está acoplada a um sistema de suspensão independente: são quatro suspensões a serem atuadas simultaneamente, o que impossibilita comando manual eficiente. O controle automático será vital à mobilidade do robô nos diferentes terrenos, além de possibilitar que o operador se dedique a outras tarefas.

## 1.2 Objetivo

Nesta monografia, são apresentadas estratégias que busquem melhorar a mobilidade de robôs móveis com arquitetura *Wheel-Legged* possuindo 1 grau de liberdade por perna, ao percorrerem terrenos irregulares.

Um controle cinemático é proposto, atuando nos graus de liberdade internos do robô, alterando sua cinemática de maneira a se acomodar a obstáculos ultrapassados,

reposicionar seu centro de gravidade e influenciar as forças de contato com o terreno.

As estratégias de controle devem ser desenvolvidas buscando simplicidade e robustez. Poucos sensores e dados externos do terreno são necessários, permitindo sua implementação em qualquer dispositivo simples que possua reconfiguração ativa. As simplificações adotadas não podem comprometer a eficiência da solução proposta.

As velocidades de deslocamento adotadas são baixas, e por isso o controle desenvolvido é puramente cinemático, desconsiderando a dinâmica do sistema.

Utilizamos um controle de velocidade descentralizado, que busque uma configuração com melhor estabilidade e tração. Requisitos de altura e orientação do robô devem ser cumpridos. Estratégias são desenvolvidas para cada grau de liberdade, comandando-os de maneira adequada à variável controlada.

Controles são projetados, considerando inicialmente um robô simplificado, com pernas prismáticas, e em seguida o modelo cinemático do Robô Ambiental Híbrido. Eles são validados em simulações e também em testes práticos com o RAH, realizados em laboratório e em campo.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Diferentes técnicas para melhorar o desempenho e mobilidade de um sistema móvel já foram desenvolvidas.

Algumas das tecnologias para sistemas móveis mais conhecidas estão presentes na área automobilística, muitas delas desenvolvidas para carros de corrida, e hoje embarcadas em carros de passeio modernos.

Entre os controles que atuam nas rodas e nos freios dos veículos, podemos citar: *Antilock Brake (ABS)*, *Electronic Brake Distribution (EBD)*, *Electronic Power Steering (EPS)*, *Electronic Stability Program (ESP)* (WikiAnswer 2007), e o controle de tração.

A suspensão ativa, banida da Fórmula 1 em 1994, visava principalmente manter constante a altura do carro em relação ao solo, independentemente do peso (GPTotal 2008). Este varia em função da quantidade de gasolina nos tanques e da força vertical que aumenta com a velocidade. Com altura invariável, o efeito de sucção sob o carro é otimizado.

Como alternativa a um sistema de suspensão passiva, como molas, é utilizado um atuador oleopneumático cuja rigidez varia continuamente de maneira a compensar as variações de carga em cada roda.

A altura é medida utilizando laser. Toda variação é transformada num sinal elétrico, que chega ao módulo de controle eletrônico e este determina a pressão no atuador para atender às necessidades no dado momento.

A suspensão ativa proporciona também total controle de rolagem nas curvas e dos ângulos de ataque nas freadas e saída nas acelerações, respectivamente (Martins 1999).

Essa tecnologia já está disponível em carros de passeio, entre eles o *Citroën C5* com sua suspensão *Hidractive* de terceira geração, e os Mercedes-Benz CL e Classe S. O utilitário esporte *Porsche Cayenne Turbo* vem com suspensão pneumática que faz o veículo baixar para duas diferentes alturas, uma a 125 km/h e outra a 210 km/h, com objetivo de maior estabilidade.

A empresa Bose, que produz equipamentos de som de alta qualidade, especialmente alto-falantes, desenvolveu um sistema de suspensão para automóveis. A suspensão da Bose é na verdade um motor linear, seguindo o mesmo princípio dos motores lineares presentes nos alto-falantes, responsáveis por mover o cone acústico para frente e para trás, criando as ondas sonoras. Os resultados obtidos são impressionantes, e podem ser vistos em vídeo na Internet ( < <http://www.youtube.com/> >, palavras chave: *bose, suspension*).

Porém, não será esse o enfoque adotado nessa monografia. O controle proposto aqui será utilizado em um robô móvel ao percorrer terrenos irregulares, se deparando com obstáculos e inclinações. As velocidades de locomoção nessas condições serão baixas, de maneira a atenuar os efeitos da dinâmica do sistema. Essas condições se assemelham muito às encontradas pelos *rovers* utilizados para exploração espacial.

Primeiros estudos sobre locomoção em terrenos acidentados foram realizados por *Mieczyslaw Gregory Bekker* (Bekker 1956). Membro do exército polonês durante a segunda guerra mundial, *Bekker* trabalhou no *Wojskowy Instytut Badan Inzynierii* (Instituto de Pesquisa Bélica) em Varsóvia, em sistemas para tração de veículos em terrenos desconhecidos (Wikipedia 2007).

Na década de 60, nos Estados Unidos, *Bekker* se tornou especialista em projetos de veículos *off-road*, desenvolvendo uma nova disciplina chamada *Terramechanics* (Bekker

1960). A disciplina estuda as propriedades do solo, em especial sua interação com veículos móveis.

Com base nas suas pesquisas, foi desenvolvido o *Lunar Roving Vehicle* (Boeing 1971), utilizado nas missões *Apollo 15*, *Apollo 16* e *Apollo 17*. O veículo possui suspensão passiva para se adaptar às irregularidades do terreno, e é capaz de transportar dois tripulantes.

Para se locomover em terrenos irregulares, é necessário um sistema de locomoção de alto desempenho. Os sistemas de locomoção podem ser classificados como passivos ou ativos.

As principais pesquisas sobre suspensão passiva se concentram no projeto de um mecanismo inovador. Os robôs *Nomad* (Rollins, Luntz, Foessel, Shamah & Whittaker 1998), *Rocky* (Volper 1997) e *Shrimp* (Estier, Crausaz, Merminod, Lauria, Piguet & Siegwart 2000) ilustram a utilização de suspensões passivas que permitem alta adaptabilidade. Essas suspensões permitem ao veículo ultrapassar obstáculos com dimensão superior ao raio das rodas utilizadas, e também superar descontinuidades do terreno.

Já os sistemas de suspensão ativa possuem graus de liberdade internos. Empregando tais mecanismos, um robô é capaz de alterar sua cinemática de maneira a se acomodar a obstáculos, reposicionar seu centro de gravidade e influenciar as forças de contato com o solo. Esses mecanismos possuem características de mobilidade em terrenos acidentados superiores aos dispositivos que utilizam suspensão passiva (Sreenivasan 1994).

As pesquisas relacionadas a suspensões ativas consistem em comandar os graus de liberdade internos do robô, de maneira a melhorar o desempenho e a mobilidade do sistema em terrenos irregulares. Estratégias para superação de obstáculos são desenvolvidas. Critérios de estabilidade e tração podem ser controlados.

A literatura sobre robôs móveis para exploração espacial está em constante expansão, com vários exemplos de aplicações de controle em robôs com reconfiguração cinemática ativa.

Entre as pesquisas já realizadas na área, dois grupos de pesquisa se destacam, o *Jet Propulsion Laboratory* e o *Laboratoire de Robotique de Paris*, por apresentarem trabalhos com objetivos semelhantes. Ambos os laboratórios possuem robôs com arquitetura *Wheel-Legged*, para os quais são desenvolvidas estratégias de controle cinemático estático visando melhorar a mobilidade dos sistemas.

Em (Iagnemma & Dubowsky 2004, Iagnemma, Rzepniewski, Dubowsky, Pirjanian, Huntsberger & Schenker 2000) é proposto como solução do problema de reconfiguração cinemática a minimização de uma função de custo que avalia a configuração do robô, utilizando o gradiente da margem de estabilidade.

O critério utilizado em (Iagnemma et al. 2000) para avaliar a estabilidade do sistema considera os ângulos de inclinação necessários para tombar um corpo. O ângulo mínimo de tombamento corresponde ao gradiente da margem de estabilidade.

O gradiente da margem de estabilidade, proposto em (Papadopoulos & Rey 1996), é também utilizado por outras pesquisas, como (Grand, Amar, Plumet & Bidaud 2002, Grand et al. 2004), que mesmo adotando estratégia de controle diferente, empregam o ângulo de tombamento mínimo para avaliar o desempenho obtido.

Para utilizar o gradiente da margem de estabilidade, é necessário conhecer com exatidão a localização do centro de gravidade do robô, os pontos de contato com o terreno e as forças externas aplicadas.

O robô utilizado para validar o controle proposto em (Iagnemma et al. 2000) é o *Sample Return Rover* (SSR).

Segundo (Iagnemma et al. 2000), não é possível obter uma solução ótima para a configuração do robô, sem conhecer dados do terreno, quando os pontos de contato entre robô e terreno se deslocam durante a reconfiguração cinemática.

Conforme apresentado na seção 4.4.2, em (Iagnemma et al. 2000, Iagnemma & Dubowsky 2004), a estabilidade do sistema é analisada considerando todos os ângulos de tombamento, e não apenas o gradiente da margem de estabilidade. Um robô controlado com o algoritmo proposto não alcançará configuração de estabilidade máxima.

Um enfoque diferente é adotado em (Grand et al. 2002, Grand et al. 2004), que consideram complexo e pouco confiável calcular ou estimar informações sobre o terreno, em especial o ponto exato de contato com o solo. Os trabalhos propõem uma nova abordagem para melhorar a estabilidade e a tração de um robô móvel, utilizando a distribuição uniforme de forças.

O robô *Hyllos* é utilizado para demonstrar a eficiência das estratégias desenvolvidas. De acordo com (Grand et al. 2002), através de análises estáticas de distribuição de força, é possível considerar que a estabilidade do robô é máxima quando as componentes verticais das forças aplicadas as suas pernas sejam iguais.

O robô *Hylos* possui sensores de força instalados nas pernas. Porém, segundo (Grand et al. 2002), quando o sistema está se movendo, não é trivial determinar as forças de contato através das medidas dos sensores de força. Tais dispositivos são empregados apenas para garantir o contato das rodas com o terreno.

Dessa maneira, foi desenvolvido um controle cinemático que cancela a inclinação do corpo robô. O controle de orientação implementado, aplicado num sistema para o qual as simplificações e considerações adotadas são válidas, distribui as componentes verticais das forças de maneira uniforme entre as pernas.

Porém, a configuração final alcançada não é a ideal, quando adotamos o critério do gradiente da margem de estabilidade.

Considerações sobre distribuição de forças em cadeias cinemáticas fechadas foram realizados em (Kumar & Waldron 1988). A aplicação da distribuição de forças em robôs que se locomovem utilizando apenas pernas são apresentados em (Waldron 1986). Aqui é considerada a dinâmica do sistema, e é necessário conhecer com exatidão todas as forças aplicadas ao sistema.

Em (Sreenivasan 1994) a distribuição de forças é aplicada em um *Wheeled Actively Articulated Vehicle*. Assim como em (Kumar & Waldron 1988, Waldron 1986), é considerada a dinâmica do sistema, e é necessário conhecer com exatidão todas as forças aplicadas ao sistema, exigindo a instalação de sensores de força multi-eixos em cada roda.

Em relação ao Robô Ambiental Híbrido, já foram propostas tanto modelagem quanto estratégias de controle de estabilidade, em (Silva 2007, Santos 2007). Esses dois trabalhos buscam melhorar a estabilidade do robô através do controle de tração das rodas, e consideram a dinâmica do robô.

## 1.4 Organização da Dissertação

Essa dissertação é composta por 7 capítulos.

Este capítulo introduz o assunto abordado durante a dissertação, incluindo a motivação da pesquisa, os objetivos desejados e considerações sobre outros trabalhos na área.

A formulação do problema de locomoção em terrenos irregulares é feita no capítulo 2. Neste capítulo, apresentamos considerações empregadas sobre o robô *Wheel-Legged*, o terreno percorrido e as interações entre eles. Os critérios de estabilidade e tração utilizados para avaliar a mobilidade do sistema são formalizados.

O capítulo 3 apresenta dois modelos cinemáticos de robôs a serem utilizados nesta dissertação: o primeiro, um robô com pernas prismáticas (RPP), com configuração simples; o segundo, o Robô Ambiental Híbrido (RAH). As equações de cinemática direta e cinemática diferencial dos modelos são calculadas.

No capítulo 4 são propostas as estratégias de controle, desenvolvidas buscando maior mobilidade de um robô móvel. Diferentes equações são utilizadas, buscando controlar a altura do veículo em relação ao solo, orientação do seu corpo, tração e estabilidade do sistema. Outras soluções já desenvolvidas são analisadas.

As simulações das estratégias de controle aplicadas aos modelos do RG e RAH são apresentadas no capítulo 5. Os resultados obtidos são analisados.

A implementação do controle no Robô Ambiental Híbrido é detalhada no capítulo 6. Os testes realizados com o sistema, tanto em laboratório, quanto em campo, são apresentados neste capítulo.

As conclusões desta pesquisa são feitas no capítulo 7, que também contém sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Locomoção em Terrenos Irregulares

As diferentes soluções propostas para resolver o problema de reconfiguração cinemática são fortemente caracterizadas pelas considerações realizadas sobre o terreno e suas interações com o robô.

Um enfoque consiste em utilizar grande número de dados do terreno e sua interação com o robô, estimados através de diferentes sensores.

Muitas estratégias de controle cinemático desenvolvidas para um robô *Wheel-Legged* seguem preceitos da *Terramechanics*, utilizando parâmetros relacionados ao solo, e a interação deste com o robô (Iagnemma et al. 2000, Iagnemma & Dubowsky 2004).

É importante ressaltar que a estimação de parâmetros do solo pode ser uma complexa tarefa a ser realizada, exigindo esforço computacional e dependendo de dados obtidos por sensores num ambiente não estruturado.

Outra abordagem seria empregar simplificações e utilizar poucos dados do meio externo. As simplificações adotadas não podem comprometer a verossimilhança do sistema.

Nesta tese buscamos uma solução simples e robusta para reconfigurar um robô *Wheel-Legged*, buscando maior mobilidade. Dessa forma, poucos sensores e dados externos do terreno são utilizados, permitindo sua implementação em qualquer dispositivo simples com arquitetura adequada.

Neste capítulo, iremos apresentar as considerações e simplificações empregadas nesta dissertação, referentes aos robôs controlados, o terreno percorrido e a interação

entre eles.

Os critérios utilizados para avaliar a mobilidade do sistema serão apresentados.

## 2.1 Robô *Wheel-Legged*

Nesta dissertação, consideramos robôs móveis com graus de liberdade internos comandados de maneira ativa. O objetivo é atuar nesses graus de liberdade, de maneira a assumir configuração mais adequada ao sistema.

Não nos preocupamos em controlar os propulsores utilizados. Os robôs aqui estudados possuem arquitetura *Wheel-Legged*, utilizando rodas para propulsão e pernas para suspender o robô, comandadas de maneira ativa, aumentando os graus de liberdade (DOF) internos do sistema.

Comandando as pernas, é possível alterar a configuração cinemática do robô, se acomodando a obstáculos ultrapassados, reposicionando seu centro de gravidade e influenciando as forças de contato com o terreno.

Consideramos robôs com corpo retangular suspenso por 4 pernas, também denominadas de suspensões. Cada suspensão está acoplada a uma junta  $\theta_i \in \mathbb{R}$ , resultando em 1 DOF por perna.

Para ilustrar o problema de reconfiguração cinemática, utilizamos também robôs bidimensionais, com apenas duas pernas, conforme ilustrado na figura 2.1. Essa abordagem é utilizada para introduzir os principais conceitos relacionados ao problema da reconfiguração cinemática.

Ao se locomover em um terreno acidentado, o robô não pode contar com nenhum ponto externo como referência de coordenadas, apenas o plano horizontal ( $O_T$ ).

Assim como na aeronáutica e engenharia espacial, adotaremos como origem do sistema de coordenadas  $O_R$  do robô um ponto fixo, coincidente com seu centro de massa (CM). Esse será o sistema de coordenadas utilizado em todos os cálculos de cinemática dos robôs.

A orientação do robô é indicada pelos ângulos de balanço (*roll*)  $\phi$ , caturro (*pitch*)  $\psi$  e guinada (*yaw*)  $\vartheta$ . Utilizamos  $\phi$  indicando a inclinação lateral, em torno do eixo  $x_R$  e  $\psi$  indicando a inclinação longitudinal do sistema, em torno de  $y_R$ .

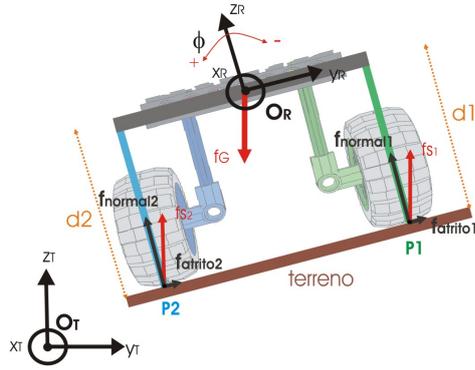


FIGURA 2.1: Robô *Wheel-Legged* Bidimensional

Os pontos de contato entre terreno e robô estão localizados nas extremidades das pernas ou rodas acopladas. A posição de um ponto de contato, em relação a  $O_R$ , é uma função da posição da junta que comanda a perna correspondente ( $P_i(\theta_i) \in \mathbb{R}^3$ ).

## 2.2 O Terreno Irregular Percorrido

Os terrenos irregulares geralmente formam uma superfície não linear complexa (Sreenivasan 1994). Obter um modelo exato dessa superfície é uma tarefa difícil, sendo necessários vários dados do meio, e elevados requisitos computacionais.

Uma simplificação importante consiste em considerar o terreno composto por diferentes planos, referentes aos pontos de contato. Tal simplificação é necessária para a realização do controle cinemático, quando não conhecemos com exatidão o modelo do terreno. A mesma abordagem é adotada em outras pesquisas (Grand et al. 2004, Grand et al. 2002, Sreenivasan 1994).

Dessa maneira, podemos considerar que as condições locais do terreno se mantêm constantes. Além disso, as forças normais entre solo e as rodas do robô são aplicadas no mesmo sentido, perpendicular aos planos que formam o terreno.

Segundo (Sreenivasan 1994), a hipótese é pertinente, já que a flexibilidade dos pneus

nos pontos de contato aumenta o raio de curvatura efetivo das variações locais do solo.

Os sistemas de visão de mapeamento de terreno, como o *Scanning Laser Rangefinder*, geram informações discretas sobre o terreno. Para propósitos de reconfiguração cinemática, o modelo do terreno pode ser obtido através de interpolação planar entre os pontos adjacentes (Sreenivasan 1994).

O terreno acidentado percorrido será representado como uma reta ( $\Psi : ax + by + c = 0$ , onde  $a, b, c$  são os parâmetros da reta) traçada entre os dois pontos de contato com o robô, semelhante à figura 2.1, no caso bidimensional.

Ao utilizar três pernas como sustentação, podemos considerar o terreno como um plano ( $\Phi : ax + by + cz + d = 0$ , onde  $a, b, c, d$  são os parâmetros do plano) formado pelos três pontos de contato correspondentes.

No caso mais geral, considerando um sistema que utilize mais de três suspensões, o terreno será composto por diferentes planos de contato, paralelos entre si, podendo estar em alturas diferentes.

A simplificação adotada é válida para terrenos onde as condições locais são constantes e as forças normais aplicadas nas rodas (ou pernas) possuem mesmo sentido.

Ao se deslocar em um terreno, o robô analisa os ângulos de  $\phi$  e  $\psi$  referentes a sua orientação. Conhecendo ainda a posição dos pontos de contato, podemos estimar uma superfície virtual, não necessariamente equivalente ao modelo real, utilizada como terreno.

O robô percebe o terreno, durante seu deslocamento, pela alteração na orientação de seu corpo causada por fatores externos, e não pela reconfiguração cinemática do sistema.

## 2.3 Forças Aplicadas no Robô

Nesta pesquisa, apenas a força externa da gravidade  $f_g \in \mathbb{R}^3$  é considerada, atuando no centro de massa do robô, sendo este ponto o centro de gravidade (CG) do sistema.

O peso resultante do sistema se concentra em forças de sustentação  $f_{s_i} \in \mathbb{R}^3$  atuando nos pontos de contato. Assim como a força de gravidade, as  $f_{s_i}$  são aplicadas no sentido vertical, podendo cada uma ser decomposta em força normal ao terreno e forças de

atrito lateral e longitudinal.

Essas simplificações estão ilustradas na figura 2.1.

## 2.4 Critérios de Mobilidade do Sistema

A mobilidade de um robô móvel expressa a facilidade do sistema para se locomover em terrenos irregulares. Quanto maior for a mobilidade de um robô, maiores serão as adversidades superadas pelo sistema.

Nesta pesquisa, iremos considerar principalmente a estabilidade e a tração de um robô móvel para avaliar sua mobilidade. Os conceitos relacionados serão formalizados nas próximas seções, apresentando critérios de medição adequados.

### 2.4.1 Estabilidade

O conceito básico de estabilidade consiste em manter um corpo suspenso, preferencialmente em equilíbrio estável. Nessa condição, qualquer deslocamento em relação a esta posição resultará em uma força restauradora, que tende a fazer a partícula voltar a condição de equilíbrio (Goldstein, Poole & Safko 2002).

Em robótica móvel, o compromisso do controle de estabilidade é garantir que o sistema não tombe em qualquer direção. Quanto mais eficiente o sistema de locomoção utilizado, melhor será a adaptação de um robô a um terreno acidentado, assumindo configuração mais estável.

Nas primeiras pesquisas sobre locomoção com pernas (McGhee & Frank 1968), um critério básico foi desenvolvido para analisar a estabilidade estática de um corpo ideal, com velocidade constante sobre um terreno plano. O corpo é considerado estável se a projeção do seu centro de gravidade (CG) estiver dentro do polígono de sustentação.

O polígono de sustentação é criado ao se traçar linhas ligando os pontos de sustentação vizinhos. A distância mínima entre a projeção do CG e polígono de contato no plano horizontal é a margem de estabilidade do sistema.

Muitos outros critérios de estabilidade foram desenvolvidos. Nesta pesquisa, utili-

zaremos um critério classificado em (Grand et al. 2004) como gradiente da margem de estabilidade, analisando o ângulo mínimo em que o corpo começa a tombar.

### 2.4.1.1 Margem de Estabilidade

Um critério simples para avaliar a estabilidade de um sistema consiste em analisar a distância entre as projeções do centro de gravidade de um corpo e o polígono de sustentação do mesmo, no plano horizontal.

Tal polígono de sustentação, também denominado nesta dissertação de PS, é criado ao se traçar linhas ligando os  $m$  pontos de contato vizinhos.

As distâncias entre as projeções do CG e PS do robô no plano horizontal serão chamadas de distâncias de tombamento  $d_{T_i} \in \mathbb{R}$ . A distância mínima de tombamento é a margem de estabilidade  $\alpha$  do sistema:

$$\alpha = \min(d_{T_i}), \quad i = 1, \dots, m \quad (2.1)$$

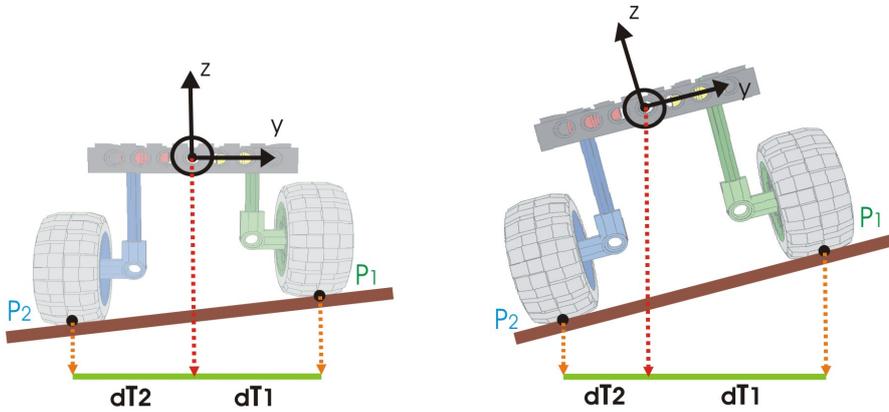


FIGURA 2.2: Margem de Estabilidade de um Robô Móvel

De acordo com o critério apresentado, a configuração na qual o sistema possui maior estabilidade é quando a projeção do CG está localizada no centro geométrico da projeção do polígono de sustentação.

É importante ressaltar que esse critério não considera diretamente a altura do CG do robô em relação ao seu polígono de sustentação. Dois robôs alinhados à horizontal, apresentando diferentes alturas em relação ao solo e polígonos de sustentação com a mesma área, possuirão margem de estabilidade idêntica.

A margem de estabilidade é o critério utilizado em (Santos 2007) como realização do controle desenvolvido.

#### 2.4.1.2 Gradiente da Margem de Estabilidade

O critério de estabilidade proposto em (Papadopoulos & Rey 1996) foi originalmente desenvolvido pensando em máquinas móveis com manipulador de grande porte, como guindastes e empilhadeiras. Devido as considerações apresentadas em seguida, esse critério é bastante adequado à análise de robôs móveis exploradores, sendo adotado nas pesquisas (Iagnemma et al. 2000, Iagnemma & Dubowsky 2004, Grand et al. 2002, Grand et al. 2004).

Este critério analisa o ângulo mínimo em que o corpo começa a tombar. Dessa maneira, além de considerar a distância entre a projeção do CG e o polígono de sustentação (PS), também é considerada a altura do CG em relação ao polígono.

O gradiente da margem de estabilidade  $\beta$  é calculado por:

$$\beta = \min(\gamma_i), \quad (2.2)$$

sendo  $\beta$  equivalente ao ângulo  $\gamma_i$  mínimo em que o corpo começa a tombar.

Os ângulos de tombamento  $\gamma_i$  são calculados utilizando os vetores traçadas entre os pontos de contato  $P_i \in \mathbb{R}^3$  (entre robô e terreno) que formam o polígono de sustentação, denominados eixos de tombamento  $e_{t_i} \in \mathbb{R}^3$ :

$$e_{t_i} = P_{i+1} - P_i, \quad i = 1, \dots, m - 1, \quad (2.3)$$

$$e_{t_m} = P_1 - P_m \quad (2.4)$$

Os vetores  $l_i \in \mathbb{R}^3$ , normais aos eixos de tombamento  $e_{t_i}$ , que interceptam o centro

de massa do robô, são descritos como:

$$l_i = (I - \hat{e}_{t_i} \hat{e}_{t_i}^T) P_{i+1}, \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (2.5)$$

$$l_m = (I - \hat{e}_{t_m} \hat{e}_{t_m}^T) P_1 \quad (2.6)$$

onde  $\hat{e}_{t_i} = \frac{e_{t_i}}{\|e_{t_i}\|}$ . Os ângulos entre  $l_i$  e o vetor da força gravitacional  $f_g$  serão os  $\gamma_j$ :

$$\gamma_j = \sigma_j \arccos(\hat{f}_g^T \hat{l}_i), \quad j = 1, \dots, m \quad (2.7)$$

com

$$\sigma_j = \begin{cases} +1, & (\hat{l}_j \times \hat{f}_g)^T \hat{e}_{t_j} < 0 \\ -1, & (\hat{l}_j \times \hat{f}_g)^T \hat{e}_{t_j} \geq 0 \end{cases}$$

onde  $\times$  é o produto vetorial.

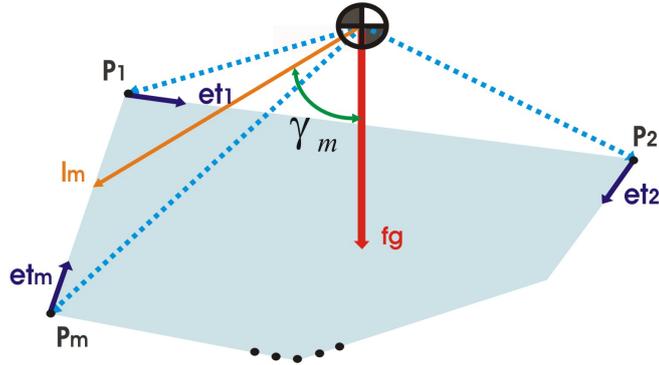


FIGURA 2.3: Gradiente da Margem de Estabilidade

Quando algum  $\gamma_j \leq 0$ , significa que o robô pode tombar. Quanto maior for o gradiente da margem de estabilidade, mais estável estará o sistema.

Forças aplicadas ao sistema, causadas por exemplo ao manusear uma carga com o manipulador, podem ser computadas nos cálculos.

Uma força externa  $f_m$  aplicada no sistema irá alterar a estabilidade do sistema. A força resultante  $f_j$  no eixo de tombamento é calculado através da equação 2.8:

$$f_j = (I - \hat{e}_{t_j} \hat{e}_{t_j}^T) (f_g + f_m) \quad (2.8)$$

Se existir um momento  $n_m$  associado a força  $f_m$ , podemos calcular o sistema de forças de acordo com a equação 2.9:

$$f_j^* = f_j + \frac{\hat{l}_j \times (\hat{e}_{t_j} \hat{e}_{t_j}^T) n_m}{\|\hat{l}_j\|} \quad (2.9)$$

Esse sistema de forças  $f_j^*$  será utilizada na equação 2.7, ao invés de apenas a força de gravidade  $f_g$ .

## 2.4.2 Tração

Um fator determinante para a mobilidade de um sistema é sua capacidade de tração em terrenos irregulares.

Visando aumentar a capacidade de tração de um sistema móvel, é importante garantir que todos os propulsores atuem em condições semelhantes, tracionando de maneira conveniente. Se uma roda não estiver em contato com o solo, ela não contribui para a mobilidade do sistema.

Com esse enfoque, o requisito básico de tração é garantir que todas as rodas do robô estejam sempre em contato com o solo. Considerando as simplificações adotadas, como abordagem quase-estática e terrenos irregulares representados por planos, a configuração ideal de um robô móvel é quando todas as forças normais de contato sejam uniformes.

Nessa configuração, em um terreno uniforme, se todas as rodas forem comandadas de maneira equivalente, as forças de tração geradas também serão uniformes, melhorando a mobilidade do sistema.

Com a distribuição uniforme de forças de contato, nenhum componente é exigido em demasia, não é desperdiçada energia com roda patinando, e o sistema possui capacidade máxima de tração, melhorando seu desempenho em terrenos irregulares.

Tal abordagem possui a vantagem de não utilizar a posição e o ângulo exato de contato de cada roda com o solo, considerado igual para as rodas do robô. Porém, para terrenos acidentados, onde as trações das rodas influenciam as forças normais aplicadas nas rodas, a abordagem adotada poderia até gerar instabilidade do sistema.

### 2.4.2.1 Critério de Tração

Podemos determinar a tração de uma roda através da razão entre forças tangenciais e normais ao plano de contato com o solo (Grand et al. 2004, Sreenivasan 1994).

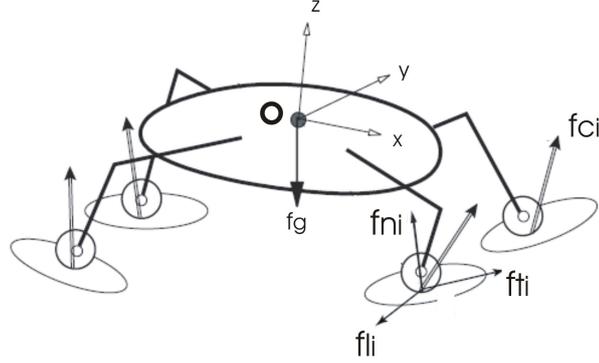


FIGURA 2.4: Critério de Tração

A força de contato  $f_{c_i} \in \mathbb{R}^3$  aplicada a cada perna, conforme ilustrado na figura 2.4, pode ser decomposta nas componentes:

$$f_{c_i} = \begin{bmatrix} f_{t_i} \\ f_{l_i} \\ f_{n_i} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde

- $f_{t_i}$  = força na direção longitudinal;
- $f_{l_i}$  = força na direção lateral;
- $f_{n_i}$  = força normal.

Podemos adotar o critério de tração  $\rho_i$ , calculado com a equação 2.11:

$$\rho_i = \frac{\sqrt{f_{l_i}^2 + f_{t_i}^2}}{f_{n_i}} \quad (2.11)$$

A eficiência da tração está relacionada ao escorregamento da roda, causado pelas forças tangenciais ao plano de contato com o solo. Quanto menor o valor de  $\rho_i$ , menor será o deslizamento e melhor será a tração referente ao ponto de contato.

Segundo (Sreenivasan 1994), quando  $\rho_i$  mínimo é alcançado, maximizamos a tração e minimizamos o consumo de energia do sistema móvel.

O conhecimento da força aplicada é necessário para se determinar com exatidão a tração de cada roda. Tal informação pode ser obtida por meio de um sensor de força multi-eixos, instalado em cada perna do robô, próximo ao ponto de contato.

A instalação de tais sensores de força possui custo e complexidade mecânica elevados (Iagnemma & Dubowsky 2004). Além disso, quando o sistema está se movendo, é difícil determinar as forças de contato através das medidas dos sensores de força (Grand et al. 2002).

Uma possível solução seria utilizar o torque resultante na junta, ou força aplicada na estrutura mecânica, como nas molas do RAH, para estimar a força de contato entre roda e terreno.

Podemos utilizar o jacobiano para determinar a força de contato na roda, de acordo com o torque aplicado na junta. O jacobiano é uma matriz que contém as derivadas parciais de componentes de vetores.

Considerando um manipulador robótico com  $n$  juntas  $\theta \in \mathbb{R}^n$ , podemos relacionar as velocidades linear  $v$  e angular  $w$  do efetuador ( $v, w \in \mathbb{R}^3$ ), de acordo com a velocidade das juntas  $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^n$ , utilizando o jacobiano  $J \in \mathbb{R}^{(6 \times n)}$ :

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (2.12)$$

Utilizando a dualidade velocidade-força, o jacobiano permite também correlacionar a força  $F \in \mathbb{R}^6$  exercida no efetuador, de acordo com o torque  $\tau \in \mathbb{R}^n$  das juntas:

$$\tau = J^T(\theta) F \quad (2.13)$$

Os atritos internos de um robô articulado podem ser consideráveis, impedindo a medição precisa da força de contato com o terreno. Muitos mecanismos não dispõem de sensores apropriados, impossibilitando a utilização do critério  $\rho_i$ .

Contornando este problema, consideramos apenas a força da gravidade  $f_g$  atuando no sistema, e o terreno formado por planos de contato paralelos entre si.

Utilizando as equações de equilíbrio de corpos rígidos, podemos calcular a resultante

da força peso em cada ponto de contato com o solo por meio de relações geométricas.

Essa resultante indica quanto do peso do sistema esta sendo sustentado pela respectiva perna. Estimado o ponto e plano de contato, podemos então obter as componentes normal, atrito lateral e atrito longitudinal da força de sustentação  $f_s \in \mathbb{R}^3$ .

O critério de tração utilizado deve analisar o módulo das forças de sustentação  $\|f_{s_i}\|$  aplicadas em cada uma das  $m$  rodas, calculando a diferença  $\Delta f_{s_i}$  entre eles:

$$\Delta f_{s_i} = \frac{\sum_{j=1}^m \|f_{s_j}\|}{m} - \|f_{s_i}\| \quad (2.14)$$

Como os planos de contato são paralelos entre si, a razão entre as componentes normal, atrito lateral e atrito longitudinal de  $f_{s_i}$  é constante, para todas as pernas. Quando as forças  $f_{s_i}$  estiverem uniformemente distribuídas entre as pernas, suas componentes normais serão equivalentes.

Quanto mais próximos forem os módulos das forças de sustentação, menor será o valor de  $\zeta$ , calculado por:

$$\zeta = \max(\Delta f_{s_i}) \quad (2.15)$$

Quanto menor  $\zeta$ , mais uniforme será a distribuição das forças entre as pernas, melhorando a capacidade de tração do sistema.

É importante lembrar que esse critério pode apresentar problemas, devido às simplificações adotadas. Um corpo necessita de apenas três pontos de apoio para se sustentar num espaço tridimensional. Assim, em um robô com quatro pernas, nem sempre todas as rodas estarão em contato com o terreno.

# Capítulo 3

## Modelagem Cinemática

Dois tipos de robôs são utilizados nesta pesquisa para exemplificar o problema da reconfiguração cinemática de um sistema, ao percorrer um terreno acidentado. Ambos possuem suspensões, também chamadas de pernas, com comando ativo.

Um robô com pernas prismáticas (RPP) foi proposto para introduzir o problema da reconfiguração cinemática. Ele possui arquitetura simplificada, e será utilizado para explicar conceitualmente as estratégias de controle desenvolvidas. As primeiras simulações apresentadas serão realizadas com o RPP.

O Robô Ambiental Híbrido (RAH) é o robô no qual será implementado o controle desenvolvido nesta pesquisa. Com ele, além das simulações, podemos analisar os resultados obtidos com a realização de testes reais.

As arquiteturas dos robôs serão detalhadas em seguida. As equações de cinemática serão apresentadas, correlacionando a configuração do robô obtida com a atuação equivalente nas pernas.

Ambos os robôs possuem arquitetura *Wheel-Legged*, utilizando rodas para propulsão e pernas para suspensão, comandadas de maneira ativa, aumentando os graus de liberdade internos do sistema.

Os robôs aqui estudados possuem corpo retangular com pernas nas extremidades. Cada perna está acoplada ao corpo do robô através de uma junta, resultando em 1 DOF por perna.

A posição de um ponto de contato, em relação ao sistema de coordenadas do robô

$O_R$ , é uma função da posição da junta ( $P_i(\theta_i)$ ) que comanda a respectiva perna. Nas próximas seções, serão apresentadas as equações cinemáticas referentes à posição dos pontos de contato, de acordo com a configuração das juntas.

Utilizamos  $\phi$  indicando a inclinação lateral e  $\psi$  indicando a inclinação longitudinal do sistema em relação ao plano horizontal ( $O_T$ ), conforme ilustrado na figura 2.1.

As matrizes de rotação  $R_x(\phi), R_y(\psi) \in SO(3)$ , em torno dos eixos  $x_R$  e  $y_R$  (rotações elementares), estão apresentadas nas equações 3.1 e 3.2 respectivamente:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\phi) & -\sin(-\phi) \\ 0 & \sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$R_y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & 0 & \sin(-\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\psi) & 0 & \cos(-\psi) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Multiplicando as duas matrizes ( $R_x(\phi)R_y(\psi)$ ), obtemos a matriz de rotação  $R_T^R \in SO(3)$  (equação 3.3), equivalente a orientação final do corpo do robô:

$$R_T^R = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \sin(\phi) & -\sin(\psi) \cos(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ \sin(\psi) & -\cos(\psi) \sin(\phi) & \cos(\psi) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.1 Modelo Cinemático do Robô com Pernas Prismáticas

Iremos considerar inicialmente o modelo de um robô com pernas prismáticas (RPP). Além de reduzir os cálculos necessários e facilitar a compreensão do problema, a utilização do RPP demonstra a simplicidade de implementar o controle proposto em um sistema genérico com configuração cinemática ativa.

O RPP possui quatro pernas, representadas por segmentos de reta de comprimento variável. Cada perna pode ser considerada 1 junta prismática, atuando no eixo  $z_R$ .

O corpo do robô tem como base um quadrado com arestas de comprimento  $r \in \mathbb{R}$ , em cujas extremidades as pernas estão acopladas. O centro de massa do RPP está

posicionado no centro geométrico desse quadrado, conforme mostrado na figura 3.1.

Não consideramos o sistema de propulsão do robô. Os pontos de contato  $P_i$  com o terreno estão localizados nas extremidades das pernas.

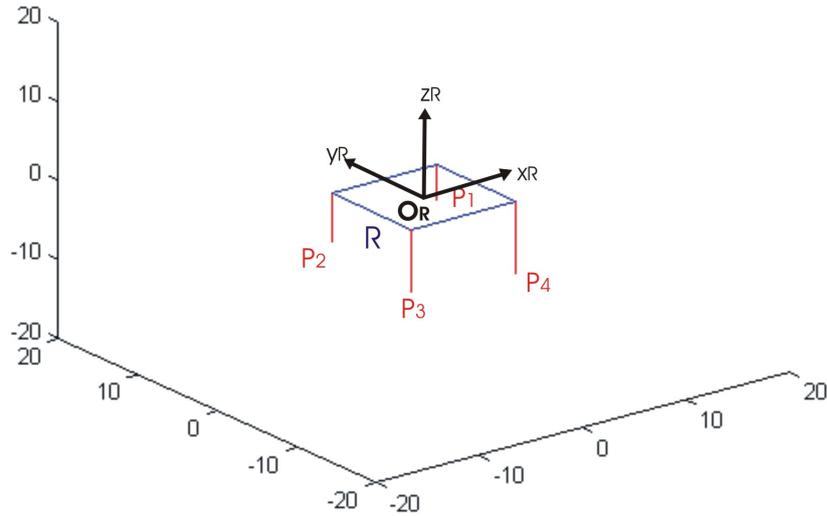


FIGURA 3.1: Modelo do Robô de Quatro Pernas Prismáticas

As equações cinemáticas referentes ao modelo serão apresentadas nas próximas seções, partindo do caso bidimensional, e depois estendendo para o caso tridimensional.

### 3.1.1 Robô com Duas Pernas Prismáticas

Iniciaremos o estudo cinemático do RPP considerando o caso bidimensional. Essa abordagem busca simplificar o modelo do robô, facilitamos a compreensão do comportamento do sistema ao se locomover em terrenos irregulares.

A ação do controle implementado é facilmente analisada no caso bidimensional. Podemos observar como a configuração do sistema é alterada, buscando controlar algum critério específico.

No caso planar, o robô necessita de 2 pontos de apoio para se manter suspenso. Dessa forma, será considerado um robô com 2 pernas (pernas 1 e 4 na figura 3.1), que

estão sempre em contato com o terreno. Essa consideração facilita o cálculo dos critérios utilizados para avaliar a mobilidade do sistema, em especial as forças de contato.

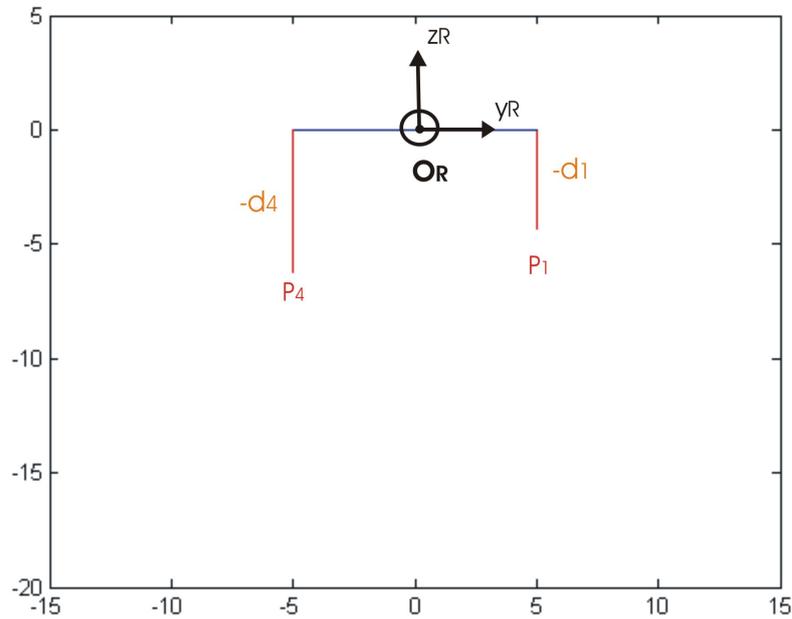


FIGURA 3.2: Robô com Duas Pernas Prismáticas

O modelo planar utiliza pernas de comprimento variável, acopladas ao corpo do robô, representado pelo segmento de reta  $r$ . O sistema de coordenadas  $O_R$  está posicionado no centro desse segmento.

No caso bidimensional, utilizamos apenas  $\phi$  indicando inclinação lateral do sistema em relação à horizontal ( $O_T$ ).

O modelo cinemático do RPP é apresentado na figura 3.2, destacando sistema de coordenadas e as convenções utilizadas.

### 3.1.1.1 Graus de Liberdade do Robô com Duas Pernas

A mobilidade cinemática do robô pode ser analisada pela fórmula de Gruebler (Murray, Li & Sastry 1993), utilizada para calcular os graus de liberdade efetivos  $M$  do sistema.

A equação 3.4 é utilizada para calcular  $M$ , em mecanismos planares:

$$M = 3 (N - g) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.4)$$

onde  $N$  é o número de elos,  $g$  o número de juntas,  $f_i$  os graus de liberdade da junta  $i$ .

O robô possui  $N = 3$  elos, equivalentes ao corpo e às 2 pernas. Cada perna está acoplada ao corpo do robô através de 1 junta prismática.

Durante a reconfiguração cinemática, os pontos de contato entre robô e terreno não permanecem fixos. Os  $P_i$  se deslocam na reta correspondente ao terreno. A orientação da perna em relação à reta também é alterada. Assim, cada ponto de contato é considerado 1 junta com 2 graus de liberdade, 1 referente à orientação e 1 à posição.

Dessa forma, o sistema utiliza  $g = 4$  juntas, num total de  $\sum_1^4 f_i = 6$  graus de liberdade das juntas. A fórmula de Gruebler resultante é:

$$M = 3 (3 - 4) + 6 = 3 \quad (3.5)$$

Através da fórmula, é possível demonstrar que o sistema possui  $M = 3$  graus de liberdade efetivos. Isso significa que são necessárias 3 variáveis para determinar a configuração do robô genérico bidimensional no espaço (Grand et al. 2004).

As variáveis utilizadas para representar a configuração cinemática do robô são as posições das juntas e a inclinação lateral de seu corpo, de modo que a postura do sistema  $P_{RPP_{2D}} = [d_1, d_4, \phi]$ .

O controle de reconfiguração cinemática pode ser também denominado de controle de postura, de acordo com (Grand et al. 2004).

As juntas  $d_1, d_4$  do robô são comandadas de maneira ativa.

### 3.1.2 Robô com Quatro Pernas Prismáticas

O modelo tridimensional considera 4 pernas de comprimento variável, acopladas ao corpo do robô, representado por um quadrado com arestas de comprimento  $r$ . O centro de massa e conseqüentemente a origem do sistema de referência  $O_R$  estão posicionados no centro desse quadrado.

O modelo do RPP é apresentado na figura 3.1 destacando o sistema de referência e as convenções utilizadas.

Considerando agora o caso tridimensional, um corpo necessita de apenas 3 pontos de apoio para se manter suspenso. Como o robô possui 4 pernas, não podemos considerar que as 4 estejam sempre em contato com o solo.

As simulações representam o terreno tridimensional através de um plano  $\Psi$ , mas essa não é a condição encontrada em testes reais, onde os pontos de contato não estão necessariamente em um mesmo plano.

### 3.1.2.1 Graus de Liberdade do Robô com Quatro Pernas

Utilizamos mais uma vez a fórmula de Gruebler, agora calculando os graus de liberdade efetivos  $M$  do robô genérico tridimensional.

A equação 3.6 é utilizada para calcular  $M$ , em mecanismos tridimensionais.

$$M = 6 (N - g) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.6)$$

onde  $N$  é o número de elos,  $g$  o número de juntas,  $f_i$  os graus de liberdade da junta  $i$ .

O robô possui  $N = 5$  elos, equivalentes ao corpo e às 4 pernas. Cada perna está acoplada ao corpo do robô através de 1 junta prismática.

Durante a reconfiguração cinemática, a posição dos pontos de contato entre robô e terreno é alterada. Os  $P_i$  se deslocam no plano correspondente ao terreno. A orientação da perna em relação à reta também é alterada. Assim, cada  $P_i$  é considerado 1 junta com 5 graus de liberdade, 3 referentes à orientação e 2 à posição.

Dessa forma, o sistema utiliza  $g = 8$  juntas, num total de  $\sum_1^8 f_i = 24$  graus de liberdade das juntas. A fórmula de Gruebler resultante é:

$$M = 6 (5 - 8) + 24 = 6 \quad (3.7)$$

Através da fórmula, é possível demonstrar que o sistema possui  $M = 6$  graus de liberdade efetivos. Isso significa que são necessárias 6 variáveis para determinar a configuração do robô genérico tridimensional no espaço.

As variáveis utilizadas para representar a configuração cinemática do robô são as posições das juntas e a inclinações lateral e longitudinal de seu corpo, de modo que a postura do sistema  $P_{RPP_3D} = [d_1, d_2, d_3, d_4, \phi, \psi]$ .

As juntas  $d_1, d_2, d_3, d_4$  do robô são comandadas de maneira ativa.

### 3.1.3 Cinemática Direta do Robô com Pernas Prismáticas

Cada perna do RPP é uma junta prismática, cujo comprimento  $d_i \in \mathbb{R}$  é determinado com a equação:

$$d_i = L \sin(|\theta_i|) \quad (3.8)$$

Embora não seja a parametrização mais usual, o comprimento  $d_i$  da perna e a posição dos pontos de contato  $P_i$  serão calculados nesta pesquisa através de um ângulo  $\theta_i \in \mathbb{R}$ .

Adotaremos como convenção o sinal negativo para as rotações realizadas em sentido horário, e sinal positivo para rotações no sentido anti-horário.

Os ângulos  $\theta_1, \theta_2$  assumem valores entre  $\theta_1, \theta_2 \in [-90, 0]^\circ$ . Já os ângulos  $\theta_3, \theta_4$  variam entre  $\theta_3, \theta_4 \in [0, 90]^\circ$ .

Quando  $\theta_i = 0^\circ$ , o comprimento da perna equivalente  $d_i = 0$ . Já para valores extremos, onde  $|\theta_i| = 90^\circ$ , o comprimento da perna equivalente  $d_i = L$ .

As extremidades das pernas estão em contato com o solo. As equações de cinemática direta do RPP fornecem as posições dos pontos de contato  $P_i$  em relação ao sistema de coordenadas no robô  $O_R$ , de acordo com os ângulos  $\theta_i$ :

$$P_1 = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2} \\ -d_1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r}{2} \\ \frac{r}{2} \\ -d_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} -\frac{r}{2} \\ -\frac{r}{2} \\ -d_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \\ -\frac{r}{2} \\ -d_4 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde  $r$  é o comprimento das arestas do quadrado que compõe o corpo do robô.

### 3.1.4 Cinemática Diferencial do Robô com Pernas Prismáticas

Depois de obtidas as equações de cinemática direta de cada perna do RPP, iremos agora apresentar as equações de cinemática diferencial, que permitem relacionar as velocidades lineares dos pontos de contato  $v_{P_i}$  de acordo com a velocidade da junta  $\dot{\theta}_i$ .

Esse mapeamento é descrito em uma matriz, o jacobiano. Utilizando o jacobiano, é possível achar as singularidades de um manipulador, analisar suas redundâncias, determinar algoritmos de cinemática inversa, fazer a correlação entre força aplicada no efetuator e torque resultante na junta.

$$v_i = J_i(\theta) \dot{\theta}_i \quad (3.13)$$

onde  $v_i \in \mathbb{R}^3$ ,  $J_i \in \mathbb{R}^3$  e  $\dot{\theta}_i \in \mathbb{R}$ .

Como cada perna do RPP possui 1 DOF, podemos calcular seu Jacobiano  $J_i$  derivando diretamente a equação do  $P_i$  equivalente. Dessa forma, obtemos a equação 3.14:

$$J_i = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L \cos(|\theta_i|) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Analisando a equação do Jacobiano, podemos identificar singularidades nas pernas. O sistema apresenta singularidades de fim de espaço de trabalho para  $\theta_i = 90^\circ +$

$180^\circ k, \forall k$  inteiro, quando a perna está totalmente esticada no sentido do eixo  $z_R$ .

## 3.2 Modelo Cinemático do Robô Ambiental Híbrido

O Robô Ambiental Híbrido possui arquitetura *Wheel-Legged*, e utiliza 4 rodas para se locomover. Cada roda está acoplada a um sistema de suspensão independente, composto por mola mais atuador elétrico.

Comandando esse atuador, é possível alterar a posição da roda em relação à base do robô, e também seu ângulo em relação ao solo.

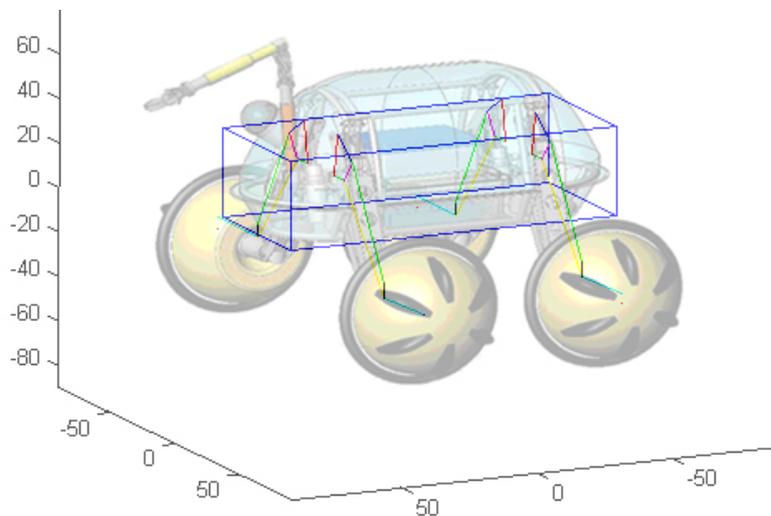


FIGURA 3.3: Arquitetura do Robô Ambiental Híbrido

Cada suspensão é composta por um mecanismo de cinco barras, com o qual é possível movimentar e posicionar a roda com exatidão e rigidez estrutural, utilizando um único atuador. Esse mecanismo será detalhado na seção 3.2.1.

O modelo utilizado do RAH considera seu corpo sendo um sólido retangular, com o centro de massa localizado no centro do retângulo inferior, a base do robô. Cada suspensão é constituída por segmentos de reta, representando o mecanismo de cinco barras.

O modelo cinemático do RPP assume que os pontos de contato  $P_i$  estão posicionados

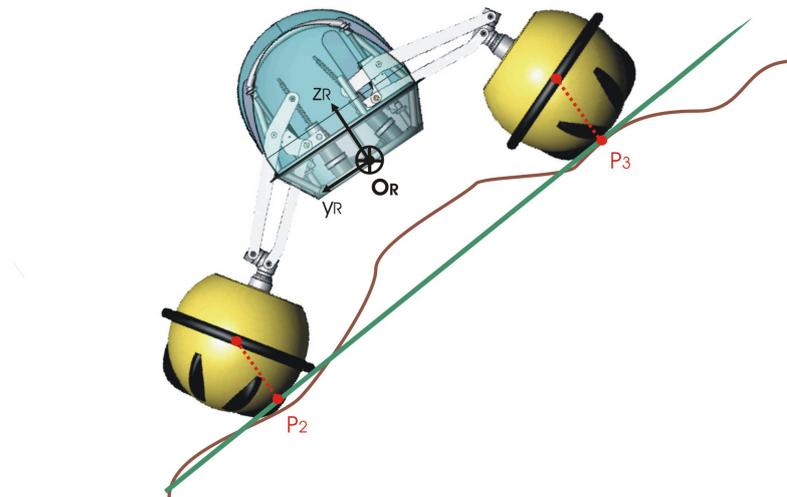


FIGURA 3.4: Simplificação da Localização dos Pontos de Contato do Robô Ambiental Híbrido

nas extremidades das pernas. No caso do RAH, as suspensões não estão em contato direto com o solo, mas sim às rodas acopladas.

Podemos considerar as rodas como esferas de raio igual a 60cm, cujos centros estão acoplados às extremidades das pernas. Independente do ângulo da roda em relação ao solo, a distância entre o ponto de contato e centro da roda será igual ao raio da esfera.

A determinação exata da localização do ponto de contato entre roda e terreno representa difícil tarefa. Nesta pesquisa, não utilizaremos a posição exata dos  $P_i$ , e sim uma estimativa, obtida através de simplificação.

A posição  $P_i$  é calculada projetando o centro da roda, em relação à  $z_R$ , na sua superfície esférica.

Para calcular a posição do ponto de contato  $P_i$  de uma perna do RAH, utilizamos as equações de cinemática direta do mecanismo de cinco barras, e depois somamos o raio da roda à componente do eixo  $z_R$ .

### 3.2.1 Mecanismo de Cinco Barras

As suspensões ou pernas do Robô Ambiental Híbrido são formadas por mecanismos

planares de cinco barras. Utilizando a fórmula de Gruebler (equação 3.4), é possível calcular os graus de liberdade efetivos  $M$  do mecanismo.

O mecanismo é composto por  $N = 5$  barras, equivalentes aos elos do sistema. Entre as barras, são utilizadas  $g = 7$  juntas, sendo 6 de rotação e 1 prismática, num total de  $\sum_1^g f_i = 7$  graus de liberdade das juntas. A fórmula de Gruebler resultante é:

$$M = 3(5 - 7) + 7 = 1 \quad (3.15)$$

O mecanismo possui 1 DOF. Utilizando 1 atuador por perna, alteramos a posição da roda em relação à base do robô, e também seu ângulo em relação ao solo, devido ao mecanismo utilizado.

Ao comandar a junta prismática ativa, a roda referente é deslocada em plano paralelo ao formado pelos eixos  $y_R$  e  $z_R$  do robô. O mecanismo possui apenas 1 DOF, e devido às características do mecanismo, os movimentos nos dois eixos estão acoplados.

Os deslocamentos de posição da roda  $P_r \in \mathbb{R}^3$  nos eixos  $y_R$  e  $z_R$  possuem magnitude semelhante. Porém, a largura do RAH é de 1.40m, e sua altura padrão em relação ao solo é de 0.4m.

A posição  $P_r$  da roda no eixo  $z_R$  tem ação predominante sobre a configuração do robô. Assim, de maneira semelhante ao RPP, comandamos os movimentos das pernas no eixo  $z_R$  para realizar a reconfiguração cinemática do RAH.

O atuador do sistema está acoplado a um fuso, representado pela junta prismática ativa  $h$ , cujo comprimento varia entre  $h \in [8.5, 21]cm$ . O valor de  $h$  determina a configuração de toda a suspensão.

Desejamos obter as equações de cinemática direta do mecanismo de cinco barras, com as quais é possível determinar a posição e orientação da roda, de acordo com o valor de  $h$ . A base da suspensão é o sistema de coordenadas  $O_S$  utilizado. A figura 3.5 apresenta o modelo da suspensão do RAH.

O mecanismo empregado é paralelo, o que pode dificultar a resolução de sua cinemática direta analiticamente (Murray et al. 1993), obtendo uma equação fechada. A posição do centro da roda é calculada solucionando um conjunto de equações, chamadas de equações de estruturas.

Diferentes abordagens podem ser utilizadas para solucionar a cinemática do meca-

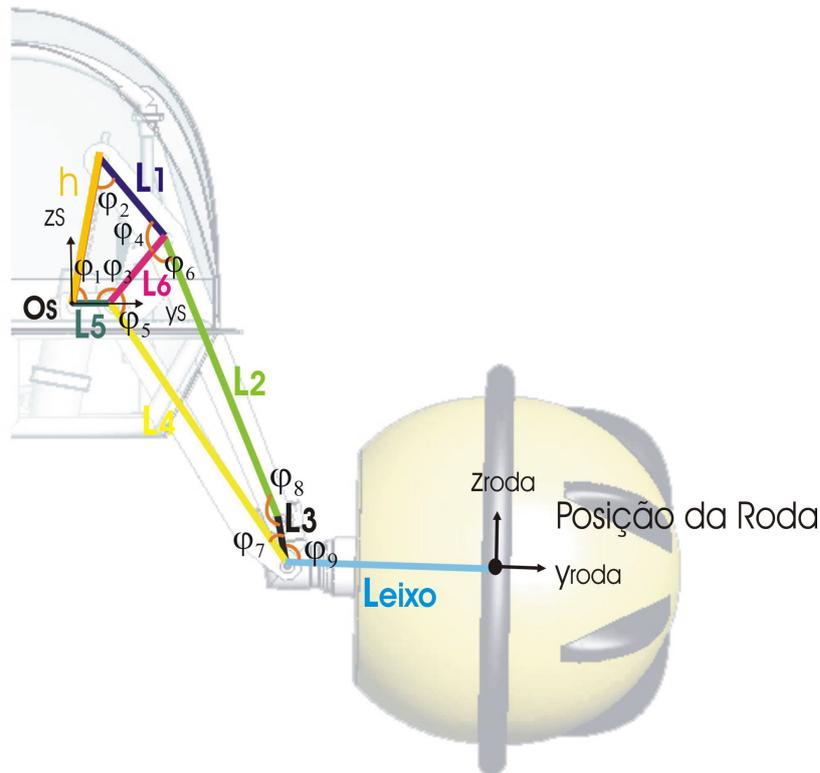


FIGURA 3.5: Mecanismo de Cinco Barras

nismo.

Uma abordagem consiste em utilizar técnicas numéricas como o método de *Newton-Raphson*, que permitem calcular a posição e orientação da roda, de acordo com a posição das juntas ativas e passivas do mecanismo.

Em (Kim, Park, Ryu, Kim, Hwang, Park & Iurascu 2001), é aplicado um método algébrico buscando representar a cinemática direta de um mecanismo paralelo por meio de polinômios.

A cinemática do mecanismo paralelo é descrita equacionando a posição da roda, especificada para cada cadeia (ou caminho). As equações de estrutura do mecanismo são obtidas correlacionando as equações obtidas com os diferentes caminhos, todas especificando a posição da roda em relação à base da suspensão.

As equações de estrutura do mecanismo estão apresentadas a seguir, introduzindo restrições entre os possíveis valores das juntas do mecanismo.

As equações referentes a orientação do centro da roda são:

*caminho* ( $L_5, L_4, L_{eixo}$ ) :

$$R_S^r = R_x(-\varphi_5 - \varphi_3 + \pi)R_x(\pi - \varphi_7 - \varphi_9)$$

*caminho* ( $h, L_1, L_2, L_3, L_{eixo}$ ) :

$$R_S^r = R_x(\varphi_1)R_x(-\pi + \varphi_2)R_x(-\pi + \varphi_6 + \varphi_4)R_x(-\pi + \varphi_8)R_x(\pi - \varphi_9)$$

*caminho* ( $L_5, L_6, L_2, L_3, L_{eixo}$ ) :

$$R_S^r = R_x(\varphi_3)R_x(-\pi + \varphi_6)R_x(-\pi + \varphi_8)R_x(\pi - \varphi_9)$$

*caminho* ( $h, L_1, L_6, L_4, L_{eixo}$ ) :

$$R_S^r = R_x(\varphi_1)R_x(-\pi + \varphi_2)R_x(-\pi + \varphi_4)R_x(\pi - \varphi_5)R_x(\pi - \varphi_7 - \varphi_9)$$

onde  $R_x(\varphi_i)$  equivale a matriz de rotação elementar em torno do eixo  $x_S$ .

Considerando

$$P_h = \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} \quad P_i = \begin{bmatrix} 0 \\ L_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad P_{eixo} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_{eixo} \\ 0 \end{bmatrix}$$

podemos calcular as equações referentes a posição  $P_r$  do centro da roda:

*caminho* ( $L_5, L_4, L_{eixo}$ ) :

$$P_r = P_5 + R_x(-\varphi_5 - \varphi_3 + \pi)P_4 + R_x(\pi - \varphi_7 - \varphi_9)P_{eixo}$$

*caminho* ( $h, L_1, L_2, L_3, L_{eixo}$ ) :

$$P_r = R_x(\varphi_1)P_h + R_x(-\pi + \varphi_2)P_1 + R_x(-\pi + \varphi_6 + \varphi_4)P_2 \\ + R_x(-\pi + \varphi_8)P_3 + R_x(\pi - \varphi_9)P_{eixo}$$

*caminho* ( $L_5, L_6, L_2, L_3, L_{eixo}$ ) :

$$P_r = P_5 + R_x(\varphi_3)P_6 + R_x(-\pi + \varphi_6)P_2 + R_x(-\pi + \varphi_8)P_3 \\ + R_x(\pi - \varphi_9)P_{eixo}$$

*caminho* ( $h, L_1, L_6, L_4, L_{eixo}$ ) :

$$P_r = R_x(\varphi_1)P_h + R_x(-\pi + \varphi_2)P_1 + R_x(-\pi + \varphi_4)P_6 \\ + R_x(\pi - \varphi_5)P_4 + R_x(\pi - \varphi_7 - \varphi_9)P_{eixo}$$

Solucionando tais equações, é possível calcular a posição e orientação da roda, utilizando a posição da junta ativa  $h$ .

Nesta dissertação, a cinemática direta do mecanismo de cinco barras foi calculada de duas maneiras.

A primeira solução utiliza os sub-problemas de *Paden-Kahan* (Murray et al. 1993) para solucionar a cinemática direta do mecanismo paralelo adotado nas suspensões do RAH. O mecanismo é planar, e sua cinemática é solucionada através dos subproblemas 1 e 3, para caso planar, conforme apresentado no apêndice A.

A segunda opção adotada considera medições do sistema real. O mecanismo de cinco barras possui apenas 1 DOF. Devido a essa característica do sistema, podemos resolver a cinemática do mecanismo utilizando seu espaço de trabalho, calculado por polinômios obtidos por método de aproximação numérica. Os polinômios são equivalentes às equações de cinemática direta do mecanismo.

Aplicando o *fit* através do comando *cftool* do *Matlab* no espaço de trabalho obtido pelas medições das posições da roda do RAH, chegamos aos polinômios apresentados na equação 3.16:

$$P_{r_m} = \begin{bmatrix} 0 \\ p_1h^5 + p_2h^4 + p_3h^3 + p_4h^2 + p_5h + p_6 \\ q_1h^5 + q_2h^4 + q_3h^3 + q_4h^2 + q_5h + q_6 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde  $P_{r_m} \in \mathbb{R}^3$  é a posição medida da roda,  $p_i \in \mathbb{R}$  são os coeficientes referentes ao eixo  $y_S$  da roda e  $q_i \in \mathbb{R}$  são os coeficientes referentes ao eixo  $z_S$ .

A qualidade da aproximação obtida com o *fit* é avaliada através dos critérios ( $\in \mathbb{R}$ )  $SSE$ , que mede o desvio total dos dados obtidos com a aproximação,  $R^2$  que mede a variação dos dados,  $R^2$  ajustado que ajusta  $R^2$  em função dos graus de liberdade residuais, e  $RMSE$  que mede o erro padrão da regressão.

O espaço de trabalho do mecanismo foi aproximado por polinômios de quinta ordem, que possuem segunda derivada suave, e a variação dos dados  $R^2 > 0.995$ .

A componente  $y_S$  da posição da roda  $P_{r_y} \in \mathbb{R}$ , referente a  $O_S$ , em função de  $h \in [8.5, 21]cm$ , pode ser obtida através do polinômio de 5ª ordem:

$$P_{r_y} = p_1h^5 + p_2h^4 + p_3h^3 + p_4h^2 + p_5h + p_6 \quad (3.17)$$

Os coeficientes abaixo foram obtidos por meio de método de *best fit*, obtendo uma aproximação onde  $SSE = 0.1661$ ,  $R^2 = 0.9973$ ,  $R^2$  ajustado = 0.9961 e  $RMSE = 0.1229$ :

$$p_1 = 0.0001702$$

$$p_2 = -0.01266$$

$$p_3 = 0.374$$

$$p_4 = -5.601$$

$$p_5 = 43.01$$

$$p_6 = -54.28$$

A componente  $z_S$  da posição da roda  $P_{r_z} \in \mathbb{R}$ , referente a  $O_S$ , em função de  $h \in [8.5, 21]cm$ , pode ser obtida através do polinômio de 5ª ordem:

$$P_{r_z} = q_1 h^5 + q_2 h^4 + q_3 h^3 + q_4 h^2 + q_5 h + q_6 \quad (3.18)$$

Os coeficientes abaixo foram obtidos por meio de método de *best fit*, obtendo uma aproximação onde  $SSE = 0.1004$ ,  $R^2 = 0.9998$ ,  $R^2 \text{ ajustado} = 0.9998$  e  $RMSE = 0.05988$ :

$$q_1 = 0.0002536$$

$$q_2 = -0.01666$$

$$q_3 = 0.4379$$

$$q_4 = -5.667$$

$$q_5 = 33.93$$

$$q_6 = -81.44$$

Podemos ver na figura 3.6 uma comparação entre os espaços de trabalho traçados utilizando equações geométricas (subproblemas de *Paden-Kahan*) e medições do mecanismo de cinco barras.

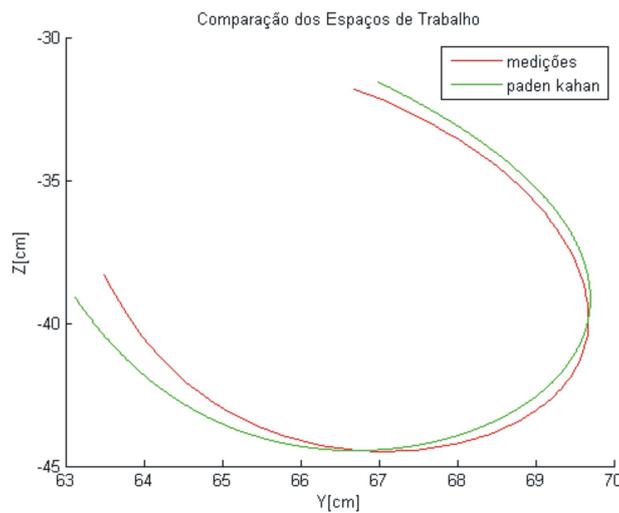


FIGURA 3.6: Espaço de Trabalho da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido

O modelo do RAH empregado nesta dissertação utiliza os polinômios apresentados nas equações (3.17) e (3.18), que correspondem a aproximações polinomiais do espaço de trabalho obtido com a medição do sistema real.

### 3.2.2 Graus de Liberdade do Robô Ambiental Híbrido

Utilizamos a fórmula de Gruebler para calcular os graus de liberdade efetivos do Robô Ambiental Híbrido

A fórmula utilizada para o caso tridimensional é apresentada na equação 3.6.

Apesar das diferenças entre perna do RPP e suspensão do RAH, ambas possuem 1 DOF.

Para realizar a análise da mobilidade cinemática do RAH, podemos simplificar o modelo de sua suspensão, representada aqui por apenas 1 elo acoplado ao corpo do robô através de 1 junta com 1 DOF. Dessa forma, consideramos o robô composto por  $N = 5$  elos, equivalentes ao corpo e às 4 pernas.

Durante a reconfiguração cinemática, os pontos de contato entre robô e terreno não permanecem fixos. Os  $P_i$  se deslocam no plano correspondente ao terreno. A orientação da perna em relação à reta também é alterada. Assim, cada  $P_i$  é considerado 1 junta com 5 graus de liberdade, 3 referentes à orientação e 2 à posição.

Dessa forma, o sistema utiliza  $g = 8$  juntas, num total de  $\sum_1^8 f_i = 24$  graus de liberdade das juntas.

$$M = 6(5 - 8) + 24 = 6 \quad (3.19)$$

Através da fórmula de Gruebler, é possível demonstrar que o sistema possui  $M = 6$  graus de liberdade efetivos. Isso significa que são necessárias 6 variáveis para determinar a configuração do RAH no espaço.

As variáveis utilizadas para representar a configuração cinemática do robô são as posições das juntas e a inclinações lateral e longitudinal de seu corpo, de modo que sua postura  $P_{RAH} = [h_1, h_2, h_3, h_4, \phi, \psi]$ .

As juntas  $h_1, h_2, h_3, h_4$  do robô são comandadas de maneira ativa.

### 3.2.3 Cinemática Direta do Robô Ambiental Híbrido

Apresentamos agora as equações de cinemática direta do RAH, utilizadas para calcular a posição dos pontos de contato  $P_i(h_i)$ , em relação ao sistema de coordenadas no robô  $O_R$ .

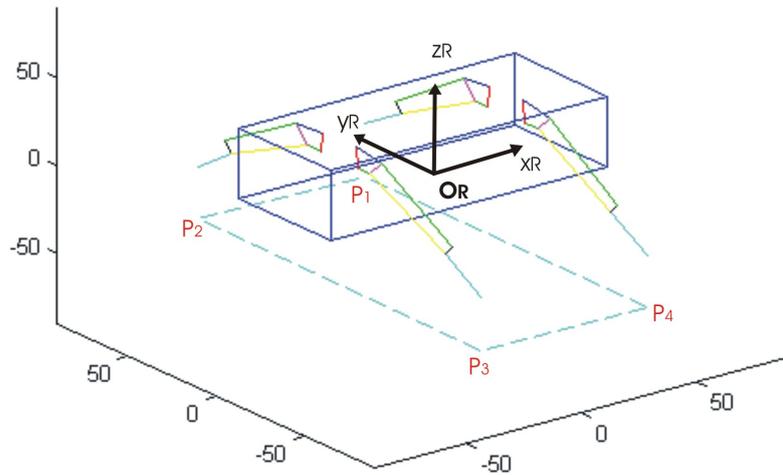


FIGURA 3.7: Modelo do Robô Ambiental Híbrido

Para tal, empregamos os polinômios 3.17 e 3.18 referentes aos mecanismos de cinco barras, que fornecem a posição do eixo da roda em relação à base da suspensão ( $O_{s_i}$ ). Em seguida correlacionamos  $O_{s_i}$  a  $O_R$ , de acordo com as convenções adotadas na figura 3.7. Por último, adicionamos o valor do raio da roda ao eixo  $z_R$ , calculando assim  $P_i$  em relação à  $O_R$ .

$$P_1 = \begin{bmatrix} 36.5 \\ P(h_1)_{r_y} + 17.6 \\ P(h_1)_{r_z} + 25.75 - 30 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} -36.5 \\ P(h_2)_{r_y} + 17.6 \\ P(h_2)_{r_z} + 25.75 - 30 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} -36.5 \\ -P(h_3)_{r_y} - 17.6 \\ P(h_3)_{r_z} + 25.75 - 30 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 36.5 \\ -P(h_4)_{r_y} - 17.6 \\ P(h_4)_{r_z} + 25.75 - 30 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

### 3.2.4 Cinemática Diferencial do Robô Ambiental Híbrido

Utilizando as equações de cinemática direta, calculamos a cinemática diferencial dos pontos de contato do RAH com o solo, correlacionando a velocidade linear dos  $P_i$  de acordo com as velocidades das juntas  $\dot{h}_i$ .

Diferentes métodos podem ser empregados para obter os Jacobianos referentes aos pontos de contato do robô. Tanto o RPP como o RAH possuem apenas 1 DOF por suspensão. Graças a essa arquitetura simplificada, suas equações de cinemática diferencial podem ser obtidas diferenciando as equações de cinemática direta.

Utilizando os polinômios apresentados nas equações 3.17 e 3.18 e coeficientes  $p_i$  e  $q_i$  que descrevem o mecanismo de cinco barras, podemos calcular o Jacobiano  $J_i(h_i) \in \mathbb{R}^3$  referente a um ponto de contato  $P_i$  :

$$J_i(h_i) = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{sign}(P_{i_y})(5p_1h_i^4 + 4p_2h_i^3 + 3p_3h_i^2 + 2p_4h_i + p_5) \\ 5q_1h_i^4 + 4q_2h_i^3 + 3q_3h_i^2 + 2q_4h_i + q_5 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Uma das raízes do polinômio apresentado na equação 3.24 referente ao eixo  $z_R$ ,

utilizando os coeficientes  $p_i$  indicados, é 17.97. Dessa forma, temos uma singularidade presente no mecanismo, quando a extremidade livre da perna está a uma distância máxima em relação à base do robô.

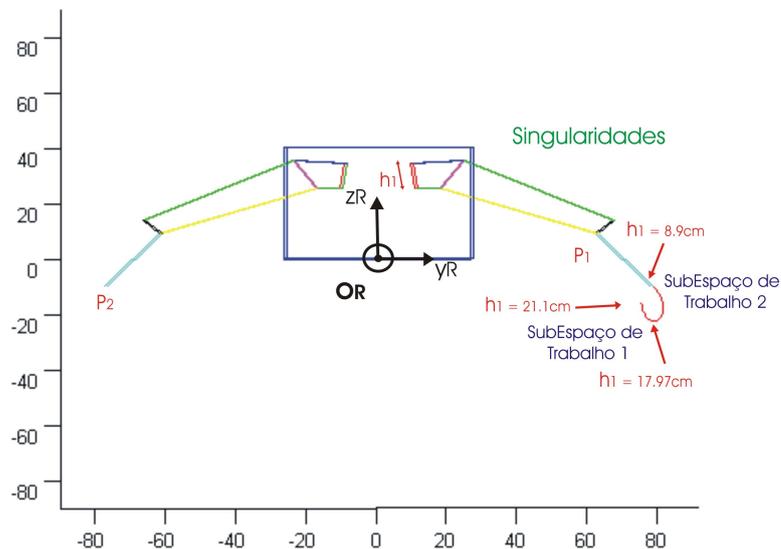


FIGURA 3.8: Singularidade do Mecanismo de Cinco Barras

Tal singularidade não está localizada na fronteira do espaço de trabalho de  $h_i$ . Assim, a singularidade divide o espaço de trabalho da suspensão, referente ao eixo  $z_R$ , em 2 subespaços distintos. Esses subespaços estão explicitados na figura 3.8.

Os ângulos máximos compensados pelo robô são de  $9.82^\circ$  no sentido longitudinal e  $4.66^\circ$  no sentido lateral, conforme apresentado na figura 3.9, com as pernas operando no subespaço de trabalho 2 (figura 3.8).

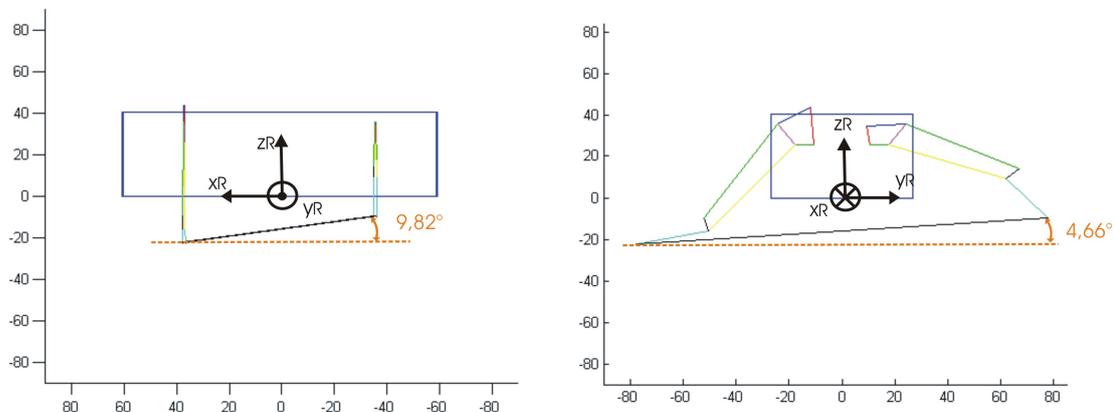


FIGURA 3.9: Ângulos Máximos Compensados pelo Robô Ambiental Híbrido

Já no subespaço de trabalho 1 (figura 3.8), as pernas conseguem compensar ângulos máximos de  $4.82^\circ$  no sentido longitudinal e  $2.33^\circ$  no sentido lateral.

Conforme ilustrado na figura 3.8, subespaço 2 é maior, permitindo ao RAH superar maiores adversidades ao percorrer um terreno acidentado. Por isso, esse será subespaço de operação das pernas mais adequado para realizar a reconfiguração cinemática proposta.

Porém, na maioria das operações, o RAH mantém suas pernas localizadas no subespaço de trabalho 1, já que nessa configuração, o eixo da roda está mais próximo à horizontal, permitindo maiores velocidades de deslocamento do robô.

# Capítulo 4

## Controle Proposto

Neste trabalho propomos estratégias utilizadas por um sistema móvel com arquitetura *Wheel-Legged*, ao se locomover em terrenos irregulares. O controle desenvolvido deve atuar na cinemática do mecanismo, adotando uma configuração que possibilite maior mobilidade ao sistema no terreno percorrido.

Os robôs analisados possuem quatro conjuntos de suspensão, acionados de maneira independente. O controle automático é vital à mobilidade dos robôs, garantindo a integridade dos mesmos, e possibilitando que o operador se dedique a outras tarefas.

A velocidade de deslocamento de um robô em terrenos irregulares é geralmente baixa. Adotando essa consideração, podemos desprezar os efeitos dinâmicos do sistema, e desenvolver um controle puramente cinemático.

Utilizaremos um controle cinemático de velocidade descentralizado, no nível de junta. Cada suspensão é acionada por apenas 1 junta, que possui 1 malha de controle dedicada.

A reconfiguração cinemática do robô será feita buscando melhorar o desempenho do sistema. Para tal, variáveis serão controladas, incluindo altura, orientação, tração e estabilidade do robô. Uma estratégia específica será elaborada para cada variável a ser controlada.

A solução desenvolvida nesta pesquisa deve ser simples e viável de aplicar a qualquer sistema mecânico com reconfiguração ativa. Para se obter um controle simples e robusto, é desejável que o sistema necessite de poucos dados sobre o ambiente de

operação. Dessa forma, serão necessários menos sensores e capacidade de processamento dedicado.

## 4.1 Análise Cinemática

A velocidade de percurso de robôs móveis exploradores, ao se locomover em terrenos com adversidades como obstáculos e inclinações, deve ser reduzida, preservando a integridade do sistema.

Utilizado o *Sample Return Rover* como referência (10kg,  $88 \times 55 \times 36\text{cm}$ ), podemos considerar que quando o dispositivo se locomove com velocidades inferiores a 10 cm/s, as forças causadas pela dinâmica do sistema são desprezíveis (Iagnemma & Dubowsky 2004). Os efeitos dinâmicos exercem influência predominante no comportamento do sistema para velocidades de percurso acima de 10 m/s.

Mesmo com o robô não se locomovendo, os efeitos da dinâmica podem influenciar o sistema. Considerando um mecanismo com capacidade de reconfiguração cinemática ativa, a velocidade de atuação das juntas pode ser rápida a ponto de causar instabilidade do sistema. A reconfiguração rápida, associada a inércia do sistema, poderia levar a perda de pontos de contato do robô com o terreno, e em casos extremos provocar o tombamento do dispositivo.

Iremos considerar que a atuação das juntas também será lenta, de maneira a não causar efeitos dinâmicos no sistema. Essa consideração é adequada, de acordo com as baixas velocidades de deslocamento do robô. A atuação lenta nas juntas consome menos energia.

Utilizando apenas baixas velocidades de deslocamento e atuação nas juntas, podemos desenvolver um controle estático, desconsiderando a dinâmica do sistema. Essa abordagem permite muitas simplificações.

De acordo com a abordagem estática, podemos considerar que o terreno mantém inclinações constantes. Do ponto de vista de controle, a reconfiguração cinemática, realizada nessas condições, caracteriza um problema de regulação de um sistema de primeira ordem. Dessa maneira, podemos utilizar um simples controle proporcional.

Em baixa velocidade de deslocamento, são necessários poucos requisitos computaci-

onais para o processamento dos dados e cálculo do controle aplicado a cada suspensão, sem afetar o desempenho do algoritmo embarcado.

Já para casos dinâmicos, envolvendo altas velocidades de deslocamento, é necessária a utilização de processamento em tempo real, o que aumenta consideravelmente a complexidade de hardware e software dedicados a tal tarefa.

As estratégias de controle desenvolvidas aqui buscam simplicidade e robustez, permitindo sua implementação em qualquer dispositivo simples que possua reconfiguração ativa. Dessa forma, a abordagem estática é a mais adequada.

## 4.2 Arquitetura Descentralizada

Uma possível solução para o problema de reconfiguração cinemática seria considerar o sistema composto por robô mais terreno uma cadeia fechada, e utilizar um controle centralizado com restrições, buscando por exemplo manter o corpo do robô sempre paralelo à horizontal. Assim, todas as suspensões seriam atuadas em conjunto, buscando garantir a restrição imposta. Essa não será a estratégia adotada aqui.

Buscando melhorar a mobilidade de um robô móvel, adotamos um controle descentralizado, no nível de juntas, conforme ilustrado na figura 4.1. Cada suspensão possui 1 DOF, controlado por malha dedicada.

Em cada uma dessas malhas de controle, o estado geral do sistema é observado, e o comando apropriado para a junta é calculado.

Como as malhas de controle são independentes, as suspensões são também comandadas de maneira independente: cada suspensão é controlada sem conhecer a posição e atuação nas demais juntas.

## 4.3 Controle Cinemático

O controle desenvolvido atua na configuração cinemática de um robô *Wheel-Legged*, reposicionando seu centro de gravidade de maneira a aumentar a mobilidade do sistema ao percorrer um terreno acidentado.

A solução proposta para a reconfiguração cinemática consiste em comandar as pernas do robô de maneira a alterar as componentes verticais  $z_R$  dos pontos de contato  $P_i$ , buscando controlar alguma variável específica do sistema.

A maioria dos robôs *Wheel-Legged* é capaz de configurar suas pernas alterando a distância (eixo  $z_R$ ) entre a base do robô  $O_R$  e os pontos de contato  $P_i$  com o solo. Dessa maneira, a estratégia adotada poderá ser facilmente adaptada para outros robôs além dos apresentados.

As equações de cinemática diferencial só precisam ser calculadas para o eixo  $z_R$ .

Os contatos entre robô e solo ocorrerão através de pontos. Assim, não precisamos considerar a orientação das extremidades livres das pernas, nem sua velocidade angular.

Cada junta recebe comando de velocidade. Assim, a reconfiguração cinemática é realizada por meio de movimentos contínuos, buscando diminuir os impactos sofridos pelos equipamentos e também pelo operador embarcado, no caso do modelo tripulado do RAH.

Utilizando as equações de cinemática diferencial, o algoritmo desenvolvido calcula a velocidade adequada para acionar cada uma das juntas, a fim de reconfigurar o robô, em busca de mais estabilidade e tração.

Calculamos a cinemática diferencial do sistema através da equação 4.1, onde  $v_{z_i} \in \mathbb{R}$  é a velocidade linear do ponto de contato  $P_i$  no eixo  $z_R$ ,  $J_{z_i} \in \mathbb{R}$  a componente  $z_R$  do jacobiano do sistema,  $\theta_i$  a posição e  $\dot{\theta}_i$  a velocidade da junta  $i$ .

$$v_{z_i} = J_{z_i}(\theta_i) \dot{\theta}_i \quad (4.1)$$

Utilizando o jacobiano, é possível calcular a velocidade de atuação  $u_i \in \mathbb{R}$  necessária em uma junta para fazer com que o ponto de contato referente se movimente da maneira desejada.

Empregamos uma malha de controle de velocidade para cada junta, conforme a figura 4.1. Utilizando um controle de alto ganho, com  $k \rightarrow \infty$ , podemos considerar que a velocidade de rotação da junta  $\dot{\theta}_i$  será igual ao comando  $u_i$ , com o erro  $e \rightarrow 0$ . Assim, a equação de controle utilizada é apresentada em 4.2.

$$u_i = J_{z_i}(\theta_i)^{-1} v_{z_i} \quad (4.2)$$

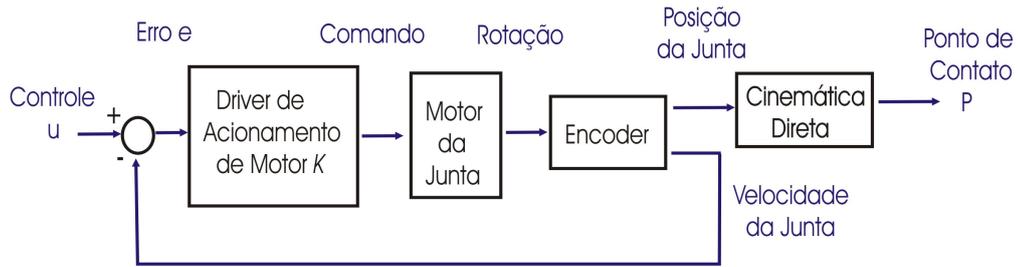


FIGURA 4.1: Malha de Controle Dedicada a Junta

onde  $v_{z_{c_i}} \in \mathbb{R}$  é a velocidade linear de comando no eixo  $z_R$  do ponto de contato  $P_i$ .

A implementação do controle em um robô com duas pernas é apresentada na figura 4.2.

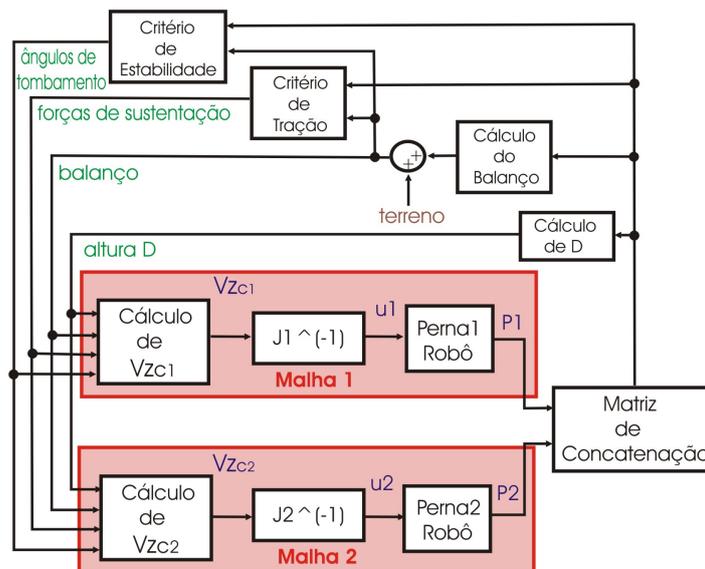


FIGURA 4.2: Malha de Controle Implementada em um Robô com Duas Pernas

Para utilizar a equação 4.2, necessitamos determinar a velocidade de comando  $v_{z_{c_i}}$  para calcular o comando  $u_i$  da respectiva junta.

De acordo com a variável controlada, uma estratégia específica é utilizada para calcular  $v_{z_{c_i}}$ . As próximas seções irão apresentar maneiras utilizadas para determinar as velocidades  $v_{z_{c_i}}$  dos pontos de contato  $P_i$ , de acordo com o objetivo almejado.

### 4.3.1 Controle de Altura

O controle da altura de um robô móvel em relação ao terreno influencia na mobilidade do sistema.

Segundo o gradiente da margem de estabilidade, quanto mais próximo do solo, mais estável será a configuração do sistema. Porém, a base do robô deve manter uma distância mínima em relação ao terreno, protegendo os equipamentos embarcados da água, no caso do RAH, ou facilitando a transposição de obstáculos com maior dimensão.

A solução é manter sempre uma altura ideal constante. Esta altura será especificada de acordo com a arquitetura do sistema e tipo de tarefa a ser realizada.

Nesta pesquisa, a altura do robô em relação ao solo é estipulada utilizando os pontos de contato  $P_i$ .

No caso bidimensional, a altura é calculada com a equação 4.3, utilizando o segmento de reta  $D$ , perpendicular ao terreno, ligando este a  $O_R = (y_0, z_0)$ , conforme ilustrado na figura 4.3. O terreno é representado pela reta  $Psi(a, b) : ax + by + c = 0$ , traçada entre os dois pontos de contato do robô.

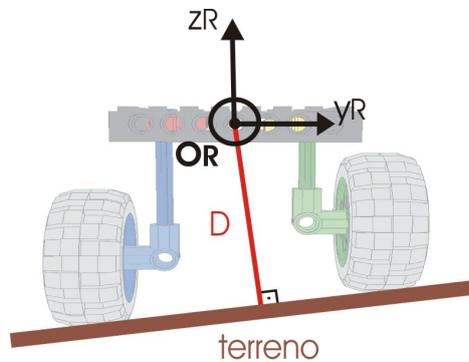


FIGURA 4.3: Cálculo da Altura de Robô Bidimensional

Utilizamos a equação 4.3 para calcular a altura  $D$ :

$$D = \frac{\|ax_0 + by_0 + c\|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.3)$$

Já para casos tridimensionais, um plano  $\Phi : ax + by + cz + d = 0$  representa o terreno, conforme ilustrado na figura 4.4.

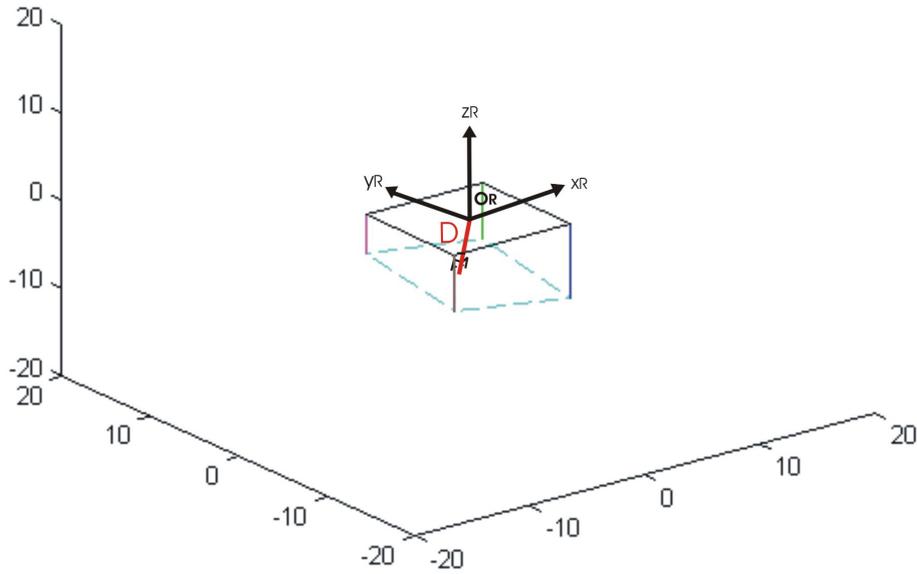


FIGURA 4.4: Cálculo da Altura de Robô Tridimensional

O plano equivalente ao terreno é definido por 3 pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  (no caso os pontos de contato do robô com o terreno).

Os parâmetros  $a, b, c$  do plano  $\Phi$  podem ser obtidos através do vetor  $n \in \mathbb{R}^3$ , normal ao plano:

$$n = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

O vetor  $n$  pode ser calculado, utilizando 3 pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ :

$$n = (P_2 - P_1) \times (P_3 - P_2) \quad (4.4)$$

O último parâmetro  $d$ , referente ao plano  $\Phi$ , pode ser calculado por:

$$d = -n^T P_i \quad (4.5)$$

onde  $\times$  é o produto vetorial e  $P_i$  um dos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  ou  $P_3$ .

Assim, a distância entre o ponto  $O_R(y_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$  e o plano  $\Phi$  é calculada

com a equação 4.6:

$$D = \frac{d}{\|n\|} \quad (4.6)$$

Definindo uma altura de referência  $D^*$ , podemos calcular as velocidades de comando  $v_{z_{c_i}}$  dos  $P_i$  utilizando a equação 4.7:

$$v_{z_{c_i}}^a = K_a (D^* - D) \quad (4.7)$$

onde  $K_a > 0$  é o ganho referente ao controle de altura.

O controle da altura do sistema é utilizado em conjunto com os outros algoritmos apresentados. Buscaremos sempre manter a altura ideal entre robô e solo, independente do algoritmo de controle implementado. Nas mesmas condições, poderemos comparar o desempenho das estratégias adotadas.

### 4.3.2 Controle de Orientação

As variações de orientação e altura do corpo do robô podem provocar impacto em equipamentos embarcados. Muitas vezes, esses equipamentos são sensíveis, não suportando condições adversas de operação.

Controlando a altura e orientação, um robô pode minimizar tais impactos. Essa prática também é aconselhável no transporte de pessoas, como por exemplo na versão tripulada do Robô Ambiental Híbrido, situação na qual se procura manter o bem estar das pessoas embarcadas.

Em arquiteturas simplificadas, com o centro de gravidade coincidente com o centro geométrico de um robô simétrico, e movimentos de reconfiguração cinemática restritos ao eixo  $z_R$ , o controle de orientação terá o mesmo efeito do controle de tração, distribuindo as componentes verticais das forças de contato de maneira uniforme entre as suspensões.

A orientação do robô é indicada pelos ângulos de balanço  $\phi$  e caturro  $\psi$ . Esses ângulos fornecem a inclinação do sistema nos sentidos lateral e longitudinal, respecti-

vamente, conforme exibido na figura 4.5.

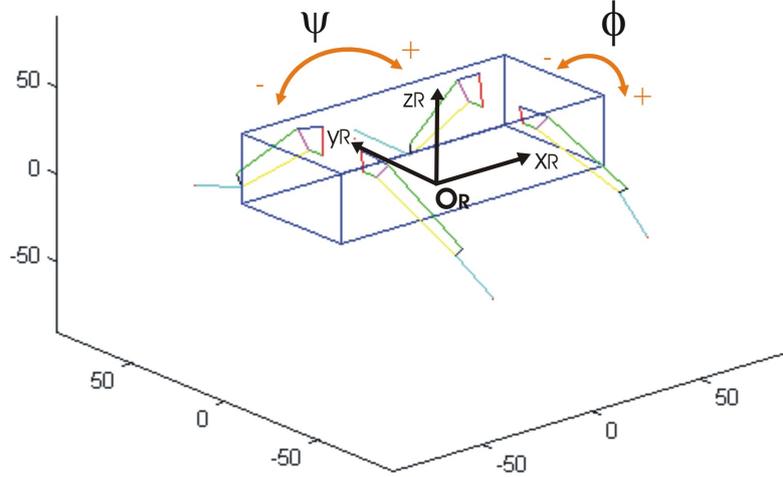


FIGURA 4.5: Ângulos de Balanço e Caturro do Robô Ambiental Híbrido

As pernas são acionadas de maneira adequada a cancelar os ângulos  $\phi$  e  $\psi$ , mantendo o corpo do robô paralelo à horizontal.

A equação 4.8 é utilizada para calcular as velocidades de comando  $v_{z_{c_i}}$ :

$$v_{z_{c_i}}^o = -K_{o_b} P_{i_y} \phi + K_{o_c} P_{i_x} \psi \quad (4.8)$$

onde  $K_{o_b} > 0$  é o ganho referente a  $\phi$ ,  $K_{o_c} > 0$  o ganho referente a  $\psi$ , e  $P_{i_x}, P_{i_y} \in \mathbb{R}$  são as componentes  $x_R$  e  $y_R$  do ponto de contato  $P_i$ .

### 4.3.3 Controle de Tração

Um dos objetivos do controle desenvolvido é aumentar a tração de um robô móvel com reconfiguração cinemática ativa, ao percorrer terrenos irregulares.

De acordo com as simplificações adotadas, o algoritmo desenvolvido busca distribuir de maneira uniforme as forças de sustentação do sistema, maximizando o critério de

tração estipulado. Para tal, iremos atuar nas pernas, controlando o movimento no eixo  $z_R$  dos pontos de contato  $P_i$ .

Atuamos nas suspensões, alterando o peso suportado por cada uma, de acordo com a equação 4.9:

$$v_{z_{c_i}}^t = K_t \Delta f_{s_i} \quad (4.9)$$

onde  $K_t > 0$  é o ganho referente ao controle de tração, e  $\Delta f_{s_i} \in \mathbb{R}$  é a diferença entre a média dos módulos de todas as forças de sustentação e  $\|f_{s_i}\|$  aplicada em  $P_i$ .

#### 4.3.4 Controle de Estabilidade

O principal objetivo do controle aqui apresentado é aumentar a estabilidade de um robô *Wheel-Legged*, garantindo que este não tombe ao percorrer terrenos irregulares.

Se considerarmos como critério de mobilidade a margem de estabilidade, podemos melhorar o desempenho do sistema posicionando a projeção do centro de gravidade (CG) no centro do PS do robô.

Porém, nesta pesquisa, a estabilidade do sistema é calculada utilizando o ângulo mínimo de tombamento, critério proposto por (Papadopoulos & Rey 1996). Analisando este critério, é possível determinar quais ações o robô deve executar para alcançar uma configuração mais estável.

O algoritmo de estabilidade irá controlar a posição de cada ponto de contato, comandando as suspensões e conseqüentemente alterando a posição da projeção do CG em relação ao polígono de sustentação, buscando minimizar a diferença entre os ângulos de tombamento nos diferentes eixos.

Quanto mais próximo do solo estiver a base do robô, mais estável será o sistema. A situação ideal, no ponto de vista de estabilidade, seria quando o centro de gravidade do sistema estivesse localizado dentro do seu polígono de sustentação. Assim, os ângulos de tombamento seriam os maiores possíveis, iguais a  $90^\circ$  quando o polígono de sustentação estiver paralelo à horizontal.

As pernas são acionadas de maneira a, mantendo uma distância fixa entre robô e terreno, alcançarem ângulos de tombamento semelhantes.

O critério de estabilidade considera apenas o menor ângulo de tombamento, sendo este o que representa maior risco para a configuração adotada. O controle de estabilidade busca convergir todos os ângulos de tombamento para um valor médio, evitando ângulo mínimo.

Considerando arquitetura simétrica, como o corpo quadrado do robô com pernas prismáticas, podemos convergir todos os ângulos de tombamento do sistema para um único valor médio. Tal configuração não é alcançada com arquiteturas assimétricas, como o corpo retangular do Robô Ambiental Híbrido.

A relação entre largura e comprimento do RAH é de aproximadamente 2:1. Considerando a condição inicial onde o robô esteja posicionado em um terreno plano, com  $h_i = 12\text{cm}$ , os ângulos laterais de tombamento  $\gamma_1, \gamma_3 = 60^\circ$ , enquanto os ângulos longitudinais  $\gamma_2, \gamma_4 = 38.52^\circ$ , conforme apresentado na figura 4.6. Considerando a altura em relação ao solo  $D > 0$ , não é possível convergir todos os ângulos de tombamento para um único valor.

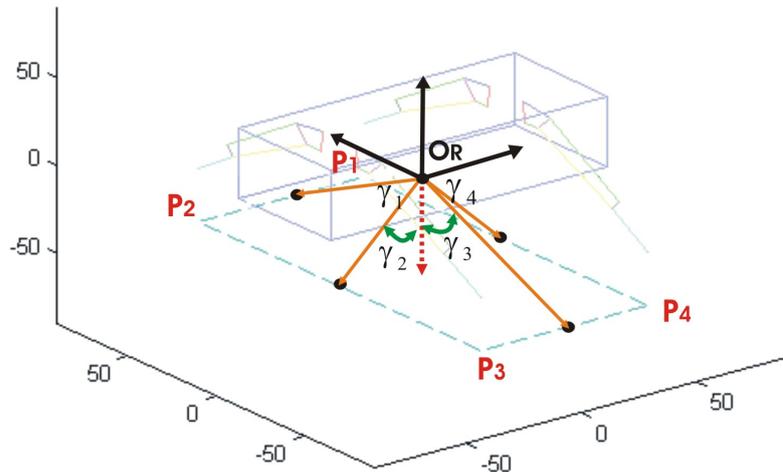


FIGURA 4.6: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido

Assim, o controle de estabilidade comanda as juntas de maneira a minimizar a diferença entre os ângulos de tombamento  $\gamma_1, \gamma_3$  no sentido lateral e  $\gamma_2, \gamma_4$  no sentido longitudinal do robô.

A equação 4.10 é utilizada para calcular as velocidades de comando  $v_{z_{c_i}}$  dos  $P_i$ :

$$v_{z_{c_i}}^e = K_{e_b} P_{i_y} (\gamma_1 - \gamma_3) - K_{e_c} P_{i_x} (\gamma_2 - \gamma_4) \quad (4.10)$$

onde  $K_{e_b} > 0$  é o ganho referente ao controle lateral de estabilidade,  $K_{e_c} > 0$  é o ganho referente ao controle longitudinal de estabilidade, e  $P_{i_x}, P_{i_y}$  são as componentes  $x_R$  e  $y_R$  do ponto de contato  $P_i$ .

A estabilidade do sistema é mensurada através do gradiente da margem de estabilidade, que considera o ângulo mínimo de tombamento do robô.

As inclinações laterais do corpo do RAH, inferiores a  $22^\circ$ , compensadas pelo controle de estabilidade não alteram o gradiente da margem de estabilidade do sistema.

### 4.3.5 Controle com Múltiplos Objetivos

Nas seções anteriores, foram apresentadas as leis de controle, permitindo calcular a velocidade linear de deslocamento no eixo  $z_R$  dos pontos de contato  $P_i$ , de acordo com a variável a ser controlada.

Essa velocidade linear de deslocamento  $v_{z_{c_i}}$  é utilizada como referência, e com o auxílio das equações de cinemática diferencial, podemos calcular o comando  $u$  para as juntas das pernas.

Quatro equações para cálculo de  $v_{z_{c_i}}$  foram apresentadas, específicas às variáveis controladas: altura  $D$  em relação ao solo, orientação do corpo  $(\phi, \psi)$ , distribuição de forças de sustentação entre as pernas  $(\zeta)$ , estabilidade do sistema  $(\beta)$ .

De acordo com os requisitos operacionais, podemos combinar as atuações das juntas calculadas com as diferentes estratégias, de maneira a realizar a reconfiguração cinemática do robô buscando atender múltiplos objetivos.

A determinação de ganhos ótimos poderia ser realizada utilizando uma função de custo-benefício  $J$  (Ogata 2003), correlacionando as múltiplas variáveis a serem controladas:

$$J = \int_0^\infty (v_{z_{c_i}}^T P_C v_{z_{c_i}} + (\Delta D)^2 P_A + \phi^2 P_{O_{lat}} + \psi^2 P_{O_{long}} + \zeta^2 P_T + \frac{1}{\beta^2} P_E) dt \quad (4.11)$$

Na equação 4.11, os custos estão referentes ao controle cartesiano aplicado  $v_{z_{c_i}}$ , e os benefícios provêm das variáveis controladas  $\Delta D, \phi, \psi, \zeta, \beta \in \mathbb{R}$ . Os pesos  $P_C, P_A, P_{O_{lat}}, P_{O_{long}}, P_T, P_E \in \mathbb{R}$  atribuídos priorizam as variáveis conforme especificado.

Dado que o controle cinemático proposto define um sistema de controle linear  $v = v_{z_{c_i}}$ , é conhecido da teoria de controle ótimo que uma realimentação de estado  $v_{z_{c_i}} = K^*[\Delta D, \phi, \psi, \zeta, \beta]^T$  minimiza a função de custo  $J$ . O ganho ótimo  $K^*$  pode ser calculado de forma similar ao controlador LQR (Ogata 2003).

### 4.3.6 Classificação das Estratégias de Controle

Os controles apresentados nas seções anteriores podem ser classificadas como ótimo global, ótimo local ou sub-ótimo, de acordo com a natureza das variáveis de realimentação utilizadas.

Os pontos de contato entre robô e terreno são deslocados durante a reconfiguração cinemática. Mesmo se a localização exata dos  $P_i$  for conhecida, só é possível garantir que o controle sempre alcance configuração ideal se o perfil do terreno for conhecido. Assim, obtemos um controle ótimo global (Iagnemma & Dubowsky 2004).

Na maioria das vezes, porém, essa não é a situação real, com o robô se locomovendo em terrenos desconhecidos. Podemos considerar que os deslocamentos dos pontos de contato são pequenos, de maneira que as condições do terreno permaneçam constantes.

Nessas condições, conhecendo a localização dos  $P_i$ , é possível alcançar sempre uma configuração cinemática ideal, caracterizando um controle ótimo local (Iagnemma et al. 2000).

Mesmo quando a localização exata dos pontos de contato não é conhecida, as estratégias de controle propostas alcançam, na maioria das vezes, configuração ideal utilizando  $P_i$  estimados. Porém, não podemos garantir que tal configuração será sempre obtida, o que caracteriza um controle sub-ótimo (Grand et al. 2004).

## 4.4 Diferentes Estratégias já Desenvolvidas

Diferentes métodos para controle da postura de robôs móveis já foram desenvolvidos.

Dois grupos de pesquisa se destacam nessa área, o *Jet Propulsion Laboratory* e o *Laboratoire de Robotique de Paris*, por apresentarem trabalhos com objetivos semelhantes. Ambos os laboratórios possuem robôs com arquitetura *Wheel-Legged*, para os quais são desenvolvidas estratégias de controle cinemático estático visando melhorar a mobilidade dos sistemas.

### 4.4.1 *Laboratoire de Robotique de Paris*

Em (Grand et al. 2002, Grand et al. 2004), uma nova abordagem é proposta para melhorar a estabilidade e a tração de um robô móvel, através da distribuição uniforme de forças.

O robô *Hylos* é utilizado para demonstrar a eficiência das estratégias desenvolvidas. Ele possui quatro conjuntos de roda e perna com 2 DOF. Sensores de força tridimensional estão acoplados às bases das rodas. Porém, em (Grand et al. 2002), esses sensores são utilizados apenas para garantir o contato das rodas com o terreno, não fornecendo com precisão ao sistema as componentes das forças de contato.

Em (Grand et al. 2002) são empregadas várias simplificações, como considerar todos os planos de contato paralelos à horizontal, centro de massa coincidente com centro geométrico, e que todas as rodas estejam sempre em contato com o solo, em pontos fixos, durante a reconfiguração cinemática do robô.

Utilizando essas simplificações, segundo (Grand et al. 2002), por meio de análises estáticas de distribuição de força, é possível considerar que a estabilidade do robô é máxima quando as componentes verticais das forças aplicadas as suas pernas sejam iguais.

Dessa maneira, foi desenvolvido um controle cinemático que cancela a inclinação do corpo robô, anulando seus ângulos  $\phi$  e  $\psi$ . O controle também busca manter uma altura constante em relação ao solo.

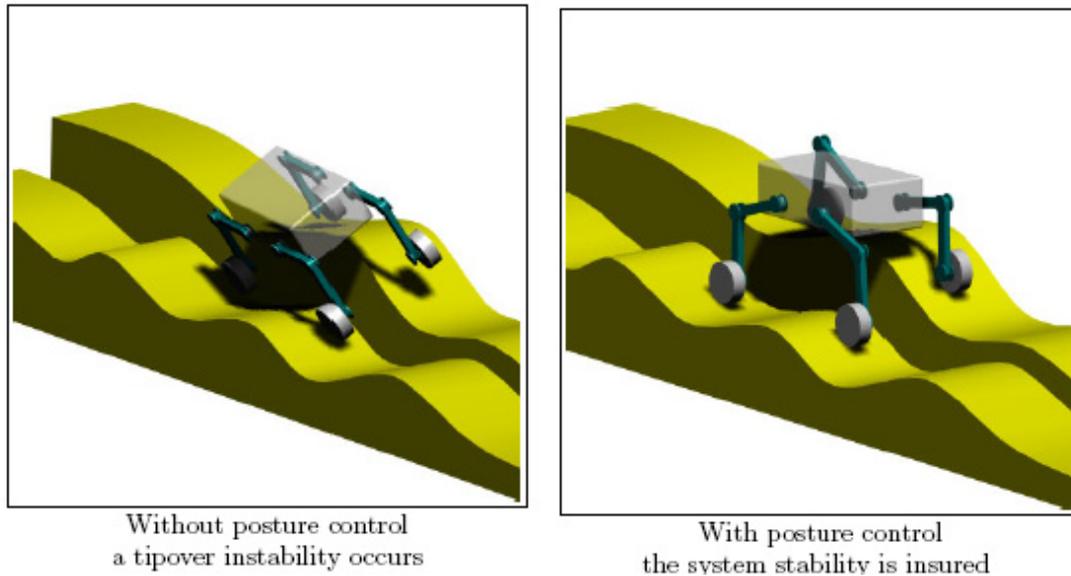


FIGURA 4.7: Controle de Orientação do Robô *Hyllos*

O controle de orientação implementado, aplicado num sistema para o qual as simplificações e considerações adotadas são válidas, distribui as componentes verticais das forças de maneira uniforme entre as pernas, e aumenta a margem de estabilidade do sistema.

Porém, a configuração final do sistema não é a ideal, quando adotamos o critério do gradiente da margem de estabilidade.

A principal diferença entre as soluções desenvolvida pelo *Laboratoire de Robotique de Paris* e proposta nesta dissertação é a análise de estabilidade do sistema.

O controle cinemático apresentado em (Grand et al. 2002) busca melhorar a estabilidade do sistema através da distribuição uniforme de forças. Já nesta dissertação, buscamos melhorar a estabilidade do robô aumentando seu gradiente da margem de estabilidade.

Outra diferença fundamental é a posição dos pontos com o terreno, que permanece fixa durante a reconfiguração do robô *Hyllos*. Nesta pesquisa, consideramos que a posição dos pontos de contato é alterada ao comandar as pernas do robô.

## 4.4.2 *Jet Propulsion Laboratory*

Já em (Iagnemma & Dubowsky 2004, Iagnemma et al. 2000), o robô *Sample Return Rover* (SSR) é controlado minimizando uma função de custo (equação 4.12) que avalia a configuração do sistema, considerando seus ângulos de tombamento  $\gamma_i$ .

O SSR possui quatro rodas e um manipulador. As rodas são comandadas aos pares, utilizando 2 juntas instaladas nas laterais do robô, conforme exibido na figura 4.8. Tal mecanismo é complacente, sempre mantendo as quatro rodas em contato com o solo. A reconfiguração cinemática só permite compensar as inclinações laterais do corpo do robô.

Considerando  $K_i$  como o ganho referente a estabilidade,  $K_n$  o ganho de altura,  $\theta_j$  a posição da junta e  $\theta_j^*$  a posição desejada da junta, temos:

$$\epsilon = \sum_{j=1}^m \frac{K_i}{\gamma_j} + \sum_{j=1}^m K_n (\theta_j - \theta_j^*)^2 \quad (4.12)$$

O primeiro termo da função analisa o ângulo de tombamento referente a cada ponto de contato com o solo. Se o robô tombar, com um ângulo  $\gamma_j = 0$ ,  $\epsilon \rightarrow \infty$ .

O segundo termo da equação procura manter o sistema em uma configuração constante, garantindo uma distância adequada em relação ao solo.

O problema da função proposta é considerar todos os ângulos de tombamento do sistema, ao invés de analisar apenas o ângulo mínimo.

Vamos considerar um exemplo hipotético. Utilizando os ganhos de  $K_i = 1$  e  $K_n = 0$ , iremos calcular o valor da função de otimização para um sistema suspenso em duas pernas, com configurações distintas. Na primeira configuração, consideraremos ângulos de tombamento com valores de  $\gamma_1 = 30^\circ$  e  $\gamma_2 = 50^\circ$ . A segunda configuração, utilizaremos ângulos de  $\gamma_1 = 35^\circ$  e  $\gamma_2 = 35^\circ$ .

Empregando o critério proposto em (Papadopoulos & Rey 1996), a segunda configuração é a mais estável, com ângulo mínimo de tombamento igual a  $35^\circ$ . A função de otimização proposta possui valor de  $\epsilon = 0.057$ .

Já a função de otimização 4.12 considera a primeira configuração mais adequada, atribuindo um valor equivalente menor, com  $\epsilon = 0.05333$ .

Um robô controlado com o algoritmo proposto em (Papadopoulos & Rey 1996) não alcançará configuração de estabilidade máxima.

Através de análise visual do controle implementado no robô SSR, observamos nas figuras 4.8 e 4.9 que o resultado final é semelhante ao controle de orientação, com a base do robô se mantendo paralela à horizontal.

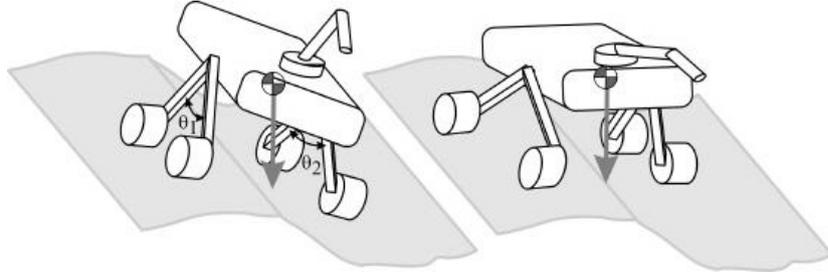


FIGURA 4.8: Funcionamento do Controle Implementado no Robô SSR

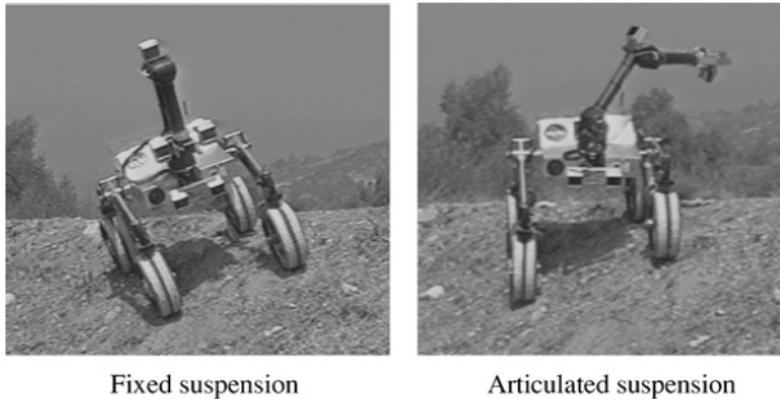


FIGURA 4.9: Controle Implementado no Robô SSR

A estratégia utilizada pelo *Jet Propulsion Laboratory* para melhorar a estabilidade do sistema difere da solução proposta nesta dissertação. Ao utilizar a função de custo (equação 4.12), procura-se em (Iagnemma & Dubowsky 2004, Iagnemma et al. 2000) aumentar todos os ângulos de tombamento do sistema.

Já a solução proposta nesta dissertação consiste em convergir todos os ângulos de tombamento para um valor médio, evitando valores máximos e mínimos. Assim, mesmo podendo diminuir a soma dos ângulos de tombamento, o gradiente da margem de estabilidade será maximizado, otimizando o critério de estabilidade adotado.

O método proposto em (Iagnemma & Dubowsky 2004, Iagnemma et al. 2000) necessita conhecer a posição exata dos pontos de contato entre robô e terreno. Tais dados não são necessários, para o controle de orientação desenvolvido nesta pesquisa.

# Capítulo 5

## Simulações

Simulações computacionais constituem uma prática cada vez mais comum. A capacidade de processamento disponível atualmente é suficiente para simular o comportamento de qualquer sistema representado através de modelo, podendo esse possuir complexidade elevada.

As simulações constituem uma poderosa ferramenta no desenvolvimento e implementação de um controle. O comportamento do sistema controlado pode ser analisado através de simulações, sem a necessidade de se realizar testes com a planta real. Custos e riscos podem ser reduzidos drasticamente.

Os algoritmos de controle cinemático desenvolvidos são avaliados, através de simulações, utilizando os modelos do robô com pernas prismáticas e Robô Ambiental Híbrido, apresentados no capítulo 3.

Uma biblioteca de programas foi desenvolvida utilizando o *software* de simulação matemática *Matlab*. O pacote de programas simula o comportamento dos robôs, utilizando o controle desenvolvido, ao se depararem com terrenos irregulares.

As posições limites das juntas são consideradas. Assim, cada robô será capaz de se adaptar aos diferentes terrenos de acordo com sua arquitetura.

Os ângulos compensados pelo RAH são pequenos, com valores máximos de  $9.82^\circ$  no sentido longitudinal e  $4.66^\circ$  no sentido lateral. Em muitas situações, mesmo utilizando configurações extremas do espaço de trabalho das pernas, o robô não consegue se adequar a irregularidades acentuadas do terreno.

Durante as simulações, as variáveis de postura do robô são armazenadas. Utilizando esses dados, podemos analisar a mobilidade do sistema no terreno acidentado percorrido, comparando os resultados obtidos com configuração cinemática fixa ou empregando o controle proposto.

A representação gráfica do comportamento dos sistemas será fornecida por meio de animações. O desempenho do controle será deferido analisando-se os critérios de mobilidade adotados.

## 5.1 Biblioteca de Programas para Simulação

O primeiro objetivo das simulações é verificar os modelos matemáticos obtidos de cada robô, RPP e RAH. Para tal, forneceremos as variáveis de postura  $P_{RPP}$  ou  $P_{RAH}$  (posição das juntas e orientação do robô) para o simulador que, utilizando as equações de cinemática direta, retorna a configuração do robô no solo encontrado.

Após validados os modelos cinemáticos calculados, podemos então testar o controle cinemático desenvolvido. Utilizando os algoritmos apresentados no capítulo 4, cada robô deve cumprir os objetivos estabelecidos, relacionados a estabilidade, tração, orientação e altura.

Além de garantir que o sistema controlado se comporte de maneira adequada, podemos analisar sua velocidade de resposta às variações do terreno. Por meio de simulações, podemos sintonizar os ganhos de controle, buscando atingir um comportamento adequado.

Responsável por realizar as simulações, um pacote de programas foi implementado utilizando o software de matemático *Matlab*. Esse pacote é composto por quatro módulos.

O primeiro módulo foi desenvolvido utilizando a ferramenta *Simulink*, e simula a malha de controle.

O segundo é um módulo gráfico, que recebe dados de entrada e desenha a configuração do robô.

O terceiro módulo obtém a seqüência de dados gerados durante a execução da malha de controle, e invoca o segundo módulo continuamente: a sucessão de desenhos produz

uma animação do comportamento do robô controlado.

Os resultados obtidos são exibidos pelo quarto módulo, que apresenta em gráficos os critérios de mobilidade empregados durante a reconfiguração cinemática.

### 5.1.1 Algoritmo de Controle

O principal programa da biblioteca desenvolvida é o que simula a malha de controle. Este programa foi implementado com a ferramenta *Simulink*, que utiliza um ambiente gráfico, composto por módulos com funções específicas interligados, para simular o comportamento de um sistema.

Como o controle cinemático desenvolvido é descentralizado, foi adotada uma malha de controle para cada junta do robô.

Na figura 5.1, podemos ver o modelo de um robô com 2 pernas controlado. Cada perna é controlada por malha exclusiva, de acordo com a equação 4.2.

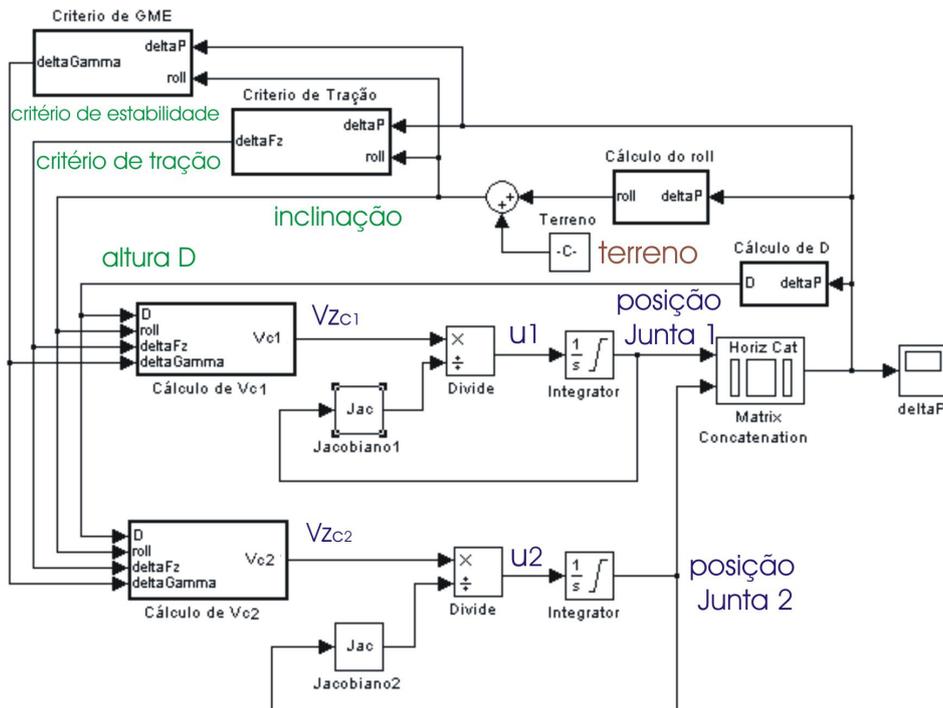


FIGURA 5.1: Malha de Controle Simulada

Conforme a equação 4.2, o dado de entrada de cada malha é a velocidade de comando  $v_{z_{c_i}}$  calculada para a perna em questão. A saída é a ação de controle que, devido

aos altos ganhos empregados, é equivalente a velocidade da junta ( $u \rightarrow \dot{\theta}$ ).

Integrando a velocidade  $\dot{\theta}$  calculada, obtemos a posição da junta  $\theta$ . Essa posição será utilizada para atualizar o valor do jacobiano, e também para calcular as variáveis de realimentação do sistema, incluindo a altura do robô em relação ao solo, sua orientação, critérios de tração e estabilidade. Cada uma dessas variáveis é calculada por módulo dedicado.

Durante a simulação do controle cinemático, as variáveis de postura  $P_{RPP}$  ou  $P_{RAH}$  ( $\theta_i$  ou  $h_i$  e as inclinações  $\phi, \psi$ ) do robô são armazenadas. As demais variáveis de realimentação do sistema  $D, d_{T_i}, \gamma_i, f_{s_i}$  também são gravadas.

- Altura do Robô

Consideramos como altura do robô a distância  $D$  entre seu centro de massa e a reta ou plano equivalente ao terreno.

Nas análises bidimensionais, o robô utiliza duas pernas para sustentação. A reta equivalente ao terreno  $\Psi$  é determinada utilizando os dois pontos de contato  $P_i$  com o solo. A equação 4.3 é utilizada para calcular a altura do sistema.

Já no caso tridimensional, o robô possui quatro pernas. O terreno será representado por um plano  $\Phi$ , formado por três pontos. Para calcular o terreno, um dos pontos de contato  $P_i$  será desconsiderado. Assim, utilizamos a equação 4.6 para obter a altura do sistema.

- Orientação do Sistema

A orientação do robô pode ser representada por seus ângulos de balanço  $\phi$  e caturro  $\psi$ , calculada através da equação 3.3. A orientação do sistema é determinada pelo terreno percorrido, e também pela configuração cinemática do sistema.

Utilizando as equações de cinemática direta apresentadas no capítulo 3, podemos determinar a posição de cada ponto de contato  $P_i$ .

No caso bidimensional, o robô utiliza duas pernas para sustentação, criando uma reta  $\Psi : ax + by + c$  que contém os dois pontos de contato  $P_i$ . A inclinação desta reta é facilmente obtida, em relação ao sistema de coordenadas do robô  $O_R$ .

$$\phi = \arctan\left(\frac{-a}{b}\right) [rad]$$

Considerando o universo tridimensional, utilizamos três pontos de contato para obter um plano  $\Phi : ax + by + cz + d$ , utilizado como terreno equivalente. Empregando as equações do plano, podemos calcular as inclinações lateral e longitudinal do plano, em relação ao sistema de coordenadas do robô  $O_R$ .

$$\begin{aligned}\phi &= \arctan\left(\frac{b}{c}\right) [rad] \\ \psi &= \arctan\left(\frac{-a}{c}\right) [rad]\end{aligned}\tag{5.1}$$

A orientação do robô em relação à  $O_T$  é calculada considerando as inclinações referentes à reta ou plano formados pelos  $P_i$ , e também os parâmetros do terreno percorrido.

O robô percebe o terreno, durante seu deslocamento, pela alteração da orientação de seu corpo em relação ao solo, causada por fatores externos, e não pela reconfiguração cinemática do sistema.

- Distribuição de Forças entre as Pernas

Consideramos apenas a força da gravidade  $f_g$  atuando no CG do robô.

O peso resultante do sistema resulta em forças de sustentação  $f_{s_i}$  aplicadas nos pontos de contato, no sentido vertical. Cada  $f_{s_i}$  pode ser decomposta em força normal ao terreno e forças de atrito lateral e longitudinal.

Podemos calcular as forças de sustentação  $f_{s_i}$  aplicadas nas pernas utilizando as equações de equilíbrio estático de um corpo rígido.

Quando um corpo está em equilíbrio mecânico, seus momentos angulares e lineares são constantes. Podemos traduzir essa condição através de um sistema de equações.

A primeira equação do sistema diz que a soma das forças de sustentação  $f_{s_i}$  é igual ao peso  $P$  do robô. As demais equações indicam que a resultante dos torques provocados pelas  $f_{s_i}$  é nula.

Considerando o caso planar, os robôs utilizam 2 pernas para se sustentar, e logo 2 pontos de contato  $P_i$ . Para calcular as forças aplicadas nas duas pernas, necessitamos de 2 equações: a primeira equação do sistema 5.2, referente ao momento linear do corpo,

e a segunda equação do sistema, referente ao momento angular no plano bidimensional (rotação em torno de  $x_R$ ).

$$\begin{cases} f_{s_1} + f_{s_2} = P \\ \tau_{P_1} + \tau_{P_2} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Já no caso tridimensional, os robôs estudados possuem quatro pernas, e logo quatro pontos de contato  $P_i$ . O problema nesta situação é que dispomos de apenas três equações de equilíbrio: uma referente ao momento linear do corpo, e duas equações referentes ao momento angular no plano tridimensional, considerando a rotação em torno dos eixos  $x_R, y_R$ .

O sistema de equações resultante é indeterminado, com quatro incógnitas e três equações. Esse fato é esperado, já que é necessário no mínimo três pontos para suspender um corpo no espaço tridimensional.

Não será possível calcular com exatidão as forças de sustentação  $f_{s_i}$  aplicadas nas quatro pernas do robô, considerando a força da gravidade atuando no robô, de acordo com sua configuração e características do terreno.

Na implementação do controle de reconfiguração cinemática no RAH, utilizamos sensores de força em cada perna, buscando manter sempre as quatro pernas em contato com o solo e garantir distribuição uniforme de forças no robô.

- Distâncias de Tombamento

As distâncias entre as projeções do centro de gravidade de um corpo e seu polígono de sustentação no plano horizontal são chamadas de distâncias de tombamento  $d_{T_i}$ .

O critério margem de estabilidade  $\alpha$  corresponde à menor distância de tombamento do sistema.

Apesar de não adotarmos esse critério para avaliar a estabilidade de um robô, iremos apresentar seu comportamento durante a simulação bidimensional do controle cinemático.

As distâncias de tombamento são calculadas rotacionando pontos  $P_i$ , calculados em relação à  $O_R$ , de acordo com a matriz de rotação  $R_T^R$ . Os novos pontos obtidos formam o polígono de sustentação do corpo.

Em seguida, calculamos a posição dos centros dos eixos de tombamento  $et_i$ . As distâncias entre projeção do CG do robô e centros dos eixos de tombamento serão as distâncias de tombamento utilizadas.

- Ângulos de Tombamento

Os ângulos de tombamento  $\gamma_i$  de um corpo são calculados utilizando os segmentos de reta  $l_i$ , ligando o centro de gravidade do robô ao centro dos eixos de tombamento  $et_i$ , e o vetor da força gravitacional  $f_g$ , conforme apresentado na figura 2.3 e equações 2.2 a 2.9.

### 5.1.2 Visualização do Robô

O segundo programa da biblioteca de simulação desenvolvida é responsável pela visualização gráfica do robô.

Esse módulo recebe como variáveis de entrada a posição das juntas  $\theta_i$  ou  $h_i$  e ângulos  $\phi, \psi$  do sistema ( $P_{RPP}$  ou  $P_{RAH}$ ). Com o auxílio das equações de cinemática direta obtidas por enfoque geométrico, é possível determinar a posição das barras dos mecanismos de suspensão e dos pontos de contato  $P_i$ , em relação a  $O_R$ .

Em seguida, o sistema é rotacionado de acordo com a orientação do corpo do robô, assumindo agora a horizontal  $O_T$  como referência. O resultado então é desenhado, proporcionando uma representação visual do sistema.

O módulo de visualização é bastante útil para a validação dos modelos de cinemática utilizados. Todas as figuras dos robôs RPP e RAH apresentadas nesta dissertação, feitas em *Matlab*, representando os modelos dos robôs estudados, foram desenhadas utilizando esse módulo.

### 5.1.3 Animação da Simulação

O terceiro módulo atua como interface entre os dois primeiros programas.

Durante a execução da malha de controle, as variáveis de postura  $P_{RPP}$  ou  $P_{RAH}$  são armazenadas. A primeira ação do módulo de animação consiste em obter esses dados, que contêm o comportamento do sistema durante a reconfiguração cinemática.

Em seguida, para cada configuração assumida pelo robô durante a simulação, é invocado o programa de visualização do sistema, de maneira seqüencial. As imagens são produzidas sobre o quadro anterior, em alta velocidade, gerando uma animação gráfica do robô durante a simulação.

A animação gráfica é uma poderosa ferramenta para a compreensão do sistema, ao se deparar com um terreno acidentado. Com o auxílio da animação, podemos visualizar os efeitos do terreno sobre o robô, e analisar seu comportamento com a utilização do controle cinemático desenvolvido.

#### 5.1.4 Apresentação dos Resultados

Um quarto programa foi desenvolvido visando analisar os resultados obtidos com a reconfiguração cinemática. O programa gera gráficos dos critérios de mobilidade adotados e variáveis controladas.

Para tal, o programa obtém as variáveis de postura e realimentação do sistema, armazenadas durante a execução da malha de controle.

O comportamento da altura  $D$  do robô em relação ao solo, sua orientação  $(\phi, \psi)$ , distribuição de forças entre as pernas  $f_{s_i}$ , e as distâncias  $d_{T_i}$  e ângulos de tombamento  $\gamma_i$  alcançados durante a reconfiguração são exibidos através de gráficos.

## 5.2 Resultado das Simulações

Após desenvolvido um pacote de programas adequado, iremos então realizar as simulações do controle cinemático desenvolvido.

As simulações são exibidas em ordem de complexidade, partindo dos casos mais simples e progressivamente ir incluindo mais dados ao sistema.

Começaremos os estudos utilizando o robô com pernas prismáticas. Esse robô não foi implementado fisicamente, sendo utilizado nas simulações, visando destacar o funcionamento do controle proposto. Sua arquitetura simplificada facilita a compreensão do comportamento do sistema.

Os primeiros ensaios são bidimensionais, considerando duas pernas do RPP. Em seguida, partiremos para simulações tridimensionais, considerando a arquitetura completa do robô.

Os terrenos percorridos são representados por inclinações lateral e longitudinal. As primeiras simulações considerarão funções constantes, como se o robô estivesse parado ou em terreno uniforme.

Para a movimentação em locais irregulares, utilizamos funções harmônicas para representar as variações do terreno. Essa representação de terreno é proposta em (Santos 2007, Silva 2007).

Verificado o correto funcionamento das simulações e do controle do RPP, podemos então adaptá-los ao Robô Ambiental Híbrido. Alterações no controle e nas simulações foram realizadas, incluindo o modelo cinemático correto e as singularidades e limites físicos associados.

Os algoritmos apresentados no capítulo 4 são simulados, incluindo controle de altura, orientação e estabilidade. As variáveis de realimentação correspondentes são analisadas, verificando o funcionamento do algoritmo.

### 5.2.1 Robô com Duas Pernas Prismáticas

As primeiras demonstrações das estratégias de controle propostas são realizadas utilizando o robô com duas pernas prismáticas. Essa abordagem foi adotada para

ilustrar o comportamento do controle cinemático em um sistema simples, destacando sua influência nos critérios adotados.

A base do robô e o comprimento máximo da perna, utilizados em todas as simulações com o RPP, são  $R = 10, L = 10$ .

O terreno é representado por uma inclinação lateral arbitrada constante  $\phi = 16.9^\circ$ . A configuração inicial do sistema é apresentada na figura 5.2.

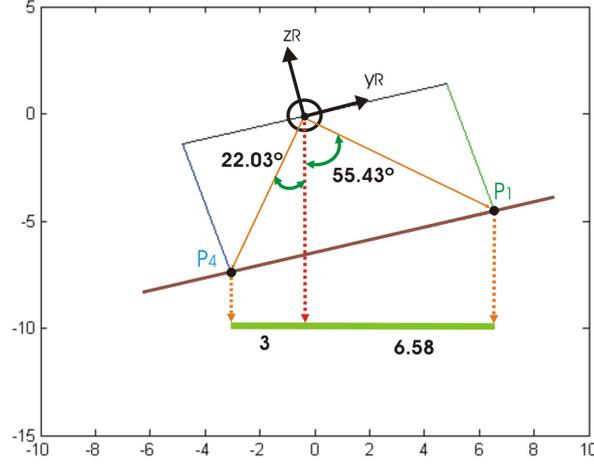


FIGURA 5.2: Robô com Duas Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinação Lateral Constante

Podemos verificar na figura 5.3 os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura (equação 4.7) e orientação (equação 4.8), com ganhos:

- $K_a = 1, K_{ob} = 10, K_t = 0, K_{eb} = 0$ .

Na configuração inicial do robô, a posição das juntas  $\theta_1(0) = -38.77^\circ, \theta_4(0) = 38.77^\circ$ . Com o controle de orientação, as juntas convergem para  $\theta_1 \rightarrow -27.62^\circ, \theta_4 \rightarrow 48.58^\circ, t \rightarrow \infty$ .

Na mesma figura (5.3) observamos os deslocamentos das juntas utilizando os controles de altura e estabilidade (equação 4.10), com ganhos:

- $K_a = 1, K_{ob} = 0, K_t = 0, K_{eb} = 0.4$ .

Com o controle de estabilidade, as juntas convergem para  $\theta_1 \rightarrow -18.54^\circ, \theta_4 \rightarrow 59.51^\circ, t \rightarrow \infty$ .

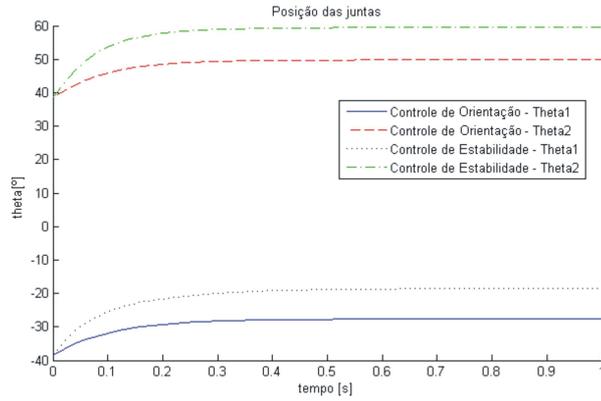


FIGURA 5.3: Deslocamento das Juntas do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

Podemos observar que o deslocamento das juntas utilizando o controle de estabilidade é superior ao obtido utilizando o controle de orientação.

Empregando o controle de orientação obtemos a configuração apresentada na figura 5.4(a). A configuração apresentada na figura 5.4(b) é alcançada utilizando o controle de estabilidade.

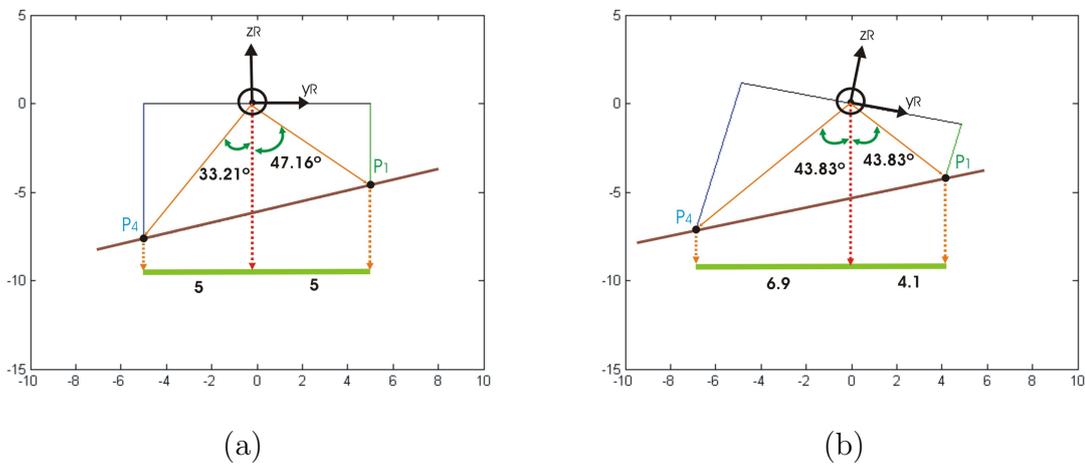


FIGURA 5.4: Configuração do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Iremos considerar que no início da simulação a altura  $D$  entre robô e solo é igual a desejada  $D^*$ .

Em ambas as simulações, durante a reconfiguração cinemática,  $D$  sofreu poucas

alterações (figura 5.5). Essa é a condição ideal para podermos comparar os demais resultados obtidos com as diferentes estratégias utilizadas. O controle de altura é utilizado em todas as simulações.

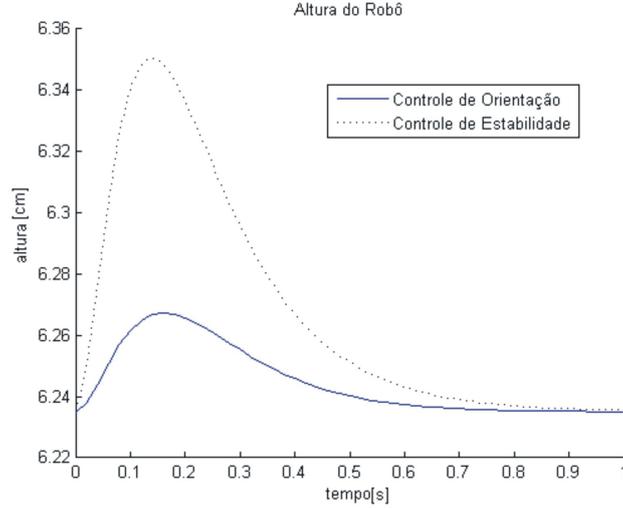


FIGURA 5.5: Altura do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

Empregando o controle de orientação, obtemos uma configuração final (figura 5.4(a)) onde a base do robô está paralela à horizontal (figura 5.6), com balanço do sistema  $\phi \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ .

Na configuração final assumida (figura 5.4(b)) com o controle de estabilidade, a base do robô está inclinada no sentido contrário ao terreno deparado (figura 5.6), com o balanço do sistema alcançando valor de  $\phi \rightarrow -13.72^\circ, t \rightarrow \infty$ .

O controle de orientação possui funcionamento semelhante ao controle de tração, devido à arquitetura simplificada do robô. Na configuração alcançada, as forças de sustentação  $f_{s_i}$  em cada perna convergem para valores iguais (figura 5.7). Já com o controle de estabilidade, a distribuição de forças não foi uniforme.

Considerando a margem de estabilidade  $\alpha$ , verificamos que o sistema atinge a melhor configuração utilizando o controle de orientação (figura 5.8). A projeção do CG do robô coincide com o centro da projeção do seu polígono de sustentação.

A configuração final do sistema obtida com o controle de estabilidade não é a mais estável, já que as distâncias de tombamento não são iguais.

As distâncias de tombamento  $d_{T_i}$  tem comportamento correlacionado à distribuição

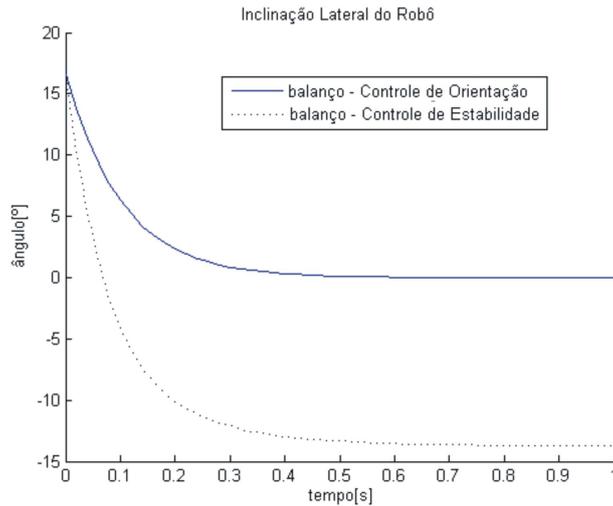


FIGURA 5.6: Orientação do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

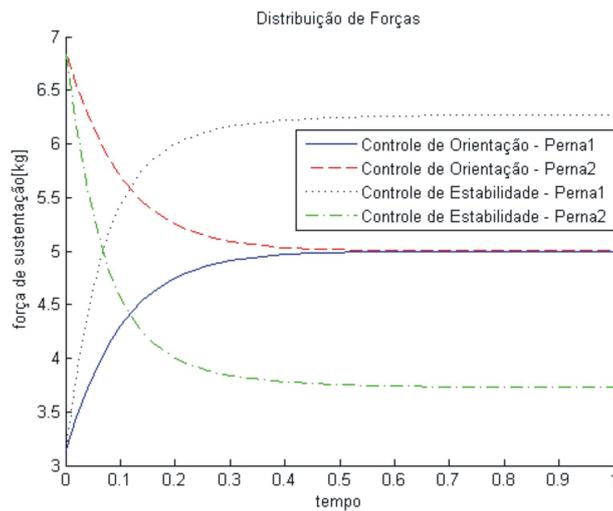


FIGURA 5.7: Distribuição de Forças no Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

de forças. A força de sustentação aplicada em cada perna gera um torque resultante  $\tau_{P_i}$ . Esse torque é proporcional ao braço de alavanca utilizado.

No caso bidimensional, os braços de alavanca utilizados são equivalentes às distâncias de tombamento. Quando esses segmentos possuem comprimentos iguais, as forças são distribuídas de maneira uniforme entre as pernas.

Considerando o gradiente da margem de estabilidade, verificamos que a estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. O gradiente da margem de

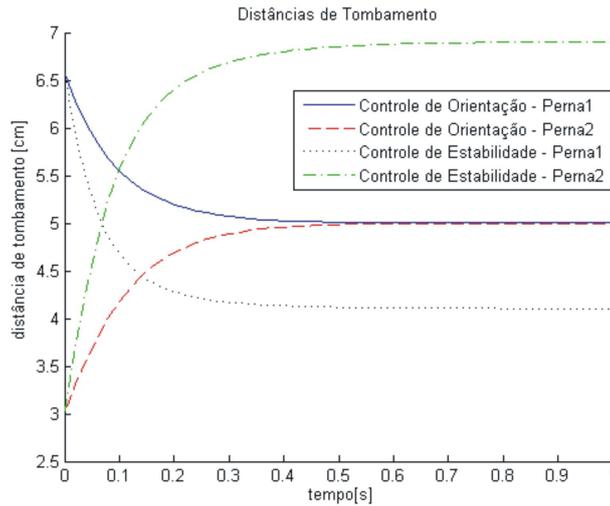


FIGURA 5.8: Distâncias de Tombamento do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

estabilidade inicial do sistema  $\beta(0) = 22.03^\circ$ .

O gradiente alcançado com o controle de orientação  $\beta \rightarrow 33.21^\circ$  (figura 5.9), o que corresponde a uma melhoria de 50.75% na estabilidade do sistema.

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento não possuem valor igual. Utilizando o controle de estabilidade, alcançamos uma configuração onde o gradiente  $\beta \rightarrow 43.83^\circ$  (figura 5.9).

Em relação à condição inicial do robô, o sistema está 98.95% mais estável. Esta estratégia obteve uma configuração 48.2% mais estável em relação à obtida utilizando o controle de orientação.

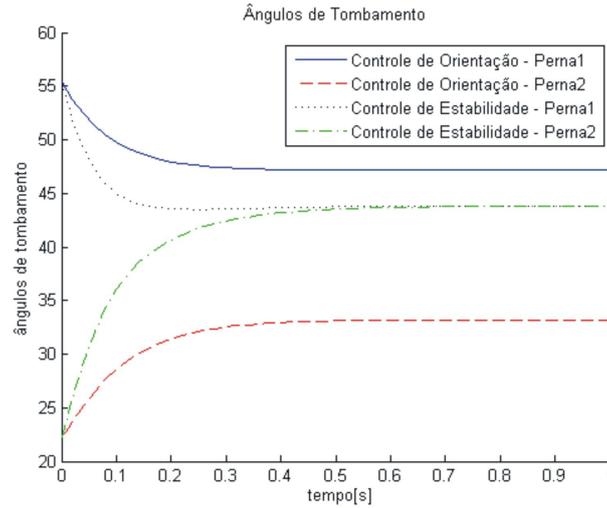


FIGURA 5.9: Ângulos de Tombamento do Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral Utilizando Diferentes Controles

Os resultados estão apresentados na tabela 5.1.

		Condições Iniciais	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$\theta_1 [^\circ]$	-38.77	-27.62	-18.54
	$\theta_4 [^\circ]$	38.77	48.58	59.51
Altura	$D [cm]$	6.24	6.24	6.24
Orientação	$\phi [^\circ]$	16.7	0	-13.72
Forças de Sustentação	$f_{s1} [kgf]$	3.13	5	6.27
	$f_{s2} [kgf]$	6.87	5	3.73
Distância de Tombamento	$d_{T1} [cm]$	6.58	5	4.10
	$d_{T2} [cm]$	2.99	5	6.89
Ângulo de Tombamento	$\gamma_1 [^\circ]$	55.43	47.16	43.83
	$\gamma_2 [^\circ]$	22.03	33.21	43.83
Incremento da Estabilidade			50.75%	98.95%

TABELA 5.1: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô com Duas Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinação Lateral

## 5.2.2 Robô com Quatro Pernas Prismáticas

Consideramos agora o modelo tridimensional do RPP, suspenso por quatro pernas.

### 5.2.2.1 Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Constantes

O terreno é representado por inclinações lateral e longitudinal arbitradas tais que  $\phi = 11.3^\circ$ ,  $\psi = 11.3^\circ$ . A configuração inicial do sistema é apresentada na figura 5.10.

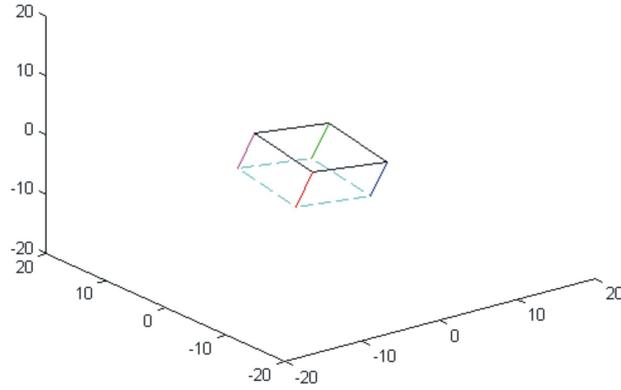


FIGURA 5.10: Robô com Quatro Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinações Constantes

A figura 5.11(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação.

- $K_a = 1$ ,  $K_{o_b} = 10$ ,  $K_{o_c} = 10$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0$ .

Na configuração inicial do robô, a posição das juntas  $\theta_1(0), \theta_2(0) = -38.77^\circ$  e  $\theta_3(0), \theta_4(0) = 38.77^\circ$ . Com o controle de orientação, as juntas convergem para  $\theta_1 \rightarrow -39.58^\circ$ ,  $\theta_2 \rightarrow -25.9^\circ$ ,  $\theta_3 \rightarrow 39.58^\circ$ ,  $\theta_4 \rightarrow 56.83^\circ$ ,  $t \rightarrow \infty$ .

A figura 5.11(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade.

- $K_a = 1$ ,  $K_{o_b} = 0$ ,  $K_{o_c} = 0$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0.4$ ,  $K_{e_c} = 0.4$ .

Utilizando o controle de estabilidade, as juntas convergem para  $\theta_1 \rightarrow -40.89^\circ$ ,  $\theta_2 \rightarrow -19.41^\circ$ ,  $\theta_3 \rightarrow 40.79^\circ$ ,  $\theta_4 \rightarrow 77.30^\circ$ ,  $t \rightarrow \infty$ . O deslocamento final das juntas é superior ao obtido utilizando o controle de orientação.

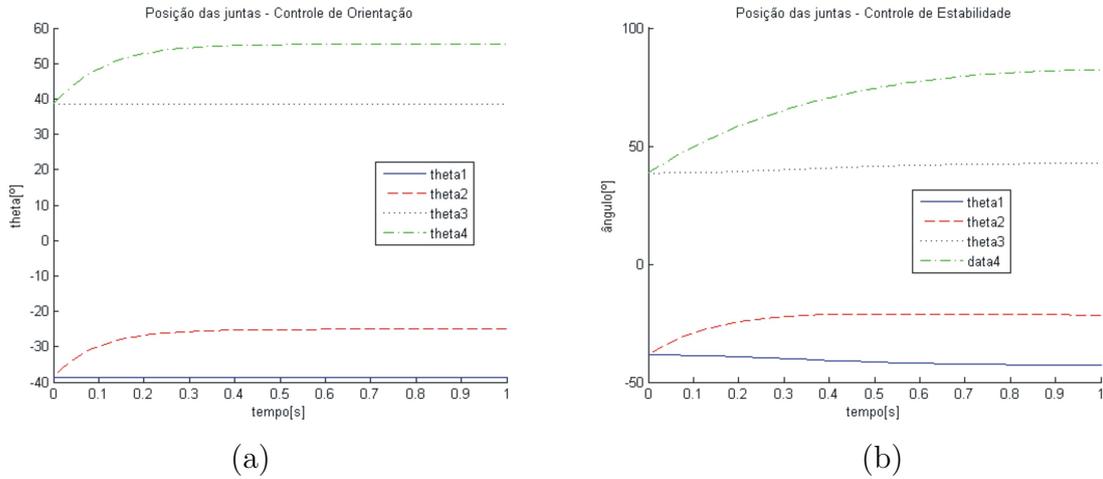


FIGURA 5.11: Deslocamento das Juntas do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Empregando o controle de orientação, obtemos a configuração apresentada na figura 5.12(a). A configuração apresentada na figura 5.12(b) é alcançada utilizando o controle de estabilidade.

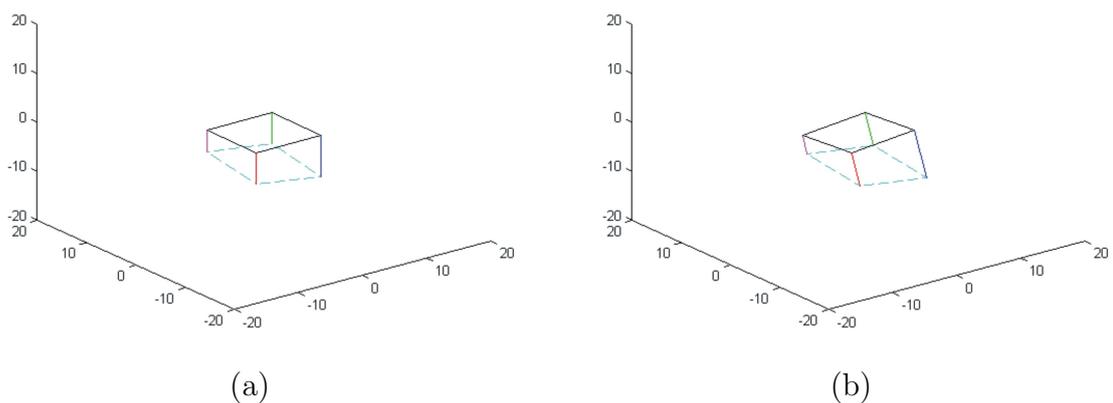


FIGURA 5.12: Configuração do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

O comportamento do robô tridimensional é semelhante ao bidimensional.

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final (figura 5.12)(a) onde a base do robô está paralela à horizontal (figura 5.13), de modo que  $\phi, \psi \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ .

Na configuração final assumida (figura 5.12)(b) com o controle de estabilidade, a base do robô está inclinada no sentido contrário ao terreno deparado (figura 5.13), com ângulos finais  $\phi \rightarrow -6.89^\circ$  e  $\psi \rightarrow -6.72^\circ, t \rightarrow \infty$ .

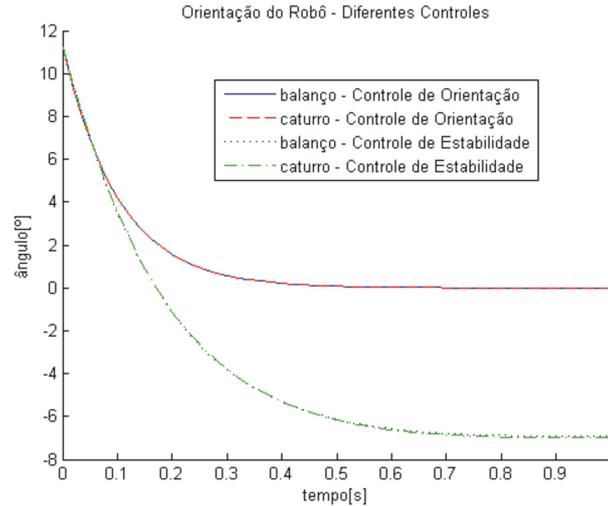


FIGURA 5.13: Orientação do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Diferentes Controles

Considerando o gradiente da margem de estabilidade, verificamos que a estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. O gradiente da margem de estabilidade inicial  $\beta(0) = 29.20^\circ$ , e alcança  $33.75^\circ$  (figura 5.14(a)) utilizando o controle de orientação, o que representa uma melhoria de 15.58% na estabilidade do sistema.

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento são diferentes. Utilizando o controle de estabilidade, alcançamos uma configuração onde o gradiente  $\beta \rightarrow 37.82^\circ$  (figura 5.14(b)).

Em relação à condição inicial do robô, o sistema está 29.52% mais estável. A estratégia de estabilidade obteve uma configuração 13.67% mais estável em relação à obtida utilizando o controle de orientação.

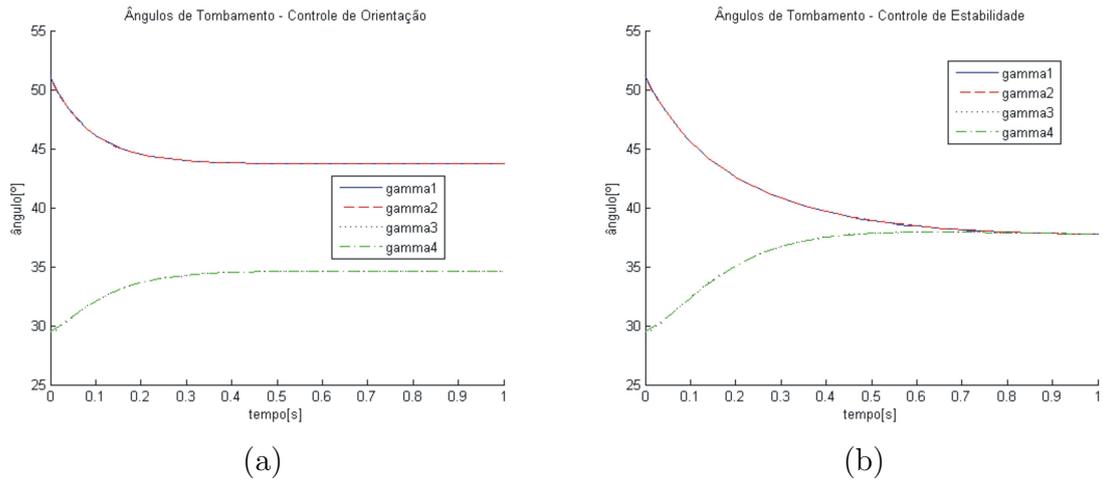


FIGURA 5.14: Ângulos de Tombamento do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Os resultados estão apresentados na tabela 5.2.

		Condições Iniciais	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$\theta_1 [^\circ]$	-38.77	-39.82	-40.89
	$\theta_2 [^\circ]$	-38.77	-25.9	-19.41
	$\theta_3 [^\circ]$	38.77	39.58	40.79
	$\theta_4 [^\circ]$	38.77	56.83	77.30
Orientação	$\phi [^\circ]$	11.3	0	-6.89
	$\psi [^\circ]$	11.3	0	-6.72
Ângulo de Tombamento	$\gamma_1 [^\circ]$	51.18	43.82	37.82
	$\gamma_2 [^\circ]$	51.18	43.82	37.82
	$\gamma_3 [^\circ]$	29.20	33.75	37.82
	$\gamma_4 [^\circ]$	29.20	33.75	37.82
Incremento da Estabilidade			15.58%	29.52%

TABELA 5.2: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Constantes

A distribuição das forças entre as pernas não será simulada para o caso tridimensional.

Para suspender um corpo em um espaço tridimensional, são necessários 3 pontos de apoio. Os robôs estudados possuem 4 pontos de contato com o terreno. O sistema de equações resultante é indeterminado, com mais variáveis que equações.

Podemos estender os resultados bidimensionais para o caso tridimensional, considerando que o controle de orientação possui funcionamento semelhante ao controle de tração, devido à arquitetura simplificada do robô. Essa consideração é feita em (Grand et al. 2002).

Porém, é necessário utilizar uma malha de controle interno para cada perna, garantindo que todas estejam em contato com o solo.

### 5.2.2.2 Terreno com Inclinações Variáveis

Consideramos o robô se deslocando em um terreno acidentado. As inclinações lateral e longitudinal são representadas por funções harmônicas, apresentadas nas equações 5.3 a 5.5.

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 11.3 \sin(2\pi t) \\ \psi = 0 \end{array} \right\} t \in [0, 1]s \quad (5.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 0 \\ \psi = 11.3 \sin(2\pi t) \end{array} \right\} t \in [1, 2]s \quad (5.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 11.3 \sin(2\pi t) \\ \psi = 11.3 \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \end{array} \right\} t \in [2, 3]s \quad (5.5)$$

O sistema de equações utilizado recria entre  $t \in [0, 1]s$  uma onda lateral em relação ao corpo do robô, em seguida ( $t \in [1, 2]s$ ) uma onda longitudinal, e por fim ( $t \in [2, 3]s$ ) um movimento combinado de inclinações lateral e longitudinal.

A figura 5.15(a) apresenta a orientação do corpo do robô (ângulos de  $\phi, \psi$ ), e a figura 5.15(b) seus ângulos de tombamento  $\gamma_i$ , ao percorrer o terreno acidentado sem nenhum controle.

A figura 5.16(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 5, K_{o_b} = 50, K_{o_c} = 50, K_t = 0, K_{e_b} = 0, K_{e_c} = 0$ .

Com o controle de orientação, as juntas atingem valores extremos de  $\|\theta_{4_{\max}}\| = 51.45^\circ, t = 2.30s$ , e  $\|\theta_{2_{\max}}\| = 51.85^\circ, t = 2.78s$ .

A figura 5.16(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade. Os ganhos adotados foram:

- $K_a = 5, K_{o_b} = 0, K_{o_c} = 0, K_t = 0, K_{e_b} = 40, K_{e_c} = 40$ .

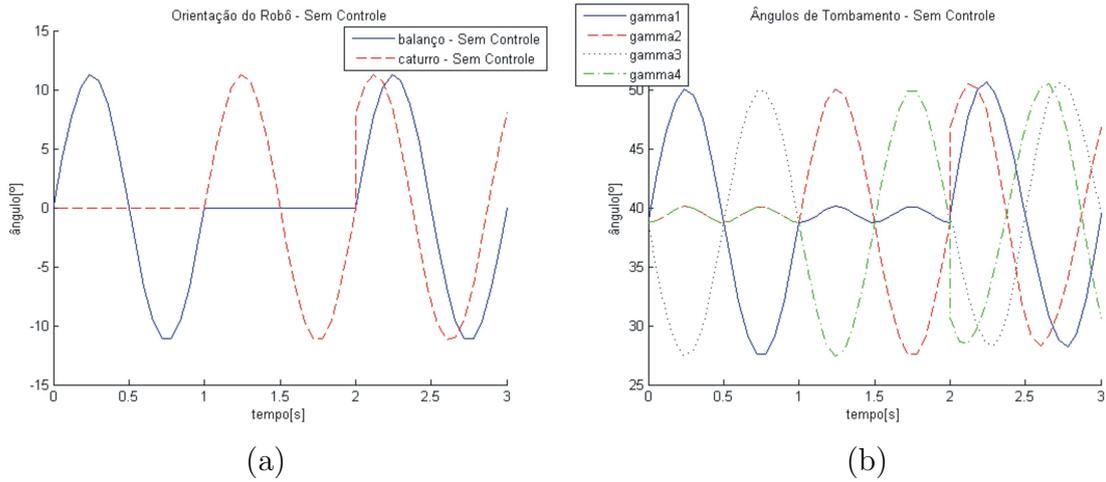


FIGURA 5.15: Robô com Quatro Pernas Prismáticas Não Controlado em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Orientação; (b) Ângulos de Tombamento.

Com o controle de estabilidade, as juntas atingem valores extremos de  $\|\theta_{4_{\max}}\| = 71.73^\circ, t = 2.19s$ , e  $\|\theta_{2_{\max}}\| = 72.03^\circ, t = 2.64s$ . O deslocamento das juntas é superior ao obtido utilizando o controle de orientação.

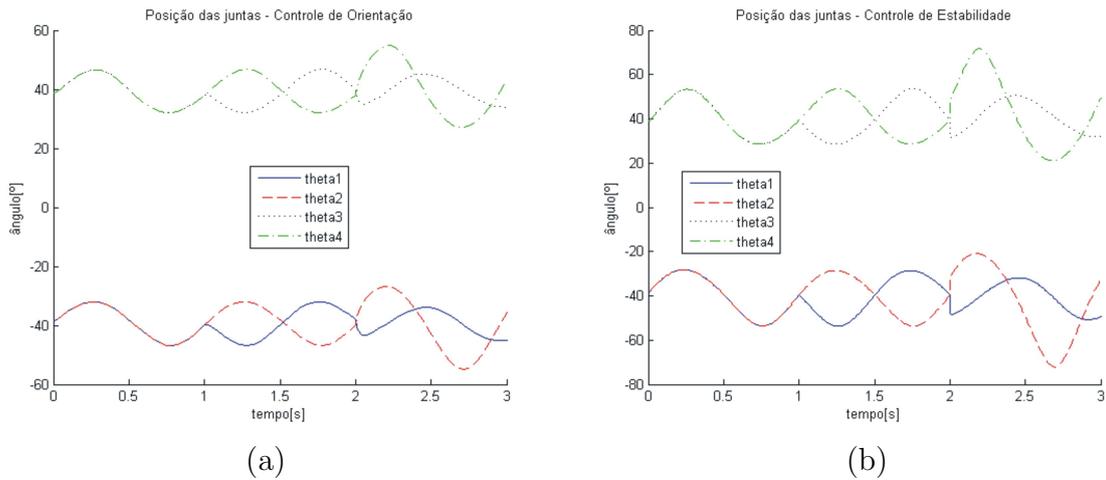


FIGURA 5.16: Deslocamento das Juntas do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Utilizando o controle de orientação, o robô busca manter sua base paralela à horizontal (figura 5.17). Os valores máximos de balanço e caturro do robô, com exceção da descontinuidade do terreno ( $t = 2s$ ), são  $\|\phi_{\max}\| \sim \|\psi_{\max}\| \sim 1.42^\circ$ . Esses valores podem ser cancelados, aumentando os ganhos utilizados.

Já com o controle de estabilidade, a base do robô permanece inclinada no sentido

contrário ao terreno deparado (figura 5.17). Os valores máximos de balanço e caturro do robô, com exceção da descontinuidade do terreno ( $t = 2s$ ), são  $\|\phi_{\max}\| \sim \|\psi_{\max}\| \sim 7.20^\circ$ .

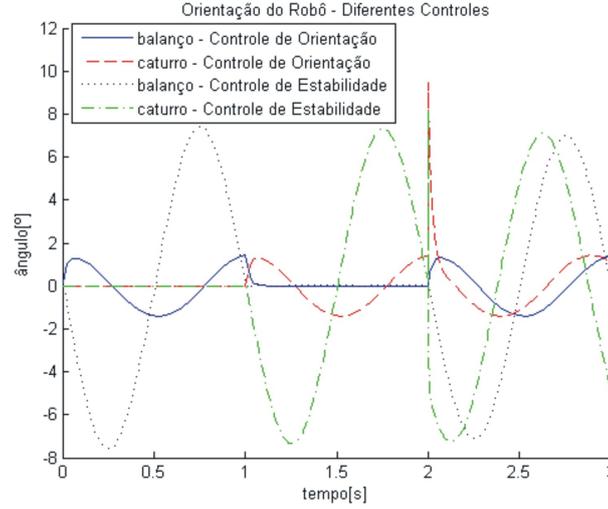


FIGURA 5.17: Orientação do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Diferentes Controles

Considerando o gradiente da margem de estabilidade, verificamos que a estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. Sem reconfiguração cinemática, o gradiente da margem de estabilidade apresenta valores mínimos de  $\beta_{\min} = 27.50^\circ$  (figura 5.15(b)).

Utilizando o controle de orientação, o gradiente da margem de estabilidade mínimo é de  $\beta_{\min} = 34.20^\circ$  (figura 5.18(a)), o que representa uma melhoria de 24.36% na estabilidade do sistema.

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento são diferentes. Utilizando o controle de estabilidade, os gradientes mínimos apresentados durante a simulação foram de  $\beta_{\min} = 37.70^\circ$  (figura 5.18(b)).

Nestes instantes, esta estratégia de controle obteve uma configuração 37.31% mais estável que a obtida com configuração cinemática constate, sendo 12.95% melhor que o resultado alcançado com o controle de orientação.

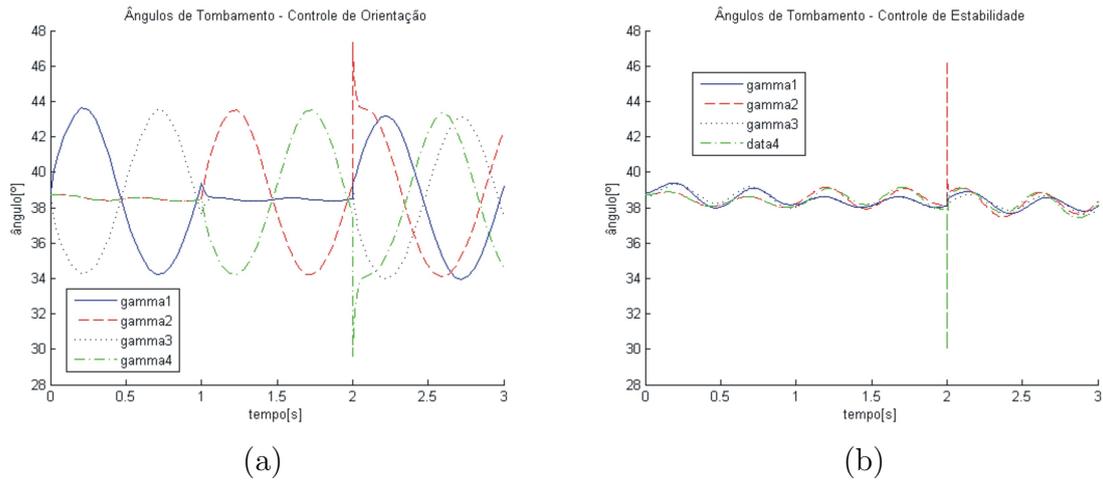


FIGURA 5.18: Ângulos de Tombamento do Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Os resultados estão apresentados na tabela 5.3.

		Sem Controle	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$\ \theta_{2_{\max}}\  [^\circ]$	-	51.85	72.03
	$\ \theta_{4_{\max}}\  [^\circ]$	-	51.45	71.73
Orientação	$\ \phi_{\max}\  [^\circ]$	11.3	1.42	7.20
	$\ \psi_{\max}\  [^\circ]$	11.3	1.42	7.20
$\beta$	$\beta_{\min} [^\circ]$	27.50	34.20	37.70
Incremento da Estabilidade			24.36%	37.31%

TABELA 5.3: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô com Quatro Pernas Prismáticas em Terreno com Inclinações Variáveis

### 5.2.3 Robô Ambiental Híbrido

Concluídas as simulações com o RPP, iremos agora realizar a reconfiguração do Robô Ambiental Híbrido, adaptando-se aos terrenos deparados, buscando melhor mobilidade.

Diferente do RPP, o RAH é um robô real. As simulações devem ser verossímeis, utilizando os mesmos limites de posição das pernas do robô.

Os ângulos máximos compensados pelo robô são de  $9.82^\circ$  no sentido longitudinal e  $4.66^\circ$  no sentido lateral, conforme apresentado na figura 3.9. Ao se deparar com inclinações mais abruptas do terreno, as juntas do robô atingem posições extremas, podendo não ser suficiente para atingir configuração cinemática ideal.

Nessas situações, o desempenho dos controles desenvolvidos é prejudicado.

### 5.2.3.1 Terreno com Inclinação Longitudinal Constante

As primeiras simulações realizadas com o RAH consideram o terreno representado por inclinação longitudinal, de maneira que o caturro do robô  $\phi = 2.5^\circ$ . A configuração inicial do sistema é apresentada na figura 5.19.

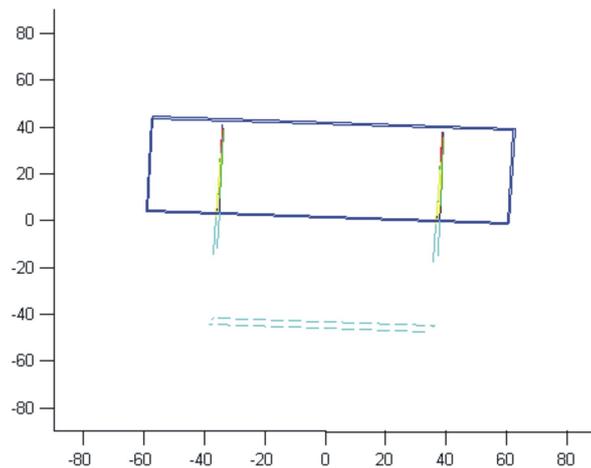


FIGURA 5.19: Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante

A figura 5.20(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 100$ ,  $K_{o_c} = 100$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0$ .

Na condição inicial do teste, a posição das juntas prismáticas  $h_i(0) = 12cm$ . Com o controle de orientação, as juntas convergem para  $h_1, h_4 \rightarrow 12.98cm$ , enquanto  $h_2, h_3 \rightarrow 11.15cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ .

A figura 5.20(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 0$ ,  $K_{o_c} = 0$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 20$ ,  $K_{e_c} = 20$ .

Com o controle de estabilidade, as juntas  $h_1, h_4 \rightarrow 13.68cm$ , enquanto  $h_2, h_3 \rightarrow 10.67cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ . O deslocamento final das juntas alcançado é superior ao obtido com o controle de orientação.

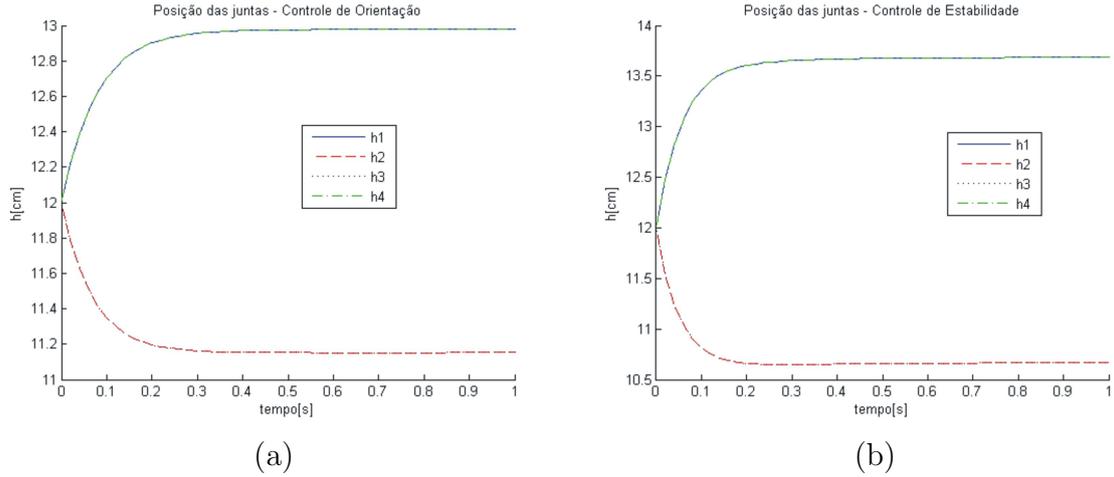


FIGURA 5.20: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

A configuração apresentada na figura 5.21(a) é alcançada utilizando o controle de orientação. Empregando o controle de estabilidade, obtemos a configuração apresentada na figura 5.21(b).

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final (figura 5.21(a)) onde balanço e caturro  $\psi \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ , e a base do robô está paralela à horizontal (figura 5.22).

Na configuração final adotada (figura 5.21(b)) utilizando o controle de estabilidade, a base do robô está inclinada no sentido contrário ao terreno deparado (figura 5.22), com caturro  $\psi \rightarrow -1.58^\circ$ ,  $t \rightarrow \infty$ .

A estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. O gradiente da margem de estabilidade inicial  $\beta(0) = 36^\circ$ , e utilizando o controle, alcança valor de  $37.53^\circ$  (figura 5.23(a)). Em relação à condição inicial, o sistema está 4.25% mais estável.

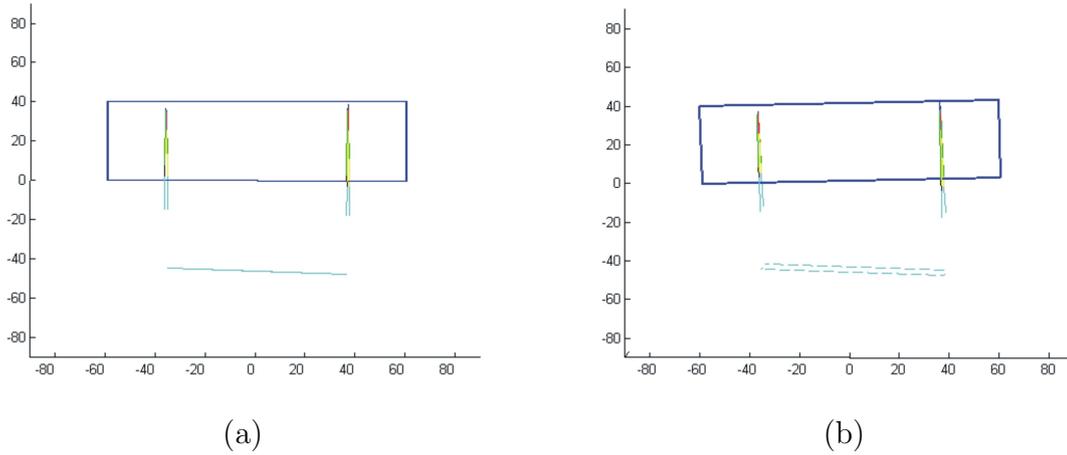


FIGURA 5.21: Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade;

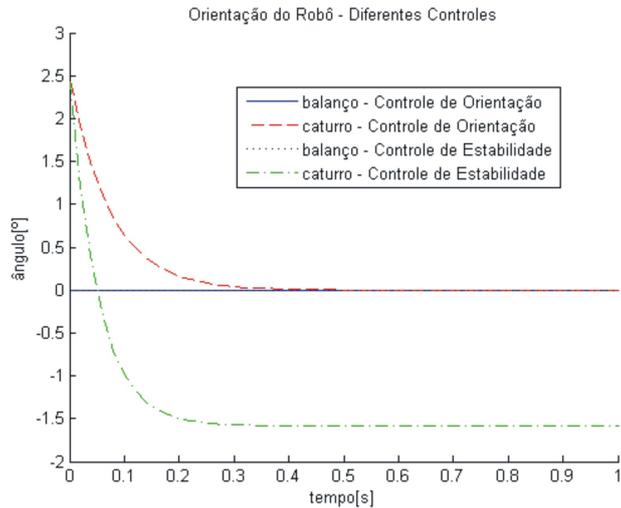


FIGURA 5.22: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Diferentes Controles

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento são diferentes. Com controle de estabilidade, o robô assume configuração onde o gradiente  $\beta \rightarrow 38.52^\circ$  (figura 5.23(b)).

A configuração é 7% mais estável que a configuração inicial, sendo 2.75% melhor que o resultado obtido com o controle de orientação.

As melhorias obtidas com a reconfiguração cinemática possuem valor baixo. Isso devido ao pequeno ângulo de inclinação do terreno utilizado.

Os objetivos dos controles propostos foram alcançados. O controle de orientação

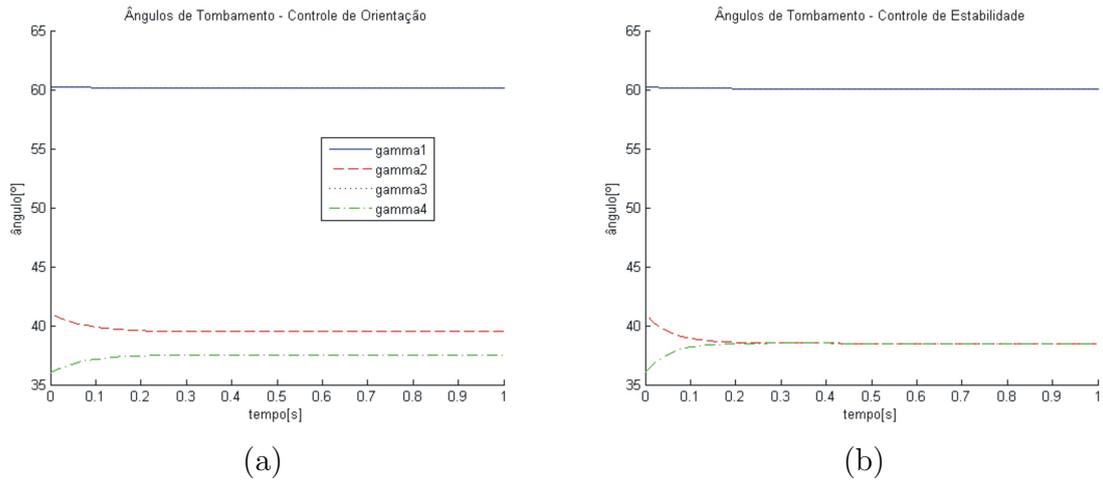


FIGURA 5.23: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

cancela a inclinação do corpo do robô. Mantendo a altura do RAH constante, a configuração obtida com o controle de estabilidade proporciona estabilidade máxima ao sistema.

Podemos observar que os ângulos de tombamento laterais ( $\gamma_1, \gamma_3$ ) possuem valores superiores que os ângulos longitudinais do robô ( $\gamma_2, \gamma_4$ ). Esse comportamento é causado pela arquitetura do mecanismo, cuja largura do polígono de sustentação é o dobro do comprimento.

Em todos os testes apresentados, o gradiente da margem de estabilidade do RAH será um dos ângulos de tombamento  $\gamma_2$  ou  $\gamma_4$ .

Os resultados estão apresentados na tabela 5.4.

		Condições Iniciais	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$h_1[cm]$	12	12.98	13.68
	$h_2[cm]$	12	11.15	10.67
	$h_3[cm]$	12	11.15	10.67
	$h_4[cm]$	12	12.98	13.68
Orientação	$\phi[^\circ]$	0	0	0
	$\psi[^\circ]$	2.5	0	-1.58
Ângulo de Tombamento	$\gamma_1[^\circ]$	60.25	60.2	60.2
	$\gamma_2[^\circ]$	40.80	39.5	38.52
	$\gamma_3[^\circ]$	60.25	60.2	60.2
	$\gamma_4[^\circ]$	36.00	37.56	38.52
Incremento da Estabilidade			4.25%	7%

TABELA 5.4: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante

### 5.2.3.2 Terreno com Inclinação Lateral Constante

Submetemos o robô a um terreno com inclinação lateral, de forma que o balanço  $\phi = 0.8^\circ$ . A configuração inicial do sistema é apresentada na figura 5.24.

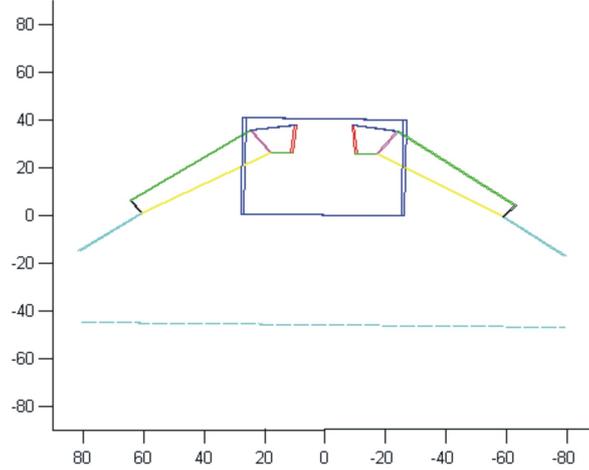


FIGURA 5.24: Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinação Lateral Constante

A figura 5.25(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 100$ ,  $K_{o_c} = 100$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0$ .

Na condição inicial do teste, a posição das juntas prismáticas  $h_i(0) = 12cm$ . Com o controle de orientação, as posições das juntas convergem para  $h_1, h_2 \rightarrow 11.38cm$ , enquanto  $h_3, h_4 \rightarrow 12.65cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ .

A figura 5.25(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade. Os ganhos utilizados são:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 0$ ,  $K_{o_c} = 0$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 20$ ,  $K_{e_c} = 20$ .

Utilizando o controle de estabilidade, as posições das juntas tendem para  $h_1, h_2 \rightarrow 10.32cm$ , enquanto  $h_3, h_4 \rightarrow 14.28cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ . Os deslocamentos das juntas são superiores ao triplo dos resultados obtidos com o controle de orientação.

A configuração apresentada na figura 5.26(a) é alcançada utilizando o controle de orientação. Empregando o controle de estabilidade, obtemos a configuração apresentada na figura 5.26(b).

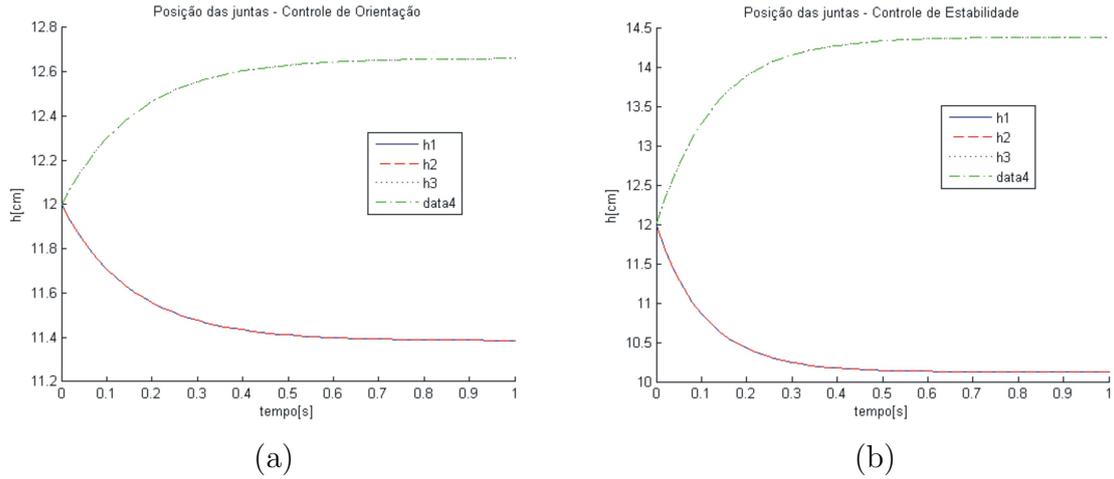


FIGURA 5.25: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

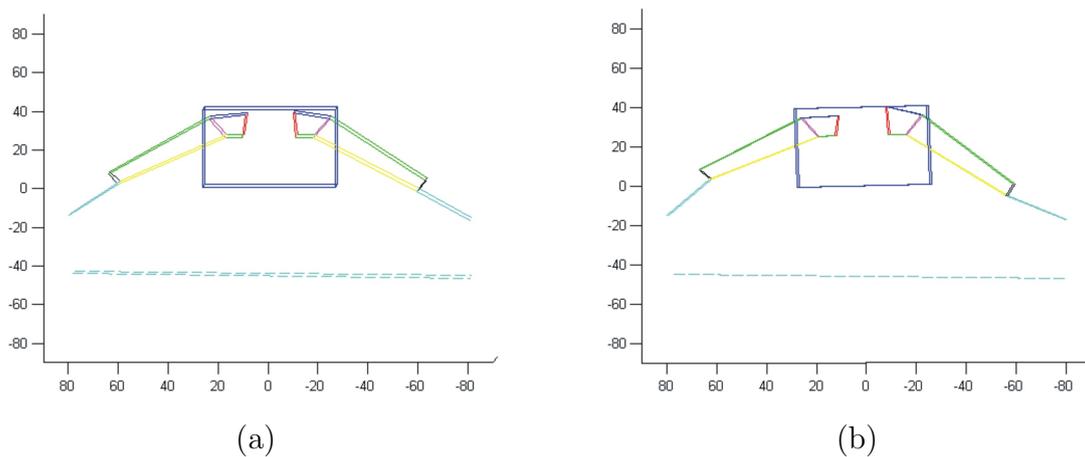


FIGURA 5.26: Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Utilizando o controle de orientação, a base do robô fica paralela à horizontal, com  $\phi \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$  (figura 5.27).

Na configuração final adotada utilizando o controle de estabilidade, a base do robô está inclinada no sentido contrário ao terreno deparado (figura 5.27), com  $\phi \rightarrow -1.81^\circ, t \rightarrow \infty$ .

Devido à arquitetura do robô, em especial as relações entre alturas das pernas, comprimento e largura do polígono de sustentação, o balanço do robô deve assumir valores contrários maiores que o dobro da inclinação do terreno percorrido, para diminuir a

diferença entre os ângulos de tombamento laterais  $\gamma_1, \gamma_3$ .

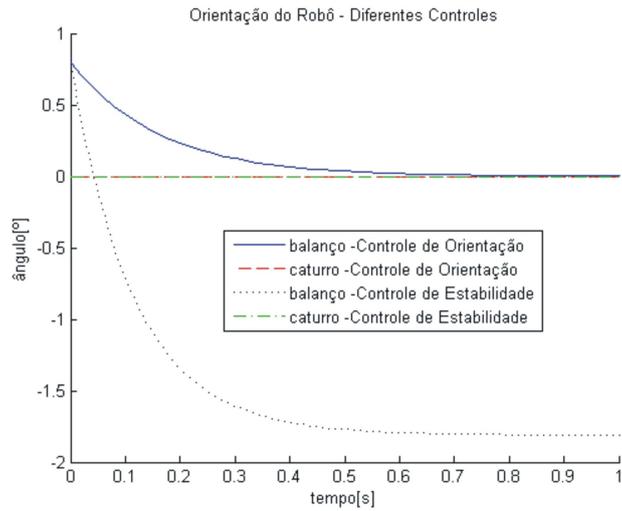


FIGURA 5.27: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Diferentes Controles

Os ângulos de tombamento, nas condições iniciais, são de  $\gamma_2(0), \gamma_4(0) = 38.52^\circ, \gamma_1(0) = 61.00^\circ, \gamma_3(0) = 59.39^\circ$  (figura 5.28(a)).

O controle de orientação diminui a diferença entre  $\gamma_1, \gamma_3$ , assumindo valores finais de  $\gamma_1 \rightarrow 60.72^\circ, \gamma_3 \rightarrow 59.62^\circ$  (figura 5.28(a)).

Utilizando o controle de estabilidade, os ângulos de tombamento laterais convergem para  $\gamma_1, \gamma_3 \rightarrow 60.00^\circ$  (figura 5.28(b)).

Nenhum dos controles utilizados melhorou a estabilidade do sistema, já que o gradiente da margem de estabilidade permaneceu constante durante todo o teste ( $\beta = 38.52^\circ$ ).

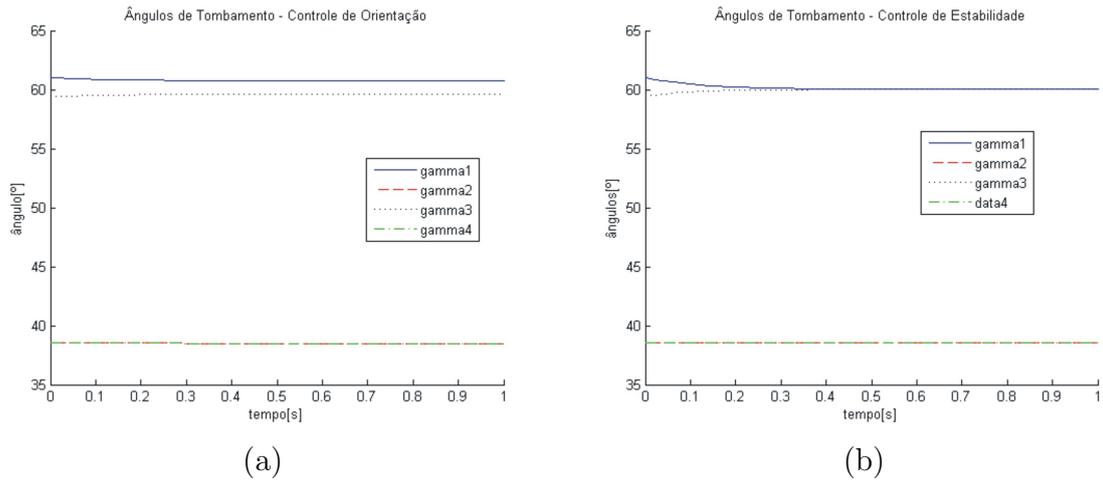


FIGURA 5.28: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Os resultados estão apresentados na tabela 5.5.

		Condições Iniciais	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$h_1[cm]$	12	11.38	10.32
	$h_2[cm]$	12	11.38	10.32
	$h_3[cm]$	12	12.65	14.28
	$h_4[cm]$	12	12.65	14.28
Orientação	$\phi[^\circ]$	0.8	0	-1.81
	$\psi[^\circ]$	0	0	0
Ângulo de Tombamento	$\gamma_1[^\circ]$	61	60.72	60
	$\gamma_2[^\circ]$	38.52	38.52	38.52
	$\gamma_3[^\circ]$	59.39	59.62	60
	$\gamma_4[^\circ]$	38.52	38.52	38.52
Incremento da Estabilidade			0%	0%

TABELA 5.5: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante

### 5.2.3.3 Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Constantes

Nesta simulação o terreno será representado por inclinações lateral e longitudinal inclinando o corpo do RAH em  $\phi = 1.25^\circ$  e  $\psi = 0.4^\circ$ . A configuração inicial do sistema é apresentada na figura 5.29.

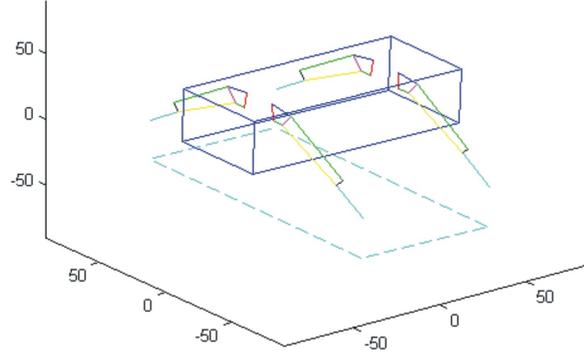


FIGURA 5.29: Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinações Constantes

A figura 5.30(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação. Os ganhos utilizados são:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 200$ ,  $K_{o_c} = 100$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0$ .

Todas as juntas começam o teste na posição inicial  $h_i(0) = 12cm$ . O controle de orientação desloca as juntas para posições finais  $h_1 \rightarrow 12.14cm$ ,  $h_2 \rightarrow 11.26cm$ ,  $h_3 \rightarrow 11.87cm$ ,  $h_4 \rightarrow 12.81cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ .

A figura 5.30(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade (equação 4.10). Os ganhos utilizados são:

- $K_a = 10$ ,  $K_{o_b} = 0$ ,  $K_{o_c} = 0$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 40$ ,  $K_{e_c} = 10$ .

O controle de estabilidade desloca as juntas para posições finais  $h_1 \rightarrow 11.74cm$ ,  $h_2 \rightarrow 10.38cm$ ,  $h_3 \rightarrow 12.31cm$ ,  $h_4 \rightarrow 13.97cm$ , em  $t \rightarrow \infty$ . O deslocamento das juntas é maior que o dobro obtido com o controle de orientação.

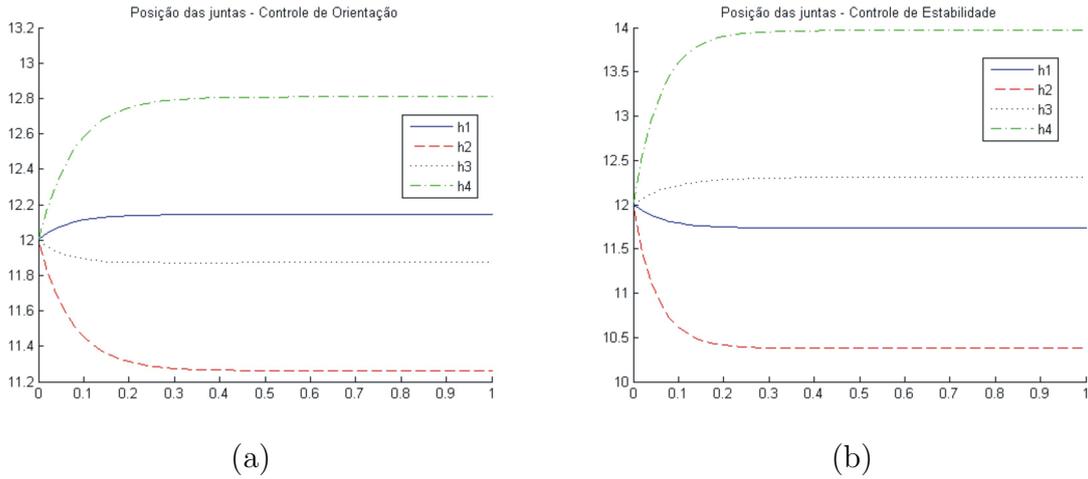


FIGURA 5.30: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

A configuração apresentada na figura 5.31(a) é alcançada utilizando o controle de orientação. Empregando o controle de estabilidade, obtemos a configuração apresentada na figura 5.31(b).

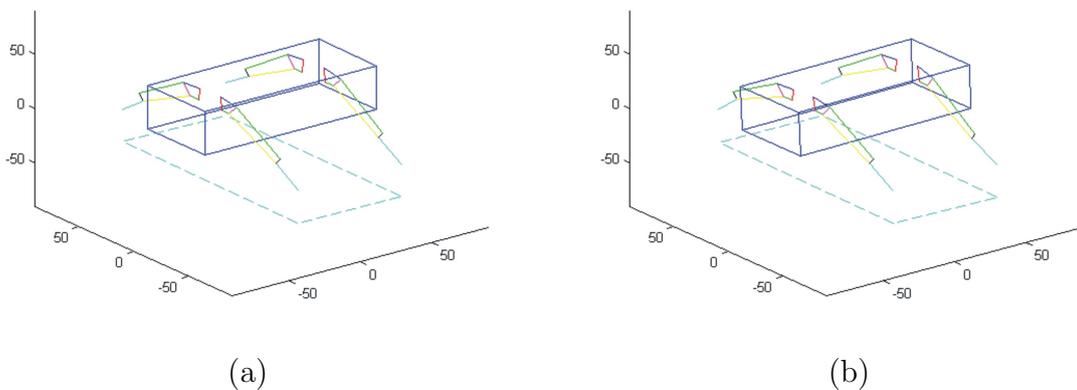


FIGURA 5.31: Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final onde a base do robô está paralela à horizontal, de modo que  $\psi, \phi \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$  (figura 5.32).

Na configuração alcançada utilizando o controle de estabilidade, a base do robô está inclinada no sentido contrário ao terreno deparado (figura 5.32). Os ângulos finais de balanço e caturro do robô são de  $\phi \rightarrow -0.89^\circ, \psi \rightarrow -0.79^\circ, t \rightarrow \infty$ . O robô teve de

compensar lateralmente mais que o dobro da inclinação do terreno.

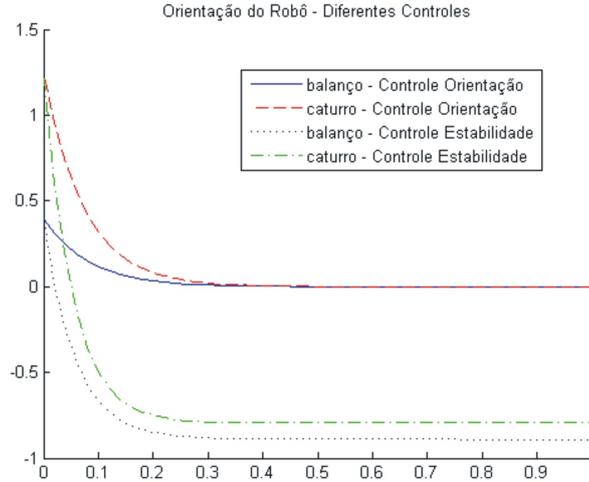


FIGURA 5.32: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Diferentes Controles

Os ângulos de tombamento iniciais do robô são de  $\gamma_1(0) = 60.61^\circ, \gamma_2(0) = 39.76^\circ, \gamma_3(0) = 59.80^\circ, \gamma_4(0) = 37.26^\circ$ .

A estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. O gradiente da margem de estabilidade alcançado com o controle é de  $\beta \rightarrow 38.02^\circ$  (figura 5.33(a)), sendo 2.04% mais estável que nas condições iniciais.

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento são diferentes.

Com controle de estabilidade, o robô assume configuração onde o gradiente  $\beta \rightarrow 38.52^\circ$  (figura 5.33(b)), sendo 3.38% mais estável que a obtida com as condições iniciais.

Os ganhos de estabilidade obtidos com os controles de reconfiguração cinemática são consequência dos movimentos longitudinais no corpo do robô causados pela atuação das pernas.

Os ângulos de tombamento laterais ( $\gamma_1, \gamma_3$ ) possuem valor muito superior aos longitudinais ( $\gamma_2, \gamma_4$ ). Dessa forma, os movimentos laterais do corpo do robô, nas condições testadas, não influenciam o gradiente da margem de estabilidade  $\beta$ .

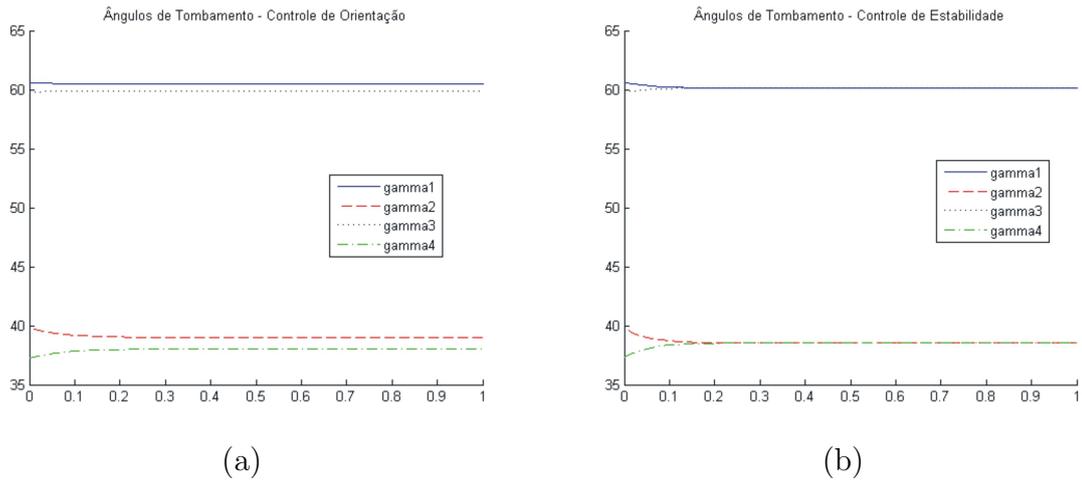


FIGURA 5.33: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade;

Os resultados estão apresentados na tabela 5.6.

		Condições Iniciais	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$h_1[cm]$	12	12.14	11.74
	$h_2[cm]$	12	11.26	10.38
	$h_3[cm]$	12	11.87	12.31
	$h_4[cm]$	12	12.81	13.97
Orientação	$\phi[^\circ]$	0.4	0	-0.89
	$\psi[^\circ]$	1.25	0	-0.79
Ângulo de Tombamento	$\gamma_1[^\circ]$	60.61	60.72	60.02
	$\gamma_2[^\circ]$	39.76	39.32	38.52
	$\gamma_3[^\circ]$	59.80	59.62	60.02
	$\gamma_4[^\circ]$	37.26	38.02	38.52
Incremento da Estabilidade			2.04%	3.38%

TABELA 5.6: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes

### 5.2.3.4 Terreno com Inclinações Variáveis

Assim como o RPP, iremos considerar o RAH se deslocando em um terreno acidentado. As inclinações lateral e longitudinal são representadas por funções harmônicas, apresentadas nas equações 5.6 a 5.8.

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 0.4 \sin(2\pi t) \\ \psi = 0 \end{array} \right\} t \in [0, 1]s \quad (5.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 0 \\ \psi = 1.25 \sin(2\pi t) \end{array} \right\} t \in [1, 2]s \quad (5.7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi = 0.4 \sin(2\pi t) \\ \psi = 1.25 \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \end{array} \right\} t \in [2, 3]s \quad (5.8)$$

O sistema de equações utilizado recria entre  $t \in [0, 1]s$  uma onda lateral em relação ao corpo do robô, em seguida ( $t \in [1, 2]s$ ) uma onda longitudinal, e por fim ( $t \in [2, 3]s$ ) um movimento combinado de inclinações lateral e longitudinal.

A figura 5.34(a) apresenta a orientação do corpo do robô (ângulos de  $\phi, \psi$ ), e a figura 5.34(b) seus ângulos de tombamento  $\gamma_i$ , ao percorrer o terreno acidentado sem nenhum controle.

A figura 5.35(a) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e orientação. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 50, K_{o_b} = 500, K_{o_c} = 500, K_t = 0, K_{e_b} = 0, K_{e_c} = 0.$

Com o controle de orientação, as juntas atingem valores máximos de  $h_{2_{\max}}, h_{4_{\max}} = 12.72cm$  e mínimos de  $h_{2_{\min}}, h_{4_{\min}} = 11.34cm$

A figura 5.35(b) apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando os controles de altura e estabilidade. Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 50, K_{o_b} = 0, K_{o_c} = 0, K_t = 0, K_{e_b} = 40, K_{e_c} = 40.$

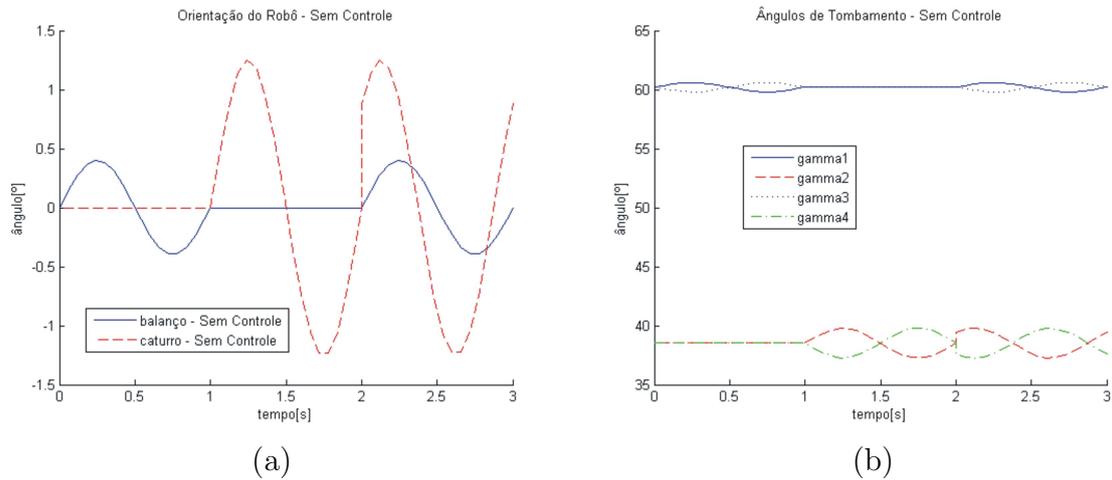


FIGURA 5.34: Robô Ambiental Híbrido Não Controlado em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Orientação; (b) Ângulos de Tombamento.

Com o controle de estabilidade, as juntas atingem valores máximos de  $h_{2_{\max}}, h_{4_{\max}} = 13.61\text{cm}$  e mínimos de  $h_{2_{\min}}, h_{4_{\min}} = 10.63\text{cm}$ , deslocamentos superiores ao dobro dos obtidos com o controle de orientação.

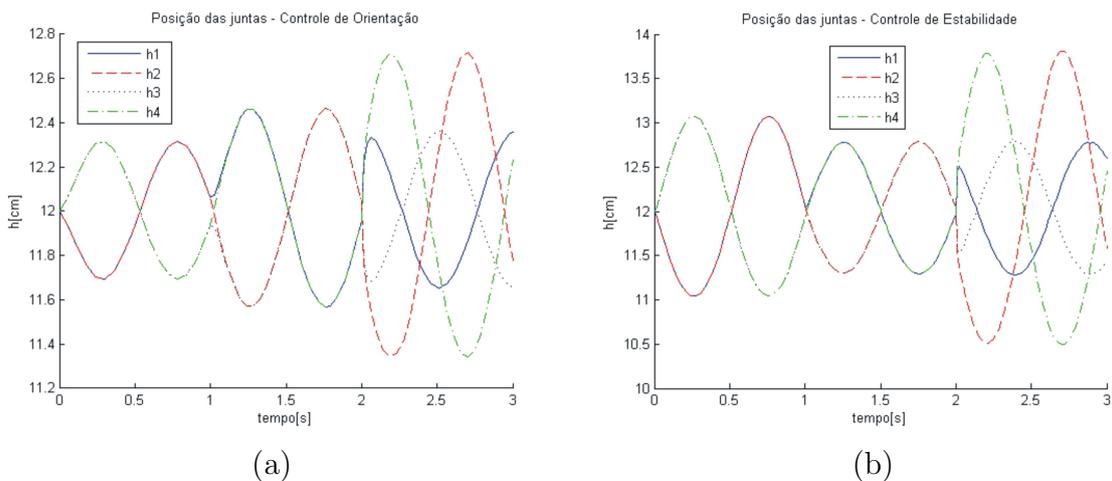


FIGURA 5.35: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Utilizando o controle de orientação, o robô busca manter sua base paralela à horizontal (figura 5.17). Os valores máximos de balanço e caturro do robô, com exceção da descontinuidade do terreno ( $t = 2s$ ), são de  $\|\phi_{\max}\| \sim \|\psi_{\max}\| \sim 0.1^\circ$ . Essa diferença pode ser cancelada aumentando os ganhos utilizados.

Já com o controle de estabilidade, a base do robô permanece inclinada no sentido

contrário ao terreno deparado (figura 5.17). Os valores máximos de balanço e caturro do robô, com exceção da descontinuidade do terreno ( $t = 2s$ ), são tais que  $\|\phi_{\max}\| \sim 0.89^\circ$ ,  $\|\psi_{\max}\| \sim 0.79^\circ$ .

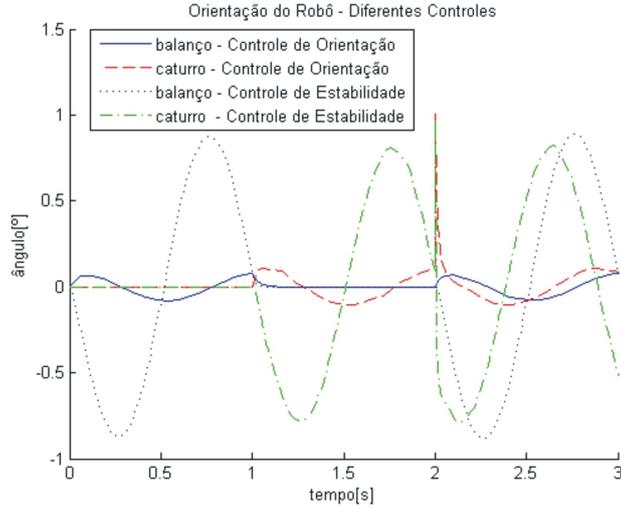


FIGURA 5.36: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Diferentes Controles

Considerando o gradiente da margem de estabilidade  $\beta$ , verificamos que a estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação.

O gradiente da margem de estabilidade apresenta valores mínimos de  $\beta_{\min} = 37.26^\circ$ , elevados para  $38.01^\circ$  utilizando o controle de orientação (figura 5.37(a)). Tal mudança corresponde a um aumento de 2.01% na estabilidade do robô, nestes instantes.

Porém, o robô não está na configuração mais estável, já que os ângulos de tombamento são diferentes.

Utilizando o controle de estabilidade, alcançamos uma configuração onde o gradiente apresenta valor  $\beta_{\min} = 38.48^\circ$ , corresponde a um aumento de 3.27% na estabilidade do robô, sendo 1.26% mais estável que a configuração obtida com o controle de orientação.

Mais uma vez, os ganhos de estabilidade obtidos com os controles testados são consequência dos movimentos longitudinais do corpo do robô executados durante a reconfiguração cinemática.

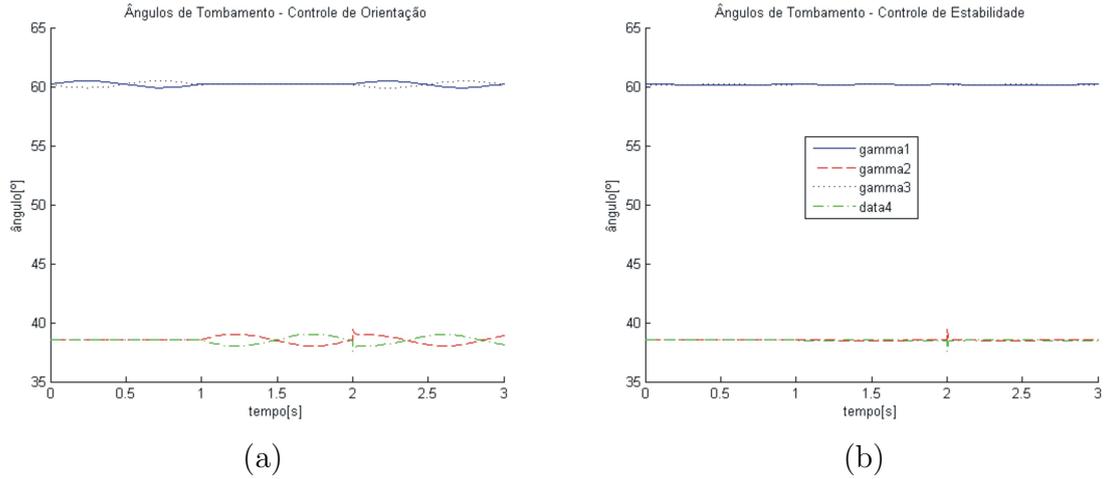


FIGURA 5.37: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Controle de Orientação; (b) Controle de Estabilidade.

Os resultados estão apresentados na tabela 5.7.

		Sem Controle	Controle de Orientação	Controle de Estabilidade
Deslocamento das Juntas	$\ h_{2_{\max}}\  [cm]$	-	12.72	13.61
	$\ h_{2_{\min}}\  [cm]$	-	11.34	10.63
	$\ h_{4_{\max}}\  [cm]$	-	12.72	13.61
	$\ h_{4_{\min}}\  [cm]$	-	11.34	10.63
Orientação	$\ \phi_{\max}\  [^\circ]$	0.4	0.1	0.89
	$\ \psi_{\max}\  [^\circ]$	1.25	0.1	0.79
$\beta$	$\beta_{\min} [^\circ]$	37.36	38.01	38.48
Incremento da Estabilidade			2.01%	3.27%

TABELA 5.7: Resumo dos Resultados Obtidos com o Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis

## Capítulo 6

# Implementação do Controle no Robô Ambiental Híbrido

Essa dissertação foi motivada pelo Robô Ambiental Híbrido.

Este robô possui reconfiguração ativa, empregando arquitetura *Wheel-Legged*, e está sendo desenvolvido para operar nos diferentes terrenos encontrados na região Amazônica.

Sem reconfiguração cinemática, o robô apresenta problemas de mobilidade, principalmente em regiões acidentadas. É comum encontrar uma das rodas sem contato com o solo, o que prejudica a tração do sistema.

O gradiente da margem de estabilidade  $\beta$  do robô é baixo, podendo este tombar ao se deparar com inclinações mínimas de  $35^\circ$ .

O robô utiliza 4 DOF, referentes às pernas, que devem ser atuados simultaneamente, impossibilitando comando manual eficiente. O controle automático é vital à mobilidade do robô nos diferentes terrenos, permitindo ao operador se dedicar a outras tarefas.

A implementação das técnicas desenvolvidas em um sistema real é fundamental para o desenvolvimento e validação de um controle de reconfiguração cinemática para um robô móvel.

Em (Sreenivasan & Wilcox 1994), é sugerido um controle cinemático para o *mini-rover GOFOR*, robô *Wheel-legged* de 4 pernas com sensores de força acoplados. A idéia é melhorar a mobilidade do sistema através da distribuição uniforme das forças

de contato.

Apesar da complexa análise de forças feitas em (Sreenivasan & Wilcox 1994), o trabalho é considerado por (Iagnemma & Dubowsky 2004, Grand et al. 2004) pouco relevante, devido ao fato de não ter sido validado experimentalmente em um sistema real.

Neste capítulo, apresentamos os detalhes da implementação do controle cinemático desenvolvido no Robô Ambiental Híbrido.

Algumas considerações sobre o robô são apresentadas, destacando os problemas de mobilidade do sistema. Os equipamentos do RAH utilizados para executar o controle são descritos.

Após embarcado no RAH, validamos o funcionamento do controle proposto através de testes realizados com o robô. Os testes foram realizados tanto em laboratório quanto em campo.

Uma plataforma de testes foi utilizada para emular as condições de um terreno acidentado em laboratório

Os testes em campo foram realizados na Amazônia em dezembro de 2007.

## **6.1 Problemas de Mobilidade do Robô Ambiental Híbrido**

O Robô Ambiental Híbrido é um sistema inovador, que está sendo desenvolvido para operar nas mais diversas condições encontradas na floresta amazônica.

O sistema de locomoção utilizado deve ser eficiente, permitindo ao robô se locomover sobre água, terra firme, pântanos, brejos, terrenos alagadiços e arenosos.

Apesar de cumprir os objetivos propostos, a arquitetura e mecanismos de suspensão ativa utilizados atualmente pelo modelo intermediário do RAH levam a problemas de mobilidade, relacionados à tração e estabilidade do sistema.

Novos mecanismos já foram projetados, buscando atenuar os problemas descritos a seguir. Esses mecanismos serão utilizados nos próximos protótipos do robô.

### 6.1.1 Problemas de Tração

O Robô Ambiental Híbrido não possui cabo umbilical. Toda a energia utilizada deve ser armazenada e/ou produzida pelo próprio sistema. Atualmente o robô utiliza baterias. A utilização adequada dessa fonte limitada de energia é vital para a autonomia do sistema.

Todos os equipamentos embarcados devem consumir pouca energia e possuir pouco peso. A preocupação com o peso resultante é grande, já que quanto mais peso, maior será a energia gasta para locomover o sistema, e menor será a autonomia do mesmo.

Apesar da atenção especial a esses tópicos, o RAH consome aproximadamente 1KW e pesa 150kg. Isso se deve principalmente à grande quantidade de equipamentos embarcados, necessários às tarefas realizadas pelo robô.

Cada roda é acionada por um motor DC de 150W. Devido ao elevado peso do sistema, o robô necessita das 4 rodas tracionando adequadamente para se locomover com mobilidade nos terrenos irregulares encontrados.

O RAH apresenta problemas de mobilidade ao se deparar com obstáculos ou terrenos irregulares, quando uma de suas rodas perde o contato com o solo. O mecanismo utilizado nas suspensões possui uma mola, mas não é totalmente complacente. É comum encontrar o robô suspenso apenas por três rodas, conforme apresentado nas figuras 6.1 e 6.2.



FIGURA 6.1: Roda Dianteira do Robô Ambiental Híbrido sem Contato com o Solo



FIGURA 6.2: Roda Traseira do Robô Ambiental Híbrido sem Contato com o Solo

Nesses casos, o robô se depara com uma situação em que necessita de mais tração para superar a adversidade encontrada, mas apenas três rodas estão tracionando adequadamente. Em grande parte dos testes realizados, o RAH não conseguiu superar as adversidades utilizando 75% da sua capacidade de tração.

Além das pesquisas já desenvolvidas para atuar nas rodas (Silva 2007, Santos 2007), também se faz necessário o controle cinemático das suspensões para melhorar a tração do RAH. É importante atuar na configuração do robô de maneira a manter todas as rodas em contato com o terreno, suportando cada uma o mesmo peso. Dessa maneira, quando em terreno homogêneo, todas as rodas terão a mesma capacidade de tração.

### 6.1.2 Problemas de Estabilidade

O Robô Ambiental Híbrido apresenta problemas de estabilidade, causados principalmente por sua arquitetura.

A base do robô e seu centro de massa estão afastados do solo.

A largura do polígono de sustentação do RAH é aproximadamente o dobro do seu comprimento.

Utilizando a configuração da suspensão onde os eixos das rodas paralelos ao terreno ( $h_i = 19cm$ ), o RAH tomba no sentido longitudinal ao se deparar com um ângulo de

35°, e no sentido lateral com ângulos superiores a 60°.

É fácil perceber que o risco de tombamento é grande no sentido longitudinal do robô, já que inclinações com ângulo superior a 35° são facilmente encontradas em terrenos irregulares.

De fato, tanto os modelos pequeno e médio do RAH já tombaram, o primeiro para frente, e o segundo para trás. Em ambos os casos, os equipamentos sofreram graves danos. Algumas imagens estão apresentadas nas figuras 6.3 e 6.4.

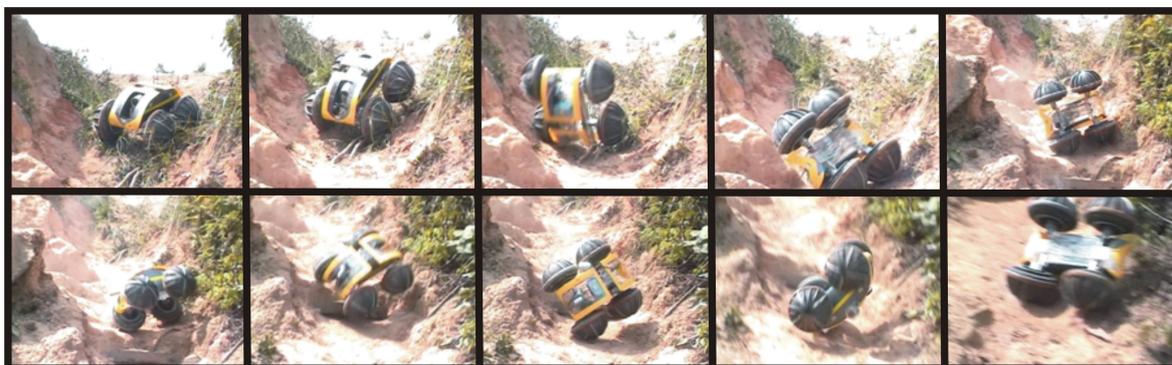


FIGURA 6.3: Capotagem do Robô Ambiental Híbrido Modelo Reduzido



FIGURA 6.4: Tombamento do Robô Ambiental Híbrido Modelo Intermediário

Os acidentes poderiam ser evitados se o controle de estabilidade desenvolvido aqui estivesse sendo utilizado.

## 6.2 Implementação do Controle no Robô Ambiental Híbrido

Iremos agora descrever a implementação do controle de reconfiguração cinemática desenvolvido no Robô Ambiental Híbrido.

Os equipamentos utilizados pelo controle são detalhados.

Os dados utilizados como realimentação do sistema são destacados, fazendo uma breve análise dos sensores necessários.

Os algoritmos embarcados no robô são apresentados.

### 6.2.1 Equipamentos do Robô Ambiental Híbrido Utilizados

O modelo intermediário pesa aproximadamente 150 kg, isto principalmente pela grande quantidade de equipamentos embarcados, visando cumprir todas as tarefas estipuladas.

Alguns desses equipamentos, utilizados no controle cinemático apresentado nesta pesquisa, são descritos em seguida.

O processamento principal é feito por um microcomputador padrão PC/104 com processador GX 500 de 500Mhz com baixo consumo (5W), 256 MB de Memória Ram, com 1 porta de Ethernet, 4 USB 2.0 , 1 RS-232 e 2 RS-485. O sistema operacional adotado é o Linux.

Os acionadores utilizados no robô são motores DC com escovas, fabricados pela Maxon Motors. Os motores das rodas são de 150W, e os das suspensões de 40 W. Eles estão acoplados a reduções planetárias (93:1 nos motores das rodas e 156:1 motores das suspensões ), e *encoders* HED5540 com 500 pontos por volta.

Cada motor é comandado por um módulo de controle EPOs, também da Maxon. Os módulos estão interconectados num barramento CAN, e se comunicam com o PC 104 através de protocolo RS-232. Cada módulo possui portas de entradas analógicas e entradas e saídas digitais, e pode comandar a corrente, velocidade ou posição de um motor.

Uma unidade inercial Xsens MTi-28A13G95 está embarcada no robô. Utilizando 3 acelerômetros, 3 giroscópios e 3 bússolas, a unidade fornece a orientação do robô, através dos ângulos de balanço, caturro e guinada, com resolução de  $0.05^\circ$ .

Quatro sensores de deslocamento são utilizados, acoplados as molas presentes nos sistemas de suspensão. Medindo o deslocamento da mola, é possível estimar a força aplicada em uma suspensão.

### 6.2.2 Dados Utilizados no Controle

A solução proposta deve ser de fácil implementação em qualquer sistema mecânico com reconfiguração ativa. Visando um controle simples e robusto, poucos dados devem ser considerados sobre o ambiente de operação. Dessa forma, são necessários menos sensores e capacidade de processamento dedicado.

Nessa pesquisa não são utilizados dados do meio externo como, por exemplo, o tipo e geometria do terreno percorrido, o local exato e o ângulo de contato com o solo. As informações mais relevantes utilizadas para o controle são dados do próprio robô.

O modelo cinemático do RAH é calculado utilizando a posição das juntas de cada perna, informadas pelos *encoders* anexados aos motores das suspensões.

O sensor inercial é empregado para de obter informações sobre a orientação do corpo do robô, fornecendo os ângulos de balanço, caturro e guinada. Já se encontram no mercado diversos tipos de sensores, de baixo custo, que fornecem esses ângulos.

O controle proposto não depende de características mecânicas do robô como um sistema flexível de suspensões, que mantenha todas as rodas sempre em contato com o terreno. A solução proposta considera situações em que uma das rodas pode perder contato com o solo, como de fato ocorre com o RAH.

Buscando detectar e solucionar tal problema, são empregados sensores de deslocamento linear acoplados às molas dos sistemas de suspensão, buscando estimar a força aplicada a cada roda e perna.

Diferentes sensores podem ser utilizados para estimar as forças de contato com o solo. *Strain Gages* podem ser instalados nas pernas do robô. No caso do RAH, o deslocamento da mola utilizada em cada suspensão pode ser medido também através

de efeito *hall*.

O objetivo principal é manter as 4 rodas do robô em contato com o solo, se possível buscando distribuição uniforme das forças de sustentação entre as rodas.

A distribuição uniforme das forças de contato entre as pernas e o solo só é alcançada utilizando sensores de força multi-eixos instalados em mecanismos com 3 DOF.

A instalação de sensores de força multi-eixos em cada roda ou perna possui custo e complexidade mecânica elevados (Iagnemma & Dubowsky 2004). Quando o sistema está se movendo, é difícil determinar as forças de contato através das medidas dos sensores de força (Grand et al. 2002).

### 6.2.3 Algoritmos Embarcados

As estratégias de reconfiguração cinemática propostas no capítulo 4 foram adaptadas e embarcadas no RAH durante o desenvolvimento desta dissertação.

O programa de controle do RAH está sendo desenvolvido utilizando a linguagem C++. Ele é executado no processador principal (PC104) do robô.

Durante a operação do robô, diversos processos são executados simultaneamente (*threads*), responsáveis pelo controle em paralelo dos diversos dispositivos embarcados.

Uma *thread* foi desenvolvida exclusivamente para executar o controle de reconfiguração cinemática proposto.

Diferentes algoritmos foram desenvolvidos, implementando as estratégias de reconfiguração cinemáticas propostas no capítulo 4.

#### 6.2.3.1 Algoritmo do Controle de Altura

1. Receber dados dos *encoders* e calcula a posição das juntas  $h_i$ ;
2. Calcular posição dos pontos de contato  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  utilizando equações 3.20 a 3.22;
3. Calcular o plano, utilizando a equação 4.4;
4. Calcular distância entre o CM do robô  $O_R$  até o plano, utilizando a equação 4.6;
5. Calcular os Jacobianos  $J_i$  referentes a  $z_R$  de acordo com a posição das juntas  $h_i$ , utilizando a equação 3.24;

6. Calcular  $v_{z_{c_i}}$ , de acordo com a equação 4.7;
7. Calcular as velocidades de comando  $u_i$ , utilizando a equação 4.2.

### 6.2.3.2 Algoritmo do Controle de Orientação

1. Receber dados dos *encoders* e calcula a posição das juntas  $h_i$ ;
2. Receber ângulos de balanço  $\phi$  e caturro  $\psi$  do sensor inercial;
3. Calcular os Jacobianos  $J_i$  referentes  $z_R$  de acordo com a posição das juntas  $h_i$ , utilizando a equação 3.24;
4. Calcular  $v_{z_{c_i}}$ , de acordo com a equação 4.8;
5. Calcular as velocidades de comando  $u_i$ , utilizando a equação 4.2.

### 6.2.3.3 Algoritmo do Controle de Tração

1. Receber dados dos *encoders* e calcula a posição das juntas  $h_i$ ;
2. Receber dados dos sensores de deslocamento e estima as forças de sustentação  $f_{s_i}$ ;
3. Calcular os Jacobianos  $J_i$  referentes a  $z_R$  de acordo com a posição das juntas  $h_i$ , utilizando a equação 3.24;
4. Calcular  $v_{z_{c_i}}$ , de acordo com a equação 4.9;
5. Calcular as velocidades de comando  $u_i$ , utilizando a equação 4.2.

### 6.2.3.4 Algoritmo do Controle de Estabilidade

1. Receber dados dos *encoders* e calcula a posição das juntas  $h_i$ ;
2. Receber ângulos de balanço  $\phi$  e caturro  $\psi$  do sensor inercial;
3. Calcular posição dos pontos de contato  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  utilizando equações 3.20 a 3.23;
4. Rotacionar os pontos de contato  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$ , de acordo com a matriz de rotação 3.3;
5. Calcular os ângulos de tombamento  $\gamma_i$ , de acordo com a equação 2.7.

6. Calcular os Jacobianos  $J_i$  referentes a  $z_R$  de acordo com a posição das juntas  $h_i$ , utilizando a equação 3.24;
7. Calcular  $v_{z_{c_i}}$ , de acordo com a equação 4.10;
8. Calcular as velocidades de comando  $u_i$ , utilizando a equação 4.2.

### 6.3 Testes Realizados com o Robô Ambiental Híbrido

Após embarcar o controle de reconfiguração cinemática no Robô Ambiental Híbrido, estamos aptos a realizar testes com o sistema, comprovando o funcionamento das estratégias propostas.

Os primeiros testes com o robô foram realizados em laboratório. O objetivo aqui é utilizar um ambiente estruturado, de maneira a facilitar a compreensão do comportamento do sistema ao se reconfigurar cinematicamente, buscando maior mobilidade.

Condições semelhantes às utilizadas nas simulações foram recriadas, permitindo a comparação dos resultados obtidos. Para recriar tais condições, uma plataforma para emulação de terrenos irregulares foi utilizada.

Os resultados dos testes realizados com o RAH são semelhantes aos obtidos com as simulações. Porém, conforme esperado, algumas diferenças são notadas.

As juntas das suspensões possuem atuação lenta, levando no mínimo 13 segundos para percorrer todo seu curso, de maneira que  $\|\dot{h}_{Max} = 0.96cm/s\|$ . Dessa maneira, o robô só irá conseguir se reconfigurar a tempo, de maneira adequada a cada terreno percorrido, quando sua velocidade de translação for reduzida.

A estrutura mecânica do RAH apresenta atritos internos, que tendem a piorar com impactos sofridos durante os testes em campo. As pernas estão em contato lateral contínuo com nylon fixado na carroceria do robô. O nylon serve como interface entre os alumínio das suspensões e carroceria e também como guia de movimentação, evitando a torção das pernas.

O atrito gerado por tal mecanismo é grande, praticamente inviabilizando a utilização dos sensores de deslocamento acoplados as molas das suspensões. As forças de atrito entre uma perna e nylon interferem no deslocamento da mola do sistema

de suspensão. Apenas em situações críticas, como uma roda sem contato com o solo, podemos nos basear nestes sensores.

Durante a reconfiguração cinemática, os pontos de contato entre robô e terreno mudam de posição. Devido ao atrito com o terreno, o deslocamento dos pontos pode ocorrer de maneira abrupta.

O modelo cinemático utilizado considera as rodas sendo esferas perfeitas. Esse não é o caso das rodas atuais do robô, constituídas de aro e pneu de bicicleta acopladas a duas semi-esferas de fibra de vidro. A diferença entre as superfícies da fibra e do pneu adiciona uma descontinuidade no perfil da roda.

As rodas possuem aletas, também confeccionadas em fibra de vidro, utilizadas para a propulsão na água. Nos demais locais de operação do RAH, como brejos, areia, e terra, as aletas penetram no terreno, o que permite considerar que a superfície da roda possui perfil esférico.

Porém, em solos duros como madeira e asfalto, as aletas não penetram no terreno, o que altera o perfil das rodas.

O mecanismo de cinco barras utilizado nas suspensões consegue compensar ângulos máximos de  $9.82^\circ$  no sentido longitudinal e  $4.66^\circ$  no sentido lateral. Os testes realizados em laboratório utilizam inclinações suaves, o que aumenta o efeito das incertezas do sistema real nos resultados obtidos com o RAH.

O controle principal do RAH não possui garantia de tempo real. A comunicação entre o PC104 e os *drivers* Epos de controle de motor é feita com protocolo RS232, que não permite altas taxas de troca de dados.

A comunicação entre os equipamentos não é feita de maneira otimizada, o que resulta num período médio superior a 1 segundo, gasto para amostrar todos os dados de realimentação do controle cinemático.

Com isso, ao compensar ângulos pequenos, o sistema pode não responder rápido o suficiente, com a orientação do corpo do robô podendo apresentar picos de baixa magnitude.

Devido à configuração atual do RAH e implementação do controle proposto, as diferentes estratégias propostas se diferenciam em relação às variáveis de realimentação utilizadas.

O controle de altura utiliza a variável de realimentação  $D$ , calculada utilizando a

posição estimada dos pontos de contato  $P_i$ .

O controle de estabilidade utiliza os ângulos de tombamento  $\gamma_i$ , calculados utilizando a posição estimada dos pontos de contato  $P_i$ .

As incertezas do modelo real geram erros nas posições estimadas. A utilização de pontos de contato errados pelo controle cinemático pode levar a uma configuração equivocada do robô, conforme descrito nos testes realizados em campo, na água (seção 6.3.2.2).

Os dados obtidos com os sensores de deslocamento, utilizados para estimar as forças de sustentação  $f_{s_i}$  aplicadas nas pernas do RAH, são influenciados pelos atritos internos do mecanismo, prejudicando o desempenho do controle de tração.

O controle de orientação utiliza como realimentação os ângulos de balanço  $\phi$  e caturro  $\psi$  do robô, fornecidos pelo sensor inercial embarcado. Tal sensor é preciso, com resolução de  $0.05^\circ$ .

O controle de orientação é robusto às não idealidades do modelo utilizado. Mesmo com as diferenças de perfil da roda e atritos internos do robô, o controle de orientação atuará no sistema buscando atenuar os ângulos de  $\phi, \psi$  medidos pelo sensor inercial.

Nos testes em campo apresentados com o Robô Ambiental Híbrido, utilizamos apenas o controle de orientação desenvolvido. Tal estratégia alcança melhores resultados, por utilizar variáveis de realimentação de melhor qualidade.

Tais experimentos foram realizados em dezembro de 2007, em diferentes localidades situadas nas margens do rio Solimões, na Amazônia. O controle proposto foi testado em diferentes terrenos, incluindo solo com presença de obstáculo, água e um banco de areia com ondulações.

### 6.3.1 Testes em Laboratório

Os terrenos irregulares percorridos pelo RAH são ambientes não estruturados. As inclinações encontradas podem apresentar diferentes valores, incluindo condições extremas de operação.

A realização de testes em campo com condições pré-determinadas é pouco viável. Até mesmo a replicação de testes em condições idênticas é uma tarefa complexa, já que

o perfil do terreno pode sofrer alterações mesmo para pequenas variações no trajeto do robô.

Algumas pesquisas, como (Grand et al. 2002, Grand et al. 2004, Bartlett, Wettergreen & Whittaker 2008), utilizam pistas construídas com diferentes inclinações (figuras 6.5 e 6.6) para simular um terreno acidentado.



FIGURA 6.5: Pista Utilizada para Testes com o Robô *Hylos*



FIGURA 6.6: Pista Utilizada para Testes com o Robô Ambiental Híbrido *Scarab*

Os robôs percorrem a pista com perfil conhecido, e os critérios de mobilidade do sistema são monitorados durante o deslocamento. Neste ambiente estruturado, é fácil analisar o desempenho da reconfiguração cinemática.

O Robô Ambiental Híbrido pesa 150kg e possui aproximadamente 1,33m de comprimento e 1,98m de largura.

Qualquer aparato sobre o qual o RAH venha a se locomover deve possuir rigidez estrutural, suportando o peso do robô durante seu deslocamento e as forças de atrito geradas durante a reconfiguração cinemática. As inclinações da pista não podem sofrer alterações, caracterizando assim um meio estruturado.

Os testes realizados em laboratório com o RAH consideram diferentes condições de terrenos. Devido às grandes dimensões do robô, seria necessária a construção de uma

pista bastante extensa, apresentando os diversos perfis de terrenos a serem estudados.

A implementação de tal dispositivo é impraticável, levando em conta as limitações de espaço físico do Laboratório de Robótica do Cenpes.

Solucionando essas questões, uma plataforma para a emulação de terrenos irregulares foi utilizada.

A idéia consiste em utilizar uma plataforma composta por 4 módulos móveis, posicionados sob as rodas do robô. Cada módulo possui altura variável, comandada de maneira ativa.

O robô é posicionado sobre a plataforma, na qual permanece durante a reconfiguração cinemática. Suas rodas não giram durante todo o teste. As alturas dos módulos são alteradas individualmente, recriando assim as condições encontradas pelo robô ao percorrer um terreno acidentado.

Empregando a plataforma, podemos recriar diferentes inclinações laterais e longitudinais, modificando a orientação do robô de maneira semelhante a um terreno acidentado. Podemos emular uma depressão ou obstáculo que tenha ação localizada em apenas uma roda. Acoplando motores a cada módulo móvel, podemos recriar também terrenos com inclinações variáveis.

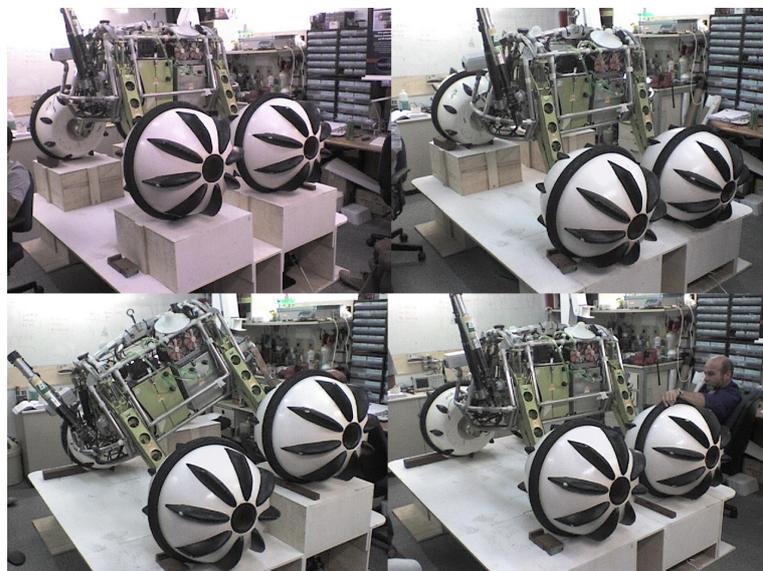


FIGURA 6.7: Plataforma para Emulação de Terrenos Irregulares

Utilizando a plataforma para emulação de terrenos irregulares, foram realizados testes em laboratório do controle de reconfiguração cinemática proposto, implementado

no Robô Ambiental Híbrido.

O deslocamento dos pontos de contato pode ocorrer de maneira não suave. Este comportamento fica evidente nas primeiras simulações realizadas com a plataforma de testes. O atrito entre madeira e roda emborrachada é grande, e muitas vezes os pontos de contato se deslocam de maneira abrupta, o que gera reflexos na orientação do robô.

Nos testes apresentados em seguida, foram utilizadas folhas de papelão entre as rodas e a pista, diminuindo o atrito entre as superfícies.

As aletas não penetram na madeira da pista de testes, alterando o perfil circular das rodas do robô. Essa alteração induz a erros no modelo do sistema utilizado.

As condições emuladas com a plataforma são semelhantes aos terrenos utilizados nas simulações (seção 5.2.3). Os testes utilizam inclinações suaves, o que aumenta o efeito das imperfeições do sistema real nos resultados obtidos com o RAH.

O controle de orientação (equação 4.8) foi utilizado nos testes realizados com o RAH, com exceção do experimento descrito na seção 6.3.1.5. Os ganhos empregados, tanto nos testes em laboratório quanto em campo, foram:

- $K_a = 0$ ,  $K_{o_b} = 25$ ,  $K_{o_c} = 25$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0$ .

Apesar das imperfeições, os resultados obtidos com o sistema real em laboratório são semelhantes às simulações, mantendo a base do robô paralela à horizontal com a configuração cinemática alcançada.

### 6.3.1.1 Terreno com Inclinação Longitudinal Constante

Os primeiros testes consideram o terreno representado por inclinação longitudinal, provocando inclinação no corpo do robô de  $\psi = -2.5^\circ$ .

A média do período de amostragem dos dados utilizados pelo robô é de 1.1622s.

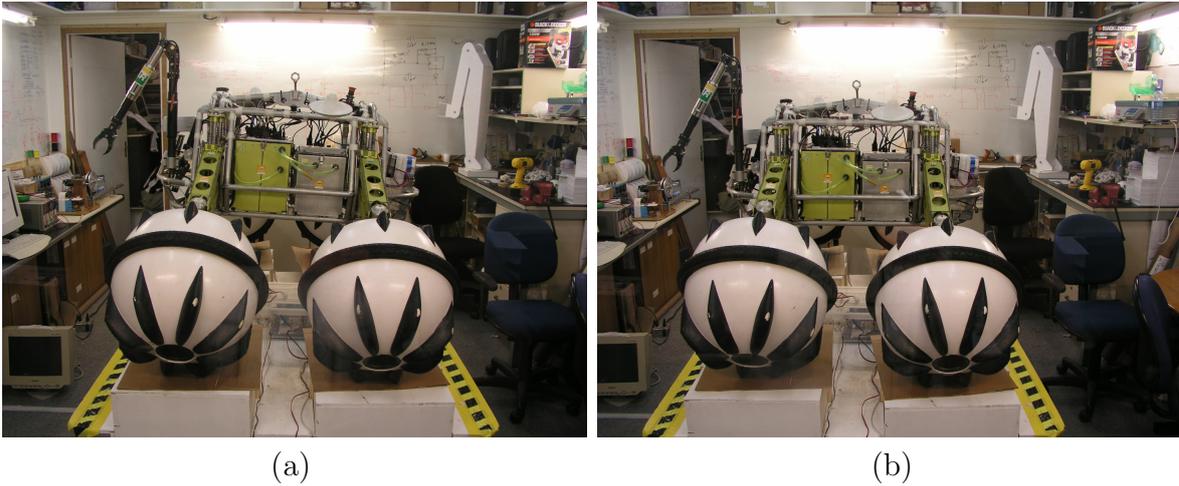


FIGURA 6.8: Configuração do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.

A figura 6.9 apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando o controle de orientação.

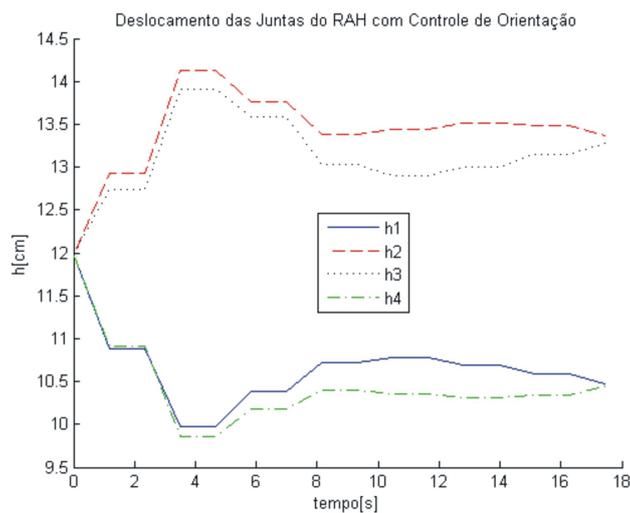


FIGURA 6.9: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final onde a base do robô está paralela à horizontal (figura 6.10), de maneira que  $\psi \rightarrow 0^\circ$ . O pico referente ao caturro apresentado na figura ( $t = 3s$ ) é causado pelo deslocamento abrupto dos pontos de contato.

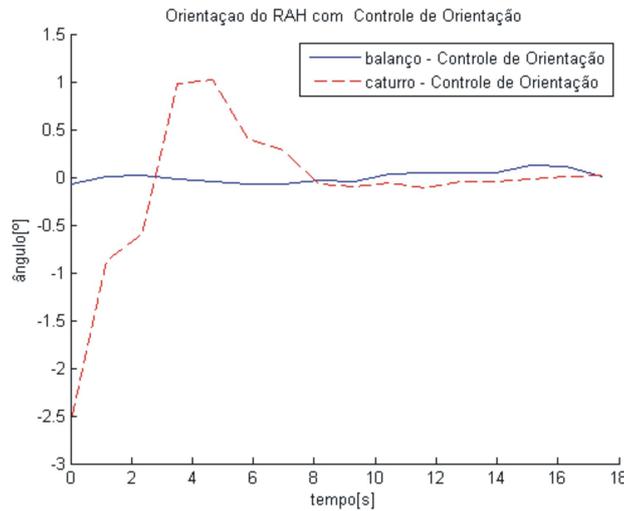


FIGURA 6.10: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação

O gradiente da margem de estabilidade inicial do robô é de  $35.95^\circ$ . A estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação, atingindo um valor  $\beta \rightarrow 37.21^\circ$  (figura 6.11). Semelhante às simulações, o sistema atingiu uma configuração 3.5% mais estável.

Podemos observar que os ângulos de tombamento laterais ( $\gamma_1, \gamma_3$ ) possuem valores muito superiores que os ângulos longitudinais ( $\gamma_2, \gamma_4$ ). Esse comportamento é causado pela arquitetura do robô, cuja largura do polígono de sustentação é o dobro do comprimento.

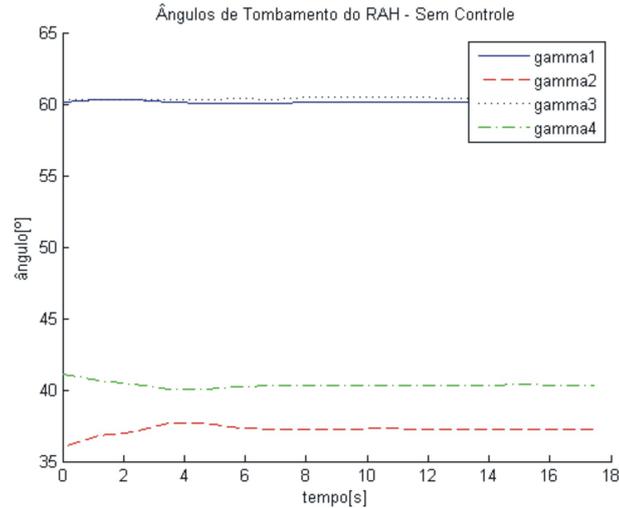


FIGURA 6.11: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Longitudinal Constante Utilizando Controle de Orientação

### 6.3.1.2 Terreno com Inclinação Lateral Constante

Consideramos agora o terreno representado por inclinação lateral, tal que o balanço do robô  $\phi = 0.75^\circ$ .

A média do período de amostragem dos dados utilizados pelo robô é de 1.1232s.

A figura 6.12 apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática.

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final onde a orientação da base do robô oscila paralela à horizontal (figura 6.26). Essa oscilação é causada pelas características físicas do sistema descritas previamente.

O controle de orientação utilizado aproxima os ângulos de tombamento  $\gamma_1, \gamma_3$ , de maneira que  $\gamma_1 - \gamma_3 \rightarrow 15^\circ$  (figura 6.14). O valor reduzido é gerado pela pequena inclinação do terreno, de  $\phi = 0.75^\circ$ .

Porém, o ângulo de tombamento mínimo é  $\beta = \gamma_2$ , com valores oscilando em torno de  $38.25^\circ$ , e corresponde ao gradiente da margem de estabilidade do robô. O controle de orientação utilizado não provoca nenhuma melhoria na estabilidade do sistema

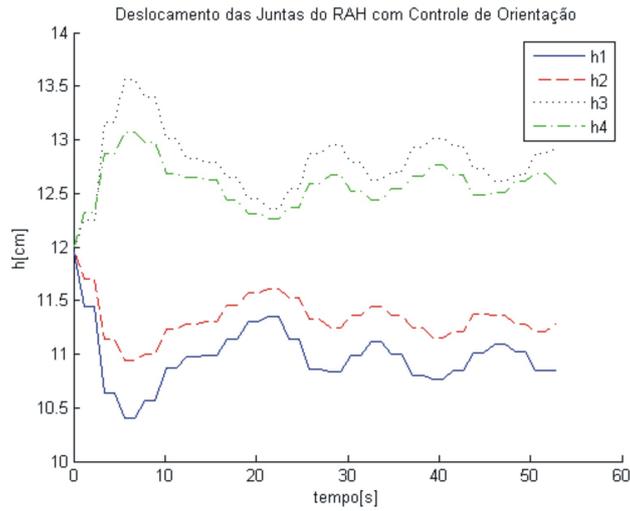


FIGURA 6.12: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação

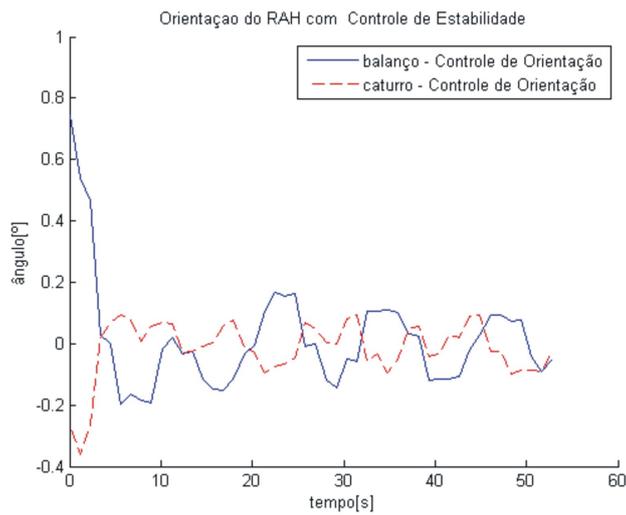


FIGURA 6.13: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação

### 6.3.1.3 Terreno com Inclinações Longitudinal e Lateral Constantes

O terreno será representado por inclinações lateral e longitudinal, de maneira que  $\phi = -3^\circ$  e  $\psi = 0.45^\circ$ .

A média do período de amostragem dos dados utilizados pelo robô é de 1.1994s.

A figura 6.15 apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática.

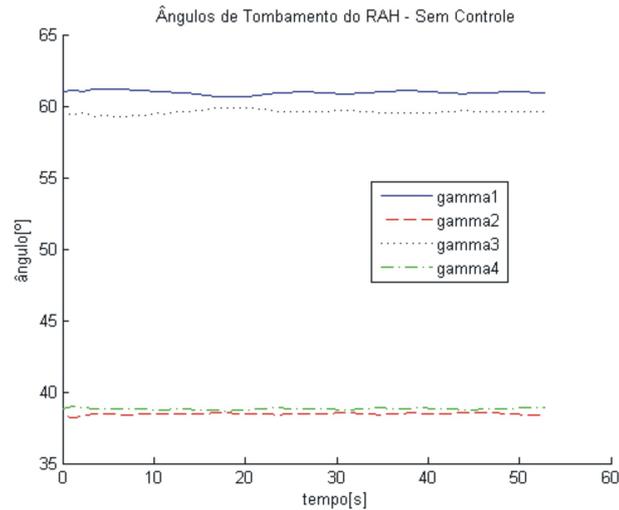


FIGURA 6.14: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinação Lateral Constante Utilizando Controle de Orientação

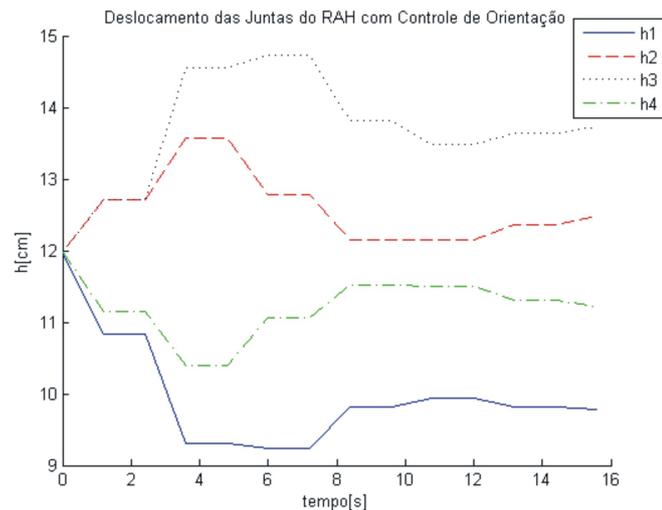


FIGURA 6.15: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Controle de Orientação

Utilizando o controle de orientação, obtemos uma configuração final onde a base do robô está paralela à horizontal (figura 6.16), com  $\phi, \psi \rightarrow 0^\circ$ . Mais uma vez, observamos um pico ( $t = 3s$ ) na orientação do robô de aproximadamente  $1^\circ$ .

O gradiente da margem de estabilidade inicial do robô é de  $35.45^\circ$ . Assim como nas simulações, utilizando o controle de orientação, o gradiente alcançado é de  $\beta \rightarrow 37.47^\circ$ , o que corresponde a uma melhoria de 2.88% na estabilidade do sistema.

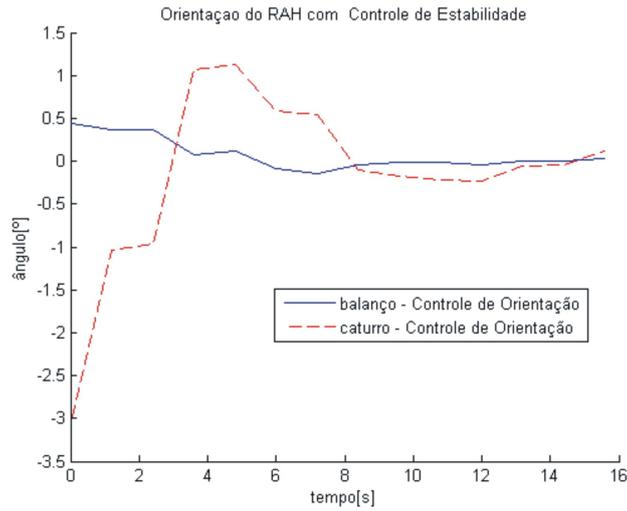


FIGURA 6.16: Orientação do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes

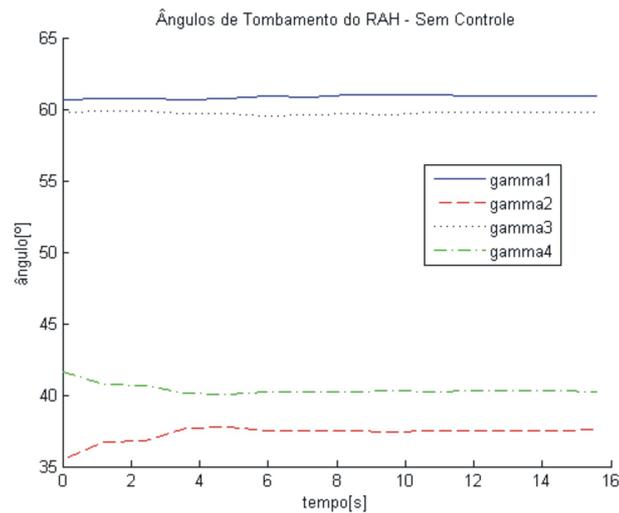


FIGURA 6.17: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Constantes Utilizando Controle de Orientação

#### 6.3.1.4 Terreno com Inclinações Variáveis

Iremos considerar agora o robô se locomovendo em um terreno acidentado. Para tal, os motores acoplados aos módulos da pista de testes recebem comando de velocidade, simulando a alteração do terreno.

Assim como nas simulações, os módulos emulam três situações distintas.

Num primeiro instante ( $t \in [30, 130]s$ ), os módulos provocam movimento de uma

onda senoidal na orientação do corpo do robô, no sentido longitudinal, com amplitude de  $5.35^\circ$  e período de 120s.

Em seguida ( $t \in [130, 250]s$ ), os módulos criam outro movimento de onda senoidal no sentido lateral do sistema, com amplitude de  $2.26^\circ$  e período de 120s, refletindo no balanço do robô.

Por último ( $t \in [250, 380]s$ ), ondas senoidais lateral e longitudinal defasadas são aplicadas em ambos os sentidos do robô.

A média do período de amostragem dos dados utilizados pelo robô é de 0.9727s.

A orientação do robô ao percorrer o terreno simulado, na configuração inicial adotada, sem nenhum controle cinemático, é apresentada na figura 6.18.

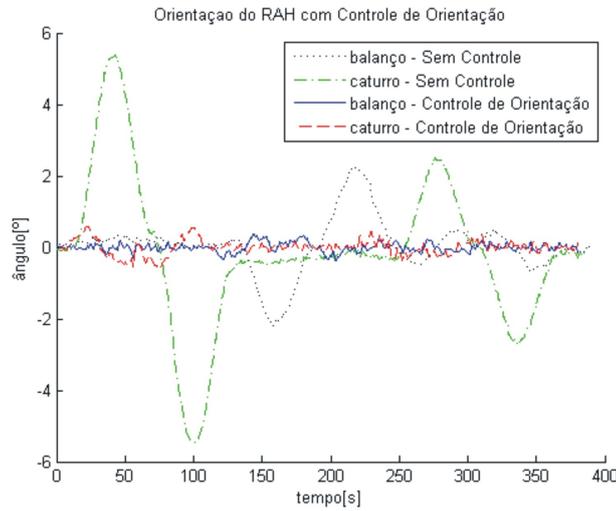


FIGURA 6.18: Orientação do Robô Ambiental Híbrido com Controle de Orientação em Terreno com Inclinações Variáveis

A figura 6.19 apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática.

Podemos observar que, utilizando o controle de orientação, as juntas realizam movimentos senoidais, de acordo com o terreno percorrido.

Com o controle de orientação, o corpo do robô busca permanecer paralelo à horizontal, com ângulos  $\|\phi_{\max}\| = 0.38^\circ$ ,  $\|\psi_{\max}\| = 0.56^\circ$  (figura 6.18).

Considerando o gradiente da margem de estabilidade  $\beta$ , verificamos que a estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação. Sem controle, o gradiente da margem de estabilidade apresenta valores mínimos de  $\beta_{\min} = 33.05^\circ$  (figura 6.20(a),

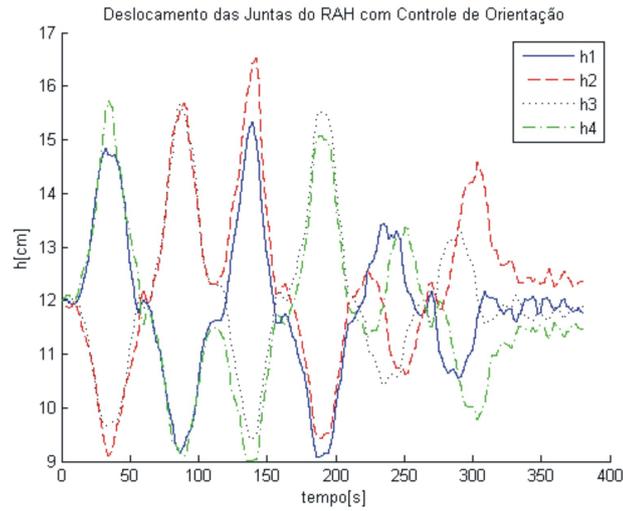


FIGURA 6.19: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis Utilizando Controle de Orientação

$t = 82.5s$ ).

Nesse mesmo instante, o gradiente da margem de estabilidade do sistema utilizando o controle de orientação é de  $\beta_{\min} = 35.55^\circ$  (figura 6.20(b)), o que corresponde a uma melhoria de 7.56% na estabilidade do robô.

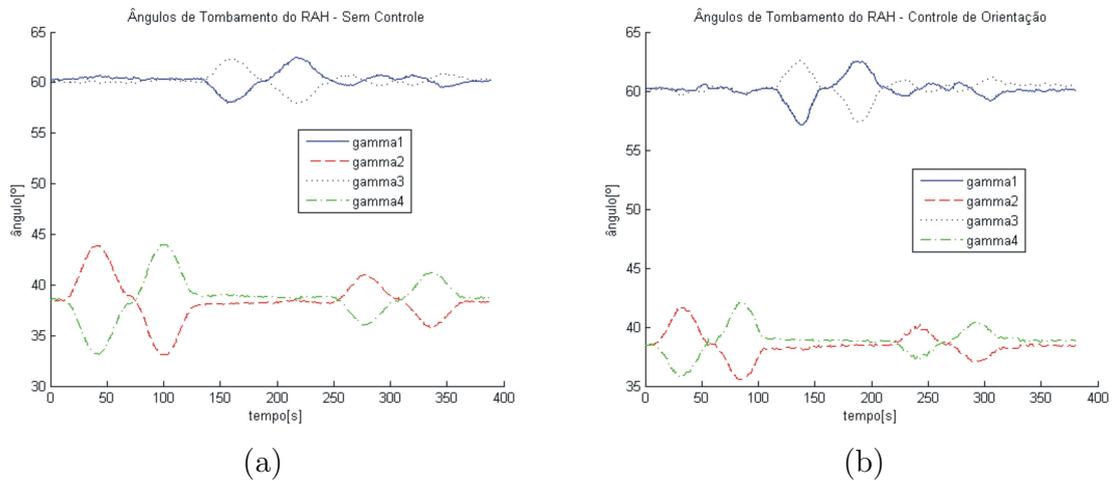


FIGURA 6.20: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido em Terreno com Inclinações Variáveis: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.

### 6.3.1.5 Terreno Plano com Depressão

O controle de tração apresentado na seção 4.3.3 desta dissertação não foi simulado para o caso tridimensional.

O enfoque utilizado para calcular a distribuição de forças de sustentação  $f_{s_i}$  aplicadas nas 4 pernas do robô resulta em um sistema de equações indeterminado, com mais incógnitas que equações.

O RAH possui sensores com os quais é possível estimar as forças de sustentação  $f_{s_i}$ . Porém, os mecanismos de suspensão utilizados possuem atrito interno, alterando os dados medidos por tais sensores.

Assim, testamos o controle de tração proposto utilizando uma situação extrema, onde uma das rodas do robô perde o contato com o solo.

Utilizamos a pista de simulação de terrenos irregulares para reproduzir uma depressão. A altura de um módulo é reduzida, até umas das rodas (no caso  $P_1$ ) perder o contato com o terreno.

Na figura 6.21(a), podemos ver o RAH posicionado sobre a depressão.



FIGURA 6.21: Robô Ambiental Híbrido em Terreno Plano com Depressão: (a) Sem Controle; (b) Controle de Tração.

A figura 6.22 apresenta os deslocamentos das juntas, durante a reconfiguração cinemática, utilizando o controle de tração (equação 4.9). Todas as juntas terminam o teste saturadas, em posições limite.

A média do período de amostragem dos dados utilizados pelo robô é de 0.9875s.

Os ganhos utilizados foram:

- $K_a = 0$ ,  $K_{o_b} = 0$ ,  $K_{o_c} = 0$ ,  $K_t = 0$ ,  $K_{e_b} = 0$ ,  $K_{e_c} = 0.5$ .

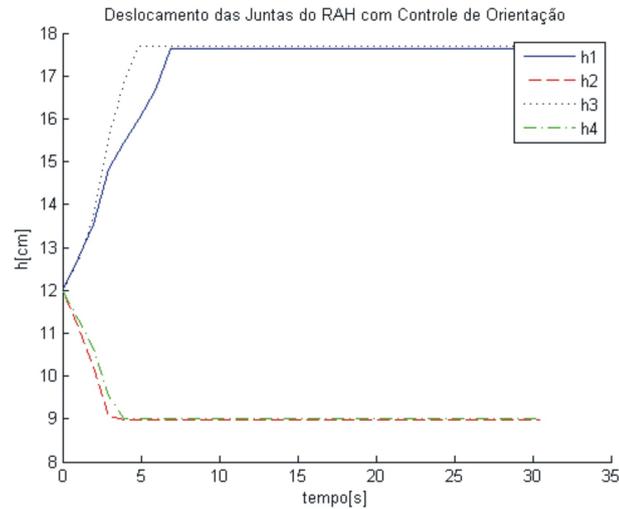


FIGURA 6.22: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido com Controle de Tração

O controle de tração recebe os dados dos sensores de deslocamento, acoplados às molas das suspensões, e através da reconfiguração cinemática, busca igualar as forças de sustentação  $f_s$  estimadas.

A figura 6.23 mostra que com a reconfiguração cinemática executada, os deslocamentos dos sensores utilizados tendem para um valor médio.

A configuração apresentada na figura 6.21(b) é alcançada utilizando o controle de tração. Todas as rodas estão em contato com o terreno.

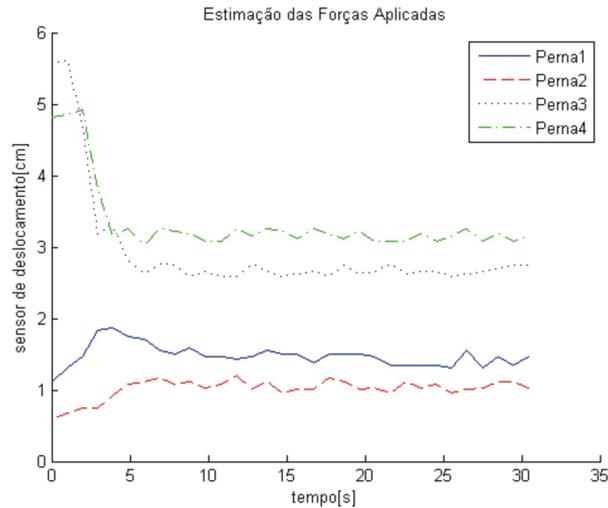


FIGURA 6.23: Sensores de Deslocamento do Robô Ambiental Híbrido Durante Controle de Tração

### 6.3.2 Testes em Campo

Na seção anterior foram apresentados resultados obtidos com o Robô Ambiental Híbrido, utilizando o controle de reconfiguração cinemática proposto, ao se adaptar a um terreno acidentado.

As condições do terreno foram recriadas utilizando uma plataforma composta por módulos com altura variável, empregada para comprovar as estratégias propostas.

O robô permaneceu parado durante os testes. As alturas de cada módulo foram comandadas de maneira a recriar configurações específicas de terreno. Dessa forma, os testes em laboratório foram realizados num ambiente estruturado, onde todas as condições são controladas.

Porém, essas não serão as condições reais de operação do RAH. O robô realizará o monitoramento ambiental da região Amazônica, se locomovendo nos mais variados terrenos, como água com vegetação flutuante, brejo, terra com vegetação, areia, entre outros. São muitos os fatores externos que poderão influencia o comportamento do sistema, caracterizando um ambiente não estruturado.

Buscando analisar o desempenho do RAH em seu local de operação, o robô foi levado para a Amazônia em dezembro de 2007. Nesse período, uma série de testes ao longo do rio Solimões foi realizada com o sistema, incluindo ensaios do controle de

reconfiguração cinemática desenvolvido.

Apresentaremos nos próximos tópicos alguns testes do RAH utilizando o controle desenvolvido, em condições distintas.

No primeiro ensaio, o robô está parado com uma de suas rodas posicionada sobre um tronco de árvore. O segundo teste apresentado foi realizado com o RAH se locomovendo na água. Por último, demonstramos o comportamento do sistema ao se locomover em um banco de areia com ondulações.

### 6.3.2.1 Obstáculo no Terreno

O primeiro teste em campo com o RAH utilizando reconfiguração cinemática apresentado foi realizado com o robô parado, com a terceira roda ( $P_3$ ) posicionada sobre um tronco de árvore.

Esse teste é o mais semelhante aos realizados em laboratório. Como o sistema está parado, as condições do terreno permanecem constantes. O controle cinemático desenvolvido funciona de maneira satisfatória.

O obstáculo provoca inclinações  $\psi = 5.45^\circ$ ,  $\phi = -0.55^\circ$  no corpo do robô, conforme explicitado na figura 6.26. Com todas as juntas na mesma posição  $h_i = 14.8cm$ , o gradiente da margem de estabilidade do sistema é de  $\beta(0) = 30^\circ$  (figura 6.27).

Considerando essa configuração inicial, habilitamos o controle de orientação. O deslocamento das juntas obtido com o controle é apresentado na figura 6.24.

Cada uma das pernas é comandada buscando manter a base do robô paralela à horizontal. A configuração final do sistema pode ser verificada na figura 6.25.

O controle de orientação diminui a distância entre os pontos de contato  $P_2, P_3$  (referente ao eixo  $z_R$ ) e a base do robô. O comportamento contrário é verificado com os pontos  $P_1, P_4$ .

A junta acoplada a perna 3, posicionada sobre o tronco de árvore, atinge posição limite, proporcionando distância mínima entre  $P_3$  e base do robô, em relação ao eixo  $z_R$

Dessa forma, foi obtida uma configuração final onde a base do robô está paralela à horizontal, com  $\psi, \phi \rightarrow 0$  conforme mostrado na figura 6.26.

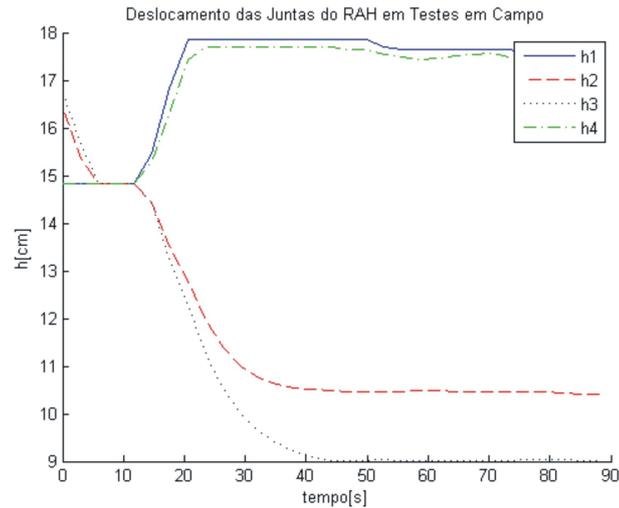


FIGURA 6.24: Deslocamento das Juntas do RAH ao se Deparar com um Obstáculo na Terra



FIGURA 6.25: Configuração do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno

A estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação, com o gradiente da margem de estabilidade partindo de  $30^\circ$  e alcançando um valor final  $\beta \rightarrow 34.65^\circ$  com a reconfiguração cinemática.

Durante a reconfiguração cinemática, a altura do robô em relação ao solo diminuiu, provocando aumento de todos os ângulos de tombamento  $\gamma_i$ , contribuindo também na estabilidade do sistema.

A reconfiguração alcançou uma melhoria de 15.5% na estabilidade do sistema.

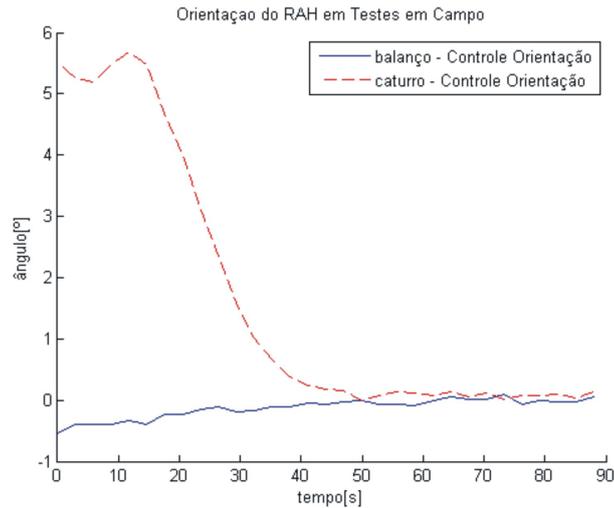


FIGURA 6.26: Orientação do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno

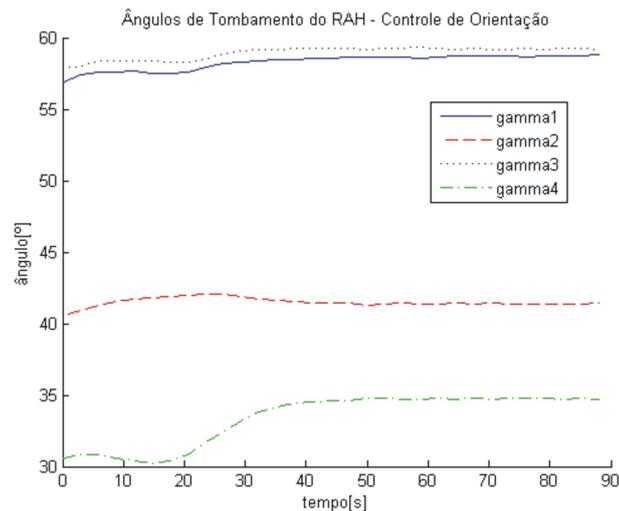


FIGURA 6.27: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido ao se Deparar com um Obstáculo no Terreno

### 6.3.2.2 Locomoção na Água

O Robô Ambiental Híbrido realiza na água grande parte das tarefas relacionadas ao monitoramento da região Amazônica. Dois dos principais equipamentos embarcados no sistema são destinados a atividades neste meio.

Uma sonda multi-parâmetros é utilizada para checar as características da água em pontos específicos do rio Solimões e entorno, criando uma base de dados disponível

para centros de excelência e universidades. O objetivo é levantar as condições da água do rio antes e depois da construção do gasoduto Coari- Manaus, permitindo a análise do impacto ambiental causado.

Atualmente, pesquisadores realizam coletas de amostras de larvas de mosquitos, incluindo os transmissores da febre amarela, malária, dengue e leishmaniose. Esses profissionais estão expostos a possíveis áreas de risco, podendo ser infectados por tais doenças. Evitando tal situação, um coletor de larvas foi desenvolvido e embarcado no robô.

A capacidade de se locomover tanto na água quanto na terra é uma das principais características do RAH. Os terrenos apresentam propriedades muito distintas, o que exige um sistema de locomoção eficiente.

A determinação da velocidade de deslocamento do robô utilizando a rotação das rodas é imprecisa, devido ao escorregamento das mesmas. Esse problema é agravado na água, onde as rodas estão deslizando continuamente. Ventos e correntezas influem na velocidade do robô.

Na água, não existem pontos, e sim superfícies de contato entre roda e terreno. Essa característica impede a estimação do terreno utilizando os pontos de contato referentes a cada roda.

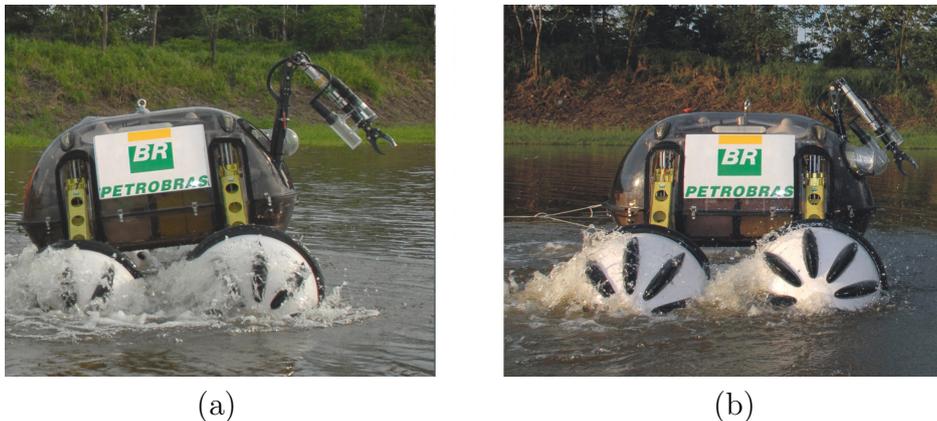


FIGURA 6.28: Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação

Ao se locomover com velocidade máxima positiva (eixo  $x_R$ ) na água, o corpo do RAH apresenta inclinação constante, com  $\psi \approx -6^\circ$ , conforme observado nas figuras 6.29 e 6.28(a).

O controle de estabilidade apresentado na seção 4.3.4 utiliza a posição dos pontos de contato estimados. Se tal algoritmo for utilizado na água com o robô em movimento, o sistema perceberá o terreno como uma rampa inclinada, e buscará uma configuração na qual o robô assuma inclinação oposta à superfície virtual.

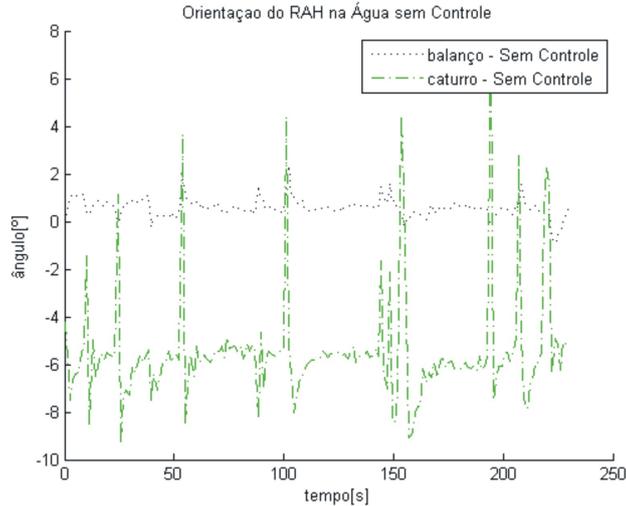


FIGURA 6.29: Orientação do Robô Ambiental Híbrido Não Controlado se Locomovendo na Água

O robô se locomoveria na água com  $\psi > 0$ , configuração na qual a estabilidade do sistema não é maximizada. O problema seria agravado quando o sistema sofre desaceleração, inclinando o robô ainda mais para frente.

Esse é um dos principais motivos para a utilização do controle de orientação nos testes em campo.

As acelerações e desacelerações do robô na água provocam picos (negativo e positivo, respectivamente) na inclinação longitudinal do corpo do robô. A figura 6.30 apresenta inclinações causadas por uma seqüência de movimentos de deslocamento na água, com aceleração e desaceleração abruptas. Cinco repetições foram realizadas, entre os instantes:

- $M_1$ :  $t \in [108, 143]s$ ;
- $M_2$ :  $t \in [180, 251]s$ ;
- $M_3$ :  $t \in [383, 425]s$ ;

- $M_4$ :  $t \in [467, 531]s$ ;
- $M_5$ :  $t \in [730, 825]s$ .

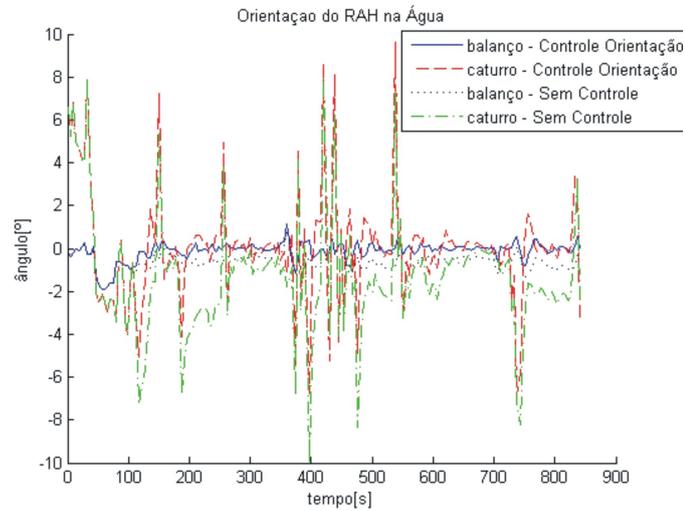


FIGURA 6.30: Orientação do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água Utilizando Controle de Orientação

A seqüência de movimentos fica mais evidente na atuação das juntas, exibida na figura 6.31.

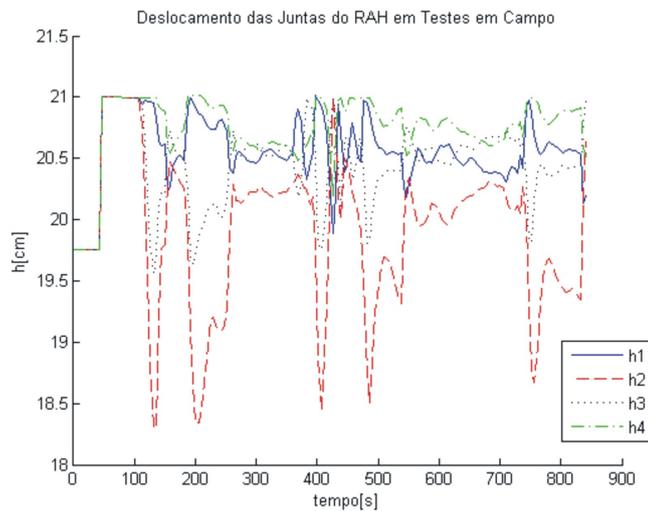


FIGURA 6.31: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água

Utilizando o controle de orientação, o robô busca manter sua base paralela à horizontal. Como a atuação nas juntas é lenta, o robô não consegue evitar os picos causados

pela aceleração e desaceleração do sistema (figura 6.30).

Quando em velocidade constante, a reconfiguração cinemática consegue manter a base do robô paralela à horizontal, compensando ângulos  $\|\Delta_{\max}\psi\| = 3.81^\circ$  e  $\|\Delta_{\max}\phi\| = 0.69^\circ$  em  $t \in M_2$ .

Neste mesmo intervalo, o gradiente da margem de estabilidade sem o controle cinemático é de  $\beta = 31.2^\circ$ ,  $t = 210s$  (figura 6.32(a)). O valor chega a  $\beta = 34.71^\circ$ ,  $t = 210s$  (figura 6.32(b)) utilizando o controle de orientação, correspondente a uma melhoria de 11.25% na estabilidade do sistema neste instante.

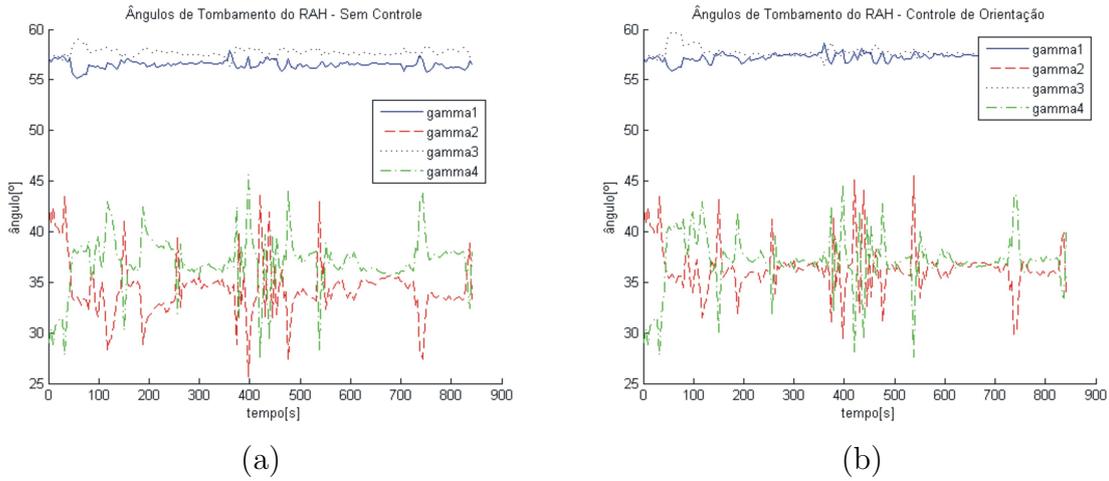


FIGURA 6.32: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido se Locomovendo na Água: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.

Uma das considerações feitas nesta pesquisa é que o controle de orientação possui funcionamento semelhante ao controle de tração, devido à arquitetura simplificada do robô. Essa correlação é destacada durante a locomoção na água.

Sem a reconfiguração cinemática, o robô permanece inclinado durante a locomoção na água (figura 6.28(a)).

Como estão suportando mais carga, o volume das rodas traseiras ( $P_2, P_3$ ) submerso é maior que a das rodas dianteiras ( $P_1, P_4$ ), prejudicando o empuxo gerado pelo RAH. Utilizando uma configuração cinemática constante ( $h_i = 19cm$ ), a velocidade máxima de deslocamento na água alcançado foi de 0.7m/s.

Utilizando o controle de orientação, o corpo do robô permanece paralelo à horizontal, distribuindo seu peso entre as pernas de maneira uniforme. Na água, tal configuração, que otimiza o critério de tração adotado, repercute diretamente na velocidade

de deslocamento do sistema.

As rodas possuem mesma capacidade de tração, possibilitando o robô se locomover a 0.9m/s na água, o que equivale a um aumento de 28.57% da velocidade máxima atingida.

### 6.3.2.3 Locomoção em Banco de Areia com Ondulações

No teste com o RAH na Amazônia utilizando o controle cinemático desenvolvido foi realizado sobre um banco de areia formado no meio do rio Solimões.

Na borda do banco foi encontrada uma longa extensão de areia apresentando ondulações. O trecho percorrido pelo robô era formado por 9 montes de areia intercalados, semelhante a uma função senoidal.

Os montes possuem inclinação com amplitude máxima de  $6^\circ$ , com distância entre picos de aproximadamente 10m. Poças de água se formaram nas depressões entre cada monte. O cenário é apresentado na figura 6.33.



FIGURA 6.33: Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado

A velocidade de deslocamento utilizada foi aproximadamente 0.5m/s. As pernas estão todas localizadas no subespaço de trabalho 1 (figura 3.8), permitindo cancelar ângulos máximos  $\|\Delta_{\max}\phi\| = 2.33^\circ$  e  $\|\Delta_{\max}\psi\| = 4.82^\circ$ .

Durante o deslocamento do robô ao longo do terreno, todas as juntas alcançam posições limites ao longo da reconfiguração cinemática, conforme apresentado na figura 6.34.

Mesmo em baixa velocidade, o robô não consegue anular as inclinações do terreno, conforme mostrado na figura 6.35.

Podemos observar atenuações no caturro  $\psi$  do robô na figura 6.35, nos instantes  $t = 61, 94.2, 177.6, [195, 210]s$ . A maior compensação nesse sentido é de  $\|\Delta_{\max}\psi\| =$

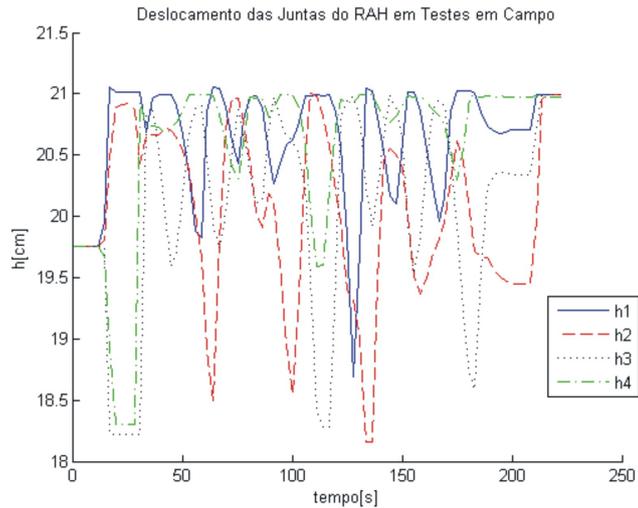


FIGURA 6.34: Deslocamento das Juntas do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado

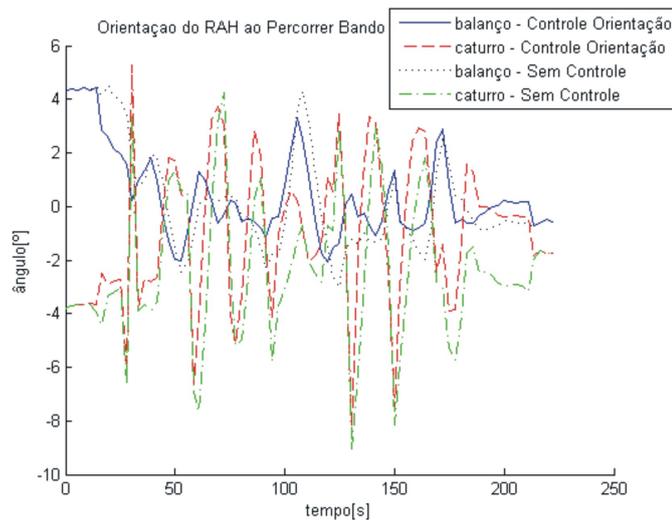


FIGURA 6.35: Orientação do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado

$3.54^\circ, t = 61s$ .

No balanço  $\phi$  do robô é atenuado nos instantes  $t \in [16, 28], 108.2, [195, 210]s$ , atingindo atenuação máxima de  $\|\Delta_{\max}\phi\| = 1.91^\circ, t = 27.6s$ .

A estabilidade do sistema melhorou com o controle de orientação em alguns trechos do terreno. Entre os instantes  $t = [195, 210]s$ , o gradiente da margem de estabilidade do sistema sem controle é de  $\beta \sim 32.65^\circ$  (figura 6.36(a)).

Com o controle de estabilidade, este valor sobe para  $\beta \sim 35.51^\circ$  (figura 6.36(b)), o

que significa uma melhoria de 8.76% da estabilidade do sistema neste período.

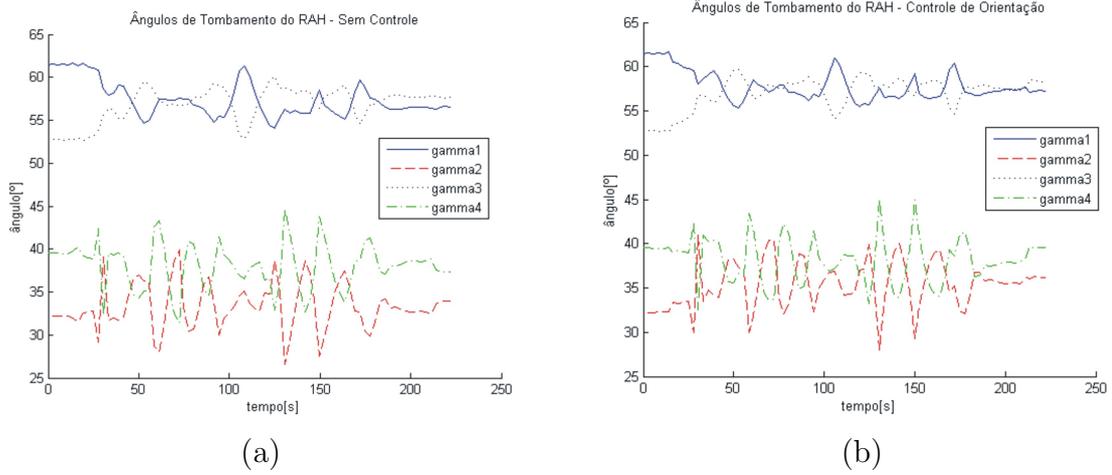


FIGURA 6.36: Ângulos de Tombamento do Robô Ambiental Híbrido ao Percorrer um Banco de Areia Ondulado: (a) Sem Controle; (b) Controle de Orientação.

Analisando em conjunto os resultados do teste realizado no banco de areia, podemos verificar o funcionamento correto do controle, e também do critério de estabilidade utilizado.

Durante a locomoção neste terreno, a orientação do robô apresenta valores de balanço  $\phi$  positivos com maior magnitude nos instantes  $t \in [0, 25], [100, 115], [165, 180]s$ .

Conforme esperado, nesses instantes, o ângulo de tombamento  $\gamma_1$  é superior a  $\gamma_3$ . Os pares laterais de juntas ( $h_1, h_2$  e  $h_2, h_4$ ) são comandados de maneira semelhante, buscando compensar a inclinação lateral.

O padrão predominante do terreno é apresentar ondulações no sentido longitudinal do robô. Nos picos positivos do caturro, verificamos que  $\gamma_2$  é superior a  $\gamma_4$ . Já nos picos negativos,  $\gamma_4$  é superior a  $\gamma_2$ .

As inclinações longitudinais mais acentuadas possuem sinal negativo. Nesses instantes, verificamos as maiores diferenças entre os ângulos de tombamento  $\gamma_4, \gamma_2$ , e os menores gradientes da margem de estabilidade do sistema, referentes a  $\gamma_2$ .

Os pares longitudinais de juntas ( $h_1, h_4$  e  $h_2, h_3$ ) são comandados de maneira semelhante, buscando compensar a inclinação longitudinal.

# Capítulo 7

## Conclusões

Esta dissertação apresentou um controle de reconfiguração cinemática, desenvolvido visando melhorar a mobilidade de um robô móvel com arquitetura *Wheel-Legged* ao percorrer terrenos irregulares.

A utilização de robôs móveis em tarefas de monitoração e exploração é cada vez mais comum. Tais robôs devem possuir sistema de locomoção eficiente, capaz de se adaptar às diferentes condições dos meios de operação.

Uma proposta é a utilização da arquitetura *Wheel-Legged*, que emprega rodas para propulsão, acopladas a pernas com juntas comandadas de maneira ativa, adicionando graus de liberdade interno ao mecanismo, permitindo alterar a configuração do robô.

Como as pernas possuem comando ativo, é possível alterar a configuração cinemática do robô, de maneira adequada ao terreno percorrido. Tal sistema necessita de um controle eficiente.

Os terrenos irregulares percorridos foram simplificados, podendo ser representados por diferentes planos, paralelos entre si, com diferentes alturas.

Critérios de estabilidade e tração foram descritos, utilizados para avaliar a mobilidade do robô. Dois critérios de estabilidade foram apresentados: a margem de estabilidade e o gradiente da margem de estabilidade. O gradiente foi avaliado como mais adequado, sendo o critério adotado nesta pesquisa.

Consideramos o robô se locomovendo em terrenos irregulares em baixa velocidade. Dessa forma, o controle proposto é estático, desconsiderando os efeitos dinâmicos do

sistema.

Baseado nos modelos cinemáticos de um robô com pernas prismáticas (RPP) e do Robô Ambiental Híbrido (RAH), foi proposto um controle descentralizado, no nível de junta. Cada junta possui malha de controle dedicada, sendo controlada sem conhecer a atuação nas demais pernas.

Em cada malha, aplicamos um controle de velocidade. As velocidades de comando das juntas são calculadas utilizando diferentes estratégias, de acordo com os requisitos desejados de operação, incluindo altura, orientação, estabilidade e tração do robô.

Essa pesquisa teve como principal diretriz a obtenção de uma solução simples e robusta, que utiliza poucos dados e informações do terreno e que seja aplicável em qualquer sistema com reconfiguração ativa.

Utilizando o controle de estabilidade proposto, um robô pode assumir configuração mais estável que as alcançadas com as estratégias utilizadas em (Iagnemma & Dubowsky 2004, Iagnemma et al. 2000, Grand et al. 2004, Grand et al. 2002).

O controle de reconfiguração cinemático desenvolvido foi testado nos dois robôs apresentados, RG e RAH, por meio de simulações.

A atuação nas juntas dos robôs e o comportamento das variáveis controladas foram explicitadas durante as simulações. Os objetivos de controle propostos foram alcançados, obtendo consideráveis ganhos de mobilidade do sistema.

A influência das considerações empregadas no controle cinemático desenvolvido é destacada. Uma mesma configuração de robô pode ser analisada de diferentes maneiras em relação a sua estabilidade, de acordo com o critério adotado.

Uma importante contribuição desta dissertação foi a implementação do controle cinemático proposto no Robô Ambiental Híbrido da Petrobras, permitindo a validação das estratégias desenvolvidas em um sistema real. Testes foram realizados com o robô em laboratório e em campo.

Os testes de reconfiguração cinemática realizados com o RAH em laboratório utilizaram uma plataforma para emular as condições de um terreno acidentado. Apesar das incertezas do sistema real, os resultados alcançados com os testes em laboratório são semelhantes aos obtidos com as simulações.

Por fim, testes em campo foram realizados com o sistema. O robô foi levado para seu local de operação, a Amazônia, em dezembro de 2007. Uma série de ensaios com o RAH

foi realizada ao longo do rio Solimões, utilizando o controle de reconfiguração cinemática desenvolvido. Os resultados obtidos com os testes em campo foram satisfatórios.

A atuação das juntas do RAH é lenta, com velocidade máxima de aproximadamente 1cm/s. Além disso, os ângulos máximos compensados pelo robô são de  $9.8^\circ$  no sentido longitudinal e  $4.7^\circ$  no sentido lateral. Assim, devemos considerando as limitações do sistema, que não é capaz, por exemplo, de compensar as variações abruptas do terreno.

Mesmo assim, o controle cinemático proposto se comportou de maneira adequada, resultando em melhorias significativas referentes à estabilidade e tração do sistema, nos diferentes terrenos percorridos. Nos testes em campo, foram alcançadas configurações cinemáticas que aumentaram a estabilidade do sistema em 15.5%, e velocidade máxima de deslocamento na água em 28%.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta pesquisa foi desenvolvido e implementado um controle quase-estático de reconfiguração cinemática, que busca melhorar a mobilidade de um robô móvel com arquitetura *Wheel-Legged* ao percorrer um terreno irregular.

Pesquisas futuras devem também considerar terrenos acidentados, para os quais a simplificação adotada, representando o terreno por planos, não é adequada.

Assumindo que a velocidade de deslocamento é baixa, foi desenvolvida uma abordagem estática. No entanto, para velocidades de deslocamento média e alta, a abordagem estática não deve garantir a estabilidade do sistema. Além disto, os critérios de mobilidade adotados deverão ser reavaliados.

Desta forma, trabalhos futuros devem considerar a dinâmica do sistema, garantindo a eficiência do controle com o robô se locomovendo em média e alta velocidade.

O controle dinâmico exige uma largura de banda maior que o controle estático. A velocidade máxima das juntas deve permitir que o robô se adapte às rápidas variações do terreno. Atuadores lentos levam a largura de banda insuficiente para evitar o tombamento do robô, em situação crítica.

Outro requisito para implementar o controle dinâmico em um robô móvel articulado é a garantia de processamento em tempo real. O sistema deve ser capaz de compensar

em tempo hábil as bruscas variações de terreno encontradas durante o deslocamento do robô.

O desempenho dos controles é diretamente influenciado pela qualidade dos dados de realimentação. Utilizando informações precisas sobre o terreno e interações deste com o robô, é possível alcançar sempre a correta reconfiguração cinemática, classificado o controle utilizado como ótimo global.

Sistemas de medições apropriados devem ser implementados, capazes de fornecer a topologia do terreno, a posição exata dos pontos de contato entre robô e terreno, as forças aplicadas no robô, e sua velocidade de deslocamento.

# Apêndice A

## Resolução Cinemática do Mecanismo de Cinco Barras da Suspensão do Robô Ambiental Híbrido

Uma maneira de calcular a cinemática direta do mecanismo de cinco barras utilizado nas suspensões do Robô Ambiental Híbrido consiste na utilização dos sub-problemas de *Paden-Kahan* (Murray et al. 1993).

O objetivo consiste em utilizar problemas geométricos de solução conhecida, frequentemente encontrados em manipuladores padrões, de maneira a se obter a cinemática do mecanismo.

Podemos calcular a posição da roda, em relação a base da suspensão, de acordo com a posição da junta prismática ativa  $h$ , através dos sub-problemas 1 e 3, simplificados para o caso planar.

As variáveis auxiliares utilizadas neste apêndice não tem nenhuma correspondência com as variáveis de mesmo nome utilizadas na dissertação.

## A.1 Sub-Problema 1: Rotação em um Eixo

Considerando  $\xi$  o eixo de rotação com magnitude unitária, e dois vetores  $u$  e  $v \in \mathbb{R}^3$ . O problema corresponde a uma rotação do vetor  $u$  em relação a um eixo  $\xi$ , até ele coincidir com o vetor  $v$ , conforme apresentado na figura A.1.

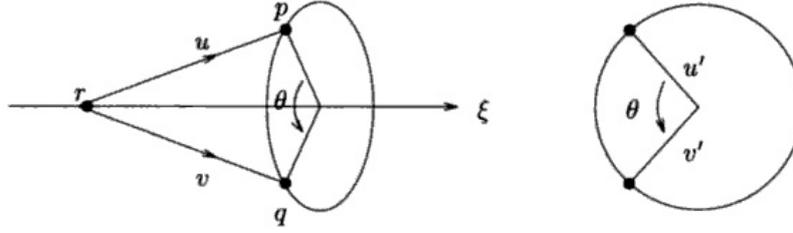


FIGURA A.1: Subproblema de *Paden-Kahan* 1

O objetivo é determinar  $\theta$ , tal que:

$$R_{\xi}(\theta) u = v \quad (\text{A.1})$$

onde  $R_{\xi}(\theta) \in SO(3)$  equivale a rotação igual a  $\theta$ , referente ao eixo  $\xi$ .

Definimos  $u'$  e  $v'$  como sendo as projeções dos vetores  $u$  e  $v$  no plano perpendicular ao eixo  $\xi$ . Consideramos ainda  $w \in \mathbb{R}^3$  sendo o vetor unitário na direção do eixo  $\xi$ .

A solução do sub-problema 1 é obtido com a equação A.2:

$$\theta = \arctan(w^T(u' \times v'), w^T u' v') \quad (\text{A.2})$$

No caso planar, podemos considerar que  $u' = u$  e  $v' = v$ . O problema possui 1 solução se  $\|u'\| = \|v'\|$ .

## A.2 Sub-Problema 3: Rotação a uma dada Distância

Considerando  $\xi$  o eixo de rotação com magnitude unitária, dois vetores  $u$  e  $v \in \mathbb{R}^3$ , e  $\delta$  um numero real  $> 0$ . O problema corresponde a uma rotação do vetor  $u$  em relação a um eixo  $\xi$ , até ele atingir uma distância  $\delta$  em relação ao vetor  $v$ , conforme apresentado na figura A.2.

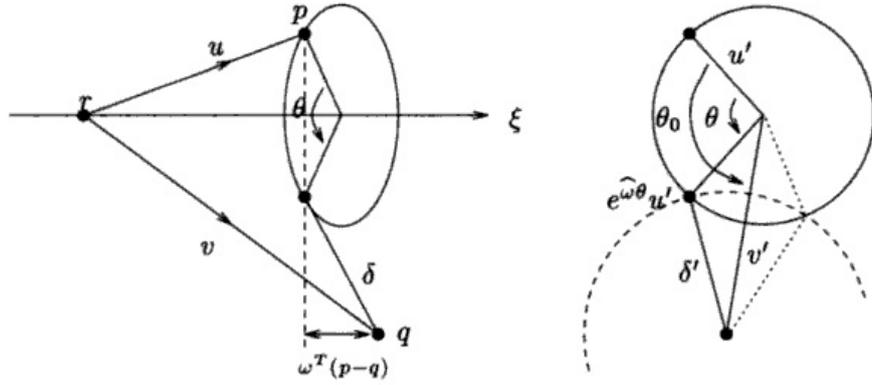


FIGURA A.2: Subproblema de *Paden-Kahan 3*

O objetivo é determinar  $\theta$ , tal que:

$$\|v - R_{\xi}(\theta) u\| = \delta \quad (\text{A.3})$$

Definimos  $u'$  e  $v'$  como sendo as projeções dos vetores  $u$  e  $v$ , apresentados na figura A.2, no plano perpendicular ao eixo  $\xi$ . A distância  $\delta'$  também corresponde a projeção de  $\delta$  no mesmo plano. Consideramos ainda  $w \in \mathbb{R}^3$  sendo o vetor unitário na direção do eixo  $\xi$ .

O ângulo  $\theta_0$  entre  $u'$  e  $v'$  é calculado utilizando a equação A.4, semelhante ao sub-problema 1:

$$\theta_0 = \arctan(w^T(u' \times v'), u'^T v') \quad (\text{A.4})$$

A solução do sub-problema 3 é obtido com a equação A.5,

$$\theta = \theta_0 \pm \arccos \frac{\|u'\|^2 + \|v'\|^2 - \delta'^2}{2\|u'\|\|v'\|} \quad (\text{A.5})$$

No caso planar, podemos considerar que  $u' = u$ ,  $v' = v$  e  $\delta' = \delta$ .

O problema pode possuir 0, 1 ou 2 soluções, dependendo do número de pontos onde o círculo de raio  $\|u'\|$  intercepta o círculo de raio  $\delta'$ .

## A.3 Cinemática Direta do Mecanismo de Cinco Barras

O mecanismo de cinco barras utilizado nas suspensões do RAH está apresentado na figura A.3.

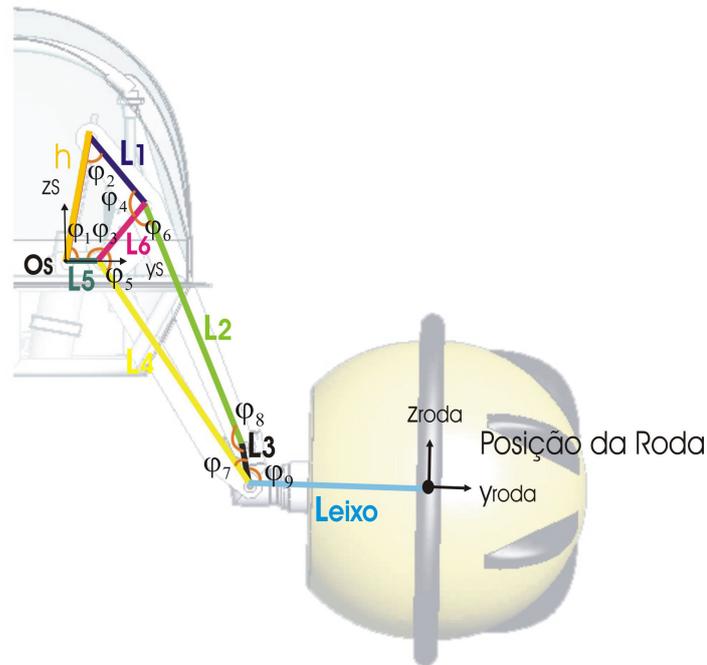


FIGURA A.3: Geometria do Mecanismo de Cinco Barras

Os valores dos segmentos de reta utilizados são:

$$L_1 = 14.95\text{cm} \quad L_2 = 43.85\text{cm} \quad L_3 = 6.45\text{cm}$$

$$L_4 = 44.85\text{cm} \quad L_5 = 6.90\text{cm} \quad L_6 = 11.70\text{cm} \quad L_{eixo} = 30.5\text{cm}$$

Os ângulos constantes do mecanismo são:

$$\varphi_3 = 125^\circ \quad \varphi_9 = 102^\circ$$

Outra representação da geometria do mecanismo pode ser utilizada para o cálculo da cinemática direta do mecanismo, conforme apresentado na figura A.4.

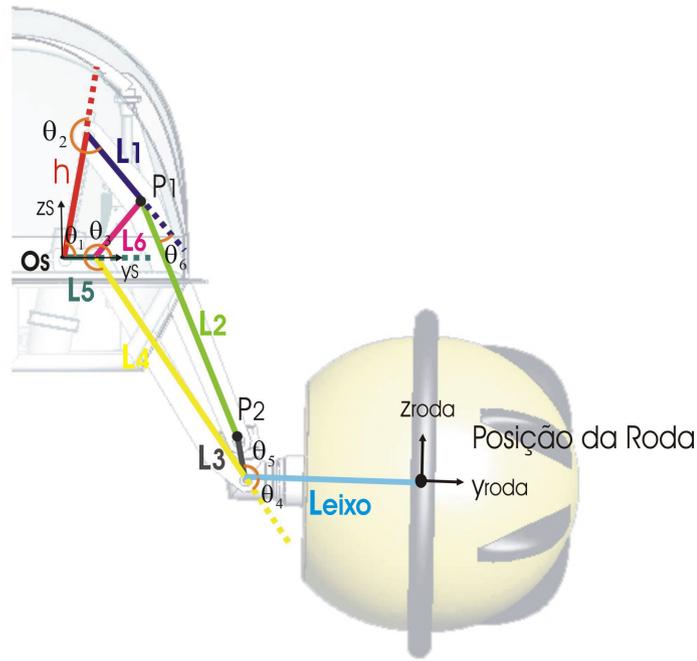


FIGURA A.4: Geometria do Mecanismo de Cinco Barras

Os ângulos  $\theta_i$  são utilizados para representar o mecanismo. A correspondência entre  $\varphi_i$  da figura A.3 e  $\theta_i$  da figura A.4 é apresentada nas relações abaixo:

$$\theta_1 = \varphi_1$$

$$\theta_2 = \pi - \varphi_2$$

$$\theta_3 = 3\pi - \varphi_3 - \varphi_5$$

$$\theta_4 = \pi - \varphi_7 - \varphi_9$$

$$\theta_5 = \varphi_9$$

$$\theta_6 = 12.92^\circ$$

$$\theta_7 = \varphi_3 = 125^\circ$$

Utilizaremos os pontos de referência  $P_1$  e  $P_2$  para auxiliar no cálculo da cinemática do mecanismo.

A posição do ponto  $P_1$  pode ser calculada por meio da equação:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ L_5 + L_6 \cos \theta_7 \\ L_6 \sin \theta_7 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

onde a variável  $\theta_7$  é conhecida.

Por outro lado, a posição de  $P_1$  também pode ser calculada pela equação:

$$P_1 = R_{x_S}(\theta_1) \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_1) R_{x_S}(\theta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Aplicando o módulo na equação, temos:

$$\|P_1\| = \left\| \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} - R_{x_S}(\theta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ -L_1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\| \quad (\text{A.8})$$

Podemos calcular o valor de  $\theta_2$ , empregando na equação A.8 a solução do sub-problema 3.

Conhecido  $\theta_2$ , podemos então calcular  $\theta_1$ , empregando o sub-problema 1 na equação A.9:

$$P_1 = R_{x_S}(\theta_1) \left[ \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix} \right] \quad (\text{A.9})$$

A posição do ponto  $P_2$  pode ser calculada por meio da equação:

$$P_2 = R_{x_S}(\theta_1) \begin{bmatrix} 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_1) R_{x_S}(\theta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_1) R_{x_S}(\theta_2) R_{x_S}(-\theta_6) \begin{bmatrix} 0 \\ L_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

onde as variáveis  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_6$  são conhecidas.

Por outro lado, a posição de  $P_2$  também pode ser calculada pela equação:

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ L_5 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_3) \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_3) R_{x_S}(\theta_4) R_{x_S}(\theta_5) \begin{bmatrix} 0 \\ L_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Tal equação também pode ser expressa como:

$$P_2 - \begin{bmatrix} 0 \\ L_5 \\ 0 \end{bmatrix} = R_{x_S}(\theta_3) \left[ \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 \\ 0 \end{bmatrix} - R_{x_S}(\theta_4) R_{x_S}(\theta_5) \begin{bmatrix} 0 \\ -L_3 \\ 0 \end{bmatrix} \right] \quad (\text{A.12})$$

Aplicando o módulo na equação, temos:

$$\left\| P_2 - \begin{bmatrix} 0 \\ L_5 \\ 0 \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 \\ 0 \end{bmatrix} - R_{x_S}(\theta_4) R_{x_S}(\theta_5) \begin{bmatrix} 0 \\ -L_3 \\ 0 \end{bmatrix} \right\| \quad (\text{A.13})$$

Podemos calcular o valor de  $\theta_4$ , empregando na equação A.13 a solução do sub-problema 3.

Conhecido  $\theta_4$ , podemos então calcular  $\theta_3$ , empregando o sub-problema 1 na equação A.12.

Por fim, a posição da roda  $P_r$  pode ser calculada utilizando a equação A.14:

$$P_r = \begin{bmatrix} 0 \\ L_5 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_3) \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{x_S}(\theta_3) R_{x_S}(\theta_4) \begin{bmatrix} 0 \\ L_{eixo} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

# Referências Bibliográficas

- Bartlett, P. W., Wettergreen, D. S. & Whittaker, W. L. (2008), ‘The scarab rover as designed for lunar science and resource exploration’, *Lunar and Planetary Science XXXIX*.
- Bekker, G. (1956), *Theory of Land Locomotion*, Michigan Press, Ann Arbor.
- Bekker, G. (1960), *Off-the-road Locomotion. Research and Development in Terramechanics*, Michigan Press, Ann Arbor.
- Boeing (1971), *Lunar Roving Vehicle Operations Handbook*.
- Cunningham, J., Corke, P., Durrant-White, H. & Dalziel, M. (1999), ‘Automated LHDs and underground haulage trucks’, *Australian J Mining* pp. 51–53.
- Durr, V., Krause, A. F., Schmitz, J. & Cruse, H. (2003), ‘Neuroethological concepts and their transfer to walking machines’, *The International Journal of Robotics Research* **22**(3-4), 151–167.
- Estier, T., Crausaz, Y., Merminod, B., Lauria, K., Piguet, R. & Siegwart, R. (2000), ‘An innovating space rover with extended climbing abilities’, *International Conference on Robotics in Challenging Environments*.
- Goldstein, H., Poole, C. P. & Safko, J. (2002), *Classical Mechanics*, Prentice Hall.
- GPTotal (2008), ‘Pergunte ao GP total: como funcionava a suspensão ativa’, < [http : //www.gptotal.com.br /pergunteedu/pergunta\\_2quin\\_jun03.htm](http://www.gptotal.com.br/pergunteedu/pergunta_2quin_jun03.htm) >.
- Grand, C., Amar, F. B., Plumet, F. & Bidaud, P. (2002), ‘Stability control of a wheel-legged mini-rover’, *CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Machines*.
- Grand, C., BenAmar, F., Plumet, F. & Bidaud, P. (2004), ‘Stability and traction optimization of a reconfigurable wheel-legged robot’, *Journal of Robotics Research*.
- Iagnemma, K. & Dubowsky, S. (2004), *Estimation, Motion Planning, and Control with application to Planetary Rovers*, Springer-Verlag, Berlin.
- Iagnemma, K., Rzepniewski, A., Dubowsky, S., Pirjanian, P., Huntsberger, T. & Schenker, P. (2000), ‘Mobile robot kinematic reconfigurability for rough-terrain’, *Sensor fusion and decentralized control in robotic systems III* **4196**, 413–420.

- Kim, J., Park, F. C., Ryu, S. J., Kim, J., Hwang, J. C., Park, C. & Iurascu, C. C. (2001), ‘Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining’, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **17**(4), 423–434.
- Kumar, V. R. & Waldron, K. J. (1988), ‘Force distribution in closed kinematic chains’, *IEEE Journal of Robotics and Automation* **4**(6).
- Mae, Y., Yoshida, A., Arai, T., Inoue, K., Miyawaki, K. & Adachi, H. (2000), ‘Application of locomotive robot to rescue tasks’, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* **3**, 2083–2088.
- Martins, L. (1999), *Os Arquivos da Formula 1*, Panda Books.
- McGhee, R. & Frank, A. (1968), ‘On the stability properties of quadruped creeping gait’, *Mathematical Bioscience* **3**, 331–351.
- Murray, R. M., Li, Z. & Sastry, S. S. (1993), *A mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC.
- NASA (2007), ‘Mars rovers’, < <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/> >.
- Ogata, K. (2003), *Engenharia de Controle Moderno*, Prentice Hall.
- Osborn, J. F. (1989), ‘Applications of robotics in hazardous waste management’, *SME world conference on robotics research*.
- Papadopoulos, E. G. & Rey, D. A. (1996), ‘A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators’, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*.
- Rollins, E., Luntz, J., Foessel, A., Shamah, D. & Whittaker, W. (1998), ‘Nomad: a demonstration of the transforming chassis’, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* **1**, 611–617.
- Santos, A. V. (2007), Projeto e controle de estabilidade de um sistema robótico anfíbio para sensoreamento remoto, Master’s thesis, PUC-Rio.
- Schmitz, J., Dean, J., Kindermann, T., Schumm, M. & Cruse, H. (2001), ‘A biological inspired controller for hexapod walking: Simple solutions by exploiting physical properties’, *Biological Bulletin*.
- Silva, A. F. B. (2007), Modelagem de sistemas robóticos móveis para controle de tração em terrenos acidentados, Master’s thesis, PUC-Rio.
- Sreenivasan, S. V. (1994), *Actively Coordinated Wheeled Vehicle Systems*, PhD thesis, Ohio State University.
- Sreenivasan, S. V. & Wilcox, B. H. (1994), ‘Stability and traction control of an actively actuated micro-rover’, *Journal of Robotics Systems* **11**(6), 487–502.
- Volper, R. (1997), ‘Rocky 7: A next generation mars rover prototype’, *Journal of Advanced Robotics* **11**(4), 341–358.

Waldron, K. J. (1986), 'Force and motion management in legged locomotion', *IEEE Journal of Robotics and Automation* **RA-2**(4).

WikiAnswer (2007), 'What are ABS EBD EPS in a car', < [http://wiki.answers.com/Q/What\\_are\\_ABS\\_EBD\\_EPS\\_in\\_a\\_car](http://wiki.answers.com/Q/What_are_ABS_EBD_EPS_in_a_car) >.

Wikipedia (2007), 'Mieczyslaw G. Bekker', < [http://en.wikipedia.org/wiki/Mieczyslaw\\_G.\\_Bekker](http://en.wikipedia.org/wiki/Mieczyslaw_G._Bekker) >.