

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.

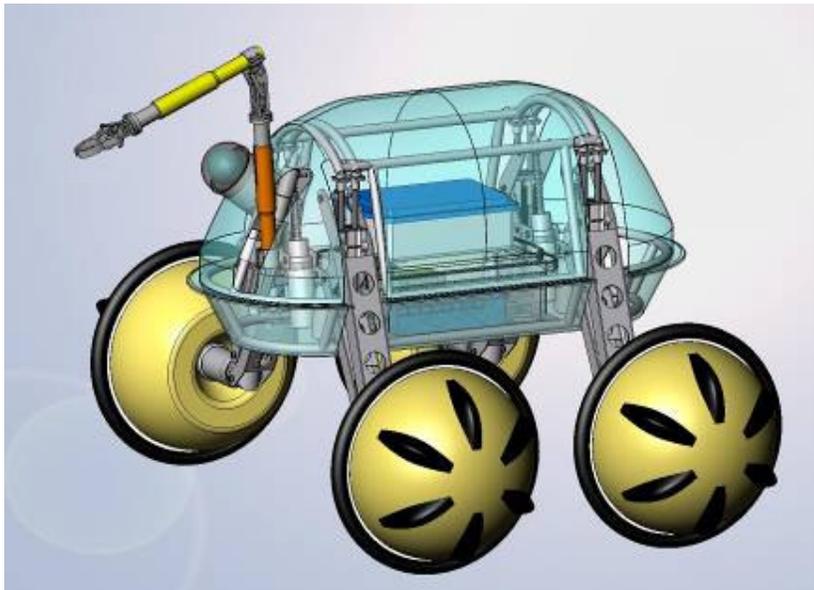


Figura 24 - Desenho em Solidworks do segundo protótipo.

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 frequências 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:

$$m = 120 \text{ [kg]}.$$

$$I = 15,22 \text{ [kg.m}^2\text{]} \text{ (Este valor foi calculado através do software SolidWorks 2007).}$$

$$F_{SAT} = 320 \text{ [N]}.$$

$$g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}.$$

Parâmetros geométricos:

$$r = 0,3 \text{ [m]}.$$

$$L = L_1 + L_2 = 0,7 \text{ [m]}.$$

$$h_1 = h_2 = 0,2 \text{ [m]} \text{ (Este valor foi calculado através do software SolidWorks 2007).}$$

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.

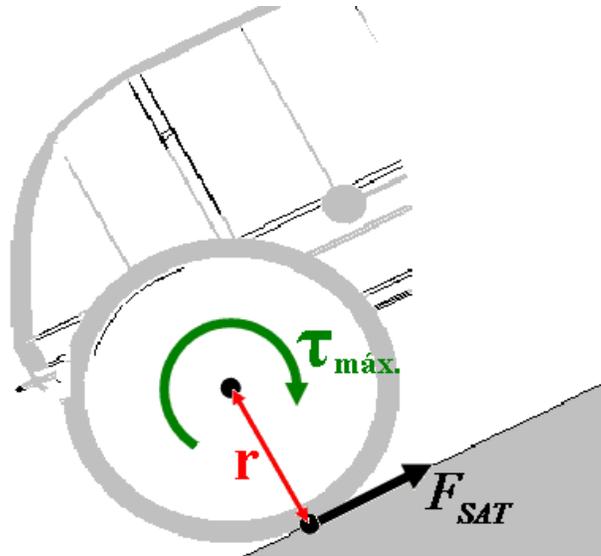


Figura 25 - Relação da F_{SAT} com o torque máximo permitido pelo motor.

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 $\left(F_1 = F_2 = \frac{\tau}{R} = 320 N \right)$. 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.

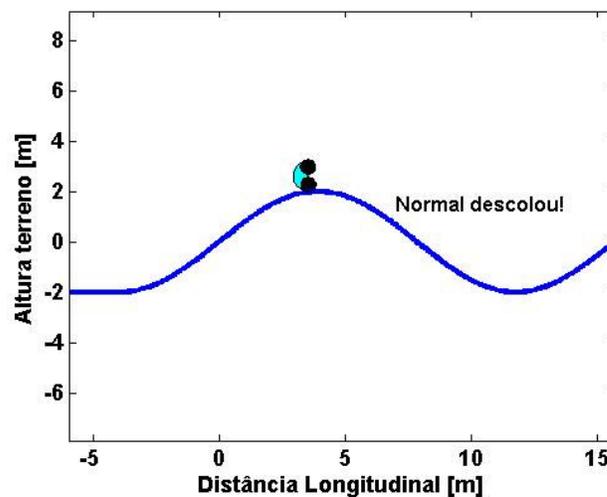


Figura 26 – Perfil senoidal com inclinação de 39 graus.

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 $x_c = -0,5$ metros. Onde x_c 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.

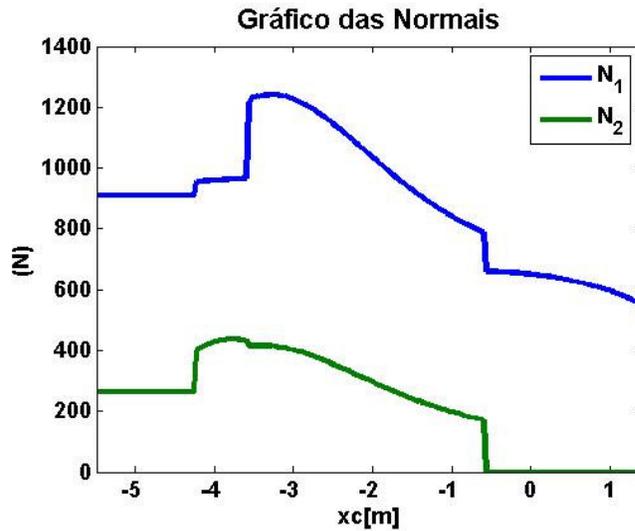


Figura 27 – Forças Normais para perfil senoidal sem controle.

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.

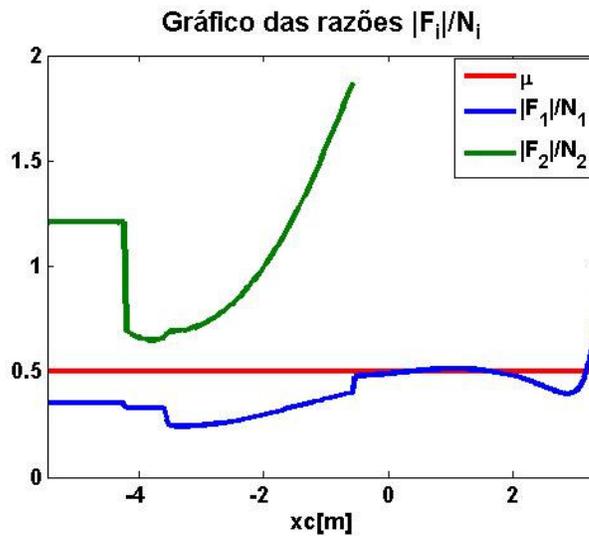


Figura 28 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal sem controle.

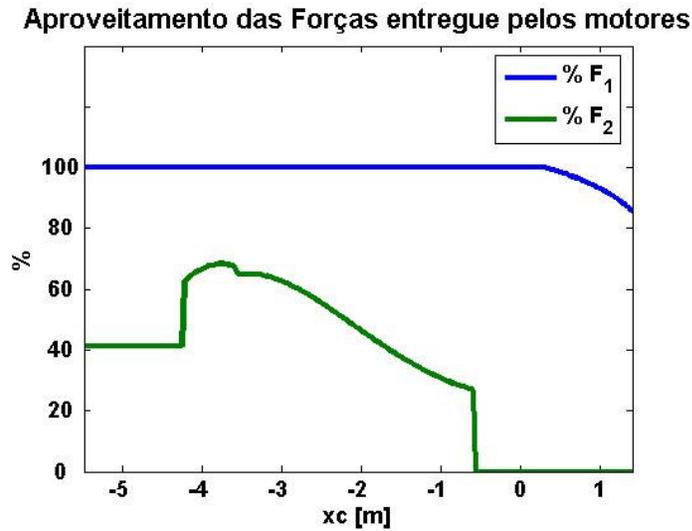


Figura 29 – Aproveitamento das forças no sistema para perfil senoidal sem controle.

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.

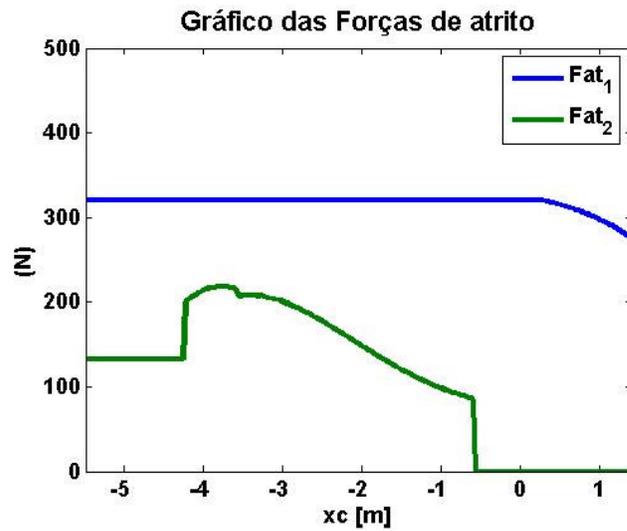


Figura 30 - Forças de atrito para perfil senoidal sem controle.

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.

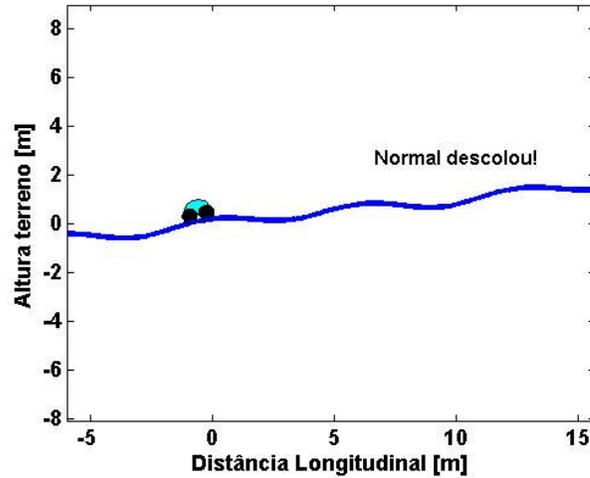


Figura 31 – Terreno pouco acidentado.

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.

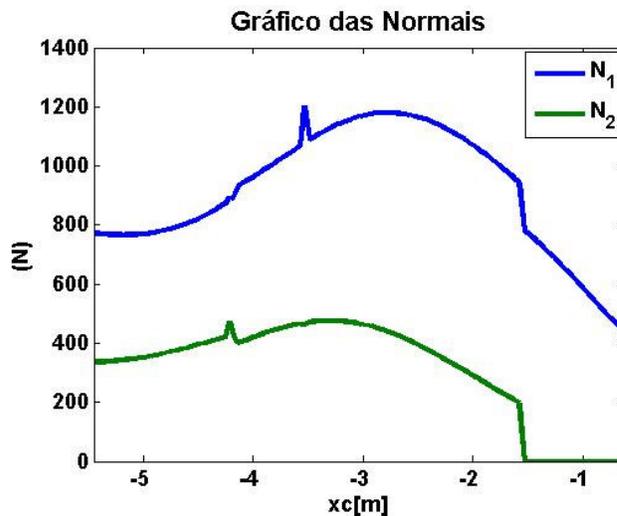


Figura 32 - Forças Normais para terreno pouco acidentado sem controle.

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.

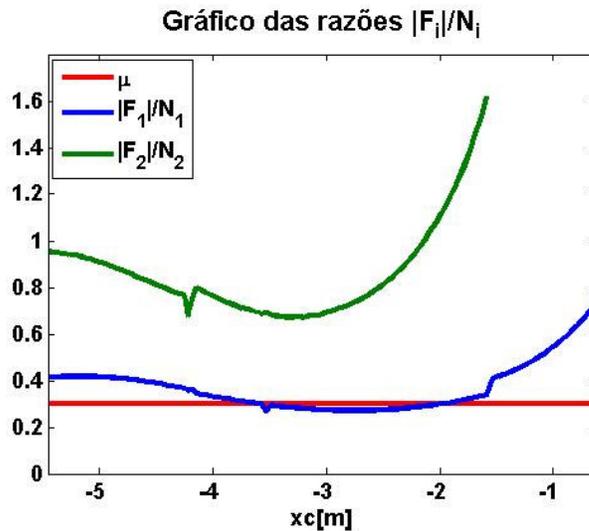


Figura 33 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado sem controle.

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

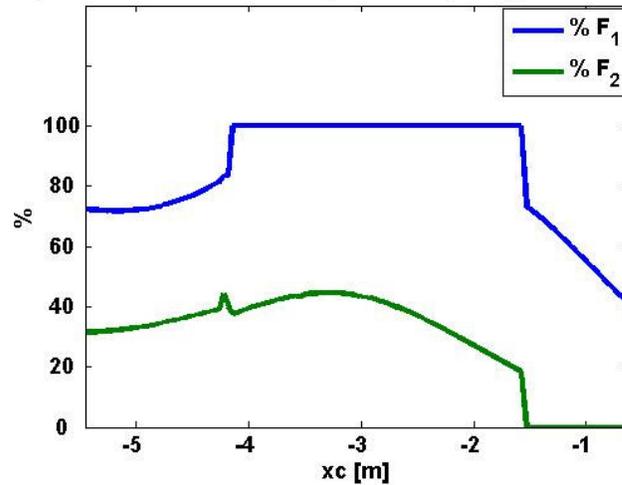


Figura 34 – Aproveitamento das forças no sistema para terreno pouco acidentado sem controle.

Gráfico das Forças de atrito

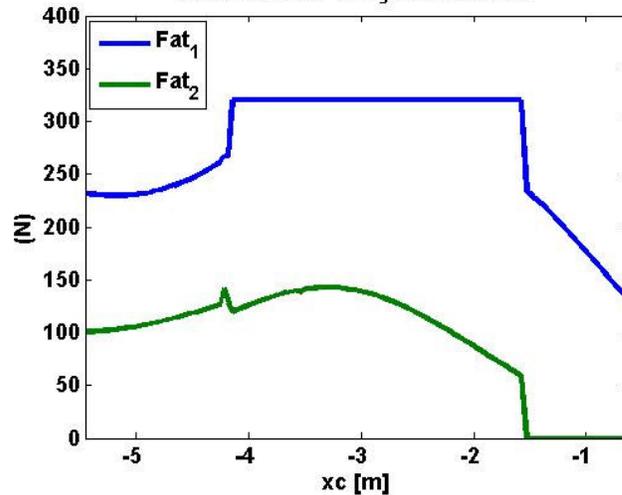


Figura 35 – Forças de atrito para terreno pouco acidentado sem controle.

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.

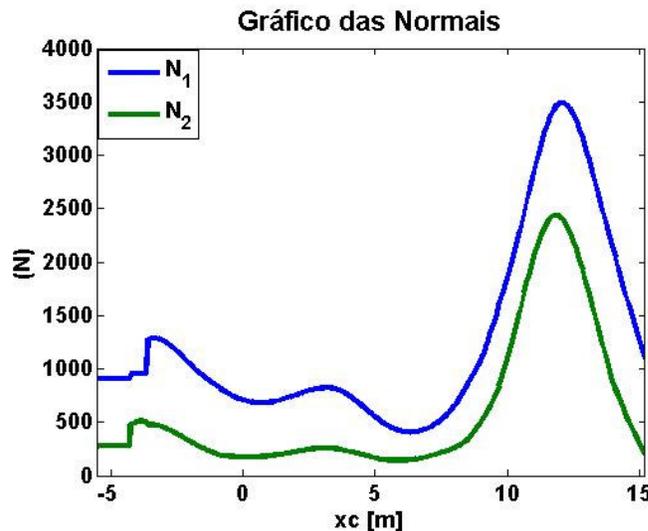


Figura 36 - Forças Normais para perfil senoidal com controle.

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 ($F_{at_i} = F_i$).

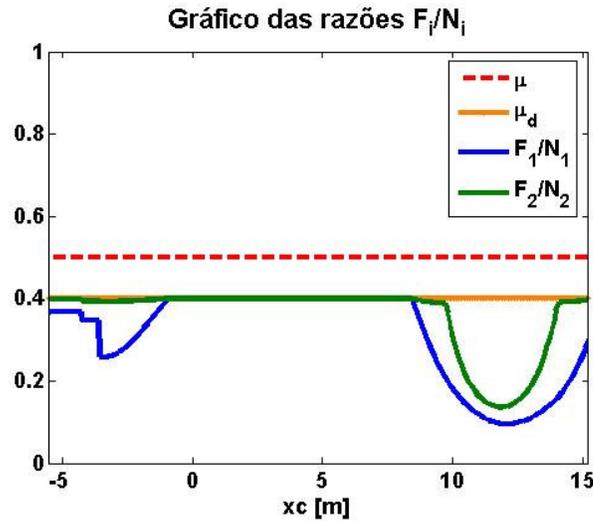


Figura 37 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil senoidal com controle.

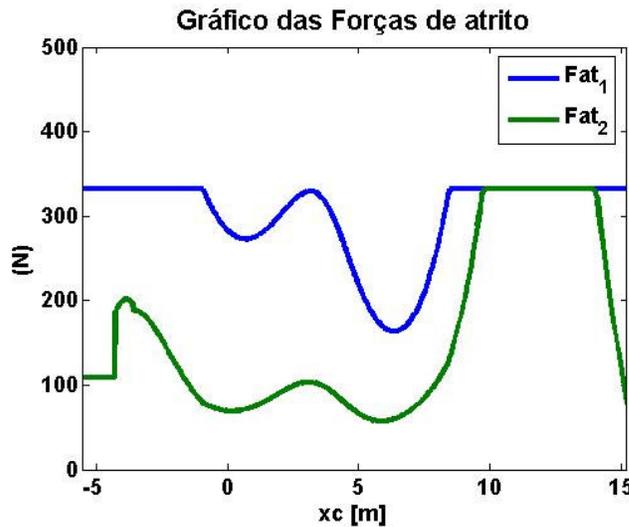


Figura 38 - Forças de atrito para perfil senoidal com controle.

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.

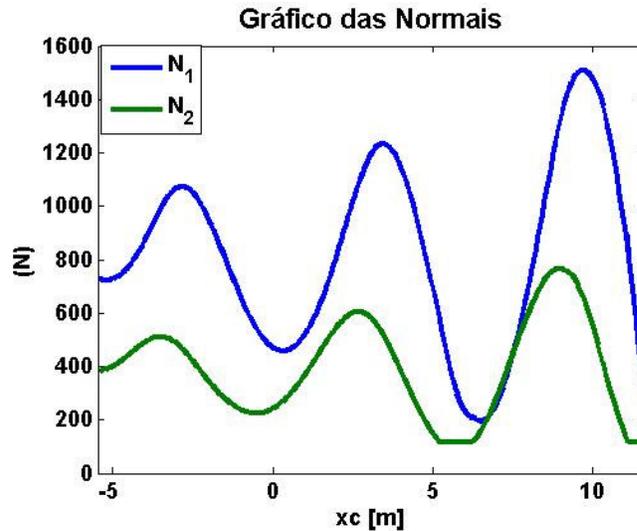


Figura 39 - Forças Normais para terreno pouco acidentado com controle.

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 ($F_{at_i} = F_i$), 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.

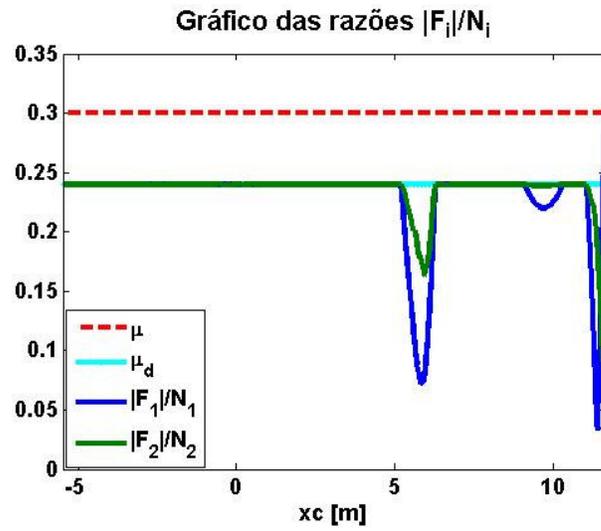


Figura 40 - Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para terreno pouco acidentado com controle.

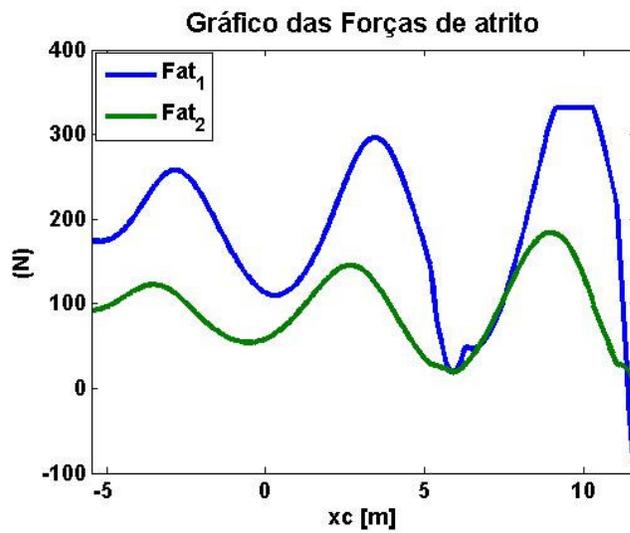


Figura 41 - Forças de atrito para terreno pouco acidentado com controle.

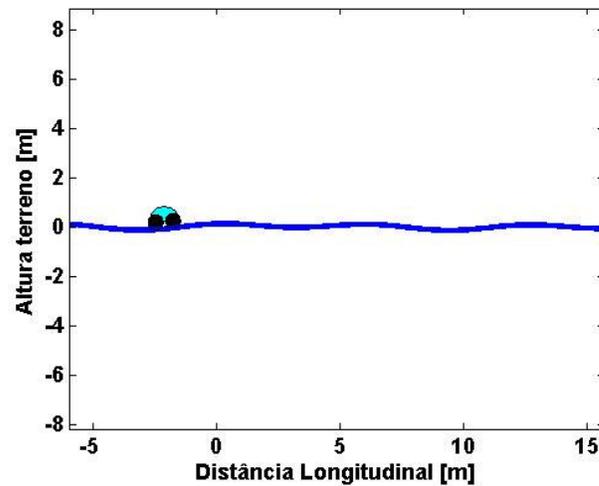


Figura 42 – Terreno pouco acidentado com μ variável.

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.

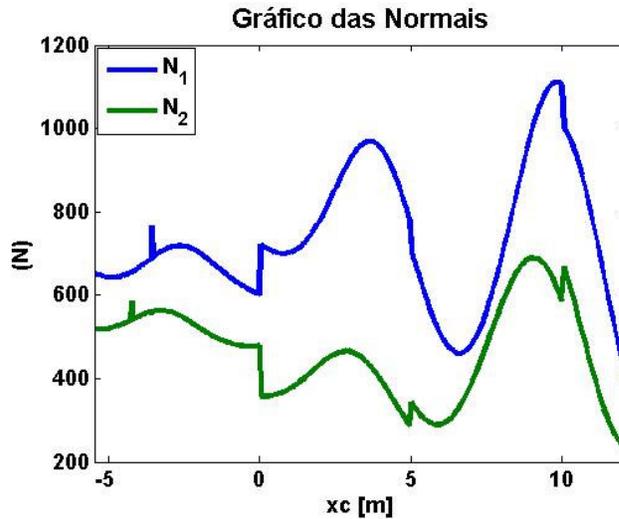


Figura 43 – Normais em terreno pouco acidentado com μ variável com controle.

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.

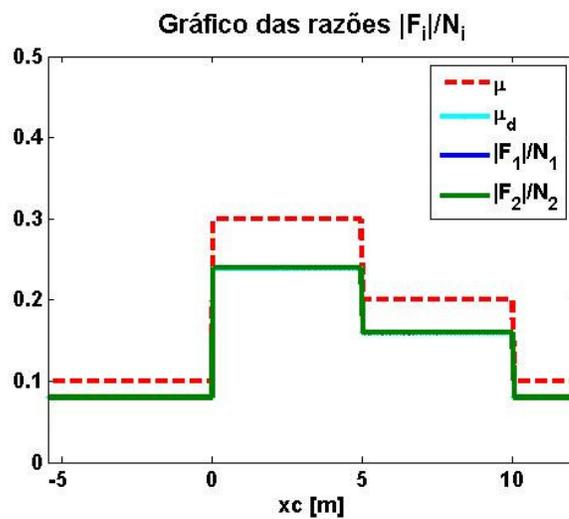


Figura 44 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ em terreno pouco acidentado com μ variável com controle.

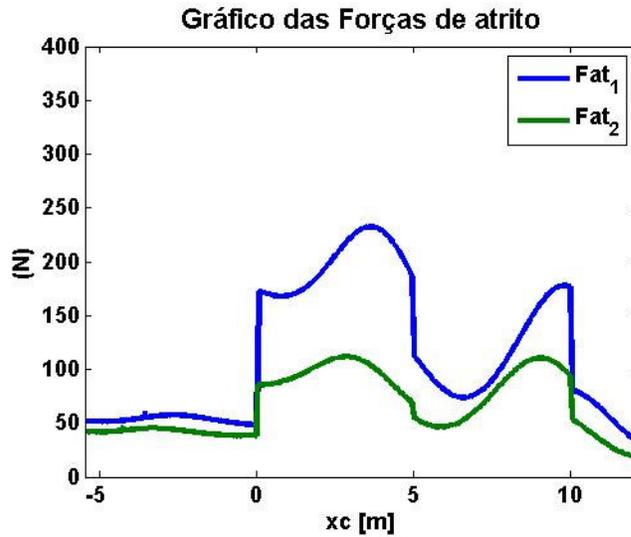


Figura 45 – Forças de atrito em terreno pouco acidentado com μ variável com controle.

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.

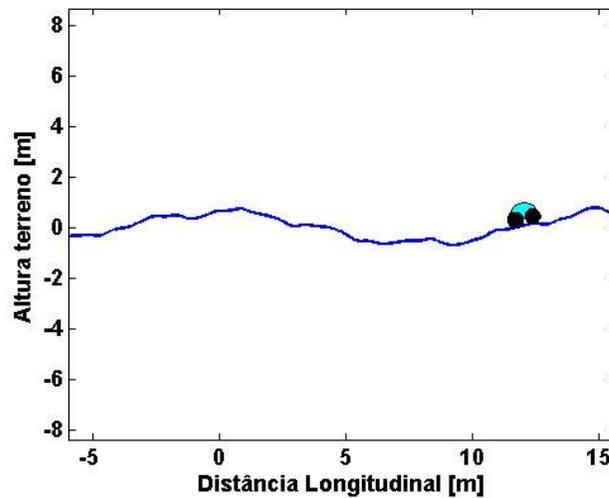


Figura 46 – Terreno acidentado com controle de velocidade e de estabilidade.

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.

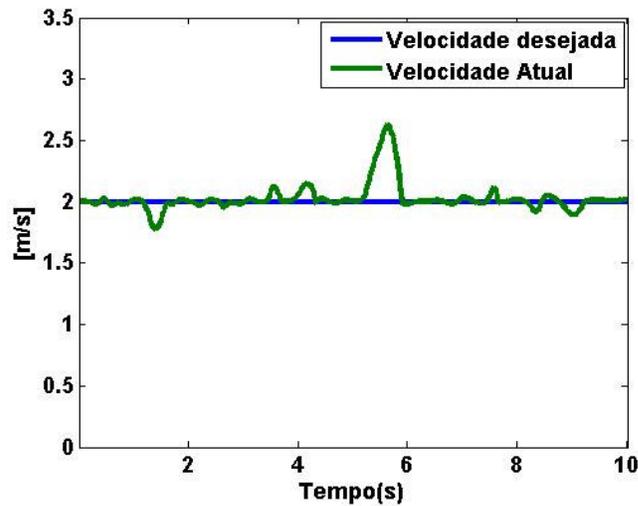


Figura 47 – Velocidade ao longo do tempo para perfil acidentado com controle.

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.

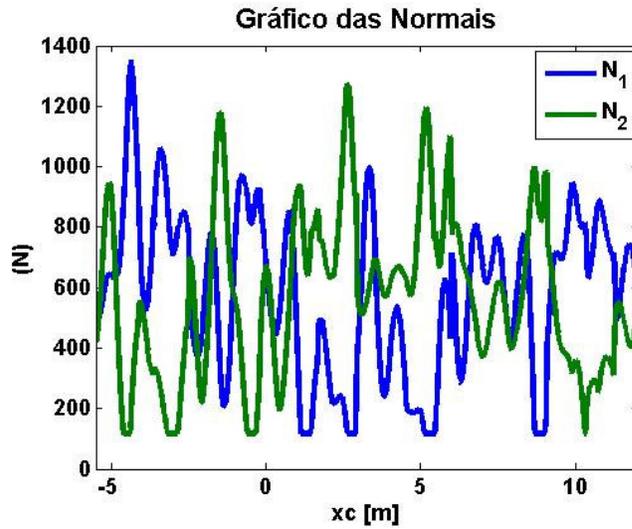


Figura 48 – Normais para perfil acidentado com controle.

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.

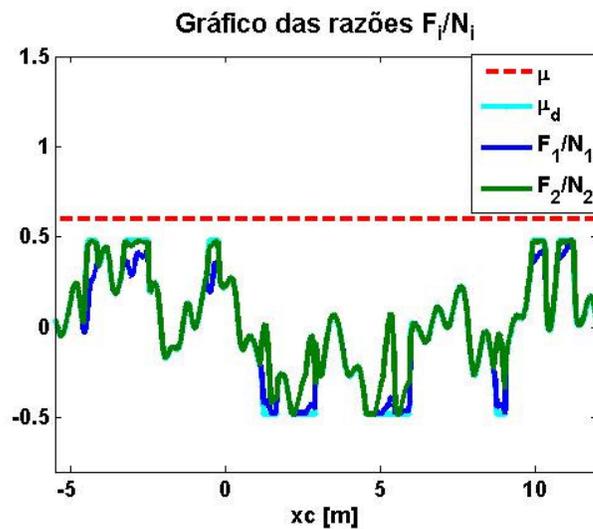


Figura 49 – Razão $\frac{F_i}{N_i}$ para perfil acidentado com controle.

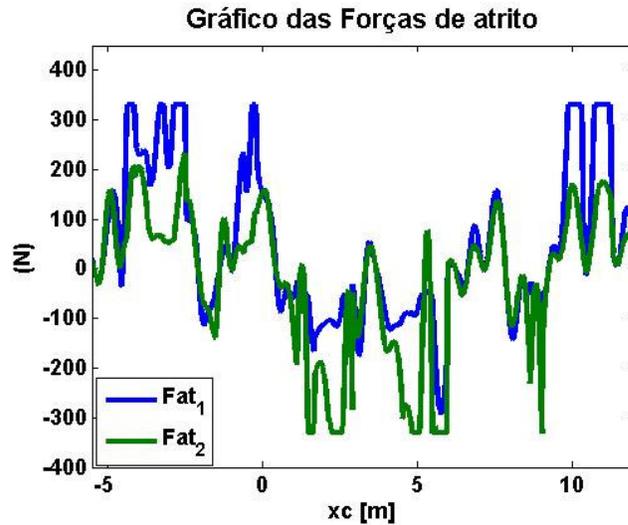


Figura 50 – Forças de atrito para perfil acidentado com controle.

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.