

# 1 Introdução

Em outubro de 1986 a Petrobras descobriu a província petrolífera de Urucu (AM), situada na bacia do Rio Solimões em plena floresta Amazônica a 600 km da cidade de Manaus. Sendo que dois anos mais tarde, ou seja em 1988, começou a exploração dessa reserva petrolífera.

A planta de Urucu (Fig. 1) é a maior Unidade Produtora de Gás Natural do Brasil (UPGN3), com uma produção de mais de seis milhões de metros cúbicos de gás natural por dia. O petróleo lá prospectado é considerado o de melhor qualidade do país, sendo dele produzidos principalmente derivados mais nobres (de alto valor agregado) como diesel e nafta (Santos [1]).



Figura 1 - Base de Urucu.

No entanto, um dos principais problemas encontrado em Urucu é quanto ao transporte do petróleo e gás natural, haja vista que esta reserva petrolífera se encontra encravada na floresta Amazônica e qualquer acidente pode causar grandes impactos sobre o meio ambiente.

De 1988 a 1998 a produção de Urucu era escoada até a Refinaria Isaac Sabbá (UN-Reman), situada em Manaus, através de balsas. Em 1998 teve início a operação de um poliduto, com 285 km de extensão, entre Urucu e Coari, cidade mais próxima da base petrolífera. Sendo que de Coari o petróleo e o gás viajam 10 dias de balsa até Manaus.

Buscando maior eficiência no escoamento do gás natural e ciente do risco que essas embarcações levam à região, a Petrobras planejou a construção de dois gasodutos: Coari-Manaus (com 420 km de extensão, Fig. 2) e Urucu-Porto Velho (com 550 km).



Figura 2 - Gasoduto Coari – Manaus.

Para monitorar esses quase mil quilômetros de dutos em uma região de difícil acesso e evitar desastres ambientais, a Petrobras, através do projeto Cognitus, braço tecnológico do projeto Piatam (Potenciais Impactos e Riscos Ambientais da Indústria de Óleo e Gás na Amazônia), está desenvolvendo uma série de robôs, apelidados de AmazonBots.

Esses robôs têm o objetivo de detectar quaisquer anomalias ambientais, especialmente aquelas provocadas por vazamento de gás ou óleo, além de coletar dados sobre o meio ambiente e disponibilizá-los em tempo real (via satélite) para uma base de dados em Coari, de onde serão enviados ao Rio de Janeiro, também via satélite.

Dentre os modelos a serem construídos, está o Robô Ambiental Híbrido (RAH), um robô móvel que poderá ser operado via satélite ou tripulado. As Figuras 3 e 4 mostram o primeiro e segundo protótipos, respectivamente, do RAH desenvolvido pelo Laboratório de Robótica do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Melo (CENPES) da Petrobras.

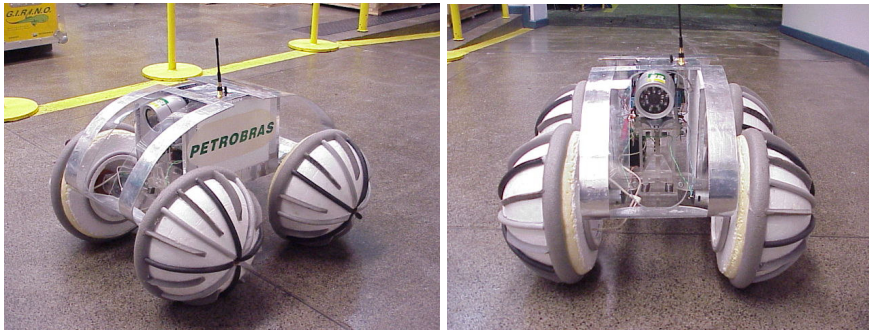


Figura 3 - Primeiro protótipo do RAH.



Figura 4 - Segundo protótipo do RAH.

O RAH terá características de projeto especiais para poder se deslocar na Amazônia devido aos diferentes tipos de terrenos encontrados, tais como: matas de terra firme, matas de várzea, alagadas pelos rios na estação das cheias e matas de igapó, inundadas permanentemente, possuindo ainda uma alta densidade vegetal. A Fig. 5 mostra uma típica paisagem encontrada na Amazônia.



Figura 5 - Terreno típico da Região Amazônica.

As margens do rio Solimões próximo a Coari são de matas de várzea, sendo que no período da cheia o rio transborda e alaga uma área de 140 quilômetros de extensão floresta adentro, por isso o RAH tem também a capacidade de se deslocar tanto na terra quanto na água.

Nos últimos anos ocorreu um grande crescimento no desenvolvimento e pesquisa de robôs móveis. Isso ocorreu, principalmente devido ao grande leque de aplicações da robótica móvel, sendo utilizada em tarefas de alto risco ao homem como: em indústrias mineradoras, manejo e manipulação de materiais perigosos [2,3,4]; em áreas de difícil acesso, tais como: exploração espacial [4,5], áreas de atividade vulcânica (Caltabiano [6]) e também em outras atividades não nocivas nas áreas industrial, médica, ambiental e ainda utilizados em tarefas domésticas (Albagul [7]). A Fig. 6 abaixo mostra o *rover* Sojourner, utilizado pela NASA em uma missão em Marte no ano de 1997.

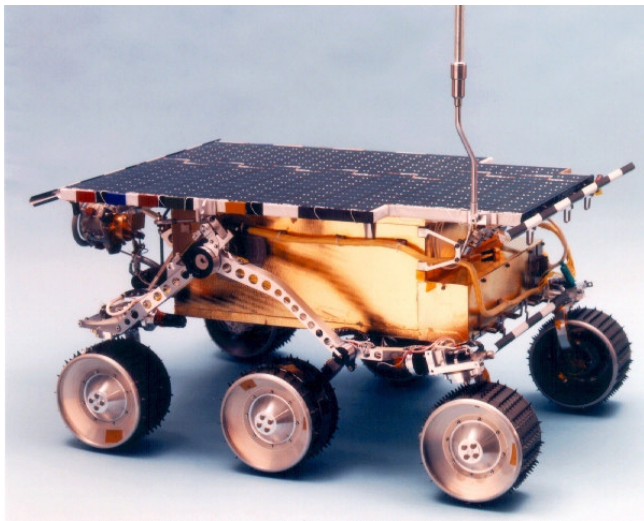


Figura 6 - Robô Sojourner do Laboratório de Propulsão a Jato da NASA.

Dentre os vários tipos de mecanismos de locomoção utilizados em robótica móvel, há de se destacar o que utiliza rodas. Tendo este, como principais vantagens um menor consumo de potência, uma maior velocidade e disponibilidade para suportar altos carregamentos (Grand [8]).

O movimento de robôs móveis em terrenos acidentados envolve interações complexas entre suas rodas e o solo. Sendo que tais interações estão relacionadas às propriedades físicas e geométricas do solo. Assim, é fator preponderante no movimento do robô, em tais terrenos, manter uma adequada tração nas rodas. Pois, um excessivo deslizamento das rodas pode fazer o robô perder estabilidade (capotar) ou desviar da rota desejada. Também, se uma força excessiva é aplicada sobre uma região do terreno, pode levar o mesmo a ceder deixando as rodas presas (Iagnemma [2]).

Além disso, devido às limitações quanto à capacidade de armazenamento de energia no robô, é necessário que se consiga gerar o movimento desejado com um mínimo consumo de potência. Desta forma, é fundamental para robôs móveis, trafegando em terrenos acidentados, a utilização de um controle de tração que consiga um elevado desempenho do seu sistema de locomoção com um mínimo consumo de energia.

Para isso, o mesmo deve buscar otimizar a tração em cada roda de modo a obter um movimento satisfatório em terrenos muito acidentados e minimizar o consumo de potência em terrenos suaves.

O desenvolvimento de controle de tração para terrenos acidentados tem sido motivado nos últimos anos, principalmente, para aplicações espaciais. Missões espaciais recentes têm utilizado robôs móveis (*rovers*) para coletar amostras de solos, minerais, etc em outros planetas (Balaram [5]). Sendo que nestes ambientes eles encontram os mais variados tipos de terrenos (arenoso, pedregoso, etc), tendo assim que utilizar um controle de tração que leve em consideração estes terrenos irregulares.

O controle de tração apresenta um grande número de trabalhos de pesquisa aplicados a veículos de passageiros, trafegando em estradas planas (Anwar [9]).

Uma técnica muito utilizada pela indústria automobilística é o ABS (*anti-lock braking system*), que consiste em usar a informação do deslizamento de cada roda para corrigir a velocidade da mesma, limitando assim o deslizamento (Sakai et al. [10]). Métodos baseados no sistema ABS podem ser derivados para serem usados no controle de tração de *rovers* em terrenos acidentados.

Contudo, tais métodos não levam em conta a cinemática e o modelo físico do *rover*. Desta forma eles são limitados quando utilizados em terrenos muito acidentados, além do que as velocidades só são alteradas quando o deslizamento já ocorreu e o sistema reage com um certo atraso, gerando assim erros na localização do robô.

Um dos principais inconvenientes quanto à implementação de tais métodos é que os mesmos assumem conhecidas as velocidades lineares, as quais são difíceis de serem medidas ou estimadas para robôs em baixas velocidades (Iagnemma [2]).

Em Lamon & Siegwart [11] é apresentado um método que propõe a minimização da razão entre as forças de tração e normal em cada roda, as quais são medidas com sensores colocados na própria roda, para o controle de seu deslizamento. Este método tem a vantagem de não requerer o conhecimento das características do terreno e da velocidade do robô, sendo que o mesmo obteve bons resultados em simulações realizadas, entretanto não foram realizados experimentos práticos para validá-lo em situações reais. Este método tem como inconveniente o custo e a complexidade das rodas utilizadas.

Há ainda modelos que se baseiam em obter um certo valor de deslizamento ótimo ( $S_{cr}$ ) entre as rodas e o solo de forma a se conseguir uma máxima força de tração. O valor de  $S_{cr}$  depende da combinação pneu/solo, variando consideravelmente para diferentes combinações [12,13]. Essa abordagem tem os seguintes inconvenientes:

- A hipótese de a roda ser flexível e o solo rígido, o que nem sempre é factível;
- Ser dependente do conhecimento de  $S_{cr}$  para cada tipo de combinação pneu/solo, apresentando baixa performance em solos com composição bastante heterogênea ;
- Necessitar conhecer a velocidade do veículo e as forças normais atuando em cada roda.

No entanto, Burg & Blazevic [14] apresentaram uma abordagem baseada na estimação de  $S_{cr}$  que não utiliza o conhecimento das características do solo, porém a mesma só é válida para terrenos planos e é muito suscetível a erros devido a variações no terreno ou vibrações do robô.

Em Chatila et al. [15] o controle de tração atua através da comparação das velocidades das rodas. Sendo que o mesmo escolhe algumas rodas para serem livres, ou seja, terem contribuição nula na tração do veículo, e compara a velocidade dessas com as das outras rodas acionadas. É considerado que as rodas livres não sofrem deslizamento, sendo desta forma que sua velocidade angular multiplicada pelo seu raio deve igualar a velocidade linear do veículo. Uma vez conhecida a velocidade linear do veículo, através das velocidades das rodas livres, pode-se calcular o deslizamento das rodas acionadas.

A escolha das rodas livres se baseia no conhecimento das forças normais agindo sobre o veículo, sendo muito difícil e custoso obter esses valores em terrenos irregulares. Esse método apresenta outro problema, que é o levantamento da relação entre torque e deslizamento para as rodas livres, sendo que essa relação está intimamente ligada ao tipo de solo e à sua geometria.

Iagnemma [2] apresentou um método de controle de tração para terrenos acidentados que utiliza como dados de entrada medições das propriedades do terreno e de sua geometria, para otimizar o torque com o intuito de obter máxima tração nas rodas ou mínimo consumo de potência, dependendo da dificuldade local do terreno. Esta abordagem não se baseia em sistemas de distribuição de torque ou medidas de deslizamento das rodas, tendo como principal parâmetro a medição dos ângulos de contato entre as rodas e o solo (Fig. 7). O mesmo apresentou bons resultados, tanto nas simulações como nos experimentos realizados.

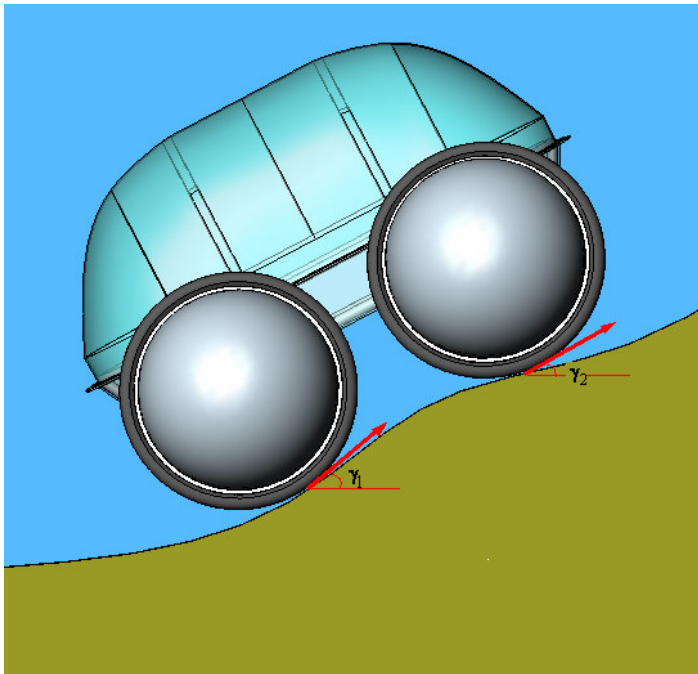


Figura 7 - Ângulos de contato ( $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ ).

Em Caltabiano & Muscato [6] é feita uma comparação entre o método de controle de tração para terrenos acidentados (CTTA) proposto por Iagnemma [2] e um controle de tração implementado com um controle de velocidade proporcional-integral (PI). Os resultados do CTTA, considerando baixos ruídos nos sensores utilizados na abordagem, apresentaram grande superioridade em

termos da relação (força de atrito)/(força normal) em relação ao controle PI, demonstrando assim a sua efetividade em terrenos acidentados.

Contudo, o método de controle de tração para terrenos acidentados utiliza uma abordagem quase-estática na formulação do problema, não considerando os efeitos dinâmicos. Além disso, o mesmo modela o robô como corpo rígido e apresenta como função objetivo empregada na otimização do sistema, uma função que decide entre a minimização do deslizamento ou da potência de forma isolada, tendo como parâmetro de comparação os ângulos de contato do veículo.

A presente dissertação, por outro lado, aplica uma abordagem dinâmica na formulação do problema, e utiliza dois modelos para análise e simulação do sistema robótico móvel, o primeiro considerando o robô como um corpo rígido e o segundo modelando as suspensões do robô para incluir efeitos de flexibilidade e amortecimento.

O controle de tração também busca prover ao robô uma adequada tração, para o mesmo vencer os obstáculos em terrenos muito acidentados, e minimizar o consumo de potência em terrenos suaves. A lei de controle proposta assegura ao veículo robótico vencer os obstáculos ao mesmo tempo em que controla uma determinada velocidade desejada ( $V_d$ ) do seu centro de massa, a qual é considerada um dado de entrada e que pode ser calculada no módulo de planejamento do movimento do robô. A potência é minimizada sempre que existir mais que uma combinação das forças de tração do veículo (provenientes do atrito entre as rodas e o solo) para gerar  $V_d$ .

Esse método de otimização tem a vantagem de não precisar escolher o valor de um limiar que decida entre o controle de velocidade, de estabilidade, ou a minimização da potência, uma vez que o valor desse limiar irá variar com o tipo de relevo do terreno.

Visando atingir os objetivos propostos a presente dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a análise: cinemática direta e inversa, estática e dinâmica do robô, modelado como corpo rígido.

No Capítulo 3 há o desenvolvimento do modelo dinâmico do veículo considerando as suspensões flexíveis e com um certo amortecimento.

No Capítulo 4 encontra-se o desenvolvimento da lei de controle, tanto para o modelo de corpo rígido quanto para o de suspensão flexível.



O Capítulo 5 descreve a implementação do programa de simulação do sistema desenvolvido utilizando o software MatLab 6.5.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados das simulações realizadas, analisando cada simulação e comparando os resultados dos modelos de corpo rígido e de suspensão flexível.

O Capítulo 7 é a conclusão sobre o controle de tração proposto e propõe possíveis trabalhos futuros.

Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas e o Apêndice A com a prova da otimização das razões entre o módulo da forças de atrito e as forças normais em cada roda do veículo na análise estática.