

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 acidentasos / 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, Auderi 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 sensoreamento 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, Auderi 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 α .	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	2
Figura 27 – Forças Normais para perfil senoidal sem controle.62	3
Figura 28 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal sem controle. 63	3
Figura 29 – Aproveitamento das forças no sistema para perfil senoidal	
sem controle. 64	4
Figura 30 - Forças de atrito para perfil senoidal sem controle.64	4
Figura 31 – Terreno pouco acidentado.65	5
Figura 32 - Forças Normais para terreno pouco acidentado sem controle.65	5
Figura 33 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado sem controle. 60	5
Figura 34 – Aproveitamento das forças no sistema para terreno pouco	
acidentado sem controle. 67	7
Figura 35 – Forças de atrito para terreno pouco acidentado sem controle. 67	7
Figura 36 - Forças Normais para perfil senoidal com controle.68	8
Figura 37 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal com controle. 69	9
Figura 38 - Forças de atrito para perfil senoidal com controle.69	9
Figura 39 - Forças Normais para terreno pouco acidentado com controle. 70	0
Figura 40 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado com controle. 72	1
Figura 41 - Forças de atrito para terreno pouco acidentado com controle.	1
Figura 42 – Terreno pouco acidentado com μ variável. 72	2
Figura 43 – Normais em terreno pouco acidentado com µ variável com controle.7	3
Figura 44 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ em terreno pouco acidentado com μ variável	
com controle. 72	3
Figura 45 – Forças de atrito em terreno pouco acidentado com µ variável	
com controle. 74	4
Figura 46 – Terreno acidentado com controle de velocidade e de estabilidade. 74	4
Figura 47 – Velocidade ao longo do tempo para perfil acidentado com	
controle. 75	5
Figura 48 – Normais para perfil acidentado com controle. 70	5

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 – Iranduba.	106
Figura 79 - Teste na Ilha do Baixio – Iranduba.	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

1 Introdução

Esta dissertação estuda um controle de capotagem e deslizamento de sistemas robóticos móveis em terrenos acidentados. Este controle é aplicado a um veículo especialmente desenvolvido para uso na Amazônia, capaz de se deslocar nos mais variados tipos de superfície: água, terra, pântano, etc. Este veículo poderá ser tripulado, semi-autônomo ou tele-operado, viabilizando o trabalho dos profissionais em locais hoje inacessíveis e fazendo um rigoroso monitoramento ambiental.

Em paralelo ao crescente interesse da sociedade por atividades de monitoramento e preservação ambiental, aliadas a projetos de mitigação e pronto combate a situações de contingência, a Petrobras através de seus vários órgãos vem desenvolvendo estudos e projetos específicos para a Amazônia Brasileira, mormente nas áreas onde serão instaladas o gasoduto Coari - Manaus.

1.1. Revisão Bibliográfica

Dentre os trabalhos que abordaram o problema de instabilidade convém destacar as soluções propostas por Iagnemma [1] e Papadopoulos [2]. A análise desenvolvida por ambos considerou o sistema como sendo quase-estático, devido as baixas velocidades dos veículos modelados. Porém os dois autores citados solucionam este problema de maneiras distintas as apresentadas nesta dissertação.

O primeiro autor garantiu a estabilidade do robô móvel através da reconfiguração geométrica do veículo que permitia atuar nas articulações para variar o centro de gravidade. O outro apenas mensurava a margem de estabilidade que o veículo pode trabalhar com segurança. Entretanto este trabalho oferece um novo conceito para vencer situações de capotagem, através de um controle que atua diretamente no torque das rodas do robô, influenciando a dinâmica do sistema de modo a não permitir que as rodas se descolem do terreno.

Introdução

A análise dinâmica feita nesta dissertação, parte do estudo do controle de tração realizado por Silva [3], cuja modelagem foi feita em 2D.

1.2. Robôs Móveis

O uso de robôs móveis vem se tornando cada vez mais comum, seja facilitando o trabalho humano ou muitas das vezes substituindo-o em operações onde existe risco de vida.

A área da robótica que se ocupa de mecanismos que se movimentam de forma autônoma tem conquistado um grande destaque na comunidade científica por apresentar grande aplicação nas mais variadas situações, cotidianas ou especiais. Um caso extremo desta aplicação são as missões de exploração de ambientes não estruturados, como por exemplo, a do robô Sojourner (Fig. 1) que explorou o planeta Marte em 1997 [4].



Figura 1 – Robô Sojourner.

O acompanhamento do homem nestas operações é de grande valor, entretanto, muitas das vezes decisões precisam ser tomadas de maneira autônoma para não colocar a missão em situação de risco. Portanto se faz necessário dotar estes robôs com capacidade de sentir, processar e escolher de maneira segura e otimizada seus movimentos. Em muitas operações os robôs servem para auxiliar o homem em locais que apresentam perigo de locomoção, conduzindo-o nestas regiões e garantindo assim sua integridade. Nos trabalhos tripulados, os robôs são dirigidos pelo homem, ficando ao robô apenas a autonomia para coordenar seus mecanismos de locomoção.

A Fig. 2 ilustra esta situação em que robô precisa distribuir ordenadamente o movimento de seus apoios [5].



Figura 2 - Robô andante para cortar madeira.

Também existem situações onde a permanência do homem no ambiente de operação já o coloca em posição perigosa. É o caso de ambientes que apresentam sinais radioativos e esta emissão invisível de energia afasta a possibilidade de acompanhamento humano nas missões. Nestes sítios, a contribuição humana é feita através de tele-operação, como apresenta a Fig. 3.



Figura 3 - Robô Pioneer [6], projetado para fazer exploração em áreas radioativas.

Nas situações que utilizam a tele-operação, o ser humano mantém só o controle parcial do sistema, enquanto o robô precisa de certa autonomia para tomar suas próprias decisões e não colocar a missão em risco.

As atitudes que o robô possa vir a tomar dependem do seu algoritmo de controle, que por sua vez precisa garantir a estabilidade, melhorar o desempenho, minimizar o consumo de energia e garantir a segurança operacional.

Como resultado da complexidade destes robôs apresentados, o estudo dos robôs móveis acaba sendo uma área multidisciplinar.

Nesta dissertação dá-se especial ênfase para a análise dinâmica de um robô móvel específico (Robô Ambiental Híbrido - Chico Mendes), que realiza missões em região de floresta alagada, que é mais bem detalhado na seção 1.5. e ilustrado na Fig.4.



Figura 4 - Robô Ambiental Híbrido - Chico Mendes.

Este robô terá dificuldades para locomoção em certas localidades, como por exemplo: derrapagem nas regiões alagadas, vencer atoleiro nas 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.

Procurando contribuir para solucionar estes problemas, esta dissertação apresenta o estudo de um controle de estabilidade que busca 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.

1.3. Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento das técnicas de controle de capotagem e deslizamento de um robô móvel, incluindo projeto, simulação e construção de um protótipo funcional.

Este controle visa garantir a locomoção do robô em terrenos irregulares e inclinados, evitando capotagem e ajudando nas tomadas de decisão e até não aceitando a trajetória comandada se esta lhe oferecer um obstáculo não superável.

Diante das condições encontradas, a estabilidade do veículo passou a ser um fator fundamental, e um controle eficaz garantirá segurança nas operações onde o resgate muitas vezes se torna inviável.

1.4. Robô Ambiental Híbrido

Dentro da estratégia de desenvolvimento de atividades na Amazônia, a Petrobras e o Centro de Pesquisas – CENPES sempre deram especial atenção ao meio ambiente e aos possíveis impactos causados por sua atividade na bela e desafiadora região amazônica.

Este item pretende apresentar a proposta do Laboratório de Robótica do CENPES para monitoramento ambiental na região onde está sendo construído o gasoduto Coari – Manaus.

1.4.1. Características do Projeto

Em se tratando de cenários muitas vezes desconhecidos e de comportamento imprevisível, a estratégia adotada pelo Laboratório de Robótica do CENPES foi, primeiramente, dar condições para que o homem consiga penetrar um pouco mais em tais regiões de forma segura e lá coletar suas impressões das variáveis de interesse. Depois de experimentar, vivenciar e conhecer um pouco melhor as características do eco-sistema, pretende-se desenvolver de forma gradativa sistemas híbridos, semi-autônomos ou até mesmo autônomos para serem operados e monitorados à distância.

Tal veículo deve possuir elementos a bordo, que o faça ser capaz de reconhecer e se adaptar aos diferentes tipos de solo, desviar de obstáculos, encontrar trajetória entre pontos inicial e final de uma dada excursão, receber e cumprir ordens enviadas remotamente, entre outras.

Para isso deve dispor de um conjunto de sistemas mecânicos, elétricos, eletrônicos, computacionais, de sensoriamento e de comunicação que seja um auxílio de grande vantagem para o homem, que possa realizar tarefas préprogramadas ou em tempo real, com a supervisão humana ou de forma autônoma. Visando aumentar ainda mais sua capacidade de deslocamento, o veículo será dotado de controle de direção e sentido que serão atendidos por atuação coordenada das trações independentes (quatro motores com redução) em cada roda. O robô também terá um sistema de suspensão independente e variável que permite mudar o ângulo de ataque das rodas com o solo, facilitando a superação de obstáculos.

As rodas servirão como flutuadores para que o robô possa percorrer lagos e igarapés coletando dados e amostras.

O sistema de visão, composto por câmeras de vídeo, é ferramenta fundamental de auxílio ao sistema de navegação, podendo servir também para determinar a presença de obstáculos e fazer o reconhecimento do meio ambiente, possibilitando planejamento de trajetória. Sensores de proximidade serão utilizados para antecipação de colisão.

O sistema de navegação é composto por sensores de atitudes (acelerômetros e giroscópio) e sistema de posicionamento global (GPS), permitindo saber suas coordenadas geográficas e acompanhar passo a passo seu movimento.

Uma base de controle dotada de sistema de rádio, para enviar ordens e escolher a missão que será executada pelo veículo e receber as informações que estarão sendo coletadas, servirá de apoio a toda operação em campo.

Manipuladores e cestas de guarda estarão disponíveis para coleta de materiais de interesse, e acessíveis por tele-operação em tempo real, devendo funcionar de forma integrada preservando as amostras, que serão armazenadas conforme as normas para análise posterior em laboratório. Por este motivo os sistemas desenvolvidos buscam ser ousados e inovadores, mas também simples e pouco invasivos.

Todas as funções do robô (locomoção, monitoramento, coleta, etc.) utilizarão energia elétrica, por esta ser renovável e mais limpa que outras fontes de energia. Para este propósito, um conjunto de baterias de alta performance associado a células fotovoltaicas serão empregados. Apesar de cumprir os requisitos necessários para executar as missões especificadas do veículo de forma aceitável, a utilização de baterias limita sua autonomia, sendo necessário que este retorne à base, para recarregar essas baterias no final de cada operação. Este tempo de missão a princípio é de três horas em média.

Introdução

Como a extensão do gasoduto é de aproximadamente 400 km, cerca de 100 bases serão construídas ao longo do seu curso, funcionando como pontos de recarga e manutenção dos robôs. Os robôs em operação na Amazônia irão trabalhar muitas vezes de forma coordenada, podendo cada um realizar pequenas tarefas de uma operação complexa.

Sensores de pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade, salinidade e hidrocarbonetos serão utilizados para monitorar as características das águas dos rios da região. Estas informações serão disponibilizadas para a comunidade local e acadêmica envolvida neste processo, elaborando relatórios oficiais respaldando as operações da indústria do petróleo nesta região.

Os trabalhos serão feitos com base em dados já levantados nos locais por grupos de estudo de Universidades e outros Centros de Pesquisa em projetos já existentes como: PIATAM, PIATAM - II, Cognitus, e outros.

Buscando reconhecer o trabalho e a disposição em desenvolver de maneira sustentável a região da Amazônia brasileira, o Laboratório de Robótica batizou este projeto de: Robô Ambiental Híbrido - Chico Mendes. Esta singela homenagem foi feita em cerimônia no CENPES, contando com a presença e consentimento da família na presença de sua filha.

1.5. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada na seguinte forma: O capítulo 2 descreve a modelagem cinemática e dinâmica do sistema apresentado, buscando detalhar as equações de restrição e algumas considerações que foram feitas a partir das equações encontradas;

O capítulo 3 apresenta o controle de estabilidade proposto, descrevendo o algoritmo utilizado;

O capítulo 4 apresenta simulações que ilustram e indagam os métodos propostos, descrevendo o algoritmo utilizado na simulação.

O capítulo 5 apresenta resultados das simulações apresentando os perfis de terrenos utilizados e mostrando graficamente o resultado deste trabalho;

Introdução

O capítulo 6 apresenta o processo de construção do robô modelado, detalhando suas características e apresentando suas dificuldades em relação à estabilidade;

O capítulo 7 apresenta conclusão sobre os métodos utilizados na dissertação e uma breve descrição sobre possíveis trabalhos futuros.

O apêndice A – Breve histórico da indústria do petróleo e gás na Amazônia.

O apêndice B - Detalhamento dos testes realizados na Amazônia.

2 Modelagem do veículo

As equações cinemáticas e dinâmicas analisadas neste capítulo consideram o veículo e o terreno como um único corpo rígido. O modelo utilizado é baseado na arquitetura do Robô Ambiental Híbrido, porém não considerando a possibilidade de cambagem das rodas. Sendo assim, não se pode reconfigurar os parâmetros geométricos do robô.

O perfil do terreno, os parâmetros físicos e geométricos e as variáveis de estado são dados de entrada para esta modelagem.

Este ensaio foi feito sob uma análise 2D, já que serve como base para trabalhos posteriores.

2.1. Cinemática

A Fig. 5 especifica os parâmetros geométricos relacionados à estrutura física do veículo.



Figura 5 – Parâmetros geométricos do veículo.

onde:

 x_c = coordenada x do centro de gravidade do veículo.

 y_c = coordenada y do centro de gravidade do veículo.

 x_{ci} = coordenada x do centro geométrico da roda i.

 y_{ci} = coordenada y do centro geométrico da roda i.

h_i = distância vertical do centro geométrico da roda i ao centro de massa.

 L_i = a distância longitudinal do centro geométrico da roda i ao centro de massa.

Para completar a análise cinemática faz-se necessário definir o ângulo α de inclinação do veículo em relação a horizontal (eixo x), que é mostrado na Fig. 6.



Figura 6 – Ângulo de inclinação do veículo.

A cinemática das rodas está determinada primeiramente pela sua posição em referência ao centro de gravidade do veículo.

Considerou-se nestas operações que a localização do centro de gravidade é previamente conhecida.

Assim, considerando os parâmetros da Fig. 5 e Fig. 6, obtém-se para as rodas do veículo o seguinte sistema de equações:

Roda 1:

 $x_{c_1} = x_c - L_1 \cdot \cos \alpha + h_1 \cdot sen\alpha \tag{1}$

 $y_{c_1} = y_c - L_1 \cdot sen\alpha - h_1 \cdot \cos\alpha \tag{2}$

Roda 2:

$$x_{c_2} = x_c + L_2 \cdot \cos \alpha + h_2 \cdot sen\alpha \tag{3}$$

$$y_{c_2} = y_c + L_2 \cdot sen\alpha - h_2 \cdot \cos\alpha \tag{4}$$

As equações acima podem ser representadas matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} x_{c_1} \\ y_{c_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -L_1 \\ -h_1 \end{bmatrix}$$
(5)

$$\begin{bmatrix} x_{c_2} \\ y_{c_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 \\ -h_2 \end{bmatrix}$$
(6)

As velocidades dos centros geométrico das rodas são encontradas derivando, em relação ao tempo, as equações (1), (2), (3) e (4).

Assim, obtém-se:

Roda 1:

$$\dot{x}_{c_1} = \dot{x}_c + (L_1 \cdot sen\alpha + h_1 \cdot \cos\alpha) \cdot \dot{\alpha}$$
⁽⁷⁾

$$\dot{y}_{c_1} = \dot{y}_c - (L_1 \cdot \cos \alpha - h_1 \cdot sen\alpha) \cdot \dot{\alpha}$$
(8)

Roda 2:

$$\dot{x}_{c_2} = \dot{x}_c - (L_2 \cdot sen\alpha - h_2 \cdot \cos\alpha) \cdot \dot{\alpha}$$
⁽⁹⁾

$$\dot{y}_{c_2} = \dot{y}_c + (L_2 \cdot \cos \alpha + h_2 \cdot sen \alpha) \cdot \dot{\alpha}$$
⁽¹⁰⁾

As acelerações dos centros geométrico das rodas são encontradas derivando, em relação ao tempo, as equações (7), (8), (9) e (10).

Assim, obtém-se:

Roda 1:

$$\ddot{x}_{c_1} = \ddot{x}_c + (L_1 \cdot sen\alpha + h_1 \cdot \cos\alpha) \cdot \ddot{\alpha} + (L_1 \cdot \cos\alpha - h_1 \cdot sen\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2$$
(11)

$$\ddot{y}_{c_1} = \ddot{y}_c - (L_1 \cdot \cos\alpha - h_1 \cdot sen\alpha) \cdot \ddot{\alpha} + (L_1 \cdot sen\alpha + h_1 \cdot \cos\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2$$
(12)

Roda 2:

$$\ddot{x}_{c_2} = \ddot{x}_c - (L_2 \cdot sen\alpha - h_2 \cdot \cos\alpha) \cdot \ddot{\alpha} - (L_2 \cdot \cos\alpha + h_2 \cdot sen\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2$$
(13)

$$\ddot{y}_{c_2} = \ddot{y}_c + (L_2 \cdot \cos\alpha + h_2 \cdot sen\alpha) \cdot \ddot{\alpha} - (L_2 \cdot sen\alpha - h_2 \cdot \cos\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2$$
(14)

2.2. Dinâmica

Para a análise dinâmica, foi utilizada a abordagem de Newton – Euler, por resultar em uma obtenção direta das equações que regem o movimento, visto que o sistema considerado é formado por um único corpo rígido.

As equações de Newton – Euler, para o caso 2D, são representadas da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = m. \mathbf{a}_{\mathbf{c}}$$

M = I. $\ddot{\alpha}$

Onde:

F = $\sum \ F_i$ - somatório das forças atuando sobre o corpo.

m - massa do corpo.

 $\mathbf{a}_{c} = [\ddot{x}_{c}; \ddot{y}_{c}]$ - vetor aceleração do centro de gravidade do veículo.

 $M = \sum M_i$ somatório dos momentos em relação ao centro de gravidade.

I \rightarrow momento de inércia de rotação do veículo em relação ao centro de gravidade.

 $\ddot{\alpha}$ = aceleração angular do corpo.

Tendo como hipótese que o contato entre cada roda e o terreno se dá em um único ponto, as forças relevantes atuando no sistema serão: as forças de atrito (Fat), as forças normais (N) nas rodas, e o peso (P) do veículo. A Fig. 7 mostra a atuação de cada uma destas forças.



Figura 7 – Forças atuando no sistema.

Sendo:

Fat_i = Força de atrito estático atuando na roda i do veículo.

N_i = Força Normal atuando na roda i do veículo.

P = Peso do veículo.

A direção das forças de atrito está determinada pelos ângulos de contato γ_1 e γ_2 , como apresentado na Fig. 8.



Figura 8 – Ângulos de contato das rodas com o perfil do terreno.

Desta forma, utilizando a abordagem de Newton – Euler neste sistema, obtêm-se as seguintes equações:

$$\sum F_x = m \cdot \ddot{x}_c$$

$$m \cdot \ddot{x}_c = Fat_1 \cdot \cos \gamma_1 + Fat_2 \cdot \cos \gamma_2 - N_1 \cdot sen\gamma_1 - N_2 \cdot sen\gamma_2$$
(15)

$$\sum F_{y} = m \cdot \ddot{y}_{c}$$

$$m \cdot \ddot{y}_{c} = Fat_{1} \cdot sen\gamma_{1} + Fat_{2} \cdot sen\gamma_{2} + N_{1} \cdot \cos\gamma_{1} + N_{2} \cdot \cos\gamma_{2} - P \qquad (16)$$

$$\sum M_{cG} = I \cdot \ddot{\alpha}$$

$$I \cdot \ddot{\alpha} = Fat_1 \cdot \cos \gamma_1 (y_c - y_1) - Fat_1 \cdot sen\gamma_1 (x_c - x_1) + Fat_2 \cdot \cos \gamma_2 (y_c - y_2)$$

$$-Fat_2 \cdot sen\gamma_2 (x_c - x_2) - N_1 \cdot sen\gamma_1 (y_c - y_1) - N_1 \cdot \cos \gamma_1 (x_c - x_1)$$

$$-N_2 \cdot sen\gamma_2 (y_c - y_2) - N_2 \cdot \cos \gamma_2 (x_c - x_2)$$

$$I \cdot \ddot{\alpha} = [(y_c - y_1) \cdot \cos \gamma_1 - (x_c - x_1) \cdot \operatorname{sen} \gamma_1] \cdot \operatorname{Fat}_1 + [(y_c - y_2) \cdot \cos \gamma_2 - (x_c - x_2) \cdot \operatorname{sen} \gamma_2] \cdot \operatorname{Fat}_2 - [(y_c - y_1) \cdot \operatorname{sen} \gamma_1 - (x_c - x_1) \cdot \cos \gamma_1] \cdot N_1$$
(17)
+ $[(y_c - y_2) \cdot \operatorname{sen} \gamma_2 - (x_c - x_2) \cdot \cos \gamma_2] \cdot N_2$

Assumindo-se que as forças de atrito são conhecidas, as três equações acima, (15), (16) e (17), apresentam cinco incógnitas $(\ddot{x}_c, \ddot{y}_c, N_1, N_2, \ddot{\alpha})$, resultando desta forma em um sistema com infinitas soluções.

Para que o problema apresente uma única solução é necessário que haja mais duas equações independentes, as quais são obtidas através da imposição das restrições descritas abaixo.

2.2.1. Equação das restrições

As restrições impostas a este sistema são que as rodas do veículo sempre devem estar em contato com o terreno. Para satisfazer esta condição, o centro geométrico das rodas, a cada instante, deve pertencer a uma determinada curva que é gerada a partir do perfil do terreno.

A esta curva é dado o nome de curva de centro, e a mesma é obtida da seguinte forma:

- a) É calculada a normal à curva do perfil do terreno em cada um de seus pontos (x, y), onde y = f(x).
- b) Tomando-se sobre esta normal um vetor com magnitude r (raio da roda) e origem em (x, y), fica definido o ponto (x_{cc}, y_{cc}) como ilustrado na Fig. 9. O conjunto formado pelos pontos (x_{cc}, y_{cc}) gera a curva de centro.



Figura 9 – Vetor normal ao terreno em direção ao centro da roda.

Excetuando os pontos não diferenciáveis e as regiões que têm um raio de curvatura menor que o raio r da roda, pertencentes à curva do perfil do terreno, que serão tratados no capítulo quatro, a curva de centro gerada a partir dos demais pontos da curva do perfil do terreno será da forma $(x_{cc}, g(x_{cc}))$.

Assim, para garantir que o veículo esteja sempre em contato com o terreno, basta que a todo instante as coordenadas dos centros geométricos das rodas pertençam à curva de centro, isto é verdade quando:

$$y_{c_1} = g(x_{c_1})$$
 (18)

$$y_{c_2} = g(x_{c_2})$$
 (19)

Derivando em relação ao tempo as Equações (18) e (19), obtem-se:

$$\frac{dy_{c_i}}{dt} = \frac{dg(x_{c_i})}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}\Big|_{x_{c_i}}$$
(20)

$$\dot{y}_{c_1} = g'(x_{c_1}) \cdot \dot{x}_{c_1} \tag{21}$$

$$\dot{y}_{c_2} = g'(x_{c_2}) \cdot \dot{x}_{c_2}$$
(22)

Derivando em relação ao tempo a Equação (20), obtem-se:

$$\frac{d^{2}y_{c_{i}}}{dt^{2}} = \frac{dg(x_{c_{i}})}{dx} \cdot \frac{d^{2}x}{dt^{2}}\Big|_{x_{ci}} + \frac{d^{2}g(x_{c_{i}})}{dx^{2}} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\Big|_{x_{ci}}\right)^{2}$$
(23)

$$\ddot{y}_{c_1} = g'_1 \cdot \ddot{x}_{c_1} + g''_1 \cdot \dot{x}_{c_1}^2$$
(24)

$$\ddot{y}_{c_2} = g'_2 \cdot \ddot{x}_{c_2} + g''_2 \cdot \dot{x}_{c_2}^2$$
(25)

onde:
$$g'_{i} = \frac{dg_{i}}{dx_{ci}} \cdot (x_{ci})$$

 $g'_{1} = g'(x_{c_{1}})$
 $g'_{2} = g'(x_{c_{2}})$
 $g''_{1} = g''(x_{c_{1}})$
 $g''_{2} = g''(x_{c_{2}})$

Substituindo a equação (11) e (12) em (24), encontram-se:

$$\ddot{y}_{c} - (L_{1} \cdot \cos \alpha - h_{1} \cdot sen\alpha) \cdot \ddot{\alpha} + (L_{1} \cdot sen\alpha + h_{1} \cdot \cos \alpha) \cdot \dot{\alpha}^{2} = g_{1}' \cdot \left(\ddot{x}_{c} + (L_{1} \cdot sen\alpha + h_{1} \cdot \cos \alpha) \cdot \ddot{\alpha} + (L_{1} \cdot \cos \alpha - h_{1} \cdot sen\alpha) \cdot \dot{\alpha}^{2}\right) + g_{1}'' \cdot \dot{x}_{c_{1}}^{2}$$

Rearranjando os termos da equação acima, resulta em:

$$g_{1}' \cdot \ddot{x}_{c} - \ddot{y}_{c} + [(\cos\alpha + g_{1}' \cdot sen\alpha) \cdot L_{1} - (sen\alpha - g_{1}' \cdot \cos\alpha) \cdot h_{1}] \cdot \ddot{\alpha} = g_{1}'' \cdot \dot{x}_{c_{1}}^{2}$$

+
$$[(\cos\alpha + g_{1}' \cdot sen\alpha) \cdot h_{1} + (sen\alpha - g_{1}' \cdot \cos\alpha) \cdot L_{1}] \cdot \dot{\alpha}^{2}$$
 (26)

Substituindo a equação (13) e (14) em (25), encontram-se:

$$\ddot{y}_{c} + (L_{2} \cdot \cos\alpha + h_{2} \cdot sen\alpha) \cdot \ddot{\alpha} - (L_{2} \cdot sen\alpha - h_{2} \cdot \cos\alpha) \cdot \dot{\alpha}^{2} = g_{2}' \cdot \left(\ddot{x}_{c} - (L_{2} \cdot sen\alpha - h_{2} \cdot \cos\alpha) \cdot \ddot{\alpha} - (L_{2} \cdot \cos\alpha + h_{2} \cdot sen\alpha) \cdot \dot{\alpha}^{2}\right) + g_{2}'' \cdot \dot{x}_{c_{2}}^{2}$$

Rearranjando os termos da equação acima, resulta em:

$$g'_{2} \cdot \ddot{x}_{c} - \ddot{y}_{c} - [(\cos\alpha + g'_{2} \cdot sen\alpha) \cdot L_{2} + (sen\alpha - g'_{2} \cdot \cos\alpha) \cdot h_{2}] \cdot \ddot{\alpha} = -g''_{2} \cdot \dot{x}_{c_{2}}^{2}$$

$$-[(sen\alpha - g'_{2} \cdot \cos\alpha) \cdot L_{2} - (\cos\alpha + g'_{2} \cdot sen\alpha) \cdot h_{2}] \cdot \dot{\alpha}^{2}$$
(27)

Definindo-se:

$$R_{1} \equiv (\cos\alpha + g_{1}' \cdot sen\alpha) \cdot L_{1} - (sen\alpha - g_{1}' \cdot \cos\alpha) \cdot h_{1}$$
⁽²⁸⁾

$$R_2 \equiv (\cos\alpha + g_2' \cdot sen\alpha) \cdot L_2 + (sen\alpha - g_2' \cdot \cos\alpha) \cdot h_2$$
⁽²⁹⁾

$$S_1 \equiv [(\cos\alpha + g_1' \cdot sen\alpha) \cdot h_1 + (sen\alpha - g_1' \cdot \cos\alpha) \cdot L_1] \cdot \dot{\alpha}^2 - g_1'' \cdot \dot{x}_{c_1}^2 \qquad (30)$$

$$S_2 \equiv -[(sen\alpha - g'_2 \cdot \cos\alpha) \cdot L_2 - (\cos\alpha + g'_2 \cdot sen\alpha) \cdot h_2] \cdot \dot{\alpha}^2 - g''_2 \cdot \dot{x}_{c_2}^2 (31)$$

As Equações (26) e (27) resultam após as substituições feitas acima, nas seguintes equações de restrição do sistema:

$$g_1' \cdot \ddot{x}_c - \ddot{y}_c + R_1 \cdot \ddot{\alpha} = S_1 \tag{32}$$

$$g_2' \cdot \ddot{x}_c - \ddot{y}_c + R_2 \cdot \ddot{\alpha} = S_2 \tag{33}$$

As Equações (32) e (33) são linearmente independentes (L.I.) se a matriz W, dos coeficientes das acelerações, tiver posto igual a dois.

$$W = \begin{bmatrix} g_1' & -1 & R_1 \\ g_2' & -1 & R_2 \end{bmatrix}$$

Quando $g'_1 \neq g'_2$, o posto de W é igual a dois. Logo, as Equações (32) e (33) são L.I.

Quando $g'_1 = g'_2$ ($\gamma_1 = \gamma_2$), ocorrem duas possibilidades:

- a) Se $\alpha \neq \gamma_1 = \gamma_2$, $R_1 \neq R_2$ e a matriz W tem posto igual a dois.
- b) Se $\alpha = \gamma_1 = \gamma_2$, R_1 será igual a R_2 e W terá posto igual a um, resultando que as Equações (32) e (33) sejam linearmente dependentes (L.D.).

Neste caso faz-se necessário gerar uma nova equação de restrição que seja L.I. com a Equação (32).

Para gerar esta nova equação, considera-se um caso onde $\alpha = \gamma_1 = \gamma_2$, como o mostrado na Fig. 10.



Figura 10 – Ângulos de contato γ_1 e γ_2 igual ao ângulo de inclinação do veículo lpha.

Assim, para que o veículo mantenha sempre as rodas em contato com o solo, as componentes das velocidades dos centros das rodas ao longo do eixo n devem ser nulas.

$${\stackrel{n}{V}}_{c_1} = {\stackrel{n}{V}}_{c_2} = 0$$

Sendo que as velocidades $\overset{n}{V}_{c_1}$ e $\overset{n}{V}_{c_2}$ estão relacionadas da seguinte forma:

$${\stackrel{n}{V}}_{c_2} = {\stackrel{n}{V}}_{c_1} + (L_1 + L_2) \cdot \dot{\alpha}$$

A velocidade angular ($\dot{\alpha}$) é dada por:

$$\dot{\alpha} = \frac{{\stackrel{n}{V}}_{c_2} - {\stackrel{n}{V}}_{c_1}}{(L_1 + L_2)} = 0$$

Assim a aceleração angular será:

$$\ddot{\alpha} = \frac{d\dot{\alpha}}{dt} = 0 \tag{34}$$

2.3. Sistema de Equações Resultante

O sistema de equações resultante é formado pelas equações provenientes das equações de Newton – Euler (15), (16) e (17) e pelas equações provenientes das equações de restrição do sistema (32), (33) e (34). Podendo ser colocado em forma matricial, mostrado a seguir.

$$G \cdot \mathbf{u} = U$$

onde:

$$G = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & sen\gamma_1 & sen\gamma_2 \\ 0 & m & 0 & -\cos\gamma_1 & -\cos\gamma_2 \\ 0 & 0 & I & d_1 & d_2 \\ g'_1 & -1 & R_1 & 0 & 0 \\ & c & & \\ \mathbf{u} = [\ddot{x}_c & \ddot{y}_c & \ddot{\alpha} & N_1 & N_2]^T \\ U = [F_x & F_y & T_{in} & S_1 & S] \end{bmatrix}$$

(35)

$$\mathbf{c} = \begin{cases} [g_2' & -1 & R_2 & 0 & 0], se \ \alpha \neq \gamma_1 \text{ ou } \alpha \neq \gamma_2 \\ [0 & 0 & 1 & 0 & 0], se \ \alpha = \gamma_1 = \gamma_2 \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} S_2, se \ \alpha \neq \gamma_1 \text{ ou } \alpha \neq \gamma_2 \\ 0, se \ \alpha = \gamma_1 = \gamma_2 \end{cases}$$

$$F_x = Fat_1 \cdot \cos \gamma_1 + Fat_2 \cdot \cos \gamma_2$$

$$F_y = Fat_1 \cdot sen \gamma_1 + Fat_2 \cdot sen \gamma_2 - P$$

$$T_{in} = [(y_c - y_1) \cdot \cos \gamma_1 - (x_c - x_1) \cdot sen \gamma_1] \cdot Fat_1 + [(y_c - y_2) \cdot \cos \gamma_2 - (x_c - x_2) \cdot sen \gamma_2] \cdot Fat_2$$

$$d_1 = (y_c - y_1) \cdot sen \gamma_1 + (x_c - x_1) \cdot \cos \gamma_1$$

$$d_2 = (y_c - y_2) \cdot sen \gamma_2 + (x_c - x_2) \cdot \cos \gamma_2$$

Da equação matricial (35), podem-se calcular as acelerações do veículo e as forças normais das rodas, através da equação:

$$\mathbf{u} = G^{-1}U \tag{36}$$

A partir da obtenção do vetor **u** através da equação (36), determinam-se os valores das normais (N₁ e N₂) e das acelerações do centro de gravidade (\ddot{x}_c , \ddot{y}_c e $\ddot{\alpha}$).

Estes valores dependem das forças de atrito (Fat₁ e Fat₂), dos ângulos de contato da roda com o solo ($\gamma_1 e \gamma_2$) e das variáveis de estado do veículo ($x_c, y_c, \alpha, \dot{x}_c, \dot{y}_c e \dot{\alpha}$).

Tendo obtido a modelagem cinemática e dinâmica do veículo, pode-se proceder com a proposta de técnicas de controle, descritas a seguir.

3 Controle de Estabilidade

Missões em terrenos irregulares exigem dos robôs mecanismos de controle que garantam sucesso e segurança nas operações, pois em muitas das vezes os locais explorados não permitem resgate. Esses mecanismos servem tanto para robôs tripulados como para autônomos. Para tal, vêm se desenvolvendo algoritmos de controle que possam auxiliar os robôs nas tomadas de decisão, sempre que este se deparar com obstáculos que o coloquem em situação de risco.

O controle proposto busca sempre manter o sistema em uma situação estável, sendo que o veículo é considerado estável quando as forças normais são positivas. No entanto, a condição onde apenas uma normal é positiva não implica necessariamente em um sistema instável. Apesar disso, normais positivas serão consideradas desejáveis em todas as rodas.

As seções a seguir apresentam o algoritmo proposto nesta dissertação, detalhando o controle que garante a estabilidade do veículo estudado.

As técnicas para garantia de estabilidade são análogas à atuação do Controle de Torque Computado (Fig. 11), que processa a saída **u** de uma lei de controle qualquer de modo a eliminar efeitos gravitacionais e dinâmicos.

Na técnica proposta, a saída μ_d de uma lei de controle qualquer é processada para garantir não-descolamento, não-deslizamento e evitar saturação.



Figura 11 – Controle de Torque Computado.

3.1. Problemas de Instabilidade

Para evitar a perda de estabilidade do robô nas regiões que apresentam aclives e declives com inclinações consideráveis, faz-se necessário primeiro avaliar as equações que regem este movimento, para então saber como influenciar neste processo, evitando o risco do robô capotar.

Uma forma de avaliar o risco de capotar é através do cálculo do centro de massa dinâmico. Este é o ponto onde o momento de todas as forças (inclusive inerciais) atuando no sistema seria nulo, resultando assim na possibilidade de o veículo girar livremente em torno deste ponto [7].

Quando a projeção deste ponto no eixo horizontal estiver fora da região (sombra) entre os pontos de contato das rodas com o solo, o robô irá capotar [1]. A Fig. 12 mostra esta projeção em duas configurações, para uma condição estática.



Figura 12 – Projeções dos centros de massa na horizontal.

(A configuração inclinada se aproxima da instabilidade, pois a projeção se aproxima do ponto de contato da roda esquerda com o solo).
No entanto, garantindo que as forças normais sempre sejam positivas, garante-se a estabilidade do sistema, ou seja, o veículo jamais capotará, pois a projeção do centro de gravidade dinâmico estará dentro da região da sombra projetada do veículo.

O controle busca as forças de atrito que atuando no sistema resultam em forças normais maiores que zero $(N_1>0 \text{ e } N_2>0)$.

Assim sendo, é necessário buscar equações que relacionam, de maneira explícita, os valores das forças normais $(N_1 e N_2)$ com as forças de atrito.

Tomando novamente as equações que regem o movimento do veículo, dadas por (15), (16) e (17), tem-se que:

$$m \cdot \ddot{x}_c = Fat_1 \cdot \cos \gamma_1 + Fat_2 \cdot \cos \gamma_2 - N_1 \cdot sen \gamma_1 - N_2 \cdot sen \gamma_2$$

$$m \cdot \ddot{y}_c = Fat_1 \cdot sen\gamma_1 + Fat_2 \cdot sen\gamma_2 + N_1 \cdot \cos\gamma_1 + N_2 \cdot \cos\gamma_2 - P$$

$$I \cdot \ddot{\alpha} = [(y_c - y_1) \cdot \cos \gamma_1 - (x_c - x_1) \cdot \operatorname{sen} \gamma_1] \cdot \operatorname{Fat}_1 + [(y_c - y_2) \cdot \cos \gamma_2 - (x_c - x_2) \cdot \operatorname{sen} \gamma_2] \cdot \operatorname{Fat}_2 - [(y_c - y_1) \cdot \operatorname{sen} \gamma_1 - (x_c - x_1) \cdot \cos \gamma_1] \cdot N_1 + [(y_c - y_2) \cdot \operatorname{sen} \gamma_2 - (x_c - x_2) \cdot \cos \gamma_2] \cdot N_2$$

Para compactar a notação considera-se:

$$I \cdot \ddot{\alpha} = a_1 \cdot Fat_1 + a_2 \cdot Fat_2 - b_1 \cdot N_1 + b_2 \cdot N_2$$

onde definem-se

 $a_{1} \equiv (y_{c} - y_{1}) \cdot \cos \gamma_{1} - (x_{c} - x_{1}) \cdot sen\gamma_{1}$ $a_{2} \equiv (y_{c} - y_{2}) \cdot \cos \gamma_{2} - (x_{c} - x_{2}) \cdot sen\gamma_{2}$ $b_{1} \equiv (y_{c} - y_{1}) \cdot sen\gamma_{1} - (x_{c} - x_{1}) \cdot \cos\gamma_{1}$ $b_{2} \equiv (y_{c} - y_{2}) \cdot sen\gamma_{2} - (x_{c} - x_{2}) \cdot \cos\gamma_{2}$

E as restrições (32), (33) e (34) podem ser escritas de uma forma geral como segue:

$$g_1' \cdot \ddot{x}_c - \ddot{y}_c + R_1 \cdot \ddot{\alpha} = S_1 \tag{37}$$

$$A \cdot \ddot{x}_{c} - B \cdot \ddot{y}_{c} + C \cdot \ddot{\alpha} = D$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{d\dot{\alpha}}{dt} = 0$$
(38)

onde:

$$R_{1} \equiv (\cos \alpha + g_{1}' \cdot sen \alpha) \cdot L_{1} - (sen \alpha - g_{1}' \cdot \cos \alpha) \cdot h_{1}$$

$$S_{1} \equiv [(\cos \alpha + g_{1}' \cdot sen \alpha) \cdot h_{1} + (sen \alpha - g_{1}' \cdot \cos \alpha) \cdot L_{1}] \cdot \dot{\alpha}^{2} - g_{1}'' \cdot \dot{x}_{c_{1}}^{2}$$

$$A \equiv \begin{cases} g_{2}', se \alpha \neq \gamma_{1} \text{ ou } \alpha \neq \gamma_{2} \\ 0, se \alpha = \gamma_{1} = \gamma_{2} \end{cases}$$

$$B \equiv \begin{cases} 1, se \alpha \neq \gamma_{1} \text{ ou } \alpha \neq \gamma_{2} \\ 0, se \alpha = \gamma_{1} = \gamma_{2} \end{cases}$$

$$C \equiv \begin{cases} R_{2}, se \alpha \neq \gamma_{1} \text{ ou } \alpha \neq \gamma_{2} \\ 1, se \alpha = \gamma_{1} = \gamma_{2} \end{cases}$$

$$D \equiv \begin{cases} S_{2}, se \alpha \neq \gamma_{1} \text{ ou } \alpha \neq \gamma_{2} \\ 0, se \alpha = \gamma_{1} = \gamma_{2} \end{cases}$$

$$R_{2} \equiv (\cos \alpha + g_{2}' \cdot sen \alpha) \cdot L_{2} + (sen \alpha - g_{2}' \cdot \cos \alpha) \cdot h_{2} \end{cases}$$

$$S_{2} \equiv -[(sen \alpha - g_{2}' \cdot \cos \alpha) \cdot L_{2} - (\cos \alpha + g_{2}' \cdot sen \alpha) \cdot h_{2}] \cdot \dot{\alpha}^{2} - g_{2}'' \cdot \dot{x}_{c_{2}}^{2}$$

Multiplicando as equações (37) e (38) pela massa (m), tem-se:

$$g'_{1} \cdot m \cdot \ddot{x}_{c} - m \cdot \ddot{y}_{c} + R_{1} \cdot m \cdot \ddot{\alpha} = m \cdot S_{1}$$
$$A \cdot m \cdot \ddot{x}_{c} - B \cdot m \cdot \ddot{y}_{c} + C \cdot m \cdot \ddot{\alpha} = m \cdot D$$

$$g_{1}' \cdot (Fat_{1} \cdot \cos \gamma_{1} + Fat_{2} \cdot \cos \gamma_{2} - N_{1} \cdot sen\gamma_{1} - N_{2} \cdot sen\gamma_{2}) - (Fat_{1} \cdot sen\gamma_{1} + Fat_{2} \cdot sen\gamma_{2} + N_{1} \cdot \cos \gamma_{1} + N_{2} \cdot \cos \gamma_{2} - P) + \frac{R_{1} \cdot m}{I} \cdot (a_{1} \cdot Fat_{1} + a_{2} \cdot Fat_{2} - b_{1} \cdot N_{1} + b_{2} \cdot N_{2}) = m \cdot S_{1}$$

$$A \cdot (Fat_1 \cdot \cos \gamma_1 + Fat_2 \cdot \cos \gamma_2 - N_1 \cdot sen\gamma_1 - N_2 \cdot sen\gamma_2) - B \cdot (Fat_1 \cdot sen\gamma_1 + Fat_2 \cdot sen\gamma_2 + N_1 \cdot \cos \gamma_1 + N_2 \cdot \cos \gamma_2 - P) + \frac{C \cdot m}{I} \cdot (a_1 \cdot Fat_1 + a_2 \cdot Fat_2 - b_1 \cdot N_1 + b_2 \cdot N_2) = m \cdot D$$

$$Fat_{1} \cdot \left(g_{1}' \cdot \cos \gamma_{1} - sen\gamma_{1} + \frac{a_{1} \cdot R_{1} \cdot m}{I}\right) + Fat_{2} \cdot \left(g_{1}' \cdot \cos \gamma_{2} - sen\gamma_{2} + \frac{a_{2}R_{1} \cdot m}{I}\right) - N_{1} \cdot \left(g_{1}' \cdot sen\gamma_{1} + \cos \gamma_{1} + \frac{b_{1} \cdot R_{1} \cdot m}{I}\right) - N_{2} \cdot \left(g_{1}' \cdot sen\gamma_{2} + \cos \gamma_{2} - \frac{b_{2} \cdot R_{1} \cdot m}{I}\right) = m \cdot S_{1} - P$$

Analogamente tem-se que:

$$Fat_{1} \cdot \left(A \cdot \cos \gamma_{1} - B \cdot sen\gamma_{1} + \frac{a_{1} \cdot C \cdot m}{I}\right) + Fat_{2} \cdot \left(A \cdot \cos \gamma_{2} - B \cdot sen\gamma_{2} + \frac{a_{2}C \cdot m}{I}\right) - N_{1} \cdot \left(A \cdot sen\gamma_{1} + B \cdot \cos \gamma_{1} + \frac{b_{1} \cdot C \cdot m}{I}\right) - N_{2} \cdot \left(A \cdot sen\gamma_{2} + B \cdot \cos \gamma_{2} - \frac{b_{2} \cdot C \cdot m}{I}\right) = m \cdot D - P$$

Definindo-se:

$$\delta_{1} \equiv g_{1}' \cdot \cos \gamma_{1} - sen\gamma_{1} + \frac{a_{1} \cdot R_{1} \cdot m}{I}$$

$$\delta_{2} \equiv g_{1}' \cdot \cos \gamma_{2} - sen\gamma_{2} + \frac{a_{2} \cdot R_{1} \cdot m}{I}$$

$$\lambda_{1} \equiv g_{1}' \cdot sen\gamma_{1} + \cos \gamma_{1} + \frac{b_{1} \cdot R_{1} \cdot m}{I}$$

$$\lambda_{2} \equiv g_{1}' \cdot sen\gamma_{2} + \cos \gamma_{2} - \frac{b_{2} \cdot R_{1} \cdot m}{I}$$

$$\beta_{1} \equiv A \cdot \cos \gamma_{1} - B \cdot sen\gamma_{1} + \frac{a_{1} \cdot C \cdot m}{I}$$

$$\beta_{2} \equiv A \cdot \cos \gamma_{2} - B \cdot sen\gamma_{2} + \frac{a_{2} \cdot C \cdot m}{I}$$

$$\varphi_{1} \equiv A \cdot sen\gamma_{1} + B \cdot \cos \gamma_{1} - \frac{b_{1} \cdot C \cdot m}{I}$$

$$\varphi_{2} \equiv A \cdot sen\gamma_{2} + B \cdot \cos \gamma_{2} - \frac{b_{2} \cdot C \cdot m}{I}$$

O sistema agora fica:

$$Fat_1 \cdot \delta_1 + Fat_2 \cdot \delta_2 - N_1 \cdot \lambda_1 - N_2 \cdot \lambda_2 = m \cdot S_1 - P$$
(39)

$$Fat_1 \cdot \beta_1 + Fat_2 \cdot \beta_2 - N_1 \cdot \varphi_1 - N_2 \cdot \varphi_2 = m \cdot D - P$$

$$\tag{40}$$

$$N_1 = \frac{Fat_1 \cdot \delta_1 + Fat_2 \cdot \delta_2 - N_2 \cdot \lambda_2 - m \cdot S_1 + P}{\lambda_1}$$
(41)

$$N_2 = \frac{Fat_1 \cdot \delta_1 + Fat_2 \cdot \delta_2 - N_1 \cdot \lambda_2 - m \cdot S_1 + P}{\lambda_2}$$
(42)

Substituindo a equação (41) na equação (42), tem-se:

$$N_{2} = \frac{Fat_{1} \cdot (\lambda_{1} \cdot \beta_{1} - \delta_{1} \cdot \varphi_{1}) + Fat_{2} \cdot (\lambda_{1} \cdot \beta_{2} - \delta_{2} \cdot \varphi_{1}) - m \cdot (D \cdot \lambda_{1} + S_{1} \cdot \varphi_{1}) + P \cdot (\lambda_{1} - \varphi_{1})}{\lambda_{1} \cdot \varphi_{2} - \lambda_{2} \cdot \varphi_{1}}$$
(43)

Substituindo a equação (42) na equação (40), tem-se:

$$N_{1} = \frac{Fat_{1} \cdot (\lambda_{1} \cdot \beta_{1} - \delta_{1} \cdot \varphi_{2}) + Fat_{2} \cdot (\lambda_{2} \cdot \beta_{2} - \delta_{2} \cdot \varphi_{2}) - m \cdot (D \cdot \lambda_{2} - \varphi_{2} \cdot S_{1}) + P \cdot (\lambda_{2} - \varphi_{2})}{\lambda_{2} \cdot \varphi_{1} - \lambda_{1} \cdot \varphi_{2}}$$
(44)

Defindo-se:

$$d_{1} \equiv \frac{\lambda_{1} \cdot \beta_{1} - \delta_{1} \cdot \varphi_{2}}{\lambda_{2} \cdot \varphi_{1} - \lambda_{1} \cdot \varphi_{2}}$$

$$e_{1} \equiv \frac{\lambda_{2} \cdot \beta_{2} - \delta_{2} \cdot \varphi_{2}}{\lambda_{2} \cdot \varphi_{1} - \lambda_{1} \cdot \varphi_{2}}$$

$$u_{1} \equiv \frac{m \cdot (D \cdot \lambda_{2} - \varphi_{2} \cdot S_{1}) + P \cdot (\lambda_{2} - \varphi_{2})}{\lambda_{2} \cdot \varphi_{1} - \lambda_{1} \cdot \varphi_{2}}$$

$$d_{2} \equiv \frac{\lambda_{1} \cdot \beta_{1} - \delta_{1} \cdot \varphi_{1}}{\lambda_{1} \cdot \varphi_{2} - \lambda_{2} \cdot \varphi_{1}}$$

$$e_{2} \equiv \frac{\lambda_{1} \cdot \beta_{2} - \delta_{2} \cdot \varphi_{1}}{\lambda_{1} \cdot \varphi_{2} - \lambda_{2} \cdot \varphi_{1}}$$

$$u_{2} \equiv \frac{m \cdot (D \cdot \lambda_{1} + S_{1} \cdot \varphi_{1}) + P \cdot (\lambda_{1} - \varphi_{1})}{\lambda_{1} \cdot \varphi_{2} - \lambda_{2} \cdot \varphi_{1}}$$

Temos finalmente que

$$N_1 = Fat_1 \cdot d_1 + Fat_2 \cdot e_1 - u_1 \tag{45}$$

$$N_2 = Fat_1 \cdot d_2 + Fat_2 \cdot e_2 - u_2 \tag{46}$$

Os coeficientes $(d_1, d_2, e_1, e_2, u_1, u_2)$ das equações (45) e (46) dependem apenas de características físicas, geométricas e do estado atual do veículo $(x_c, y_c, \alpha, \dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\alpha})$. Portanto, para garantir $(N_1 > 0 \in N_2 > 0)$ devem-se considerar as inequações a seguir:

$$Fat_1 \cdot d_1 + Fat_2 \cdot e_1 - u_1 > 0$$
$$Fat_1 \cdot d_2 + Fat_2 \cdot e_2 - u_2 > 0$$

 $Fat_1 \cdot d_1 + Fat_2 \cdot e_1 > u_1$ $Fat_1 \cdot d_2 + Fat_2 \cdot e_2 > u_2$

No entanto, como o controle visa também evitar o deslizamento, as forças de atrito ($Fat_1 e Fat_2$) são limitadas pelo coeficiente de atrito estático entre a roda e o terreno (μ), da seguinte forma:

$$\frac{|Fat_i|}{N_i} \le \mu , i=1,2$$
$$-\mu \cdot N_i \le Fat_i \le \mu \cdot N_i , i=1,2$$

Além disto, outro fator que limita as forças de atrito é a saturação do motor. Esta força de saturação F_{SAT} é a máxima força que os motores do robô conseguem fornecer ao sistema através de seus torques.

Logo:

 $-F_{SAT} \leq Fat_i \leq F_{SAT}$, i=1,2



Figura 13 – Domínio das forças de atrito limitadas pela força de saturação dos motores e as forças normais.

Os valores das forças de atrito que satisfazem todas as condições acima, irão gerar uma região $D = \{(Fat_1, Fat_2)\}$ tipicamente com o aspecto da Fig. 14.



Figura 14 – Região $D = \{(Fat_1, Fat_2)\}$ que pertence ao conjunto solução do problema de estabilidade.

Assim, existe mais de uma solução ($Fat_1 e Fat_2$) que pertence ao conjunto solução do problema de estabilidade. Desta forma, é utilizado um critério de otimização para a escolha dos valores de ($Fat_1 e Fat_2$) a serem aplicados no sistema.

O critério de otimização utilizado para o controle de estabilidade busca escolher (Fat_1 e Fat_2), pertencente a D, de modo a minimizar a função O(Fat_1, Fat_2) definida a seguir:

$$O \equiv \left| \frac{Fat_1}{N_1} - \mu_d \right| + \left| \frac{Fat_2}{N_2} - \mu_d \right|$$
(47)

onde μ_d é o valor desejado para que a razão $\frac{Fat_i}{N_i}$, especificado pelo usuário. Esse valor desejado (μ_d) é limitado fisicamente pelo coeficiente de atrito $(|\mu_d| \le \mu)$. Note que o sinal de μ_d , controla o sentido do movimento do veículo.

Para a escolha de μ_d é necessário considerar alguns fatores importantes:

- 1. Se μ_d for escolhido próximo ao coeficiente de atrito (μ), podem-se obter maiores acelerações e também fazer com que o robô vença situação de aclive e declive mais acentuado. No entanto, o sistema se encontra mais próximo de uma situação de derrapagem, podendo evoluir para uma situação de instabilidade.
- 2. Se μ_d tiver um valor muito pequeno, o robô encontrará dificuldades em superar situações de aclives e declives e terá menores valores de aceleração possíveis devido às forças de atrito aplicado serem menores.

3.2. Descrição do Algoritmo de Controle de Estabilidade

O algoritmo de controle de estabilidade é descrito da forma a seguir:

(1) Entrada dos parâmetros físicos (m, μ, F_{SAT}, I) , geométricos (r, L, h) e das variáveis de estado $(x_c, y_c, \alpha, \dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\alpha})$ atual e também de μ_d .

(2) Obtenção da região D, através do cálculo das forças de atrito ($Fat_1 e Fat_2$) que satisfazem as restrições abaixo:

- $-F_{SAT} \le Fat_1 \le F_{SAT}$ e $-F_{SAT} \le Fat_2 \le F_{SAT}$ saturação do motor.
- N₁>0 e N₂>0 condição de estabilidade (não descolamento das rodas).
- $\frac{|Fat_1|}{N_1} \le \mu$ e $\frac{|Fat_2|}{N_2} \le \mu$ condição de não deslizamento.
- (3) Verifica-se se $D \neq \emptyset$.

Em caso afirmativo: busca solução que minimize a função O(Fat₁, Fat₂).

$$O = \left| \frac{Fat_1}{N_1} - \mu_d \right| + \left| \frac{Fat_2}{N_2} - \mu_d \right|$$

Em caso negativo: não há nenhuma ação que possa ser efetivada pelo controle para manter a estabilidade do sistema.

(4) Após a obtenção de Fat_1 e Fat_2 , estes valores são repassados aos atuadores do sistema de locomoção do robô. O torque a ser aplicado em cada roda será, portanto, igual à *Fat* desejada multiplicada pelo raio da roda.

A Fig. 15 mostra o fluxograma do controle de estabilidade proposto. O próximo capítulo descreve as simulações do sistema.



Figura 15 - Fluxograma do Controle

4 Simulações

No intuito de avaliar o controle de estabilidade proposto e visualizar o comportamento do sistema, foi utilizado um simulador. Para tal, foi implementado no programa Matlab 7.01 um algoritmo e seu detalhamento será mostrado a seguir. Entretanto se faz necessário explicar a modelagem do terreno como foi feito com o veículo no capítulo 2.

4.1. Modelagem do terreno

O perfil do terreno é obtido através de pontos discretizados (x,y), onde y = f(x). Estes pontos possuem um espaçamento constante em x, representado na Fig. 16:



Figura 16 - Discretização do perfil do terreno.

Em seguida, é calculada a direção a f(x) normal em cada ponto da curva do perfil do terreno. Tomando essas normais, com magnitude igual à distância do raio da roda do veículo, é possível gerar uma nova curva, chamada de curva de centro. Esta curva representa a trajetória seguida pelo centro das rodas, assumindo o não-descolamento das mesmas, ilustrada nas Figuras 17 e 18.



Figura 17 - Trajetória seguida pelos eixos das rodas.

Através da aplicação de um tratamento matemático apropriado aos pontos (x_{CC}, y_{CC}) da curva de centro, é possível transformar esta curva em uma função onde os seus pontos serão da forma $(x_{CC}, g(x_{CC}))$, onde x_{CC} é um conjunto de pontos em x que não necessariamente distam dx entre si.



Figura 18 - Curva de centro.

O Cálculo dos pontos da curva de centro é feito da seguinte forma:

A normal unitária à curva do perfil do terreno em um ponto (x,f(x)), pertencente a mesma, é calculada como mostrado abaixo, conforme [4]:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla C_p}{\left| \nabla C_p \right|}$$

onde:

$$C_{p} = y - f(x) = 0$$
$$\nabla C_{p} = -f'(x)\vec{i} + 1 \cdot \vec{j}$$
$$\left|\nabla C_{p}\right| = \sqrt{[f'(x)]^{2} + 1}$$

Assim resulta:

$$\mathbf{n} = \frac{-f'(x)\vec{i} + 1\cdot\vec{j}}{\sqrt{[f'(x)]^2 + 1}}$$

onde $\vec{i} e \vec{j}$ são os vetores unitários nas direções x e y, respectivamente.

Tomando o vetor $\mathbf{u} = r \cdot \mathbf{n}$ como sendo o vetor que liga o ponto (x,f(x)) ao seu correspondente (x_{cc} , y_{cc}) pertencente à curva de centro, tem-se que:

$$\mathbf{u} = r \cdot \left(\frac{-f'(x)\vec{i}}{\sqrt{[f'(x)]^2 + 1}} + \frac{\vec{j}}{\sqrt{[f'(x)]^2 + 1}} \right)$$
(48)

$$\mathbf{u} = (x_{CC}, y_{CC}) - (x, f(x)) \tag{49}$$

De (48) e (49), obtêm-se os seguintes valores para (x_{CC}, y_{CC}) :

$$x_{CC} = x - r \cdot \left(\frac{f'(x)}{\sqrt{[f'(x)]^2 + 1}}\right)$$
(50)

$$y_{cc} = y + r \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{[f'(x)]^2 + 1}}\right)$$
 (51)

Na maioria das vezes o contato entre a roda e o terreno ocorre em um único ponto, podendo ter situações onde este contato se faz em mais de um ponto. Nas simulações aqui descritas, para os perfis utilizados, assume-se que não existem mais de dois pontos de contato. Observando as equações acima nota-se que para o cálculo da normal é necessário que f(x) seja derivável no ponto onde se deseja calcular a normal, no entanto nos perfis dos terrenos utilizados podem existir pontos que não possuem derivadas, não possibilitando o cálculo dos pontos correspondentes da curva de centro através das equações (50) e (51) acima.

Os casos acima mencionados são tratados da seguinte forma:

a) No ponto (x,f(x)) em que f(x) não é diferenciável e f'(x - δε) > f'(x + δε), para δε∈ ℜ^{*}₊, a roda irá girar em torno deste ponto. Sendo que a trajetória descrita pelo seu centro geométrico será um arco de circunferência de raio r e centro em (x, f(x)), conforme ilustrado na Fig. 19. Este arco é incluído então na discretização de (x_{cc}, g(x_{cc})).



Figura 19 - Ponto do perfil do terreno não diferenciável.

b) Nos pontos onde f'(x - δε) < f'(x + δε), para δε∈ ℜ^{*}₊, haverá uma situação limite onde a roda terá dois pontos de contato com o terreno, conforme a Fig. 20.



Figura 20 - Situação onde existe dois pontos de contato da roda com o terreno.

Conforme se pode ver na Fig. 20, os pontos do terreno delimitados pelos valores de $x \in]x_{c1}, x_{c2}[$ não terão pontos correspondentes na curva de centro, pois os mesmos não são pontos de contato. E os pontos P_{c1} e P_{c2} irão gerar o mesmo ponto na curva de centro.

c) Em regiões onde o raio de curvatura (r_c) de f(x) é menor que o raio da roda haverá também dois pontos de contato, tendo as mesmas o mesmo tratamento que os casos do item (b) acima. A Fig. 21 ilustra esta situação.



Figura 21 - Situação onde o raio de curvatura do perfil do terreno é menor que o raio da roda.

A interseção do contorno das rodas com o perfil do terreno f(x) determina os pontos de contato, $P_1 e P_2$, das rodas com o terreno.

Os ângulos formados pelas tangentes do perfil do terreno, nos pontos de contato P_1 e P_2 , com a horizontal, determinam os ângulos γ_1 e γ_2 . No capítulo 2 estes ângulos foram ilustrados na Fig. 8.

Para cada perfil selecionado e mantendo os parâmetros iniciais, foram feitos duas simulações. A primeira sem utilizar o controle e a segunda utilizando-o.

4.2. Descrição do Algoritmo Utilizado na Simulação

O algoritmo da simulação é dividido em cinco módulos, sendo que cada um deles é responsável por:

Módulo I:

É responsável pela entrada dos parâmetros físicos e geométricos do veículo, das coordenadas (x_c, y_c) e das velocidades $(\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\alpha})$ iniciais do centro de gravidade. Este módulo também calcula os pontos $(x_{CC}, g(x_{CC}))$ pertencentes à curva de centro e o valor inicial do ângulo de inclinação do veículo (α) de modo que ambas as rodas estejam em contato com o terreno.

Os parâmetros físicos são os seguintes:

m = massa do veículo em [kg].

I = momento de inércia de massa do veículo em relação ao centro de gravidade em [kg.m²].

 F_{SAT} = força máxima gerada pelo motor em [N], sendo que a mesma é considerada igual em ambos os sentidos (este valor é igual ao torque máximo nas rodas dividido pelo seu raio).

g = aceleração da gravidade local $[m/s^2]$.

 μ = coeficiente de atrito entre a roda e o terreno.

Os parâmetros geométricos são:

r = raio da roda em [m].

 L_1 = distância longitudinal, em [m], do centro geométrico da roda 1 ao centro de massa, conforme a definição feita no capítulo 2.

 L_2 = distância longitudinal, em [m], do centro geométrico da roda 2 ao centro de massa, conforme a definição feita no capítulo 2.

 h_1 = distância vertical, em [m], do centro geométrico da roda 1 ao centro de massa, conforme a definição feita no capítulo 2.

 h_2 = distância vertical, em [m], do centro geométrico da roda 2 ao centro de massa, conforme a definição feita no capítulo 2.

Variáveis de estado atual:

 x_c = abscissa do centro de gravidade do veículo.

 y_c = coordenada do centro de gravidade do veículo.

 \dot{x}_c = velocidade do centro de gravidade do veículo na coordenada x, em [m/s].

 \dot{y}_c = velocidade do centro de gravidade do veículo na coordenada y, em [m/s].

 $\dot{\alpha}$ = velocidade angular do centro de gravidade do veículo, em [rad/s].

Módulo II:

É responsável por calcular as coordenadas (x_{c_i}, y_{c_i}) e as velocidades $(\dot{x}_{c_i}, \dot{y}_{c_i})$ dos centros geométricos das rodas 1 e 2.

A partir da curva de centro, é feito o posicionamento o veículo no terreno utilizando o ângulo de inclinação do veículo (α) e as coordenadas do centro de gravidade (x_c, y_c).

Módulo III:

Este módulo é responsável por calcular os parâmetros relacionados às equações dinâmicas e às restrições.

São calculados primeiramente os pontos de contato da roda com o terreno, $P_1 = [x_1, y_1]$ e $P_2 = [x_2, y_2]$. Consequentemente são obtidos os ângulos de contato γ_1 e γ_2 que são ilustrados na Fig. 8.

Também são determinados os parâmetros de restrição através do cálculo das equações (22 - 28) do Capítulo 3.

Este módulo apresenta um comportamento diferenciado em relação ao uso ou não do controle de estabilidade para as forças de atrito (Fat_1 e Fat_2) demonstrado a seguir:

1. Simulação com Controle de Estabilidade:

Neste caso, as forças de atrito e os parâmetros de restrição são calculados obtendo assim a região D, das possíveis forças de atrito, demonstrados no Capítulo 3 na Fig. 14. Depois de obtida a região D, verifica se é possível ou não aplicar forças (Fat_1 , Fat_2) que estejam nesta região. Em caso afirmativo, é feita uma otimização minimizando as razões $\frac{Fat_i}{N_i}$, i=1,2, para obter um valor para as forças Fat_1 e Fat_2 . Caso contrário a simulação é interrompida.

2. Simulação sem Controle de Estabilidade:

Quando não é considerado o controle de estabilidade, as forças de atrito são parâmetros de entrada do sistema. Arbitrários, definidos a priori.

Módulo IV:

É responsável por fazer o cálculo da dinâmica do sistema calculando $\mathbf{u} = G^{-1}U$. Através da obtenção do vetor $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_c & \ddot{y}_c & \ddot{\alpha} & N_1 & N_2 \end{bmatrix}^T$, determinamse os valores das forças normais (N₁ e N₂) e das acelerações do centro de gravidade (\ddot{x}_c , \ddot{y}_c e $\ddot{\alpha}$).

Módulo V:

Este módulo é responsável por calcular o novo estado do veículo, que servirá como dado de entrada para os cálculos seguintes. O cálculo deste novo estado é feito como mostra a seguir:

$$x_{c}^{(N)} = x_{c}^{(N-1)} + \dot{x}_{c}^{(N-1)} \cdot dt + \frac{\ddot{x}_{c}^{(N-1)} \cdot (dt)^{2}}{2}$$
$$y_{c}^{(N)} = y_{c}^{(N-1)} + \dot{y}_{c}^{(N-1)} \cdot dt + \frac{\ddot{y}_{c}^{(N-1)} \cdot (dt)^{2}}{2}$$
$$\alpha_{c}^{(N)} = \alpha_{c}^{(N-1)} + \dot{\alpha}_{c}^{(N-1)} \cdot dt + \frac{\ddot{\alpha}_{c}^{(N-1)} \cdot (dt)^{2}}{2}$$

onde:

 $x_c^{(N)}$, $y_c^{(N)}$ e $\alpha_c^{(N)}$ representam a posição e a inclinação do centro de gravidade do veículo no estado novo.

 $x_c^{(N-1)}$, $y_c^{(N-1)}$ e $\alpha_c^{(N-1)}$ representam a posição e a inclinação do centro de gravidade do veículo no estado atual.

 $\dot{x}_c^{(N-1)}$, $\dot{y}_c^{(N-1)}$ e $\dot{\alpha}_c^{(N-1)}$ representam as velocidades do centro de gravidade do veículo no estado atual.

 $\ddot{x}_{c}^{(N-1)}$, $\ddot{y}_{c}^{(N-1)}$ e $\ddot{\alpha}_{c}^{(N-1)}$ representam as acelerações do centro de gravidade do veículo no estado atual.

Fazendo um truncamento de segunda ordem na expansão em série de Taylor de x_c , y_c e α em torno do ponto $x_c^{(N-1)}$, $y_c^{(N-1)}$ e $\alpha_c^{(N-1)}$, podem-se determinar as velocidades do veículo da seguinte forma:

$$\dot{x}_{c}^{(N)} = \dot{x}_{c}^{(N-1)} + \ddot{x}_{c}^{(N-1)} \cdot dt$$
$$\dot{y}_{c}^{(N)} = \dot{y}_{c}^{(N-1)} + \ddot{y}_{c}^{(N-1)} \cdot dt$$
$$\dot{\alpha}_{c}^{(N)} = \dot{\alpha}_{c}^{(N-1)} + \ddot{\alpha}_{c}^{(N-1)} \cdot dt$$

onde:

 $\dot{x}_c^{(N)}$, $\dot{y}_c^{(N)}$ e $\dot{\alpha}_c^{(N)}$ representam as velocidades do centro de gravidade do veículo no estado novo.

O valor de dt considerado é constante, sendo que quanto menor este valor melhor será a aproximação do novo estado do sistema (x_c , $y_c \in \alpha$). No entanto, quanto menor o valor de dt mais passos serão utilizados, aumentando o tempo de simulação. Assim, deve-se buscar um valor de dt que busque um equilíbrio entre a precisão e o custo computacional.

A partir da obtenção da posição e da inclinação do veículo, é feito um ajuste do veículo ao terreno obtendo assim os valores reais de x_c , y_c e α . Este algoritmo de ajuste será detalhado a seguir.

4.3. Algoritmo de Ajuste

É fundamental fazer o ajuste do veículo ao terreno nas simulações, pois sempre haverá um erro residual de posicionamento quando se comparam as variáveis do novo estado calculado com o próximo ponto do terreno que é arbitrário. Este erro residual, de segunda ordem, é resultado da discretização do terreno e das aproximações das séries de Taylor no Módulo IV. A Fig. 22 ilustra este procedimento para corrigir o erro residual.



Figura 22 – Ajuste da curva de centro para simulação.

O ajuste inicial busca o ângulo α , para um dado ponto do centro de gravidade (x_c, y_c).

Para achar a inclinação do veículo, faz-se uma varredura de $\left] -\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right[$ para encontrar α que minimize S_E, dada abaixo:

$$S_{E} = |E_{1}| + |E_{2}|$$
$$E_{1} = y_{c1} - g(x_{c1})$$
$$E_{2} = y_{c2} - g(x_{c2})$$

Onde: g(x) representa a curva de centros.

Substituindo o valor de y_{c1} e y_{c2} acima, tem-se que:

$$E_1 = y_c - L_1 \cdot sen(\alpha) - h_1 \cdot \cos(\alpha) - g(x_{c1})$$
$$E_2 = y_c + L_2 \cdot sen(\alpha) - h_2 \cdot \cos(\alpha) - g(x_{c2})$$

Logo:

$$S_{E}(\alpha) = \left| y_{c} - L_{1} \cdot sen(\alpha) - h_{1} \cdot \cos(\alpha) - g(x_{c1}) \right| + \left| y_{c} + L_{2} \cdot sen(\alpha) - h_{2} \cdot \cos(\alpha) - g(x_{c2}) \right|$$

Assim, deseja-se encontrar α tal que $S_E(\alpha) \leq \varepsilon$, onde ε é uma dada tolerância.

Sendo E_1 e E_2 definido como acima, deseja-se encontrar um α que resulte em:

Sendo:

 $\Delta E = \left| E_1 - E_2 \right|$

Deseja-se encontrar α que minimize ΔE .

Uma vez encontrado α_E que minimize ΔE , calculam-se as novas coordenadas do centro de gravidade (CG) da seguinte forma:

$$E = \frac{(E_1 + E_2)}{2}$$
$$y_c^n = y_c - E$$
$$\alpha^n = \alpha_E$$

Desta forma, mantendo x_c e colocando o veículo com inclinação $\alpha = \alpha_E$, resta apenas ajustar y_c para garantir o posicionamento no estado novo com o mínimo de erro.

O fluxograma abaixo ajuda a compreender melhor o algoritmo utilizado para simular o comportamento dinâmico do veículo.

As equações resultantes servirão para a implementação do algoritmo em linguagem de programação.

A Fig. 23 ilustra o fluxograma do algoritmo utilizado nas simulações.



Figura 23 - Fluxograma que demonstra o algoritmo utilizado nas simulações.

5 Resultados das Simulações

Para gerar resultados tangíveis, foi modelado um veículo com as mesmas dimensões e características do segundo protótipo do Robô Ambiental Híbrido – Chico Mendes, Fig. 24. Sendo assim, optou-se por escolher os perfis de terreno que obedecem às condições impostas pelo Laboratório de Robótica do CENPES. Estas condições ditam que o robô deve ser capaz de vencer situações de aclive e declive com inclinação em torno de 30 graus.



Figura 24 - Desenho em Solidworks do segundo protótipo.

Desta forma, foram selecionados cinco perfis de terrenos que levavam em consideração o grau de dificuldade para o robô superá-lo. A análise foi feita inicialmente com duas rampas de diferentes inclinações, seguido de três perfis senoidais com freqüências diferentes e amplitude constante, que serão melhor detalhados na seção 5.2.

5.1. Parâmetros Iniciais Utilizados na Simulação

A simulação foi feita utilizando os parâmetros iniciais já definidos no capítulo anterior, e possuem os seguintes valores:

Parâmetros físicos:

m = 120 [kg]. I = 15,22 [kg.m²] (Este valor foi calculado através do software SolidWorks 2007). $F_{SAT} = 320$ [N]. g = 9,8 [m/s²].

Parâmetros geométricos:

r = 0,3 [m]. L = L_1 + L_2 = 0,7 [m]. h₁ = h₂ = 0,2 [m] (Este valor foi calculado através do software SolidWorks 2007).

A força de saturação F_{SAT} utilizada foi calculada a partir do valor real de torque que o motor podia oferecer. Segundo as especificações do Laboratório de Robótica, este valor de torque máximo é igual a 96 Nm. Para calcular a força F_{SAT} foi necessário dividir o valor do torque pelo braço de alavanca, que neste caso específico é o raio da roda do veículo, como mostra a Fig. 25.



Figura 25 - Relação da F_{SAT} com o torque máximo permitido pelo motor.

5.2. Perfil do Terreno

Além dos parâmetros geométricos e físicos acima descritos, o perfil do terreno é considerado também como dado de entrada.

Nas simulações realizadas, foram utilizados terrenos com perfis do tipo senoidal e acidentados.

5.3. Análise Quantitativa

Os resultados das simulações serão descritos separadamente em dois casos, sem controle e utilizando o controle de estabilidade proposto. Para tal, foram usados os mesmos parâmetros de entrada nos dois casos para ser possível uma análise comparativa.

Em todas as simulações foram gerados os gráficos das forças de atrito, das normais às rodas, e da razão $\left(\frac{F_i}{N_i}\right)$, onde F_i é a máxima força entregue pelo motor ao sistema que é igual a razão entre o torque e o raio da roda $\left(\frac{\tau}{R}\right)$.

5.3.1. Simulação sem Controle de Estabilidade

As simulações desta seção foram feitas utilizando a máxima força entregue pelo motor ao sistema $\left(F_1 = F_2 = \frac{\tau}{R} = 320N\right)$. O critério utilizado para escolher estas forças, foi se aproximar do modelo real já testado na Amazônia que trabalhava com torque igual nas quatro rodas e no valor máximo de saturação do motor.

Para a simulação sem controle os perfis de terreno utilizados fazem com que haja o descolamento das rodas do veículo e o deslizamento das rodas no terreno. Esta escolha foi feita para mostrar posteriormente a eficiência do controle de estabilidade proposto.

O primeiro terreno utilizado na simulação foi do tipo senoidal, apresentando uma inclinação máxima de 39 graus, coeficiente de atrito $\mu = 0.5$ e velocidade inicial de 2 m/s na direção x. Nestas condições, não foi possível que o veículo atravessasse o terreno sem que houvesse o descolamento das rodas dianteiras que e a capotagem logo a seguir.



Figura 26 – Perfil senoidal com inclinação de 39 graus.

A Fig. 27 ilustra este comportamento através das forças normais, e pode-se observar que existe o descolamento das rodas dianteiras ($N_2 = 0$) em torno de xc = -0,5 metros. Onde xc é a coordenada do centro de gravidade do veículo na direção x.

Mesmo perdendo o contato das rodas dianteiras com o terreno, o robô ainda percorre aproximadamente 2 metros até que ocorra a capotagem.



Figura 27 – Forças Normais para perfil senoidal sem controle.

Na Fig. 28, pode-se observar que desde o início da simulação ocorre o deslizamento das rodas dianteiras e logo após o descolamento destas, as rodas traseiras começam a deslizar. Este deslizamento das rodas resulta em um desperdício de energia, haja vista que as forças enviadas pelo motor ao sistema (F_i) , não são integralmente aproveitadas como se pode observar na Fig. 29.



Figura 28 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal sem controle.





Figura 29 – Aproveitamento das forças no sistema para perfil senoidal sem controle.

Na Fig. 30, mostra as forças de atrito que atuam no sistema. Devido ao deslizamento das rodas estas forças são diferentes das aplicadas pelo motor.



Figura 30 - Forças de atrito para perfil senoidal sem controle.

O outro terreno utilizado nesta simulação apresenta um perfil pouco acidentado, conforme mostrado na Fig. 31, e coeficiente de atrito $\mu = 0,3$. Nesta simulação novamente foi utilizado uma velocidade inicial igual a 2 m/s na direção x.



Figura 31 - Terreno pouco acidentado.

Na Fig. 32, pode-se observar que ocorre o descolamento das rodas dianteiras, no entanto este descolamento não evoluiu para a capotagem do veículo.

A simulação foi parada mesmo sem a capotagem, pois o interesse da mesma era verificar se ocorreria ou não o descolamento das rodas.



Figura 32 - Forças Normais para terreno pouco acidentado sem controle.

A Fig. 33 mostra que todas as rodas inicialmente já estão deslizando no terreno, porém as rodas traseiras conseguem não deslizar em um intervalo de aproximadamente de 3 metros. No entanto após o descolamento das rodas dianteiras ocorre novamente o deslizamento das rodas traseiras, sendo que este perdura até o final da simulação.



Na Fig. 34, pode-se observar que o aproveitamento das forças que atuam nas rodas dianteiras neste perfil é consideravelmente baixo, sendo seu maior valor de aproximadamente 40%. Nas rodas traseiras este aproveitamento é maior, no entanto no início e no fim da simulação ele fica abaixo de 100% resultando também em desperdício de energia.

Este desperdício pode ser notado através do gráfico das forças de atrito agindo no sistema (Fig. 35), o qual mostra que as mesmas apresentam valores inferiores as forças aplicadas pelo motor.

Aproveitamento das Forças entregues pelos motores



Figura 34 – Aproveitamento das forças no sistema para terreno pouco acidentado sem controle.



Figura 35 – Forças de atrito para terreno pouco acidentado sem controle.

5.3.2. Simulação com Controle de Estabilidade

As simulações desta seção, diferentemente da anterior, não utilizam valores de entrada constantes para as forças de acionamentos das rodas provenientes do torque do motor (F_i). Estas são calculadas através do algoritmo de controle proposto, descrito no capítulo 3.

Foram realizados quatro simulações em perfis diferentes. As duas primeiras tiveram como intuito avaliar a eficiência do controle proposto em relação ao caso sem controle. A terceira simulação visa avaliar a resposta do controle, quando atuando em um perfil com coeficiente de atrito variável. A quarta simulação mostra que a partir de uma entrada de controle qualquer (neste caso um controle proporcional de velocidade com compensação de gravidade), pode-se utilizar o controle proposto para garantir a estabilidade do sistema.

As Figuras 36 à 38 são referentes a simulação feita utilizando o perfil senoidal com inclinação máxima de 39 graus, coeficiente de atrito $\mu = 0,5$ e velocidade inicial de 2 m/s na direção x. Nesta simulação $\mu_d = 0,8 \cdot \mu$, sendo que este valor foi escolhido para se ter uma margem de segurança em relação ao deslizamento e conseqüentemente ao descolamento.

A Fig. 36 mostra o gráfico das normais no qual se verifica que as mesmas sempre se encontram com valores seguros, apresentando um valor mínimo um pouco menor que 250 N.



Figura 36 - Forças Normais para perfil senoidal com controle.

A Fig. 37 mostra que o controle proposto consegue manter as razões $\left(\frac{F_i}{N_i}\right)$ iguais ao valor desejado na maior parte da simulação. Nas regiões onde isto não ocorre, as razões $\left(\frac{F_i}{N_i}\right)$ assumem valores menores que μ_d (não comprometendo a estabilidade do robô) devido à restrição da máxima força fornecida pelos motores ao sistema (F_{sat}) . Isto pode ser verificado na Fig. 38, que mostra o gráfico das forças de atrito. Como não ocorre deslizamento, as forças de atrito são iguais as forças de atuação $(Fat_i = F_i)$.





Figura 38 - Forças de atrito para perfil senoidal com controle.

As Figuras 39 à 41 são referentes a simulação feita utilizando o perfil pouco acidentado (Fig. 31), coeficiente de atrito $\mu = 0,3$ e velocidade inicial de 2 m/s na

direção x. Nesta simulação $\mu_d = 0.8 \cdot \mu$, sendo que este valor foi escolhido para se ter uma margem de segurança em relação ao deslizamento e conseqüentemente ao descolamento.

A Fig. 39 mostra o gráfico das normais e novamente se verifica que as mesmas sempre se encontram com valores seguros, apresentando um valor mínimo um pouco menor que 100 N.



Figura 39 - Forças Normais para terreno pouco acidentado com controle.

A Fig. 40 mostra que o controle proposto consegue manter as razões $\left(\frac{F_i}{N_i}\right)$ iguais ao valor desejado $\mu_d = 0,24$ (80% do valor do coeficiente de atrito) na maior parte da simulação. Nas regiões onde isto não ocorre, as razões $\left(\frac{F_i}{N_i}\right)$ assumem valores menores que μ_d (garantindo que as rodas não descolem do terreno).

A Fig. 41 mostra o gráfico das forças de atrito, que como na simulação anterior são iguais às forças de atuação ($Fat_i = F_i$), pois não ocorre deslizamento. Nesta figura nota-se a atuação do controle sobre as forças de atuação, de modo a variá-las para que suas curvas sejam similares às curvas das respectivas normais. As regiões onde o controle não consegue obter esta similaridade devem-se a restrição de saturação do motor.



Figura 40 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado com controle.



Figura 41 - Forças de atrito para terreno pouco acidentado com controle.



Figura 42 – Terreno pouco acidentado com µ variável.

A Fig. 42 acima mostra um terreno pouco acidentado com regiões de diferentes coeficientes de atrito, onde foi realizada uma simulação utilizando o controle de estabilidade proposto para verificar a sua efetividade em terrenos com atrito variável. Nesta simulação foi novamente fixado $\mu_d = 0.8 \cdot \mu$ e a velocidade inicial igual a zero.

A Fig. 43 mostra o gráfico das normais, sendo que o pico que ocorre nas normais na parte inicial da simulação deve-se a irregularidade do terreno. Analisando-se esta figura nota-se que a variação abrupta do coeficiente de atrito gera variações bruscas nos valores das forças normais, no entanto devido à eficácia da atuação do controle de estabilidade estas variações não fazem com os valores das normais se aproximem de zero.


Figura 43 – Normais em terreno pouco acidentado com µ variável com controle.

Na Fig. 44 mostra a eficiência do controle proposto, sendo que o mesmo consegue sempre manter as razões $\frac{F_i}{N_i}$ iguais ao seu valor desejado sem que haja oscilações, que poderiam surgir devido às mudanças abruptas de μ .

A Fig. 45 ilustra o gráfico das forças de atrito. As curvas destas forças também sofrem variações repentinas impostas pelo controle de estabilidade proposto, para que elas acompanhem a forma das curvas das suas respectivas normais.



Figura 44 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ em terreno pouco acidentado com μ variável com controle.



Figura 45 – Forças de atrito em terreno pouco acidentado com µ variável com controle.

A Fig. 46 ilustra o terreno acidentado utilizado na simulação do sistema, que teve como intuito demonstrar que o controle de estabilidade proposto pode trabalhar junto com outros controles (neste caso: controle de velocidade), de modo a garantir a estabilidade do sistema.



Figura 46 - Terreno acidentado com controle de velocidade e de estabilidade.

Esta simulação utilizou coeficiente de atrito $\mu = 0,3$ e velocidade inicial de 2m/s na direção x. Já μ_d traz embutido no seu cálculo o controle de velocidade, sendo o mesmo dado por:

$$\mu_d = K_p \cdot (V_d - V_0) + \tan \alpha$$

Onde:

- K_p : é o ganho proporcional do controle e igual a 10 [s/m];
- V_d : velocidade desejada do centro de massa do robô em [m/s];
- V_0 : módulo da velocidade atual do centro de massa do robô em [m/s];
- $\tan \alpha$: termo que compensa a força de gravidade;
- α : ângulo de inclinação do veículo em relação ao eixo x em [rad].

As Figuras 47 à 50 mostram os resultados obtidos nesta simulação. O gráfico da velocidade (Fig. 47) demonstra que o controle conseguiu manter a velocidade do robô em valores bem próximo ao valor desejado, apresentando um erro máximo de 0,5 m/s devido a acentuada irregularidade do terreno.



Figura 47 – Velocidade ao longo do tempo para perfil acidentado com controle.

A Fig. 48 mostra o gráfico das normais, onde se observa que o controle conseguiu manter os valores das forças normais dentro de uma margem de segurança.



Figura 48 – Normais para perfil acidentado com controle.

Na Fig. 49 pode-se observar que o controle apresenta uma boa velocidade de resposta em relação às variações de μ_d . Também nota-se que o controle atua de modo a manter as razões $\frac{F_i}{N_i}$ bem próximas do valor desejado, através da variação das forças de atrito conforme mostrado na Fig. 50.





Figura 50 – Forças de atrito para perfil acidentado com controle.

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar a eficácia do controle proposto em relação a garantia do não deslizamento e do não descolamento das rodas. O controle de estabilidade desenvolvido mostrou-se ainda ser eficiente em terrenos com coeficiente de atrito baixo e com variações descontínuas.

As simulações também demonstraram que o controle proposto pode ser utilizado em conjunto com um sistema de controle qualquer, trabalhando de modo similar ao controle de torque computado, controlando as forças de acionamento das rodas garantindo a estabilidade do sistema.

6 Experimentos

Dois protótipos do veículo modelado foram construídos e testados em terrenos acidentados. Devido a limitações no sensoreamento destes robôs e a limitação do tempo, não foi possível fazer uma avaliação quantitativa dos algoritmos propostos.

A seguir serão apresentadas as características principais dos dois protótipos construídos e os resultados dos testes feitos em terrenos irregulares e em condições reais de operação.

6.1. Construção do primeiro protótipo

Após estudos sobre as características dos ambientes de operação onde o veículo irá fazer o monitoramento ambiental, e os problemas em relação à locomoção, ao clima local e às tarefas a executar, um primeiro protótipo do Robô Ambiental Híbrido foi construído e testado no Laboratório de Robótica do CENPES.

Suas características são:

- Peso de 5,5 kg.
- Rodas com diâmetro de 270 mm.
- Conjunto de motores com redução de 24 V, com 17 RPM e torque final de 0,3 Nm por roda.
- Conjunto de 20 baterias de Ni-MH recarregáveis de 1,2 V e 2600mAh cada.
- Único comando de suspensão para todas as rodas.
- Sistema tele-operado, possuindo câmera embarcada.



Figura 51 - Primeiro Protótipo do Robô Ambiental Híbrido.

Este protótipo tem a parte estrutural construída em acrílico, e suas rodas feitas de isopor preenchido com polipropileno, apresenta um sistema de visão através de câmera de vídeo, que transmite imagens em tempo real. Não é dotado de sensores funcionais, e todo processamento é feito em um computador remoto que envia via rádio as instruções a serem executadas. A cambagem variável (não modelada nesta dissertação) é controlada por apenas um motor nas quatro rodas, e cada roda dispõe de um motor independente, sendo que as rodas do lado esquerdo e direito trabalham em pares.

As operações que este primeiro protótipo está capacitado a fazer, em relação à sua locomoção, são: deslocamento para frente, para trás, e giro no próprio eixo. Esta última virtude é possível comandando as rodas à sua esquerda e à sua direita em sentidos opostos.

Tendo este apresentado bons resultados nos seus primeiros testes em laboratório, o Laboratório de Robótica do CENPES aceitou o desafio de participar em setembro de 2005 de uma excursão do projeto PIATAM no período em que o Rio Solimões encontrava secando. O objetivo principal de participar desta excursão era aprender um pouco sobre as dificuldades encontradas em campo pelos pesquisadores e testar em condições reais alguns conceitos que seriam úteis aos protótipos futuros.

6.1.1. Teste com o primeiro protótipo

Foram realizados testes no ambiente real de operação, Amazônia, para verificar quais situações que causam o descolamento das rodas do robô e suas conseqüências. A seqüência de imagens apresentadas nas Figuras (66) e (67)

Experimentos

ilustram o problema que pode ocorrer quando em situações de aclive ou declive, quando o robô "perde" uma de suas normais.

No caso descrito, o robô está descendo uma ladeira com inclinação visivelmente acentuada. Além disto, este protótipo tinha a distância h, do seu centro de gravidade até o eixo das rodas, relativamente alta para os parâmetros geométricos e físicos do mesmo. Sendo assim, ao tentar descer, nota-se que as rodas traseiras começam a se descolar do terreno no momento em que a projeção do centro de gravidade dinâmica foge da área projetada formada pelos pontos de contato das rodas ("sombra").



Figura 52 – Condição real de capotagem I.

Para corrigir este problema, o robô deveria acelerar as duas rodas dianteiras, fazendo com que as traseiras "voltassem" ao terreno. Porém, não havendo controle capaz de atuar no sistema, não foi possível evitar a capotagem, uma vez que este protótipo não possuía ação independente entre as rodas dianteiras e traseiras.



Figura 53 - Condição real de capotagem II.

6.2. Construção do segundo protótipo

No dia 07 de Abril de 2006, foi realizado no CENPES o primeiro teste de uma nova versão do Robô Ambiental Híbrido, que teve como objetivo avaliar o desempenho de aspectos importantes do veículo de forma individual e conjunta, tais como: transmissão do movimento através da suspensão; desempenho dos motores das rodas, protocolo IP transmitindo 512 Kbps via rádio; imagem transmitida pela câmera IP; resistência dos equipamentos eletrônicos às vibrações do sistema; a aderência das rodas sobre a grama; a eficácia dos algoritmos de controle; a facilidade de condução do veículo; a captação de dados através de sensores; a movimentação do manipulador; e a flutuabilidade do sistema em movimento, parado e com o braço em operação.

Características:

- Peso aproximado de 120 kg.
- Rodas com diâmetro de 600 mm.
- Conjunto de motores com redução com tensão nominal de operação de 48
 V, com 28 RPM (velocidade final de 3,16 km/h) e torque de 15 Nm por roda.
- Dois conjuntos de baterias, um de 48 V e 7.2 Ah, e outro de 24 V e 5.0 Ah.
- Comando individual de suspensão.



Figura 54 – Segundo protótipo do Robô Ambiental Híbrido sendo testado no CENPES.

6.2.1. Testes com o segundo protótipo

Este segundo protótipo também foi testado na Amazônia, porém no período da cheia do rio Solimões, não criando situações desfavoráveis.

A área onde está sendo construído o CENPES II foi usada para fazer testes mais exigente com o robô.



Figura 55 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte I.

Neste caso, o robô encontra um obstáculo em meio à sua descida. No entanto, ele está sendo manobrado por um operador que, tendo a visão da situação e auxílio de observadores, controla o movimento.



Figura 56 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte II.

Este obstáculo, apesar de ter deixado o robô com inclinação acentuada, conserva a projeção do seu centro de gravidade dentro da área formada pelos pontos de contato das rodas, evitando a capotagem. Tudo isto é conseqüência do h ser relativamente pequeno para os parâmetros geométricos e físicos do mesmo.



Figura 57 - Teste no CENPES II em situação de declive, parte III.

Se esta operação não pudesse ser acompanhada por observadores e fosse realizada de maneira autônoma, necessitaria do uso de uma ação de controle similar à apresentada na seção anterior.

7 Conclusões e Perspectiva

Esta dissertação apresenta um método de controle de estabilidade que visa garantir que as rodas de um robô móvel não irão descolar em um terreno acidentado, evitando situações de instabilidade.

7.1. Contribuição desta dissertação

Em operações que utilizam robôs móveis em terrenos irregulares, é necessário capacitar técnicas de controle para garantir segurança nos movimentos.

No capítulo I, foi descrito um breve histórico sobre os potenciais impactos ambientais que a indústria do petróleo e do gás está levando à região da Amazônia brasileira. Também apresentou-se a importância de se fazer um monitoramento ambiental constante nesta região. Como esta região de selva apresenta dificuldades em locomoção e certos riscos, foram construídos protótipos de robôs móveis para auxiliar neste monitoramento. Algumas aplicações de robôs móveis, em missões que possam colocar em risco a vida humana, também foram apresentadas. O desejo de fazer com que este robô trabalhe com autonomia em seus movimentos foi um fator motivador para esta dissertação.

No capítulo II, foi apresentada a modelagem 2D do robô ambiental hibrido, considerando-o como um corpo rígido. Foi feita uma análise cinemática e dinâmica que permitiu compreender o movimento do robô e construir a partir desses resultados um algoritmo de controle de estabilidade.

No capítulo III, foi detalhado o controle de estabilidade proposto nesta dissertação. Este controle atua no movimento do robô através das forças de atrito, que são escolhidas respeitando critérios otimizados de restrição.

No capítulo IV, são realizadas, a partir dos resultados obtidos nos capítulos anteriores, simulações que ilustram o comportamento dinâmico do robô. Estas servem para avaliar o algoritmo de controle proposto.

No capítulo V, são apresentados os resultados das simulações onde se comprova a efetividade do controle de estabilidade. Para tal, o robô foi simulado em cinco tipos de perfil de terreno diferentes.

No capitulo VI, foi demonstrado como foram construídos os dois protótipos do Robô Ambiental Híbrido – Chico Mendes. Procurou-se também explicitar problemas causados quando existe o descolamento das rodas do robô com o terreno.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho estudou um caso particular que assegura a estabilidade do veículo. Para isto, demonstrou-se ser suficiente garantir o não deslocamento de nenhuma das rodas do robô com o terreno. Trabalhos futuros podem incluir controle de velocidade em conjunto com controle de estabilidade, ou incorporando técnicas para minimizar a energia total dispendida pelo robô.

O controle proposto neste trabalho utiliza como um dos dados de entrada o perfil do terreno. É importante, portanto, que o robô tenha um sistema de navegação que identifique a topografia do terreno, o que pode ser interpretado em trabalhos futuros como uso de câmeras estéreo, de câmeras mono com iluminação estruturada, ou com técnicas de ultra-som.

Além disto, estudos devem ser orientados para generalizar a modelagem 2D para 3D.

8 Bibliografia

- Iagnemma, K., Dubowsky,S. "Mobile Robots in Rough Terrain: Estimation, Motion Planning, and Control with Application to Planetary Rovers". New York: Springer,2004.
- [2] Papadopoulos, Evangelos, Rey, Daniel A. "The Force-Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulator". Vehicle System Dynamics, 33 2000, pp. 29–48.
- [3] Silva, A. "Modelagem de Sistemas Robóticos Móveis para Controle de Tração em Terrenos Acidentados". Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2007.
- [4] http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/mpf/rover.html.
- [5] http://www.generation5.org/content/2005/sim2005.asp.
- [6] http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/pioneer/.
- [7] Takaninish, Atsuo, Tochizawa, Mamoru, Karaki, Hideyuki, Kato, Ichiro.
 "Dynamic Biped Walking Stabilized With Optimal Trunk and Waist Motion". IEEE/RSJ InternationalWorkshop on Inteligent Robots and Systems, '89, Sep. 4-6, 1989, Tsukuba Japan.

9 Apêndice A

9.1. Amazônia

O Brasil detém de 12% a 15% de água doce do planeta e cerca de 80% dessa reserva está concentradas na Amazônia. A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical remanescente do mundo, representando cerca de 40% das florestas tropicais do planeta.



Figura 58 – Floresta Amazônica.

Conhecida como abrigo da maior biodiversidade do mundo, a floresta é formada basicamente por matas de terra firme, matas de várzea, alagadas pelos rios de água barrenta na estação das cheias, e matas de igapós, inundadas quase permanentemente por rios de água preta. A região possui vegetação nativa, com alta densidade vegetal. Boa parte da região passa metade do ano alagada. Altas temperatura e umidade constituem o clima encontrado durante todo o ano.

9.1.1. Indústria do Petróleo e Gás no Amazonas

Cerca de uma dezena de bacias sedimentares estão situadas na Amazônia Legal Brasileira, perfazendo quase 2/3 dessa área territorial. Três delas - bacias do Solimões, Amazonas e Paranaíba - são as mais importantes, não só pelo tamanho (juntas ocupam aproximadamente 1,5 milhão de km²), mas principalmente pelo seu potencial. A bacia do Solimões é a terceira bacia sedimentar em produção de óleo no Brasil, com uma reserva de 132 milhões de barris de petróleo. No entanto, a principal "vocação" da Amazônia é o gás natural. O estado do Amazonas tem a segunda maior reserva brasileira de gás natural do país, com um total de 44,5 bilhões de metros cúbicos. Nas outras duas bacias também têm sido encontradas acumulações de gás.



Figura 59 – Primeiros trabalhadores da Petrobras na Amazônia.

As primeiras descobertas de petróleo na Amazônia ocorreram em 1954, quando a Petrobras encontrou quantidades não comerciais nas cidades de Nova Olinda, Autás Mirim e Maués, no estado do Amazonas. Nos primórdios da Petrobras, as pesquisas foram direcionadas para a bacia do Amazonas, em detrimento da bacia do Solimões. Só em 1976 foi feito o primeiro levantamento de sísmica de reflexão na bacia do Solimões.

A partir de 1978, ano da descoberta da província gaseífera do Juruá, a pesquisa de petróleo na bacia do Solimões foi intensificada.

Em outubro de 1986, o sonho de prospecção petrolífera na Amazônia tornou-se realidade com a descoberta da província do Urucu, a 600 km de Manaus, vide Fig.3. Dois anos depois, o óleo já estava sendo escoado por balsas, através do rio Solimões, até a Refinaria Isaac Sabbá (UN-Reman, Fig.4), na capital do estado. Em 1998 teve início a operação do poliduto, com 285 Km de extensão, entre Urucu e Coari, cidade mais próxima da base petrolífera.



Figura 60 - Base de Urucu.



Figura 61 – Vista aérea da Refinaria Isaac Sabbá – UM-Reman.

A produção de petróleo no Amazonas, em outubro de 2002, de acordo com a Unidade de Negócios da Bacia do Solimões (UN-BSOL), foi de 58.074 barris de óleo por dia, o que representa 3,8% da produção do país (1.524.953 barris/dia) no mesmo período.

O petróleo de Urucu é considerado o de melhor qualidade no país e dele são produzidos, principalmente, derivados mais nobres (de alto valor agregado) como diesel e nafta. A região Amazônica já é auto-suficiente em petróleo e parte de sua produção é exportada para outras refinarias da Petrobras, localizadas em diferentes regiões do país.

Esse petróleo tem características especiais, pois é extremamente leve e por isso não produz asfalto, sendo necessário, portanto, importar petróleo mais pesado da Venezuela. Os 8% restantes da capacidade da refinaria são ocupados pelo petróleo importado, de nome Leona, com o único objetivo de produzir o asfalto necessário para o abastecimento do mercado regional.



Figura 62 - Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN.

Atualmente estão sendo realizados estudos para a substituição desse petróleo importado por um produto similar produzido na bacia de Campos, no Rio de Janeiro. Caso os estudos apontem para a viabilidade da substituição, a UN-Reman passará a refinar unicamente petróleo de origem nacional. Sua capacidade de refino é de 49 mil barris de petróleo por dia, o equivalente a cerca de 2,5% da capacidade de refino instalada no Brasil.

A Petrobras, por meio da UN-BSOL, foi a primeira empresa de petróleo do mundo a ser certificada simultaneamente nas gestões ambiental, com a ISO 14001, e de saúde e segurança no trabalho, com a BS 8800. Atualmente, a UN-BSOL é certificada pelas normas ISO 9002 (que trata da qualidade de produtos e serviços), ISO 14001 e OHSAS 18001, em substituição à BS 8800. A UN-Reman foi a primeira refinaria da Petrobras a obter as certificações nessas três normas que formam um único sistema de gestão.

A preocupação da UN-BSOL com o meio ambiente também pode ser constatada em outras ações da companhia no trabalho de recuperação da vegetação nas áreas de exploração de petróleo em Urucu, realização de campanhas internas e junto às comunidades para a conscientização da questão ambiental e a reciclagem de resíduos orgânicos, sucata e papel. O dinheiro arrecadado com a venda dos materiais reciclados é revertido para atividades filantrópicas da empresa.

As ações ambientais da Petrobras na Amazônia são acompanhadas, por meio de convênios, por entidades de pesquisa e preservação do meio ambiente e órgãos governamentais da região, tais como Instituto de Proteção Ambiental da Amazônia (IPAAM), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Universidade Tecnológica do Amazonas (UTAM) e prefeituras municipais.

9.1.2. Gasoduto Coari – Manaus

A construção do gasoduto Coari-Manaus é um tema antigo que remonta a 1986, quando a Petrobrás anunciou a descoberta das jazidas de gás natural em Urucu. Uma série de fatores impediu o avanço do debate e a definição sobre a viabilidade sócio-ambiental e econômica da obra.

A Petrobrás atua na exploração de petróleo e gás na Amazônia desde 1988 na província de Urucu (AM), na bacia do Rio Solimões, a 650 km da cidade de Manaus. Essa é a maior Unidade de Processamento de Gás Natural do Brasil (UPGN3), com uma produção de mais de seis milhões de m³ de gás natural por dia. O escoamento do petróleo e do gás é feito através de 285 km (140 km submersos) de dutos até a cidade amazonense de Coari. De lá viajam 10 dias de balsa até a cidade de Manaus.



Figura 63 - Transporte de GLP – Gás Liquefeito de Petróleo.

Buscando maior eficiência no escoamento do gás natural e ciente do risco que essas embarcações levam à região, a Petrobrás planejou a construção de dois gasodutos: Coari-Manaus (com 420 km de extensão) e o Urucu-Porto Velho (com 550 km). O gasoduto Coari-Manaus tem sido descrito como marco de uma nova etapa na história do Amazonas. A partir do licenciamento ambiental, outorgado em 26 de Abril de 2004, a Petrobras iniciou os preparativos técnicos e administrativos para começar a construção deste gasoduto.



Figura 64 - Gasoduto Coari – Manaus.

Em meio a esse processo de licenciamento, o governo Estadual recomendou à Petrobrás que contratasse uma instituição com notória competência e elevada credibilidade perante todos os segmentos da sociedade envolvidos direta ou indiretamente com o gasoduto. Surgiu dessa forma um contrato de prestação de serviços entre a Universidade Federal do Amazonas, através do CCA (Centro de Ciências do Ambiente), e a Petrobras. Foi montada uma equipe com 57 pesquisadores, sendo 21 doutores e 12 mestres. A maior e melhor qualificada equipe já montada no Amazonas para um estudo dessa natureza. Esse contrato criou a oportunidade para uma contribuição exemplar da UFAM à sociedade amazonense e, ao mesmo tempo, um apoio financeiro expressivo para o fortalecimento dos principais programas de pesquisas do CCA.

A sociedade amazonense registrou forte demanda para que o gás chegasse até as sedes dos municípios por onde passará o gasoduto, ainda que com certo receio dos impactos sócio-ambientais que acarretaria. Assim sendo, a Petrobras avaliou como viável essa idéia, a qual foi incluída como uma exigência para a licença ambiental.

A Petrobras assumiu esse desafio como parte de sua política de responsabilidade social e investirá mais de R\$ 70 milhões para que o gás chegue também até os municípios de Coari, Codajás, Anori, Anamã, Caapiranga, Manacapuru, Iranduba. Isso permitirá a esses municípios não apenas uma energia

Apêndice A

mais barata, confiável e ecologicamente mais limpa. Permitirá, também, a atração de novas indústrias para esses municípios, especialmente aquelas que podem se beneficiar da co-geração de energia, como é o caso de secadores de madeira, frigoríficos de peixe e olarias.

O licenciamento ambiental para construção do gasoduto Coari-Manaus contém alguns condicionantes fundamentais a serem cumpridos pela Petrobras: evitar a erosão e o entupimento de igarapés; recuperar as áreas degradadas; não permitir, ao longo do duto, a construção de estradas perenes que permitam a invasão de terras e o desmatamento; adotar medidas restritivas à prostituição, com programas educativos e punitivos para trabalhadores da obra, priorizar a contratação de mão-de-obra local; além de programas de geração de renda para famílias de baixa renda; adotar procedimentos eficientes para evitar o aumento de doenças como a malária, entre diversos outros. Esses temas foram identificados pelas equipes técnicas envolvidas no licenciamento ambiental e pelas dezenas de instituições e cerca de três mil cidadãos presentes nas oito audiências públicas realizadas em todos os municípios da área de influência da obra, inclusive Manaus. Essas ações realizadas abrangem e ampliam as prioridades identificadas pelo Estudo de Impactos Ambientais e pelo Relatório de Impactos do Meio Ambiente, elaborados pela Universidade Federal do Amazonas.

Além das medidas de prevenção de impactos ambientais, foi estruturado um Programa de Desenvolvimento Sustentável para as comunidades que estão na área de influência do gasoduto Coari-Manaus, que conta com a participação de mais de 50 instituições, entre órgãos dos governos Municipal Estadual e Federal e instituições de pesquisa e ensino do Amazonas, além de ONGs. Este Programa tem como missão socializar os benefícios do empreendimento, com três objetivos fundamentais: apoiar a construção da cidadania, promover o aumento da renda e fomentar a conservação ambiental.

Essas ações abrangem e ampliam as prioridades identificadas pelos estudos do projeto PIATAM, que será detalhado no item 1.2.1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421087/CA

9.1.3. Riscos Ambientais da Indústria do Petróleo e Gás

Desde 1986, quando a Petrobras descobriu no rio Urucu, afluente do Solimões no coração da região amazônica, a segunda maior reserva de gás e a terceira maior de petróleo do país, tornou-se imperioso o mapeamento de informações desse ecossistema de vital importância para o planeta.

Transportar uma mercadoria tão poluente quanto óleo em meio à sensível vegetação inundada pode ser fatal se faltarem os mecanismos gerenciais necessários em caso de acidente. Quando a atividade petrolífera no meio da selva teve início, eram ainda precários os conhecimentos sobre as particularidades da região. Numa iniciativa pioneira, academia e indústria deram-se as mãos, num projeto batizado de PIATAM, para preencher essa lacuna e interligar os estudos de impacto ambiental com decisões de gerenciamento de riscos operacionais. Alguns dos melhores centros de pesquisa do país emprestam hoje seus avançados métodos de coleta de dados e instrumentos de gerência para ampliar os conhecimentos do meio ambiente e construir uma base de dados que sirva de apoio para a Petrobras produzir energia sem sujar a natureza.

A produção de Urucu gira em torno de cinqüenta e oito mil barris diários de petróleo e seis milhões de metros cúbicos de gás (dos quais a Petrobras processa uma décima parte, reinjetando o restante no solo). Os dois mil homens que trabalham na província petrolífera e os equipamentos são transportados de avião e helicóptero. Um poliduto (gás e petróleo) de 285 quilômetros de extensão ligando Urucu a Coari foi construído na selva com corte mínimo de vegetação. De Coari a Manaus, o óleo é transportado em navios, e nesse trecho os riscos são ainda maiores, pois em ambiente aquáticos a dispersão do óleo não encontra restrição como em ambientes terrestres fazendo com que as proporções do derramamento se tornem enormes.



Figura 65 - Derramamento de óleo em ambientes aquáticos.

9.1.4. Projeto PIATAM

PIATAM é a denominação abreviada do projeto "Monitoramento das Áreas de Atuação da Petrobras: Potenciais Impactos e Riscos Ambientais da Indústria do Petróleo e Gás no Amazonas".

As áreas de abrangência do PIATAM são as rotas fluviais de transporte de Petróleo, gás e derivados da Petrobras e suas contratadas no Estado do Amazonas, nos trechos Manaus Terminal do Solimões – Coari lago – Coari – Urucu. A metodologia proposta no projeto prevê a construção de Sistemas de Informações Ambientais Georreferenciados, associados aos levantamentos de campo e aplicados ao planejamento, à prevenção e ao controle das atividades da indústria do petróleo, incluindo a modelagem das variações sazonais do nível das águas das bacias hidrográficas envolvidas.

O Projeto iniciou-se no mês de janeiro de 2001, com o projeto PIATAM I – Potenciais Impactos Ambientais do Transporte Fluvial de Gás Natural e Petróleo na Amazônia: Análises de Riscos, Planos de Contingência e Estratégias de Recuperação de Áreas Impactadas, tendo como executora a Universidade Federal do Amazonas – UFAM, por meio do Centro de Ciências do Ambiente – CCA e como financiadora a Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia – FINEP, com recursos do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT – Ctpetro.

O Projeto apresentou como objetivo identificar os principais pontos de risco de transporte fluvial de gás natural e petróleo, bem como identificar e avaliar os principais impactos nas áreas potencialmente afetadas, como forma de

Apêndice A

subsidiar a elaboração de planos de contingência e de recuperação de áreas impactadas.

O PIATAM II, financiado pela Petrobras e pela FINEP, iniciou suas atividades em janeiro de 2002, e se constituiu no segundo ciclo do PIATAM. Esse Projeto apresentou como objetivo principal estruturar e disponibilizar informações sobre a produção, transporte e refino de gás e petróleo no Estado do Amazonas, através do monitoramento e da avaliação de riscos ambientais dessas atividades, visando à redução de danos ao meio ambiente e às populações humanas provocados por eventuais vazamentos.

Concluído em junho 2004, o PIATAM II foi resultado do esforço interdisciplinar e interinstitucional de pesquisadores, técnicos e bolsistas da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE-UFRJ e do Instituto de Tecnologia da Amazônia – UTAM, instituições interessadas na aplicação de modernas técnicas de monitoramento das atividades da Petrobras na Amazônia, com base nos princípios de gestão, integrando conceitos de meio ambiente, de qualidade, de saúde e de segurança operacional em projetos de pesquisa. O Projeto PIATAM II contou, também, com a colaboração da Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI, do Centro Integrado de Ensino Superior do Amazonas – CIESA, do Centro Regional de Vigilância de Manaus – CRV e do Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM.

O PIATAM é hoje uma grande iniciativa de pesquisa sócio-ambiental que, além de contar com o apoio da Petrobras e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), agrega importantes instituições de pesquisa do País e ainda alguns subprojetos. Tudo isso fez com que a Finep o reconhecesse não mais como um projeto, mas sim como um programa sistemático e de longo prazo.



Figura 66 - Excursão do Projeto PIATAM em Setembro de 2005.

O projeto PIATAM realiza quatro excursões por ano, percorrendo cerca de 420 km do Rio Solimões, entre Manaus e Coari, coletando dados ambientais e socioeconômicos da região onde a Petrobras realiza uma série de operações. Quando o rio Solimões transborda, alaga uma área de 140 quilômetros de extensão ao longo de suas margens. Num espaço de três a quatro meses, as águas do Solimões nas proximidades de Coari, 360 quilômetros a oeste de Manaus, podem atingir a espantosa diferença de até 15 metros entre a cheia e a seca. As excursões são trimestrais para poder estudar os períodos de seca, enchente, cheia e vazante que o rio apresenta ao longo de um ano.



Figura 67 - Pesquisadores do INPA e da UFAM coletando amostras na Excursão do PIATAM.

9.1.5. Proposta do Laboratório de Robótica do CENPES

Sabendo das dificuldades que os pesquisadores encontram em se deslocar nas mais variadas configurações: água, terra e macrófitas aquática, e monitorar cenários adversos, o Laboratório de Robótica do Centro de Pesquisa da Petrobras - CENPES propôs a criação de sistemas móveis (tais como: veículos tripulados, semi-autônomos ou tele-operados), que possam dar condições para que o homem consiga realizar atividades em locais de difícil acesso e consequentemente pouco conhecidos e estudados. Locais onde o homem não pode permanecer ou mesmo penetrar deverão ser monitorados e, em casos extremos, serem atendidos com recursos de contingência.



Figura 68 - Dificuldades e perigo encontrado pelos pesquisadores em se locomover.

Em Setembro de 2005, foi apresentado e testado, em condições reais, o primeiro protótipo desse sistema, para avaliação dos conceitos propostos. Esse sistema irá se chamar Robô Ambiental Híbrido – Chico Mendes e irá realizar medições, coletar dados e amostras e executar tarefas nestes ambientes inóspitos, sendo capaz de superar obstáculos, podendo se locomover sobre água, terra, terrenos alagados, pântanos e brejos. No capítulo seis será detalhado todo o projeto desse robô e seus primeiros testes estão descritos no Apêndice A.

Testes na Amazônia com o Primeiro Protótipo:

Primeiro Teste (03 de Setembro de 2005)

Comunidade: Santa Luzia do Baixio Localidade: Ilha do Baixio Município: Iranduba

Para poder comandar o robô utilizando apenas uma câmera de vídeo como referência dos seus movimentos, foi necessário montar a cada operação uma pequena base que servia de oficina e permitia controlar o robô com segurança. Como primeira experiência, o local escolhido foi dentro do próprio barco da excursão do PIATAM.

O protótipo foi montado e testado dentro do barco e em seguida levado, com auxílio de uma voadeira (barco motorizado comum na região), para uma margem relativamente próxima (aproximadamente 50m). Com muita cautela dava-se início a primeira operação do robô. O veículo subiu lentamente pela encosta da margem, chegando ao topo e depois retornou para o barco pela água onde possibilitou testar as suspensões.

Este primeiro protótipo já possibilitava uma regulagem na cambagem das rodas, aumentando a distância do fundo do veículo em relação à superfície em questão e modificando o ângulo de ataque das rodas com o solo. Neste caso, como aumentava a área de contato da roda com o terreno, o atrito observado era superior aos que foram testados anteriormente pelo robô. O terreno se assemelhava a uma lama bem fina exigindo o máximo de potência dos motores das rodas.



Figura 69 - Primeiro teste na Amazônia do Robô Ambiental Híbrido.

Segundo Teste (05 de Setembro de 2005)

Comunidade: Nossa Senhora das Graças Localidade: Costa do Pesqueiro II Município: Manacapuru

O teste foi realizado no Lago Preto, local monitorado frequentemente pelos pesquisadores da UFAM e do INPA. Foi um teste mais rápido, aproximadamente 45 min, mais serviu para conhecer outro tipo de terreno. Diferente do anterior, este terreno era mais seco e os motores das rodas trabalharam com uma certa folga. Porém, houve dificuldade de vencer a vegetação local que era composta de plantas flutuantes e canaranas.



Figura 70 - Teste no Lago Preto – Manacapuru.

-Terceiro Teste (06 de Setembro de 2005)

Comunidade: Nossa Senhora de Nazaré Localidade: Costa do Paratari Município: Manacapuru

Este teste foi surpreendente, pois mostrou um novo desafio a ser superado. Um terreno que se origina pela seca do rio formando uma lama muito fina que parecia areia movediça, impedindo qualquer movimento do robô. Como o veículo ficou preso, foi necessário estudar maneiras de resgatá-lo e aproveitar para coletar amostras desse solo para melhor conhecê-lo. Essa amostra se encontra no CENPES onde pesquisadores estudam qual material pode ter melhor aderência para adaptarmos as rodas.



Figura 71 - Teste na Costa do Paratari – Manacapuru.

Após resgatar o robô e constatar que estava em perfeito estado, optou-se em continuar o teste em um lago que permitia avaliar outros conceitos, como velocidade e flutuabilidade variando a cambagem das rodas. Esse lago apresentava em sua margem uma vegetação formada por canaranas, que ao atravessá-la encontrava terra firme. Esta nova superfície era composta de uma areia fina, de quilômetros de extensão, que não dificultava a locomoção do veículo, possibilitando inclusive alterar a cambagem em terra sem forçar o motor que comandava as suspensões.



Figura 72 - Teste no Lago Preto – Manacapuru.

Quarto Teste (07 de Setembro de 2005)

Comunidade: Bom Jesus Localidade: Paraná do Iauara Município: Manacapuru

Neste local havia água calma, um terreno pantanoso e também uma vegetação flutuante (macrófitas) que era um novo desafio que se interessava estudar. Como essa é a condição mais comum que o robô irá enfrentar na região de monitoramento, era necessário saber o comportamento do veículo sobre essa vegetação e como superar os obstáculos utilizando a cambagem das rodas variando a superfície de contato, interferindo diretamente no atrito e alterando a força nas rodas devido à mudança do raio de ação.

Este teste serviu como um valioso instrumento de estudos de conceitos a serem aplicados nos próximos robôs, e apontou para a direção que deveriam ser conduzidos os novos estudos.



Figura 73 - Teste no Paraná do Iauara – Manacapuru.

Quinto Teste (09 de Setembro de 2005)

Comunidade: Matrinxã Localidade: Costa do Matrinxã Município: Codojás

Nesse local havia um tronco atravessado no rio. Optou-se em colocar o robô para tentar atravessar mais esse desafio. Como os testes anteriores exigiram muito esforço das engrenagens dos motores das rodas, esta não suportou e fraturou, mas logo foi trocada, deixando-o novamente operacional.



Figura 74 - Teste na costa do Matrinxã – Codojás.

Sexto Teste (12 de Setembro de 2005)

Comunidade: Santa Luzia do Buiuçuzinho Localidade: Costa do Buiuçuzinho Município: Coari

Este último teste só foi realizado pela importância do local, Lago Coari, pois nessa região têm acontecido casos preocupantes de malária e a coleta de amostras desse lago tem sido acompanhada com muita atenção pelos pesquisadores da Amazônia.



Figura 75 - Teste no Lago Coari – Coari.

Os resultados obtidos na primeira viagem à Amazônia trouxeram grande inspiração para a construção de um outro robô mais robusto e dotado de inteligência embarcada, sensores e um manipulador com três graus de liberdade.

Teste na Amazônia com o Segundo Protótipo:

Em Maio de 2006, na Amazônia, o robô foi testado, agora no período em que o Rio Solimões encontrava-se cheio. Para viabilizar o teste, foi necessário mobilizar uma balsa da Petrobras que servia como oficina para montar e desmontar o robô e preparar cada operação. Para auxiliar na manipulação do robô, que pesa aproximadamente 115 kg, foi mobilizado um caminhão munk.



Figura 76 - Robô sendo colocado na água pelo caminhão munk.

Primeiro Teste (21 de Maio de 2006)

Comunidade: Santa Luzia do Baixio Localidade: Ilha do Baixio Município: Iranduba

Nessa viagem a chuva atrapalhou muito e, como o robô ainda não estava totalmente vedado, ele só pode ser testado quando o tempo estava melhor. Este teste foi feito em duas etapas, a primeira de manhã e a outra à tarde.

Na primeira etapa do teste, o robô foi colocado na água e cuidadosamente testado em todas as suas funcionalidades. Esse veículo era operado ora com a sonda de multi-parâmetros, ora com o coletor de amostras, ambos fixados no manipulador de três graus de liberdade, que facilitava a coleta.

O coletor de amostras é um recipiente de acrílico preso a uma câmera submarina que permite uma análise visual simples da porção de água coletada. A sonda permite fazer a leitura de alguns parâmetros químicos da água, como por exemplo: PH, oxigênio dissolvido, salinidade, temperatura e condutividade.



Figura 77 - Teste na Ilha do Baixio - Iranduba

Na segunda etapa do teste, o robô foi tele-operado até chegar a um lago, que estava a uma distância de 600 metros da base, cruzando locais onde havia moradia, causando certo espanto nos moradores. Neste trecho, todo o movimento foi acompanhado de perto por um pequeno barco de apoio que servia também para auxiliar na condução do robô e escolher a trajetória.

Segundo Teste (22 de Maio de 2006)

Comunidade: Santa Luzia do Baixio Localidade: Ilha do Baixio Município: Iranduba



Figura 78 - Teste na Ilha do Baixio – Iranduba.

Como estava no período da cheia do Rio Solimões, quase toda região estava alagada e o robô só enfrentava dificuldades para desviar de árvores e superar a grande quantidade de troncos que apareciam no trajeto.



Figura 79 - Teste na Ilha do Baixio – Iranduba.

Terceiro Teste (22 de Maio de 2006)

Comunidade: Nossa Senhora das Graças Localidade: Costa do Pesqueiro II Município: Manacapuru

A comunidade Nossa Senhora das Graças pertencente ao município de Manacapuru foi o local escolhido para realização do terceiro teste com o robô ambiental híbrido. Nesta comunidade, o engenheiro Ney Robinson realizou uma palestra na Escola Municipal Getúlio Vargas, com o objetivo de apresentar à comunidade, aos professores e aos alunos o robô que logo fará parte do convívio deles.



Figura 80 - Palestra na Escola Municipal Getúlio Vargas - Manacapuru.

Depois da apresentação feita na escola, foi feito um convite para acompanhar parte do teste. Como havia ansiedade em relação à reação da comunidade, surpreendeu o fato de ver quão interessados estavam os ribeirinhos ainda que com um pouco de receio do desconhecido robô. Para este teste, o operador ficou no barco onde foi instalado a base de controle e o comando era enviado ao robô mediante as ordens emitidas através de um rádio de mão pela equipe que se encontrava próximo ao veículo. Como havia uma grande quantidade de crianças acompanhando este teste, todo e qualquer movimento era primeiramente estudado para garantir a segurança das mesmas.



Figura 81 - Teste acompanhado pela comunidade.

A próxima etapa de teste consistia em conduzir o robô mata adentro para avaliar o comportamento da comunicação, monitorando assim a potência do sinal recebido e comparando com valores de especificação.



Figura 82 - Teste no Lago do Tamanduá – Manacapuru.

Como nesta etapa o operador não tinha nenhuma visibilidade do robô, a operação foi dividida em duas partes: primeiro o operador obedecia à equipe que acompanhava os testes o mais perto possível; e depois, utilizando a câmera de vídeo do robô, o conduziu de volta a base. Sem o auxílio da equipe que estava dando suporte na trajetória o robô na volta, a operação demorou o dobro do tempo que na ida.


Figura 83 - Imagens captadas pelo Robô Ambiental Híbrido.