



**Auderi Vicente Santos**

**Controle de Capotagem e Deslizamento de Sistemas  
Robóticos Móveis em Terrenos Acidentados**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da  
PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco Antônio Meggiolaro

Rio de Janeiro

Maio de 2007



**Auderi Vicente Santos**

## **Controle de Capotagem e Deslizamento de Sistemas Robóticos Móveis em Terrenos Acidentados**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**  
Orientador  
PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza**  
PUC-Rio

**Prof. Fernando Cesar Lizarralde**  
COPPE/UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de Maio de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Auderi Vicente Santos**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2001.

Ficha Catalográfica

Santos, Auderi Vicente

Controle de capotagem e deslizamento de sistemas robóticos móveis em terrenos acidentados / Auderi Vicente Santos ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2007.

109 f. : il. (cal.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

CDD: 621

À minha mãe, pelo incentivo constante, em todos os desafios e especialmente durante a realização deste curso, porque ela, como sempre, percebeu antes mesmo de mim, o quanto seria importante esta conquista.

## **Agradecimentos**

À minha família e minha namorada, por compreender minha ausência no convívio.

A todos os amigos e familiares que incentivaram e ajudaram.

Ao orientador Marco Antonio Meggiolaro e aos amigos Alexandre Francisco Barral, Pedro Eduardo Gonzales Panta e Roberto Maia.

Ao Centro de Pesquisa da Petrobras - CENPES, por facilitar a conclusão deste trabalho.

## Resumo

Santos, Audei Vicente. **Controle de Capotagem e Deslizamento de Sistemas Robóticos Móveis em Terrenos Acidentados**. Rio de Janeiro - RJ, 2007. 109p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de robôs móveis para monitorar locais inacessíveis vem se tornando cada vez mais comum. Essas operações podem ser autônomas ou tripuladas e quando são feitas em terrenos irregulares é preciso garantir segurança na missão, pois muitas das vezes o resgate se torna inviável. O robô estudado nesta dissertação terá dificuldades para locomoção em certas localidades, como por exemplo: derrapagem em regiões alagadas, vencer atoleiro em regiões pantanosas e de brejos e capotagem nas regiões que apresentam aclives e declives. Diante deste quadro de problemas apresentados, garantir a estabilidade nas regiões de ladeiras é de grande valor nas operações, sejam elas tele-operadas ou autônomas. Visando contribuir para o sucesso da locomoção do robô, esta dissertação apresenta uma técnica de controle de estabilidade de um robô móvel para sensoriamento remoto em terrenos irregulares, incluindo projeto, simulação e construção de um protótipo funcional. Este controle visa garantir que as rodas do veículo não descolem do terreno, através da atuação nas forças de atrito entre as rodas e o solo variando os torques nos seus motores.

## Palavras-chave

Robôs móveis; controle de estabilidade; terrenos irregulares.

## Abstract

Santos, Audei Vicente. **Tip Over and Slippage Control of Mobile Robotic Systems over Rough Terrain.** Rio de Janeiro - RJ, 2007. 109p. M.Sc. Thesis – Mechanical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The use of mobile robots to monitor non-accessible environments has become increasingly common in the recent years. These tasks can be either autonomous, remote-controlled, or passenger-operated. When performed in rough terrain, it is necessary to guarantee mission safety, since many times it is impossible to send a rescue party for recovery. The hybrid environmental robot presented in this thesis is a mobile robot that will face very challenging conditions, avoiding e.g. slippage in wet terrain, becoming trapped in muddy soil, and tipping over in regions with high slopes. Therefore, it is a challenging task to guarantee robot stability under such circumstances, either in autonomous or operated tasks. This thesis presents a stability control methodology for a mobile robot to perform remote sensing tasks in rough terrain. The model-based technique guarantees wheel-ground contact at all times, acting individually at the wheel motors to control the traction/friction forces. This work also addresses the design, simulation and construction aspects of a functional prototype of a mobile robot to validate the proposed approach.

## Keywords

Mobile Robots; Stability Control; Rough Terrain.

## Sumário

1 Introdução	14
1.1. Revisão Bibliográfica	14
1.2. Robôs Móveis	15
1.3. Objetivo	18
1.4. Robô Ambiental Híbrido	19
1.4.1. Características do Projeto	19
1.5. Organização da dissertação	21
2 Modelagem do veículo	23
2.1. Cinemática	23
2.2. Dinâmica	26
2.2.1. Equação das restrições	29
2.3. Sistema de Equações Resultante	33
3 Controle de Estabilidade	35
3.1. Problemas de Instabilidade	36
3.2. Descrição do Algoritmo de Controle de Estabilidade	43
4 Simulações	46
4.1. Modelagem do terreno	46
4.2. Descrição do Algoritmo Utilizado na Simulação	51
4.3. Algoritmo de Ajuste	55
5 Resultados das Simulações	59
5.1. Parâmetros Iniciais Utilizados na Simulação	60
5.2. Perfil do Terreno	61
5.3. Análise Quantitativa	61
5.3.1. Simulação sem Controle de Estabilidade	62
5.3.2. Simulação com Controle de Estabilidade	67



6 Experimentos	78
6.1. Construção do primeiro protótipo	78
6.1.1. Teste com o primeiro protótipo	79
6.2. Construção do segundo protótipo	81
6.2.1. Testes com o segundo protótipo	82
7 Conclusões e Perspectiva	84
7.1. Contribuição desta dissertação	84
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	85
8 Bibliografia	86
9 Apêndice A	87
9.1. Amazônia	87
9.1.1. Indústria do Petróleo e Gás no Amazonas	87
9.1.2. Gasoduto Coari – Manaus	91
9.1.3. Riscos Ambientais da Indústria do Petróleo e Gás	94
9.1.4. Projeto PIATAM	95
9.1.5. Proposta do Laboratório de Robótica do CENPES	97
10 Apêndice B	99

## Lista de figuras

Figura 1 – Robô Sojourner.	15
Figura 2 – Robô andante para cortar madeira.	16
Figura 3 - Robô Pioneer [6], projetado para fazer exploração em áreas radioativas.	17
Figura 4 – Robô Ambiental Híbrido - Chico Mendes.	18
Figura 5 – Parâmetros geométricos do veículo.	23
Figura 6 – Ângulo de inclinação do veículo.	24
Figura 7 – Forças atuando no sistema.	27
Figura 8 – Ângulos de contato das rodas com o perfil do terreno.	28
Figura 9 – Vetor normal ao terreno em direção ao centro da roda.	29
Figura 10 – Ângulos de contato $\gamma_1$ e $\gamma_2$ igual ao ângulo de inclinação do veículo $\alpha$ .	32
Figura 11 – Controle de Torque Computado.	35
Figura 12 – Projeções dos centros de massa na horizontal.	36
Figura 13 – Domínio das forças de atrito limitadas pela força de saturação dos motores e as forças normais.	42
Figura 14 – Região $D = \{(Fat_1, Fat_2)\}$ que pertence ao conjunto solução do problema de estabilidade.	42
Figura 15 – Fluxograma do Controle	45
Figura 16 – Discretização do perfil do terreno.	46
Figura 17 – Trajetória seguida pelos eixos das rodas.	47
Figura 18 – Curva de centro.	47
Figura 19 – Ponto do perfil do terreno não diferenciável.	49
Figura 20 - Situação onde existe dois pontos de contato da roda com o terreno.	50
Figura 21 - Situação onde o raio de curvatura do perfil do terreno é menor que o raio da roda.	51
Figura 22 – Ajuste da curva de centro para simulação.	56
Figura 23 – Fluxograma que demonstra o algoritmo utilizado nas simulações.	58
Figura 24 - Desenho em Solidworks do segundo protótipo.	59
Figura 25 - Relação da $F_{SAT}$ com o torque máximo permitido pelo motor.	61

Figura 26 – Perfil senoidal com inclinação de 39 graus.	62
Figura 27 – Forças Normais para perfil senoidal sem controle.	63
Figura 28 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal sem controle.	63
Figura 29 – Aproveitamento das forças no sistema para perfil senoidal sem controle.	64
Figura 30 - Forças de atrito para perfil senoidal sem controle.	64
Figura 31 – Terreno pouco acidentado.	65
Figura 32 - Forças Normais para terreno pouco acidentado sem controle.	65
Figura 33 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado sem controle.	66
Figura 34 – Aproveitamento das forças no sistema para terreno pouco acidentado sem controle.	67
Figura 35 – Forças de atrito para terreno pouco acidentado sem controle.	67
Figura 36 - Forças Normais para perfil senoidal com controle.	68
Figura 37 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal com controle.	69
Figura 38 - Forças de atrito para perfil senoidal com controle.	69
Figura 39 - Forças Normais para terreno pouco acidentado com controle.	70
Figura 40 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado com controle.	71
Figura 41 - Forças de atrito para terreno pouco acidentado com controle.	71
Figura 42 – Terreno pouco acidentado com $\mu$ variável.	72
Figura 43 – Normais em terreno pouco acidentado com $\mu$ variável com controle.	73
Figura 44 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ em terreno pouco acidentado com $\mu$ variável com controle.	73
Figura 45 – Forças de atrito em terreno pouco acidentado com $\mu$ variável com controle.	74
Figura 46 – Terreno acidentado com controle de velocidade e de estabilidade.	74
Figura 47 – Velocidade ao longo do tempo para perfil acidentado com controle.	75
Figura 48 – Normais para perfil acidentado com controle.	76

Figura 49 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil acidentado com controle.	76
Figura 50 – Forças de atrito para perfil acidentado com controle.	77
Figura 51 – Primeiro Protótipo do Robô Ambiental Híbrido.	79
Figura 52 – Condição real de capotagem I.	80
Figura 53 - Condição real de capotagem II.	80
Figura 54 – Segundo protótipo do Robô Ambiental Híbrido sendo testado no CENPES.	81
Figura 55 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte I.	82
Figura 56 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte II.	82
Figura 57 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte III.	83
Figura 58 – Floresta Amazônica.	87
Figura 59 – Primeiros trabalhadores da Petrobras na Amazônia.	88
Figura 60 – Base de Urucu.	89
Figura 61 – Vista aérea da Refinaria Isaac Sabbá – UM-Reman.	89
Figura 62 - Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN.	90
Figura 63 - Transporte de GLP – Gás Liquefeito de Petróleo.	91
Figura 64 - Gasoduto Coari – Manaus.	92
Figura 65 - Derramamento de óleo em ambientes aquáticos.	95
Figura 66 - Excursão do Projeto PIATAM em Setembro de 2005.	97
Figura 67 - Pesquisadores do INPA e da UFAM coletando amostras na Excursão do PIATAM.	97
Figura 68 - Dificuldades e perigo encontrado pelos pesquisadores em se locomover.	98
Figura 69 - Primeiro teste na Amazônia do Robô Ambiental Híbrido.	100
Figura 70 - Teste no Lago Preto – Manacapuru.	100
Figura 71 - Teste na Costa do Paratari – Manacapuru.	101
Figura 72 - Teste no Lago Preto – Manacapuru.	102
Figura 73 - Teste no Paraná do Iauara – Manacapuru.	102
Figura 74 - Teste na costa do Matrinxã – Codojás.	103
Figura 75 - Teste no Lago Coari – Coari.	104
Figura 76 - Robô sendo colocado na água pelo caminhão munk.	104
Figura 77 - Teste na Ilha do Baixio – Iranduba	105

Figura 78 - Teste na Ilha do Baixio – Irlanduba.	106
Figura 79 - Teste na Ilha do Baixio – Irlanduba.	106
Figura 80 - Palestra na Escola Municipal Getúlio Vargas – Manacapuru.	107
Figura 81 - Teste acompanhado pela comunidade.	108
Figura 82 - Teste no Lago do Tamanduá – Manacapuru.	108