

6 Resultados

Foram realizados dois grupos de simulações, sendo que o primeiro grupo teve como objetivo comparar a técnica de controle de tração proposta na presente dissertação (utilizando o modelo de suspensão flexível) e com um controle PI para a tração. Sendo que o controle PI atua de forma a fazer com que cada roda tenha a seguinte força de tração:

$$F_i = \frac{(KP \cdot E + KI \cdot \int E \cdot dt)}{2} \quad (352)$$

onde:

F_i = força de tração na roda i que é calculada como o torque dividido pelo raio da roda (T_i/r);

KP = ganho proporcional;

KI = ganho integral;

$E = (V_d - V_L)$, erro entre a velocidade desejada e a velocidade real do centro de massa do robô ao longo da direção longitudinal ao chassi do mesmo.

Já no segundo grupo foram realizadas simulações utilizando a técnica de controle de tração proposta empregando tanto o modelo de corpo rígido do veículo como o modelo de suspensão flexível. Sendo que esse grupo de simulações teve o intuito de comparar os resultados obtidos pelos dois modelos desenvolvidos para o robô para verificar se ocorre uma tendência de convergência entre ambos quando se utiliza um elevado valor para a constante de rigidez da suspensão do veículo robótico no modelo flexível.

Os perfis de terreno empregados nas simulações foram do tipo senoidal e rampa, sendo que esses foram escolhidos de modo a se verificar o comportamento do sistema em terrenos acidentados e planos.

6.1. Parâmetros Analisados

Com os resultados das simulações foram gerados gráficos com o intuito de se analisar os seguintes parâmetros do sistema robótico:

- As forças normais em cada roda do veículo;
- As forças de tração (F_i) calculadas pelo controle, provenientes dos torques aplicados às rodas;
- As razões $|F_i|/N_i$, para $i = 1,2$;
- A velocidade longitudinal do centro de massa do veículo em cada estado;
- A potência consumida.

6.2. Valores dos parâmetros físicos e geométricos do sistema utilizados nas simulações

Os dados abaixo foram obtidos a partir de valores reais do segundo protótipo do Robô Ambiental Híbrido, sendo os seguintes:

$$m = 120 \text{ kg};$$

$$I = 15,22 \text{ kg.m}^2;$$

$$F_{\text{sat}} = 320 \text{ N};$$

$$r = 0,3 \text{ m};$$

$$L_1 = L_2 = 0,7 \text{ m};$$

$$h_1 = h_2 = 0,125 \text{ m}.$$

Para os outros parâmetros físicos, tais como: coeficiente de atrito estático (μ), aceleração local da gravidade (g), constante de rigidez da suspensão (K) e constante de amortecimento (c); foram utilizados valores típicos encontrados na literatura ou estimados. A constante de amortecimento foi calculada de modo que a suspensão seja sub-amortecida. Os valores desses parâmetros são:

$$\mu = 0,8;$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2;$$

$$K = 10^4 \text{ N/m para o caso mais flexível e } 10^7 \text{ N/m para o caso rígido};$$

$$c = 1,4 \cdot \sqrt{K \cdot m} \text{ [N.s/m]}.$$

$$K_p = \frac{g \cdot \mu \cdot \text{sen}(\pi/6)}{|V_d|}$$

O valor do ganho do controle (K_p) foi estimado de modo a igualar a máxima aceleração que o veículo poderia obter e um plano com inclinação de 30° , que é a máxima inclinação que o robô foi projetado para vencer. Sendo que o mesmo foi mantido constante em todas as simulações devido o seu valor ótimo variar com o perfil do terreno e com o coeficiente de atrito estático (μ) entre o solo e as rodas do robô. Ocasionalmente assim, que para cada tipo de terreno e valor de μ haverá um valor ótimo do ganho que deverá ser calculado aumentando-se assim a necessidade de processamento do controle, o que não é desejado. Em todas as simulações as velocidades generalizadas em $t=0$ são nulas e nas simulações utilizando o modelo de corpo rígido foi utilizado um $dt=0,01$ s.

6.3.

Perfis do terreno

Os perfis de terreno utilizados foram escolhidos de forma a variar os ângulos de contato e a inclinação a ser vencida. Para isso, foram gerados terrenos com perfis senoidais e com perfil rampa com espaçamento em x (dx) de 0,002 m. Os dados referentes aos perfis são descritos a seguir.

6.3.1.

Perfil Senoidal

Foram gerados três perfis senoidais, onde todos apresentam amplitude de dois metros e frequência espacial sendo de 0,2 m/rad e 0,3 m/rad. Sendo os pontos do perfil do terreno da forma $(x, f(x))$, cada um dos perfis apresentará uma função $f(x)$ própria, a saber:

- a) $f(x) = 2 \cdot \text{sen}(0,2 \cdot x)$;
- b) $f(x) = 2 \cdot \text{sen}(0,3 \cdot x)$;

onde a inclinação máxima desses perfis é de $21,8^\circ$ e 31° , respectivamente.

6.3.2.

Perfil rampa

Foi gerado apenas um perfil em forma de rampa, devido este apresentar resultados bastante semelhantes para os controles utilizados nas simulações, como será visto adiante. A função representativa deste perfil é a seguinte:

- a) $f(x) = 0,2 \cdot x$;

sendo que o mesmo apresenta inclinação de 11° .

6.4. Resultados das simulações

Os terrenos utilizados nas simulações são mostrados nas Figuras 34 a 36 a seguir.

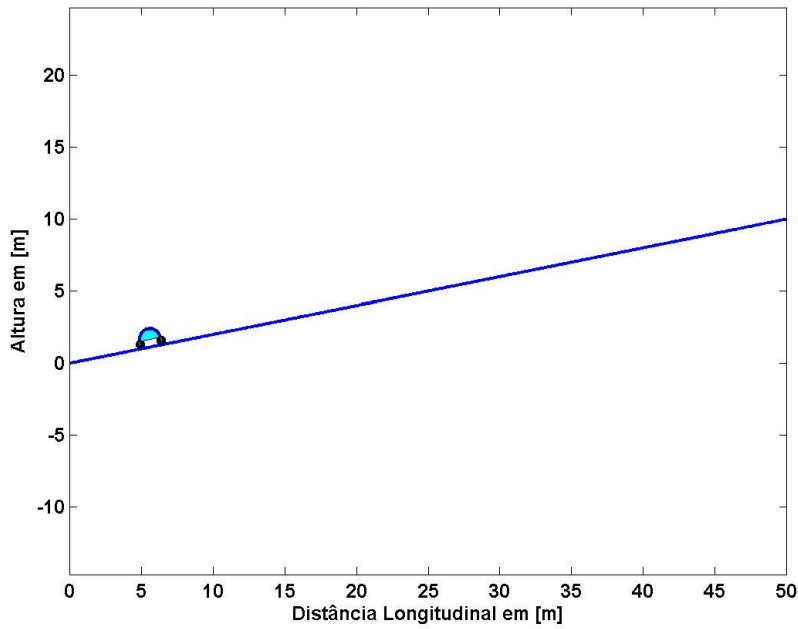


Figura 34 -Perfil de terreno rampa com equação $f(x)=0,2x$.

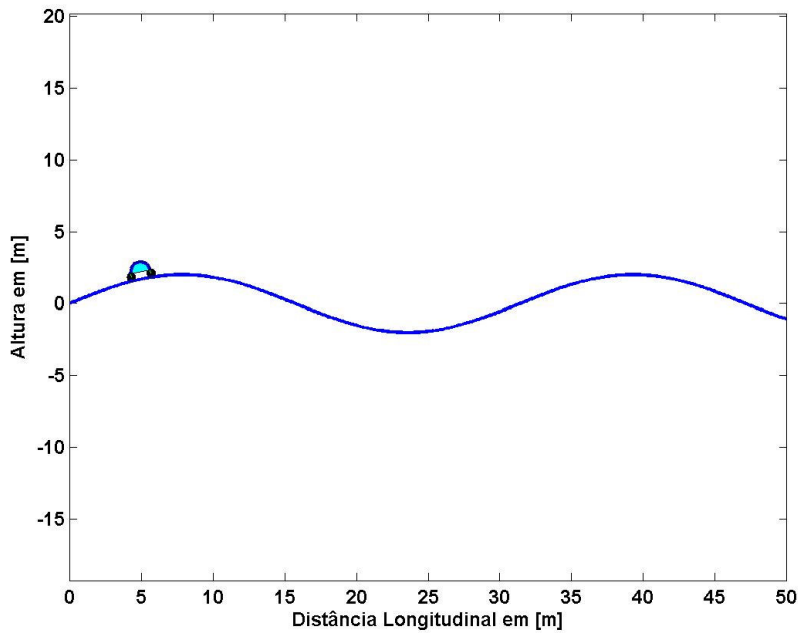


Figura 35–Perfil de terreno senoidal com equação $f(x)=2.sen(0,2x)$.

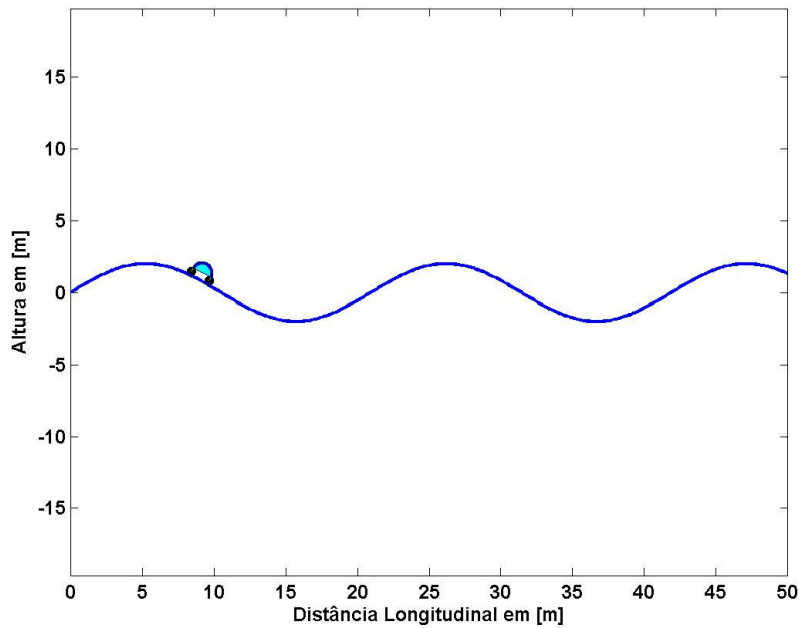


Figura 36 – Perfil de terreno senoidal com equação $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$.

6.4.1. Simulação utilizando modelo de suspensão flexível.

Essas simulações utilizaram $K = 10^4$ N/m, e foi utilizada a função ODE45 do MatLab para resolver as equações diferenciais com tolerância absoluta igual a 10^{-4} . As simulações realizadas apresentaram os resultados a seguir:

a) Simulação com perfil de terreno rampa e equação $f(x) = 0,2.x$; tempo de duração de 5s ; $V_d=1$ m/s ; $KP = 500.Kp$ e $KI = 200.Kp$.

A Fig. 37 ilustra a velocidade do centro de massa do veículo na direção de V_d ao longo do tempo, para o caso com controle PI e o controle proposto.

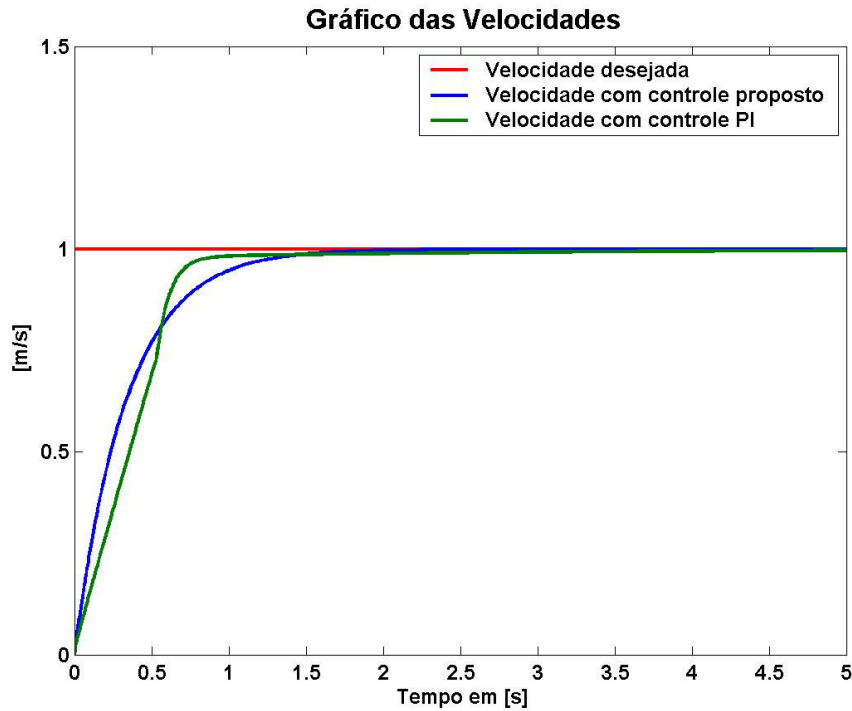


Figura 37 - Velocidade do centro de massa do robô ao longo da direção de V_d para o perfil $f(x)=0,2x$ para o controle proposto e o controle PI.

Analisando o gráfico acima pode-se notar que nos dois casos a velocidade do centro de massa do robô convergiu para V_d . No entanto, para o caso com o controle PI convergiu mais rapidamente (aproximadamente 0,8s) que o caso com o controle proposto (aprox. 1,5s). Essa diferença entre os tempos de convergência das duas técnicas de controle utilizadas deve-se a diferença entre os ganhos das mesmas, sendo que para diminuir o tempo de convergência da técnica de controle proposta poderia-se aumentar o seu ganho (K_p).

O gráfico das potências requeridas em cada tipo de lei de controle aplicada é mostrada na Fig 38. O mesmo mostra que a máxima potência requerida pela lei de controle PI é muito maior que a da lei de controle proposta, aproximadamente 450W e 240W respectivamente. Dessa forma pode-se verificar que a velocidade do centro de massa convergiu mais rápido para o controle PI, como visto na Fig. 37, ao custo de quase o dobro da máxima potência requerida em relação ao controle proposto. No entanto, excetuando-se o pico da curva da potência requerida pelo controle PI de uma forma geral as curvas de potência requerida pelas duas leis de controle são semelhantes, o que está de acordo com o que se esperava. Pois, em terrenos planos as forças de atrito (F_{at} 's) aplicadas às rodas

irão sempre atuar na mesma direção da velocidade desejada, resultando dessa forma que as Fat 's estarão atuando diretamente na variação da velocidade do veículo ao longo da direção de V_d . Assim, qualquer par de forças (Fat_1 , Fat_2), com o mesmo sentido de V_d , aplicado ao sistema pelo controle de velocidade já estará também minimizando a potência.

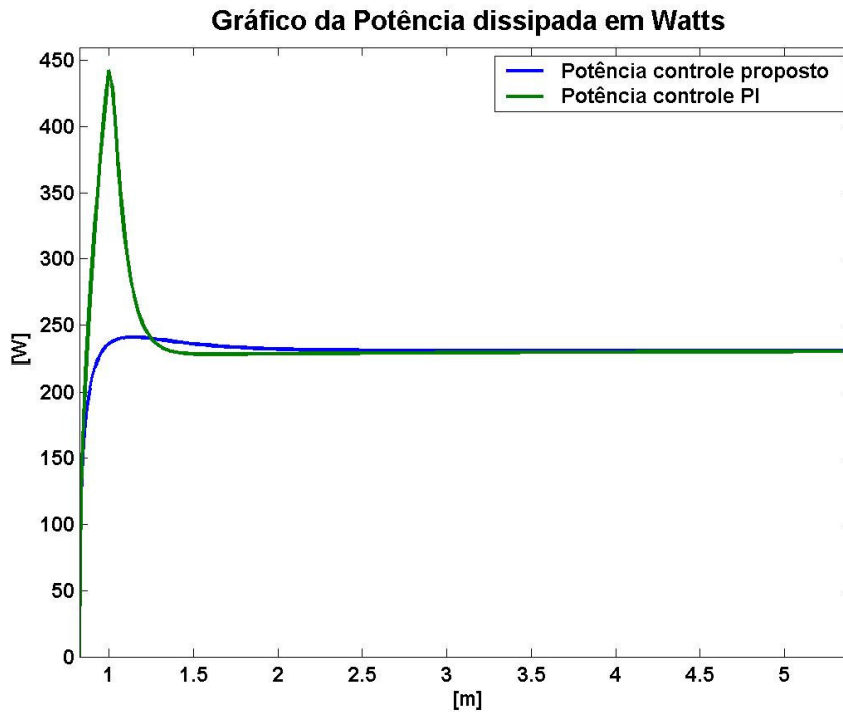


Figura 38- Potência requerida para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle PI e com controle proposto.

As Figuras 39 e 40 mostram as razões entre as forças de tração (F_1 e F_2) e suas respectivas normais para o caso com controle PI e o controle proposto, respectivamente. Analisando estes gráficos, nota-se que no início da simulação ocorre deslizamento da roda 2 (dianteira) para o caso que utilizou o controle PI e que a simulação com o controle proposto o máximo valor da razão entre as forças de tração e a sua normal está abaixo de 80% do valor do coeficiente de atrito estático (μ_{max}). Em seguida, nota-se que em ambos os gráficos as curvas de $|F_i/N_i$ convergem para valores pequenos em relação a μ_{max} .

O motivo de se obterem razões $|F_i|/N_i$ maiores no início da simulação de ambos os métodos de controle aplicados, está no fato dos mesmos buscarem atuar sobre o sistema de forma a obterem acelerações que resultem em uma velocidade do robô a mais próxima possível de V_d . Assim, como o robô tem velocidade inicial nula, as acelerações nesse período de tempo devem ser maiores fazendo com que o controle atue sobre as rodas do robô de forma que a conseguir a maior força de tração possível do sistema robótico.

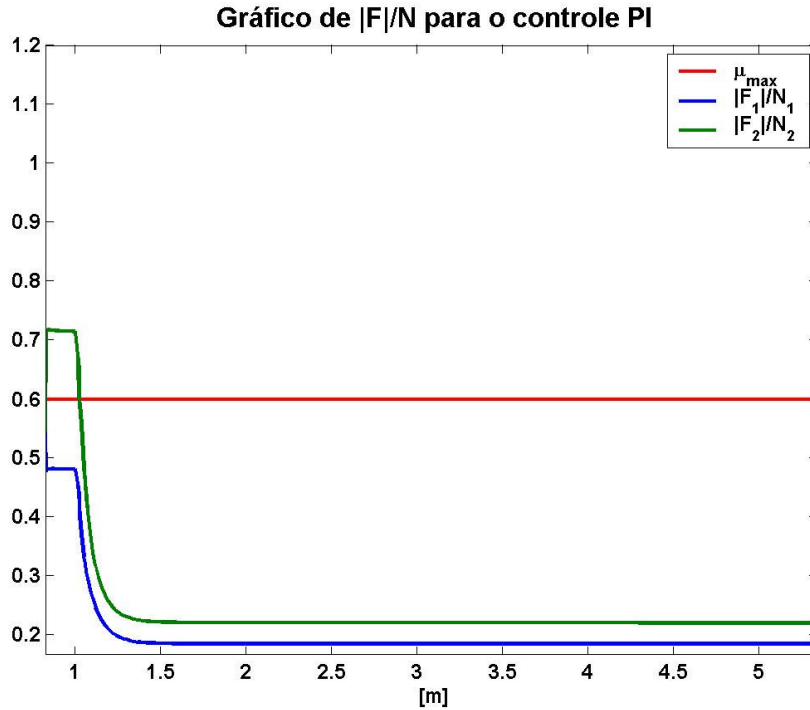


Figura 39- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle PI.

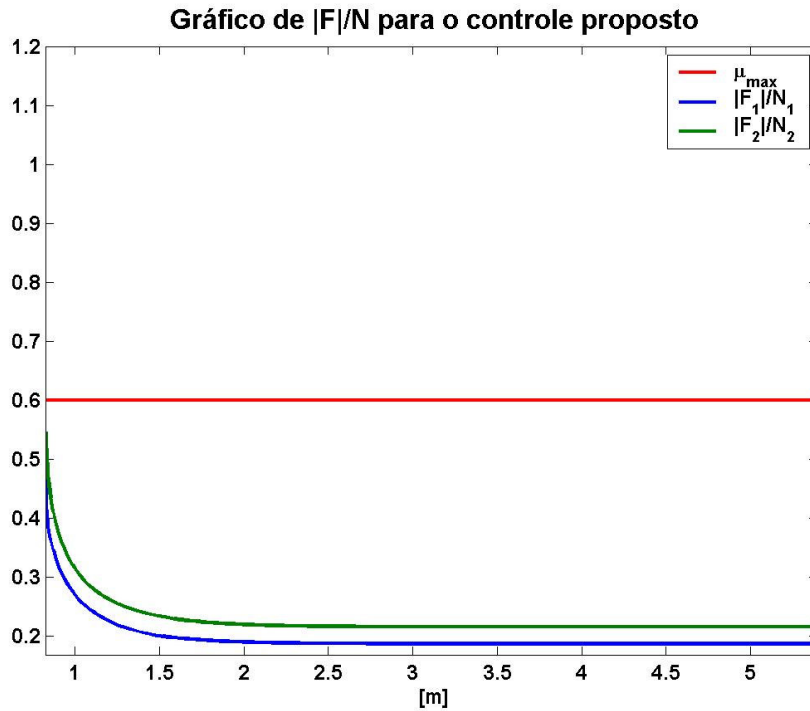


Figura 40- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle proposto.

As Figuras 41 e 42 trazem os gráficos das forças de tração calculadas pelos controles para o sistema. A Fig. 41 mostra o gráfico das forças de tração calculadas pelo controle PI, nela pode-se verificar que o controle aplica as mesmas forças em ambas as rodas não levando em consideração a limitação devido ao deslizamento e nem buscando otimizar o consumo de potência. Já a Fig. 42 ilustra o gráfico das forças de tração aplicadas ao sistema robótico pelo controle proposto, nela pode-se verificar que no início há uma diferença nos valores das forças aplicadas devido à questão de modo a evitar o deslizamento e conseqüentemente de minimizar o consumo de energia.

Pode-se ainda notar que em ambos os gráficos as forças de tração convergem, sendo isso devido ao fato que a velocidade desejada foi alcançada e os controles apenas atuam de forma a manter a velocidade alcançada.

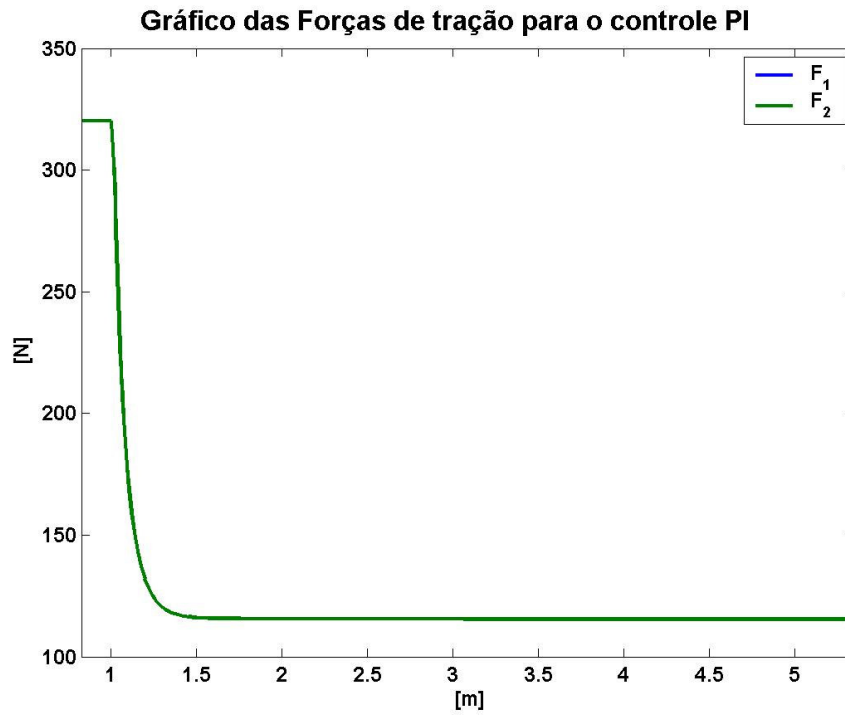


Figura 41- Forças de tração para o perfil de rampa $f(x) = 0,2x$, com controle PI.

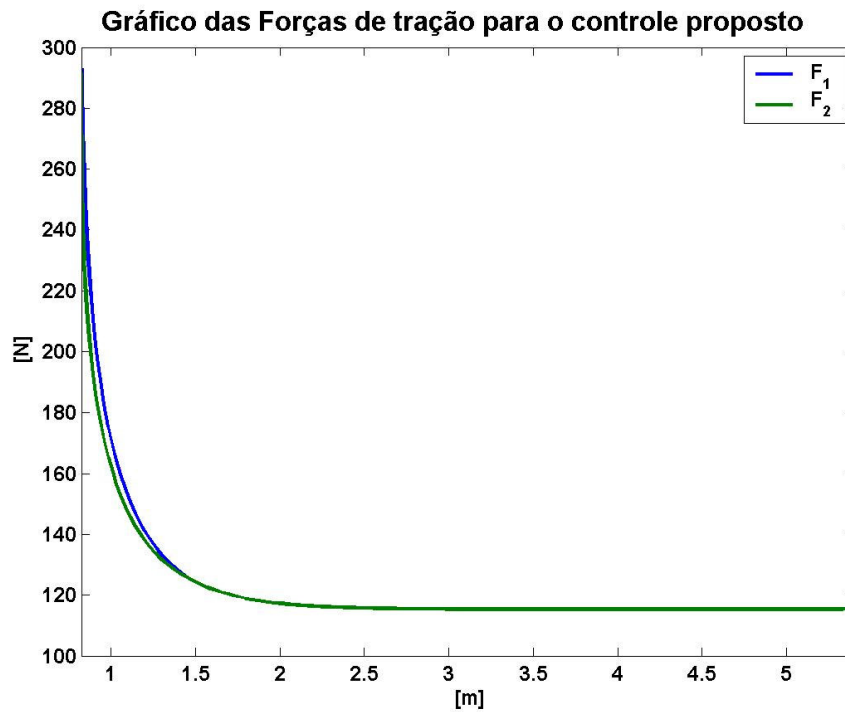


Figura 42- Forças de tração para o perfil de rampa $f(x) = 0,2x$, com controle proposto.

As Figuras 43 e 44 mostram os gráficos das forças normais para o caso com controle PI e com o controle proposto, respectivamente. Os dois gráficos mostram

que as curvas das forças normais são semelhantes para os dois controles aplicados, conforme era esperado devido a natureza plana do terreno.

Analisando os mesmos verifica-se que no início ambos apresentam um elevado valor da força normal da roda 1 (traseira) e um baixo valor da força normal da roda 2 (dianteira) devido a aceleração inicial para o robô alcançar a velocidade desejada, em seguida há uma convergência da força normal da roda 1 para valor menor que o inicial e da força normal da roda 2 para um valor maior que o inicial, no entanto a força normal da roda 1 continua sendo maior que a da roda 2 devido o robô está subindo um aclave. A convergência das forças normais ocorre devido o robô ter alcançado V_d , sendo então que os controles passam a atuar de forma a manter a velocidade do centro de massa constante zerando a aceleração do mesmo na direção longitudinal ao chassi do robô.

Entretanto, há uma diferença entre os gráficos na sua parte inicial. Sendo que em torno da coordenada $x = 1\text{m}$ a curva da força normal para o controle PI apresenta um salto devido ao fato da roda dianteira (roda 2) parar de deslizar (conforme verificado no gráfico da Fig. 39).

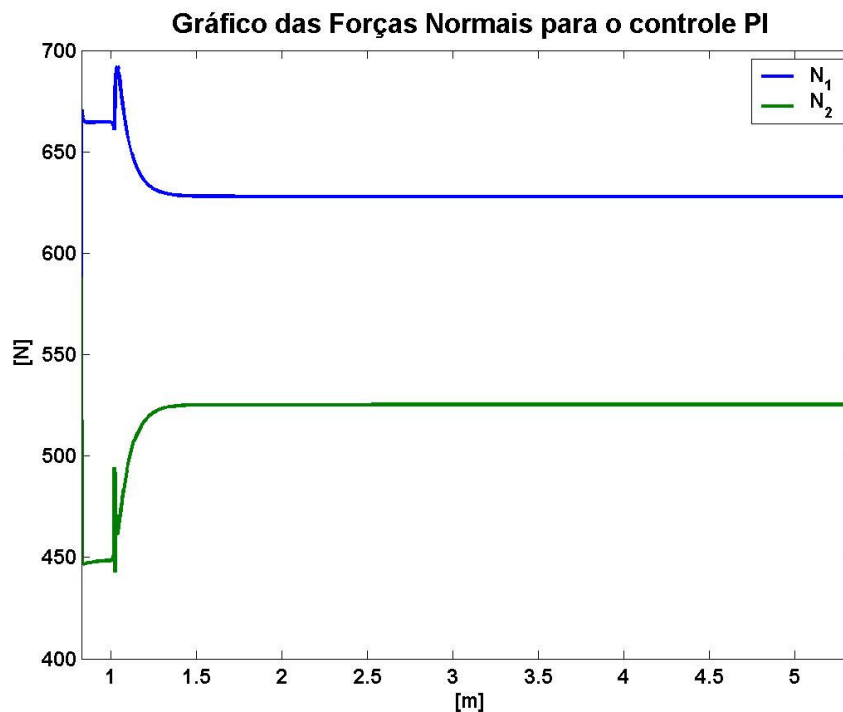


Figura 43- Forças normais para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle PI.

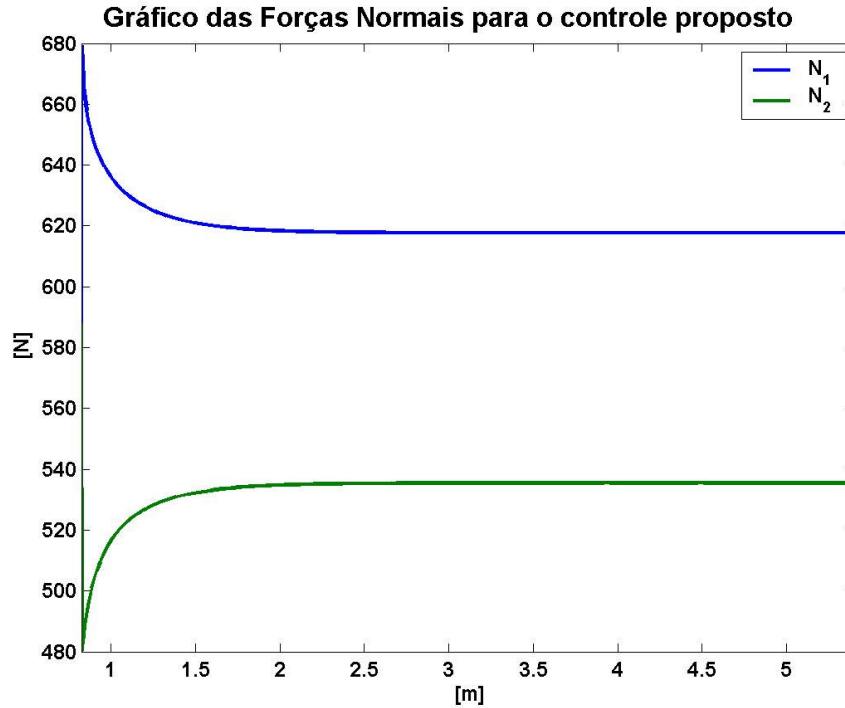


Figura 44- Forças normais para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle de tração proposto.

b) Simulação com o perfil de terreno senoidal $f(x) = 2\text{sen}(0,2x)$, $V_d=1,5\text{m/s}$, $KP=180$ Kp , $KI=100$. Kp e tempo de duração de 20 s.

Nessa simulação foi necessário alterar-se os valores dos ganhos do controle PI para que o veículo pudesse vencer o aclive do terreno no início da simulação.

A Fig. 45 mostra o gráfico das velocidades do veículo para o caso com controle PI e com o controle proposto, nela pode-se verificar que a velocidade do robô não converge quando utilizando o controle PI. Já o controle proposto consegue fazer com que a velocidade do veículo robótico alcance V_d em aproximadamente 2s, o que é um tempo satisfatório para o tipo de aplicação analisada, e a convergência da velocidade para essa técnica de controle proposta não apresenta erro em regime permanente..

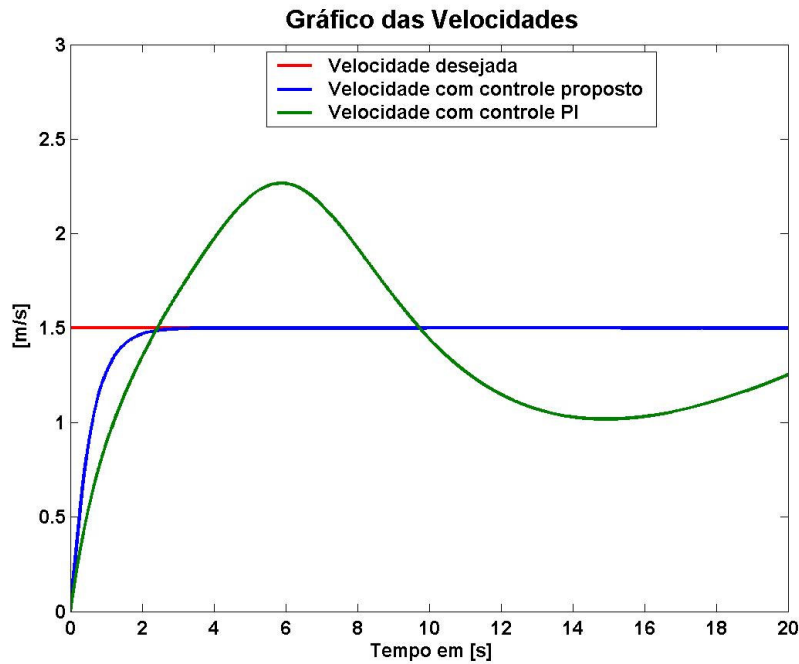


Figura 45- Velocidade do centro de massa do robô ao longo da direção de V_d para o perfil $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$ para o controle proposto e o controle PI.

O gráfico da potência requerida pelas duas técnicas de controle analisadas é mostrado na Fig. 46. Neste gráfico pode-se notar que apesar de ambas as curvas da potência requerida apresentarem pontos de mínimo (potência requerida nula), a curva referente ao controle PI apresenta um pico de potência requerida (aproximadamente 1000W) bem maior que o da curva do controle proposto, que foi de pouco mais que 600W, revelando assim a eficácia do controle proposto em relação à minimização de potência para esse caso.

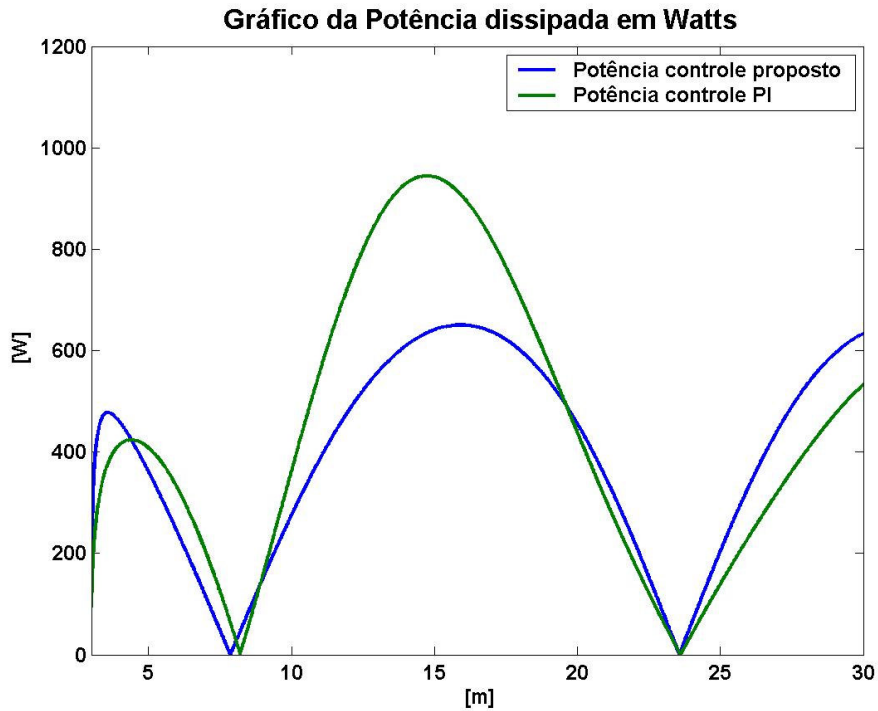


Figura 46- Potência requerida para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI e com controle proposto.

As Figuras 47 e 48 ilustram as razões entre o módulo das forças de tração e as respectivas forças normais para o controle PI e proposto, respectivamente. Analisando as mesmas nota-se que no gráfico do controle PI essas razões situam-se sempre abaixo do valor de μ_{max} , o que significa que as rodas do robô estão longe do deslizamento.

Já o gráfico do controle proposto apresenta regiões onde o valor de uma das razões entre a força de tração e a força normal é igual a μ_{max} , podendo assim resultar em deslizamento da respectiva roda do sistema. No entanto, deve-se notar que o valor das razões nunca ultrapassa o valor estipulado para μ_{max} , sendo então que para se evitar um possível deslizamento basta utilizar no controle proposto um valor de μ_{max} menor que o coeficiente de atrito estático.

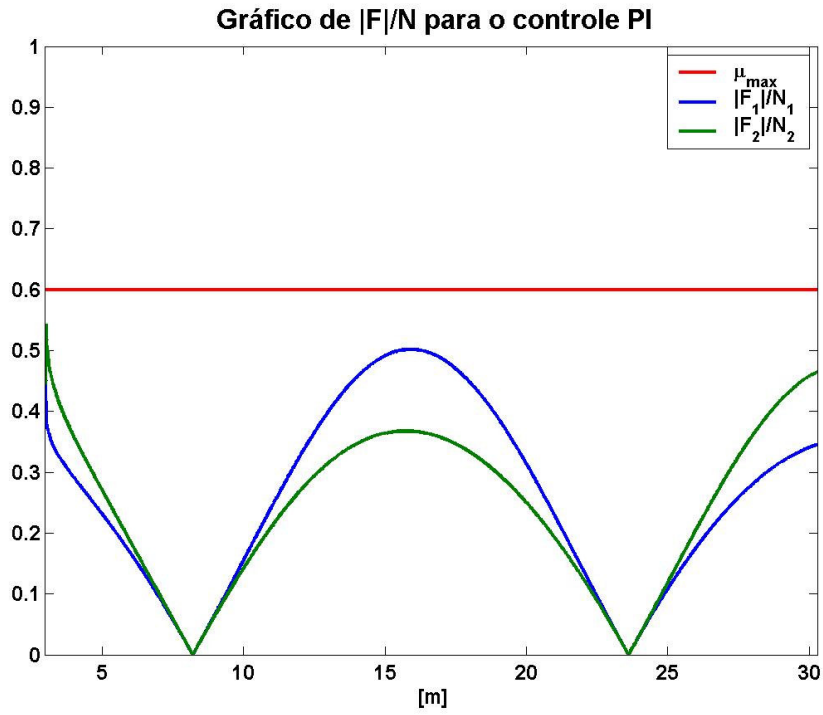


Figura 47- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle PI.

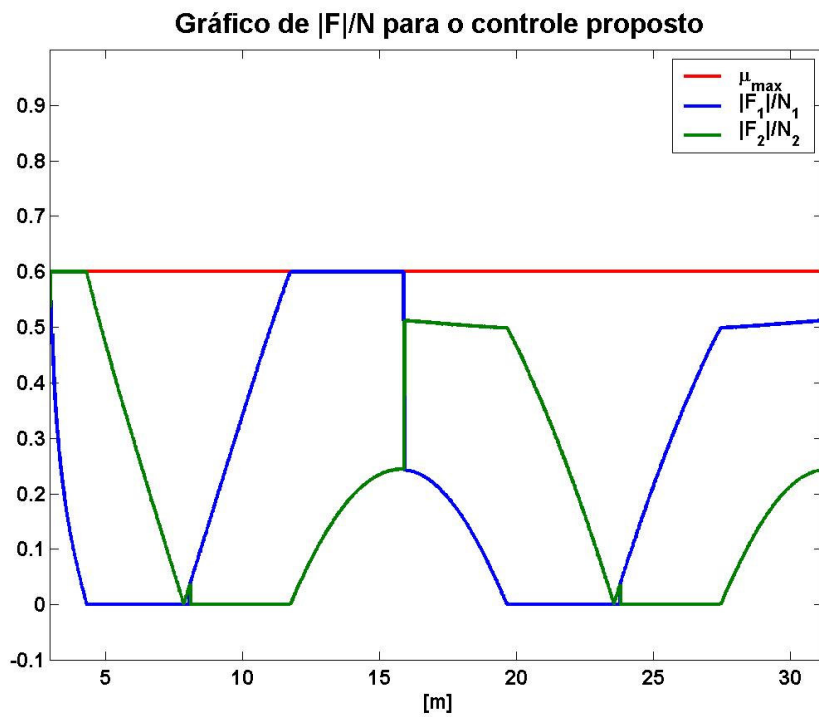


Figura 48- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle proposto.

As Figuras 49 e 50 mostram as forças de tração aplicadas ao sistema pelo controle PI e pelo controle proposto, respectivamente. Ambas as figuras mostram a influência do perfil do terreno na atuação dos controles. Entretanto, novamente o controle PI não consegue acionar as rodas de maneira a otimizar o dispêndio de energia, através da verificação em cada estado do sistema de qual roda mais contribui para o deslocamento do robô, atuando de forma a prover forças de tração de igual magnitude. No entanto, analisando a Fig. 50 pode-se notar que o controle proposto aciona as rodas de forma a levar em consideração o relevo do terreno para se otimizar o movimento do sistema robótico. Sendo que há regiões onde apenas uma roda é atuada, devido essa contribuir de forma mais eficiente para o movimento do robô, como por exemplo no intervalo que vai de 5 a 10 metros no eixo dos x somente a roda 2 (dianteira) é acionada. No gráfico da Fig. 50 há dois “saltos”, um pouco antes de $x=10\text{m}$ e também um pouco antes de $x=25\text{m}$, que acontece devido nesses pontos ocorrer uma mudança em relação ao ângulo de contato que está mais próximo do ângulo de inclinação do veículo, ou seja, nesses pontos ocorre uma alteração da roda que mais contribui para a realização do movimento desejado do robô.

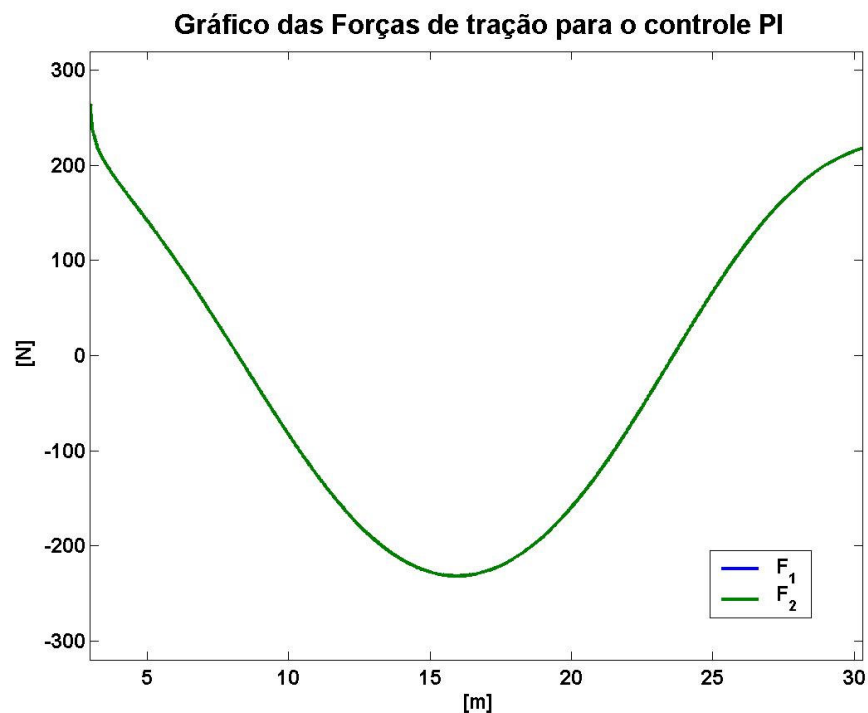


Figura 49- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI.

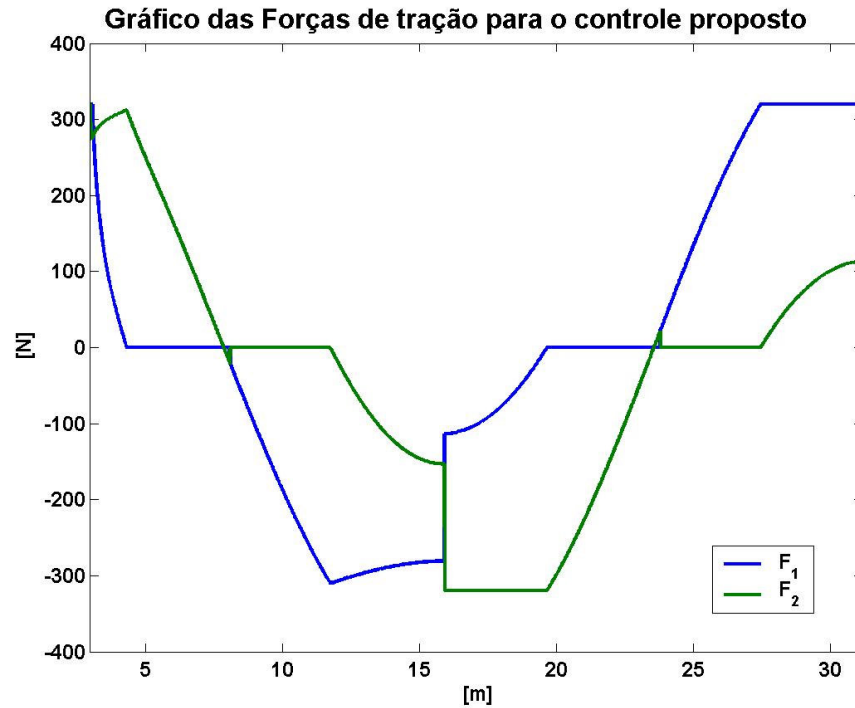


Figura 50- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle proposto.

As Figuras 51 e 52 mostram as forças normais provenientes de cada um dos casos analisados. Os gráficos mostram que as curvas das forças normais são semelhantes para ambos as leis de controle empregadas. Dessa forma, verifica-se que o controle proposto, mesmo aplicando forças de tração bem diferentes das aplicadas pelo controle PI e com alguns “saltos”, apresenta forças normais que variam de forma suave e não tendem a levar o robô a descolar uma de suas rodas.

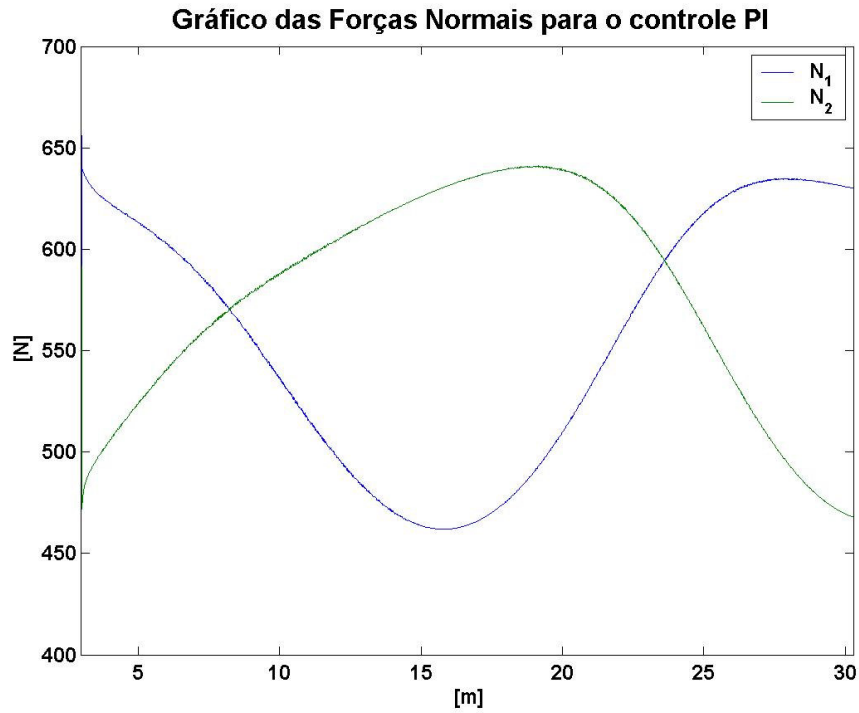


Figura 51- Forças normais para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI.

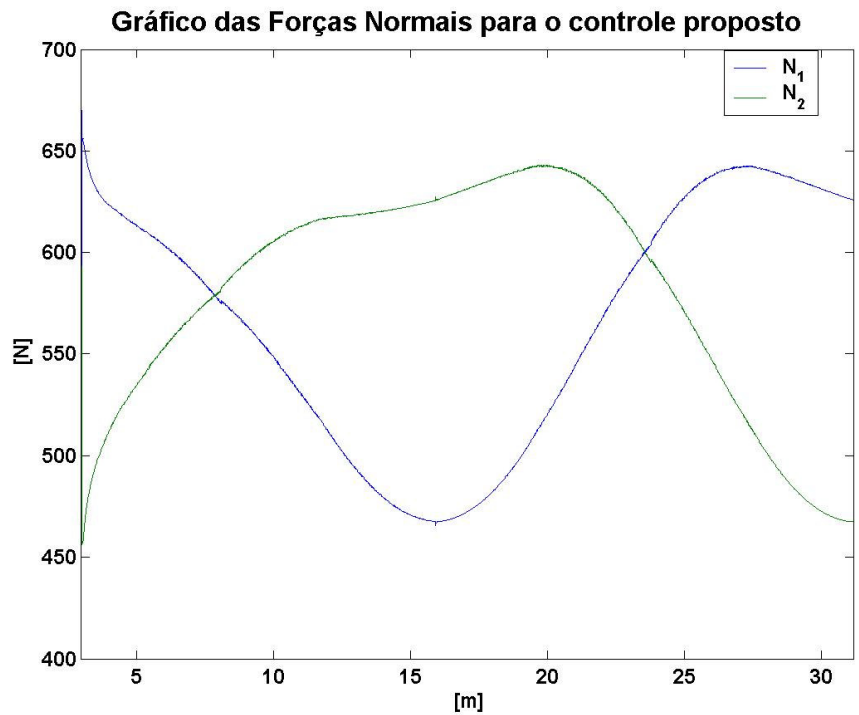


Figura 52- Forças normais para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle de tração proposto.

c) Simulação com perfil de terreno senoidal $f(x) = 2\text{sen}(0,3x)$, $V_d=1,5\text{m/s}$, $KP=180.Kp$, $KI=150.Kp$ e tempo de duração de 20 s.

A Fig. 53 apresenta o gráfico da velocidade do sistema para ambas as leis de controle utilizadas na simulação. Sendo que o controle proposto obteve um resultado bem melhor que o controle PI, onde o primeiro (depois do instante 2s) converge para V_d excetuando-se apenas dois pequenos intervalos de tempo em que o veículo robótico não está na velocidade desejada (de 6 a 8 segundos e de 12 a 16 segundos). O controle PI, de outra forma não consegue fazer com que a velocidade do robô convirja para V_d e nem se estabilize, mantendo-se oscilando em torno da velocidade desejada com um elevado *overshoot*.

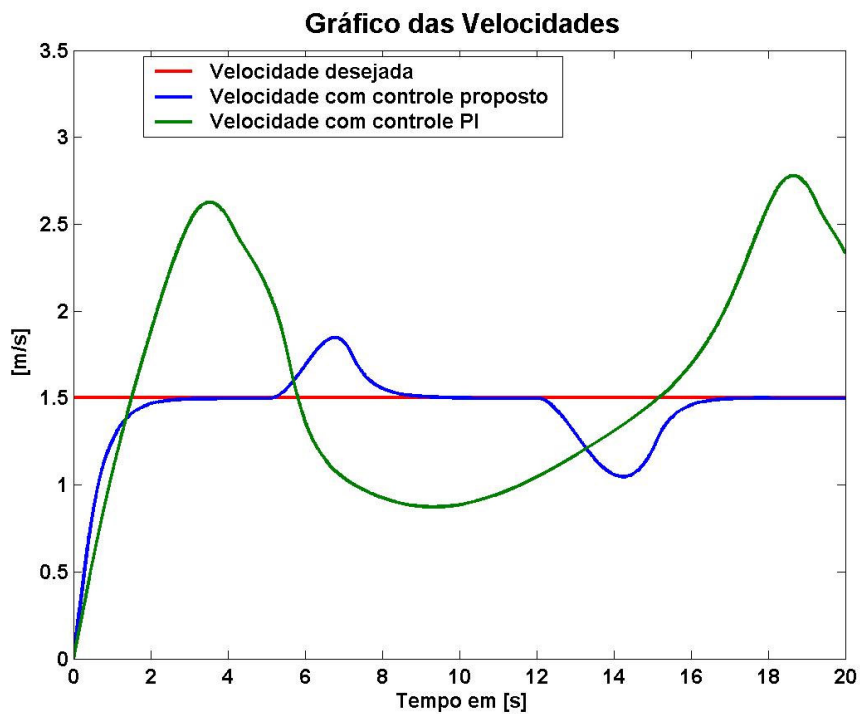


Figura 53- Velocidade do centro de massa do robô ao longo da direção de V_d para o perfil $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$ para o controle proposto e o controle PI.

A potência requerida pelo sistema em ambas as leis de controle utilizadas é mostrada no gráfico da Fig. 54. Nele pode-se verificar que novamente a potência requerida pelo controle PI apresenta um valor máximo muito maior que o caso com o controle proposto.

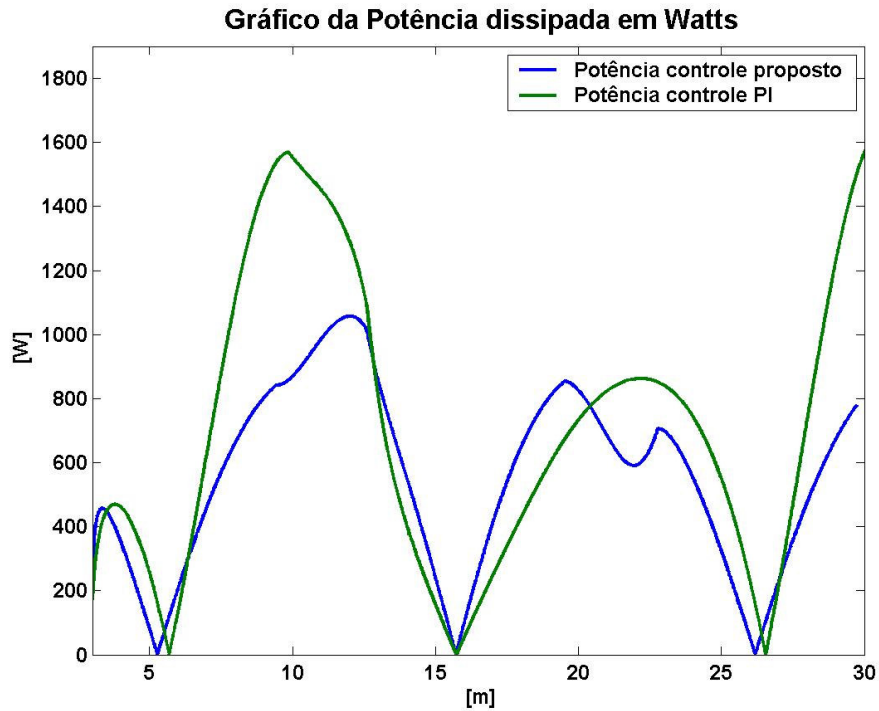


Figura 54- Potência requerida para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$, com controle PI e o controle proposto.

As Figuras 55 e 56 ilustram as curvas das razões das forças de tração pelas suas respectivas forças normais para o caso com controle PI e com o controle proposto, respectivamente. Os gráficos mostram que o controle PI não consegue evitar o deslizamento, apresentando três regiões com deslizamento de uma das rodas. Já o gráfico referente ao controle proposto ilustra que as razões nunca ultrapassam o valor máximo estipulado (μ_{max}) o que evita o deslizamento das rodas, conforme já explicado acima.

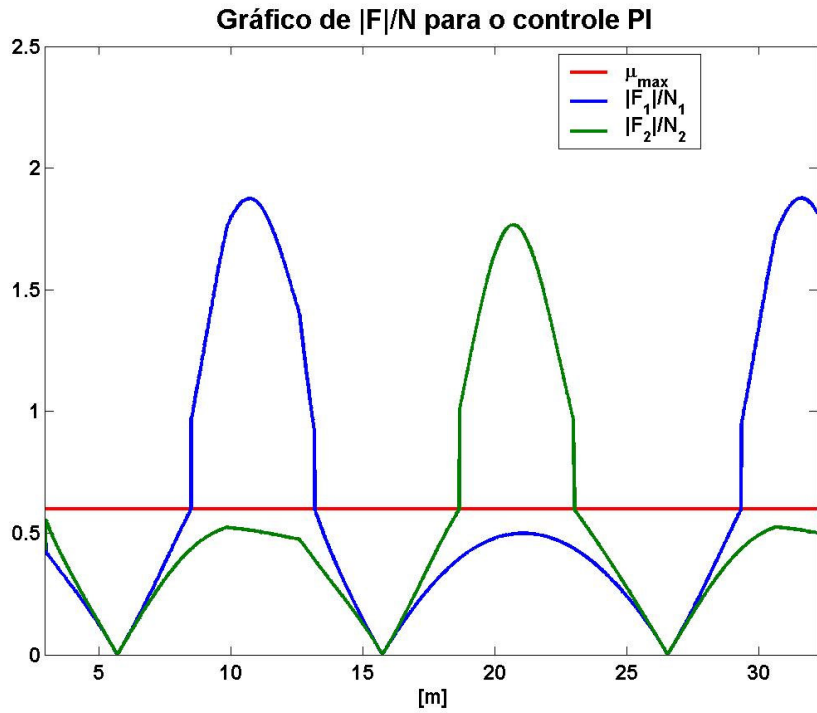


Figura 55- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle PI, para o perfil do terreno senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$.

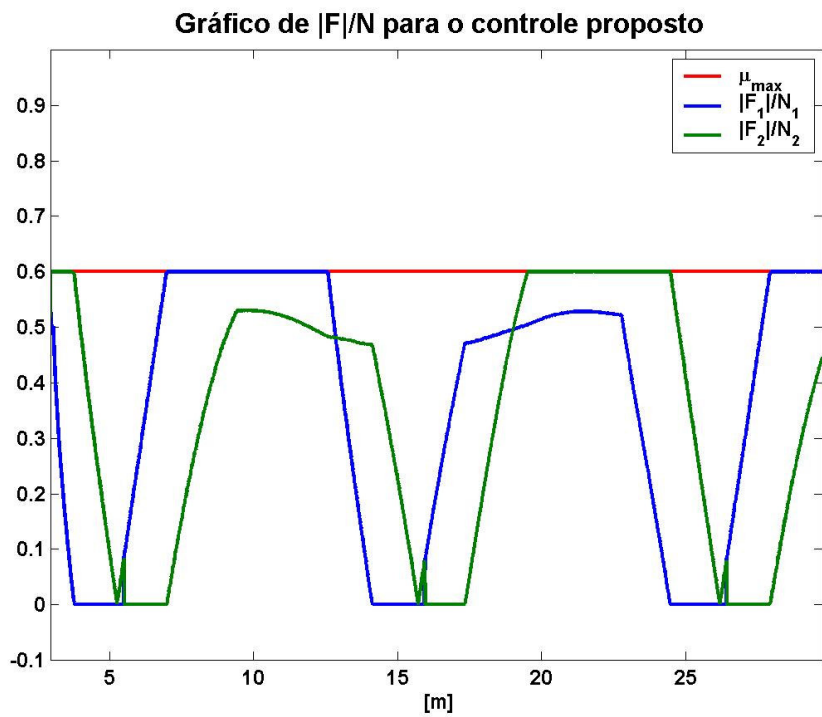


Figura 56- Razões $|F_i|/N_i$ para o controle proposto, para o perfil do terreno senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$.

As Figuras 57 e 58 mostram as forças de tração aplicadas ao sistema pelo controle PI e pelo controle proposto, respectivamente. Como no item (b) os gráficos mostram a atuação do controle proposto para otimizar o movimento do veículo robótico através da aplicação de forças de tração apropriadas às rodas, dependendo do perfil do terreno atravessado. O gráfico das forças de tração do controle PI novamente mostra novamente que essa lei de controle não leva em consideração a diferença da direção de atuação das forças de tração nas rodas para otimizar o consumo de energia.

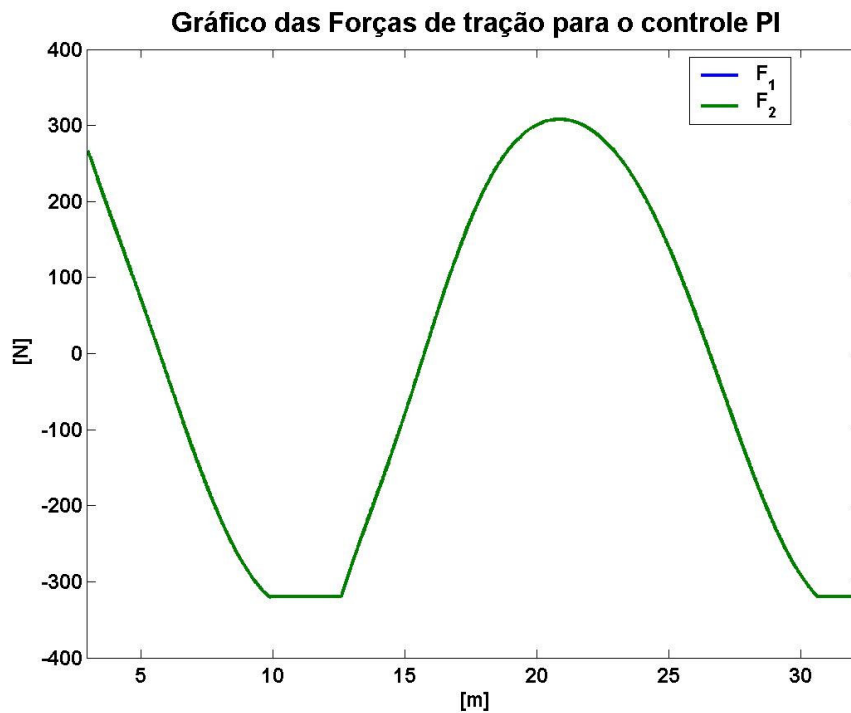


Figura 57- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$, com controle PI.

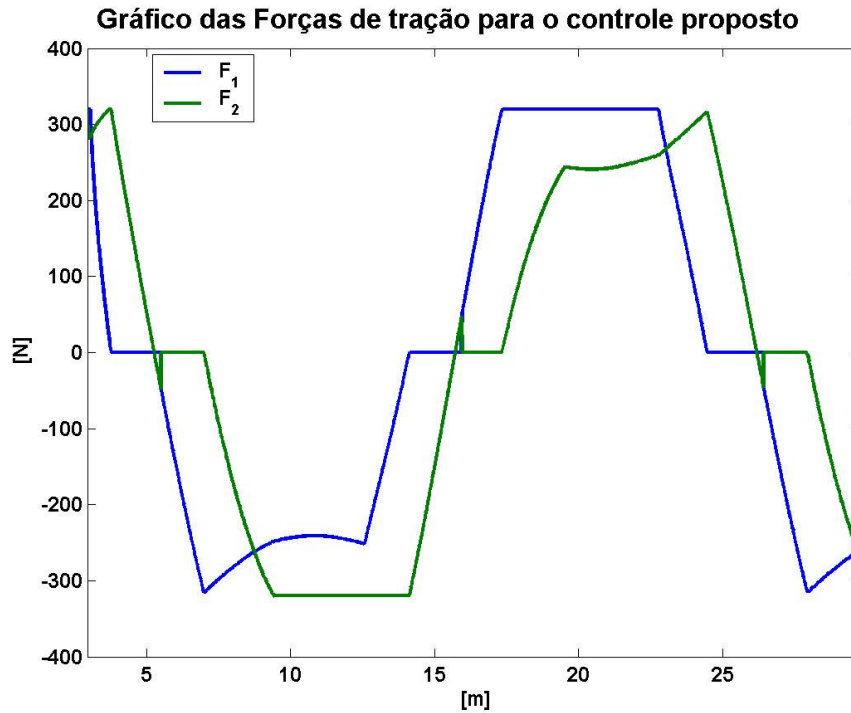


Figura 58- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$, com controle proposto.

As Figuras 59 e 60 mostram os gráficos das forças normais para o controle PI e proposto, respectivamente. Neles pode-se analisar que no caso do controle proposto as normais apresentam valores maiores quando comparados com os valores das forças normais para o caso do controle PI, sendo dessa forma que o controle proposto consegue deixar as rodas do veículo robótico mais longe do descolamento e conseqüentemente da instabilidade do sistema que o controle PI.

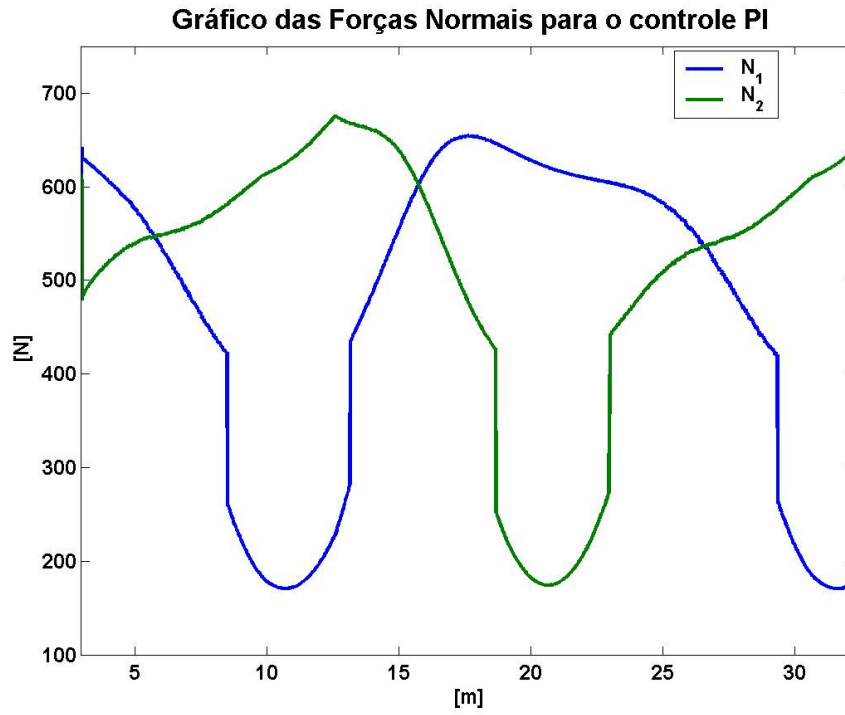


Figura 59- Gráfico das Fat's para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$, controle de velocidade e potência

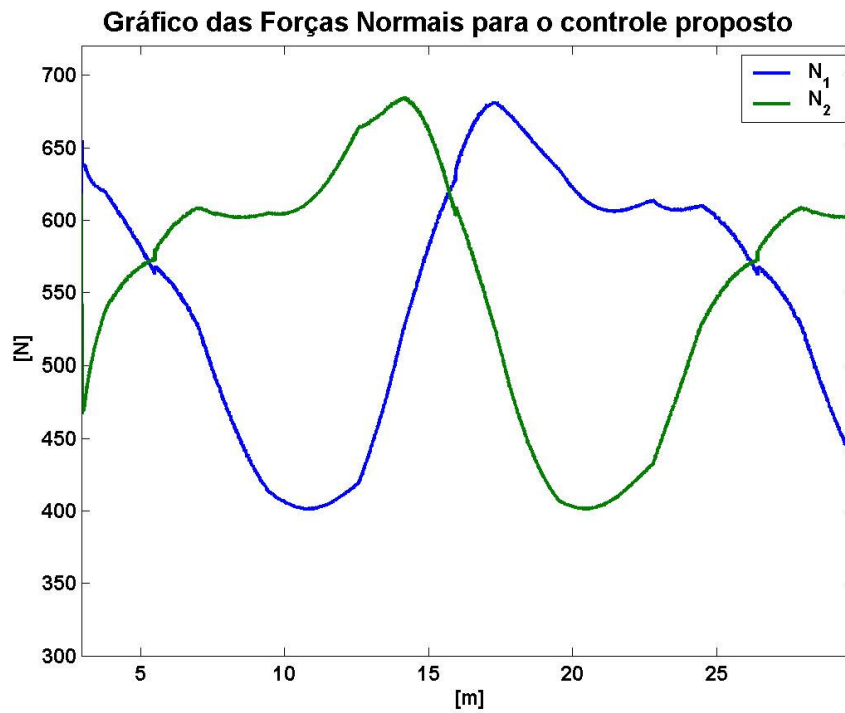


Figura 60- Gráfico das Fat's para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$, sem controle

6.4.2.

Simulação utilizando modelo de suspensão flexível e o modelo de corpo rígido.

Essas simulações utilizaram um valor elevado da constante de rigidez da mola ($K = 10^7$) no modelo flexível para comparar com o modelo de corpo rígido e verificar a convergência dos modelos. As simulações realizadas neste item utilizaram $V_d=0,5$ m/s.

a) Terreno com perfil terreno rampa: $f(x) = 0,2x$; tempo de duração de 3 s.

O gráfico das velocidades para o modelo flexível e rígido é mostrado na Fig. 61. Esse gráfico mostra que uma excelente concordância das curvas de velocidade de ambos os modelos. Isso se deve ao fato que a suspensão, no modelo flexível, possui uma flexibilidade finita na direção perpendicular ao movimento, porém na direção do movimento a mesma apresenta uma flexibilidade infinita (ou seja, é rígida), resultando dessa forma que em ambos os modelos a dinâmica do sistema na direção do movimento é idêntica.

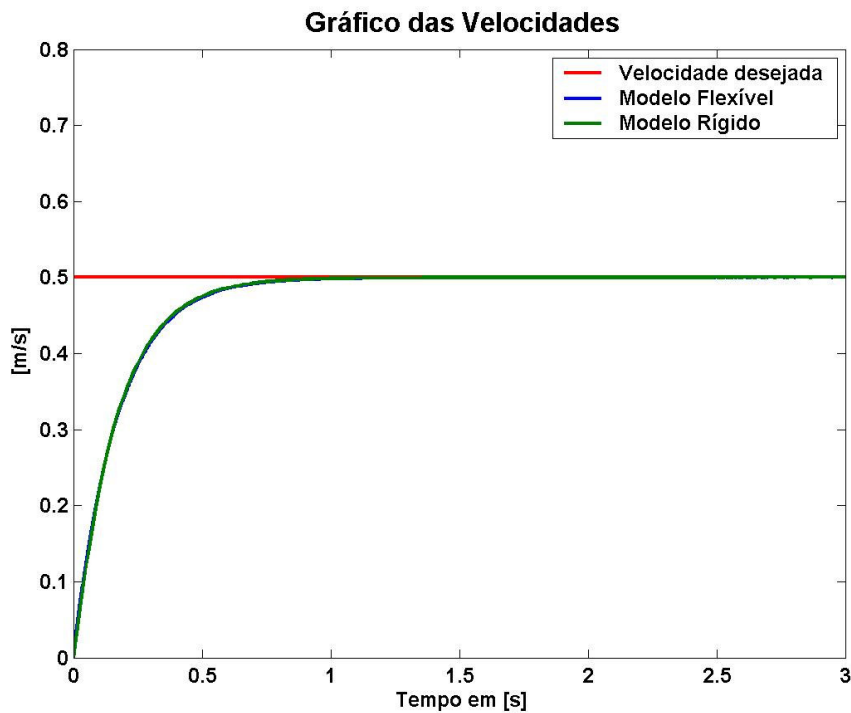


Figura 61 - Velocidade desejada e real do robô no perfil rampa $f(x)=0,2x$, para os modelos flexível e rígido.

As curvas da potência requerida pelos dois modelos analisados é mostrada no gráfico da Fig. 62. Novamente as curvas de ambos os modelos são idênticas devido, como já explicado, ao longo da direção do movimento a rigidez da suspensão ser infinita tanto para o modelo rígido como para o flexível.

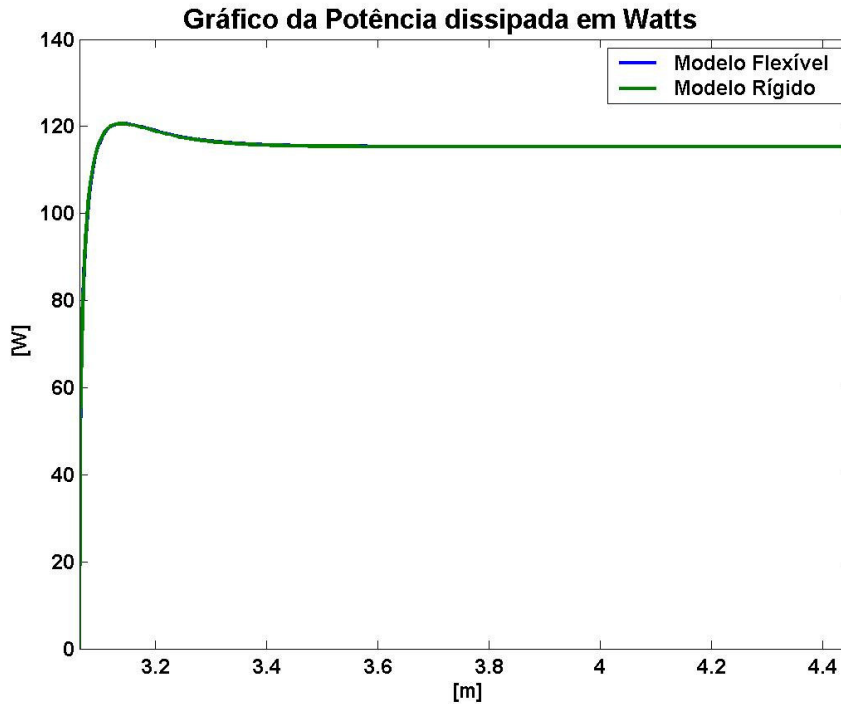


Figura 62 - Potência requerida para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para os modelos de corpo rígido e com suspensão flexível.

As Figuras 63 e 64 mostram o comportamento das curvas das razões do módulo da força de tração pela força normal da roda 1 e roda 2, respectivamente. Analisando essas figuras pode-se analisar que as curvas de ambos os modelos são semelhantes, apresentando apenas uma pequena diferença em termos quantitativos. Essa diferença quantitativa se deve a flexibilidade finita da suspensão do veículo robótico no modelo flexível, a qual faz com que o robô se ajuste melhor ao solo, resultando assim uma melhor distribuição das forças de reação do mesmo sobre o veículo.

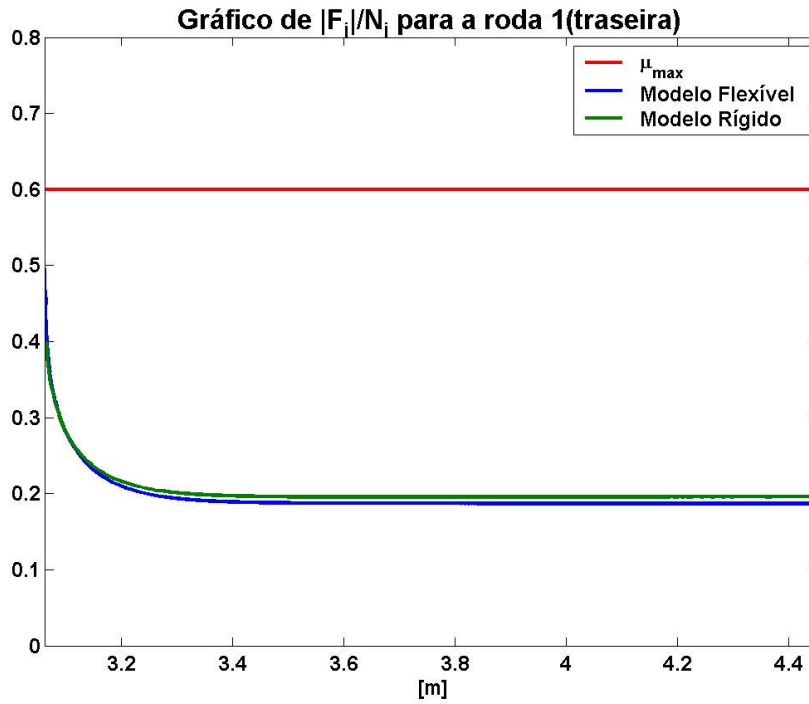


Figura 63- Razão $|F_1|/N_1$ para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

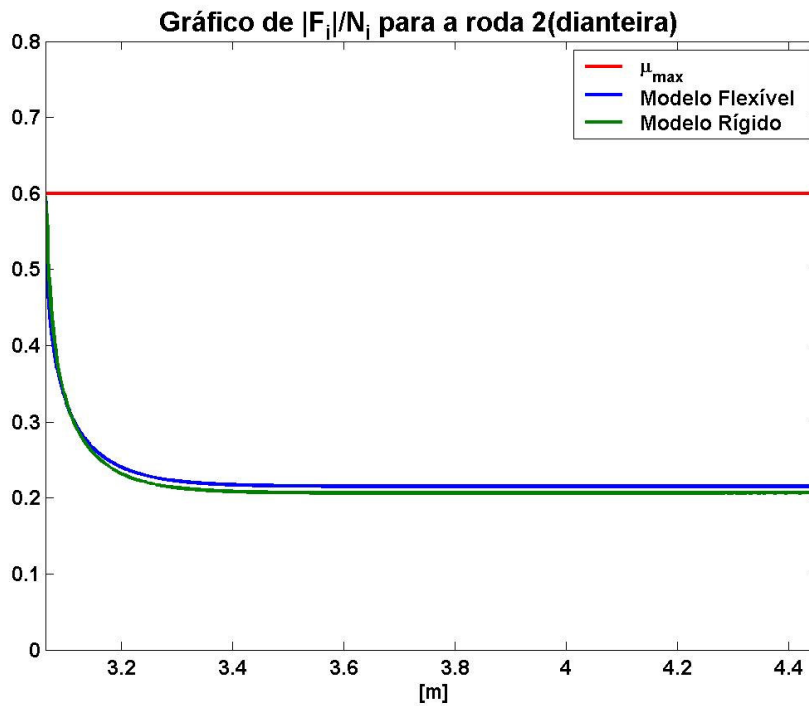


Figura 64 - Razão $|F_2|/N_2$ para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

As Figuras 65 e 66 ilustram as forças de tração da roda 1 e da roda 2, respectivamente, calculadas pelo controle proposto para o modelo rígido e flexível. Assim como os gráficos da razão da força de tração pela força normal, os gráficos das forças de tração mostram que as curvas para ambos os métodos empregados apresentam a mesma forma diferindo apenas em relação aos seus valores. Essa diferença, como já explicado, deve-se a rigidez da suspensão do modelo flexível, sendo que quanto maior for o valor desta menor será a diferença entre os valores das curvas dos modelos analisados.

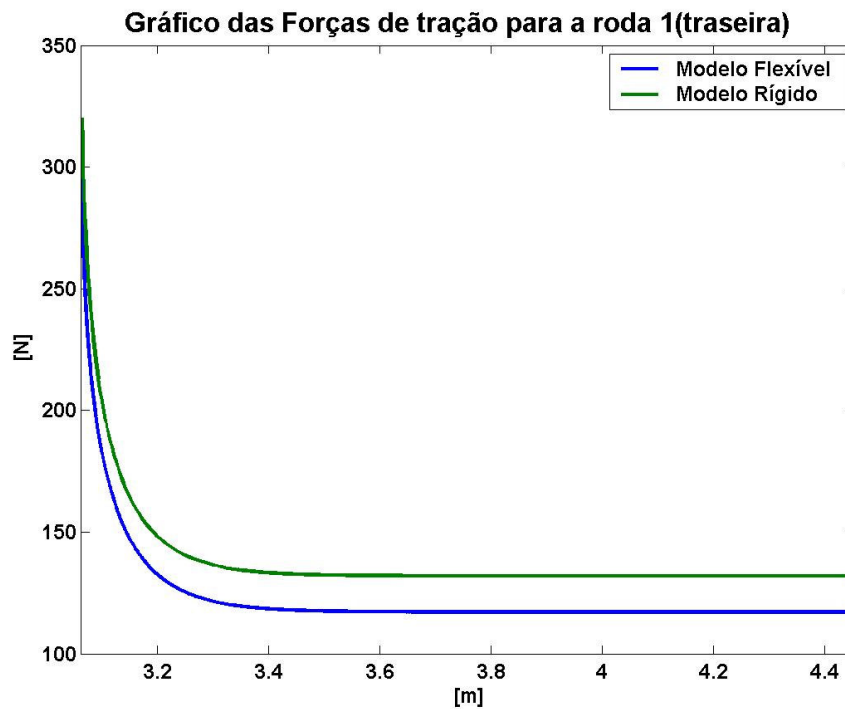


Figura 65- Força de tração da roda 1 (F_1) calculada para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

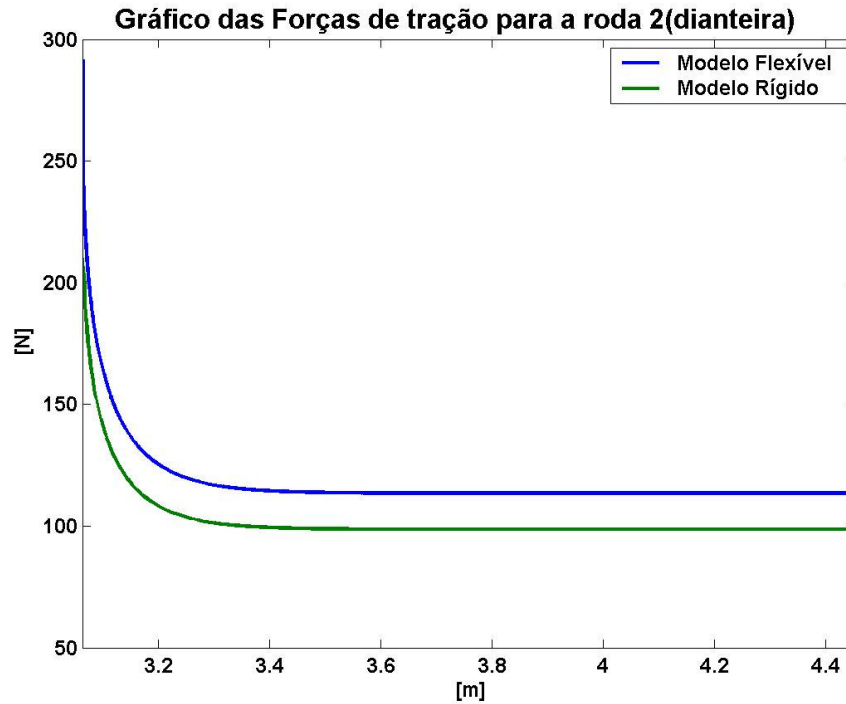


Figura 66 - Força de tração da roda 2 (F_2) calculada para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

As Figuras 67 e 68 mostram os gráficos das forças normais atuando nas rodas 1 e 2, respectivamente. Os gráficos novamente mostram uma tendência de convergência das curvas de ambos os modelos, sendo que a curva das forças normais obtidas para o modelo flexível apresenta uma menor diferença entre os valores da força normal da roda 1 com a força normal da roda 2. Essa menor diferença entre as normais do modelo flexível deve-se ao fato que a suspensão flexível permite uma melhor acomodação do robô ao solo, distribuindo assim melhor o peso do sistema entre as duas rodas.

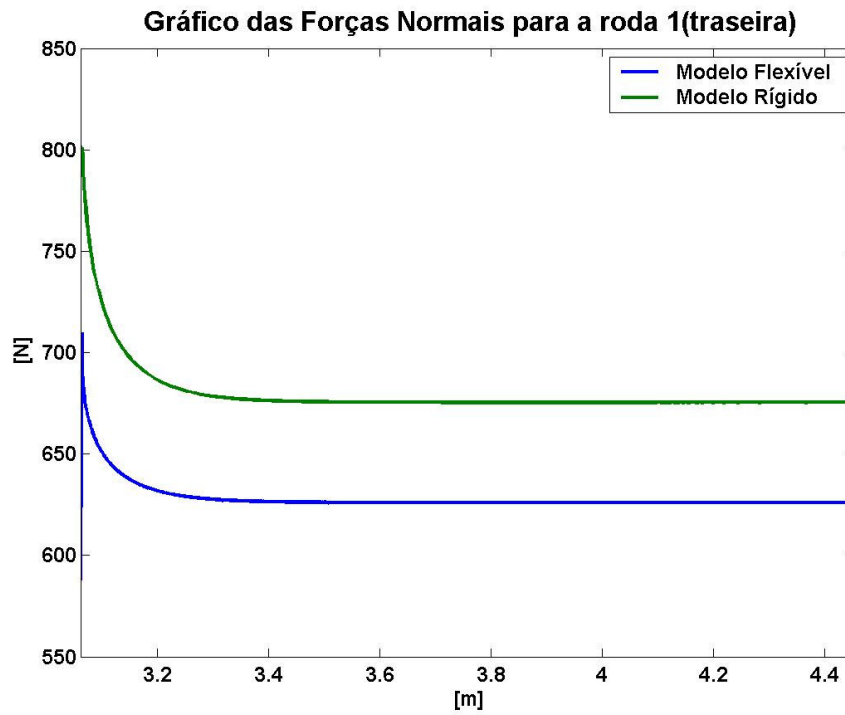


Figura 67- Força normal N_1 para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

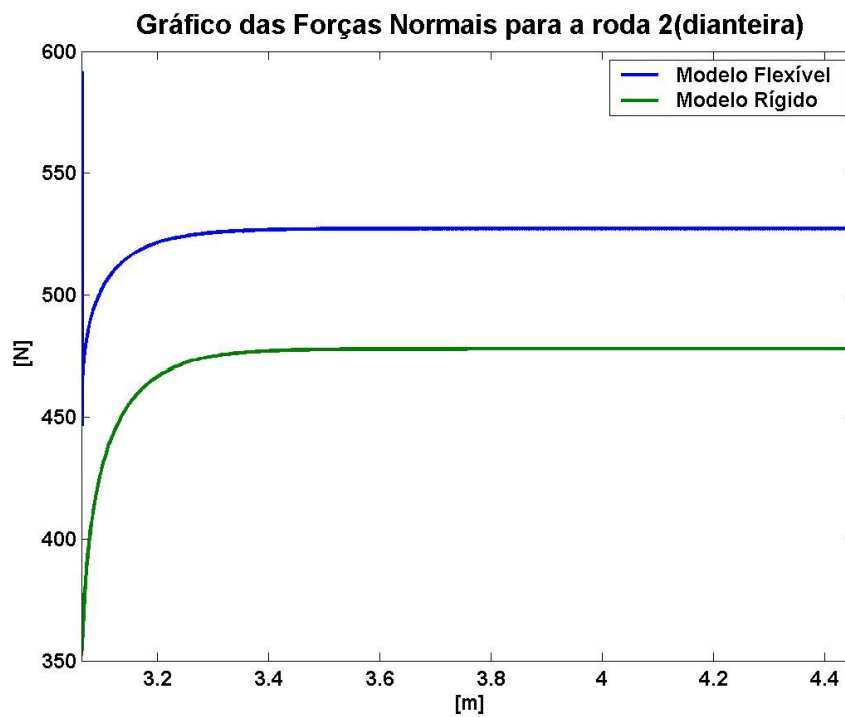


Figura 68 - Força normal N_2 para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.

Após analisar os resultados obtidos pelo controle PI e pelo controle proposto se verificou que o último se mostrou bem superior, principalmente em terrenos acidentados, tanto em termos de prover ao robô uma tração adequada que evite o deslizamento e minimize a potência requerida com em termos de fazer com que o mesmo alcance uma dada velocidade desejada.

b) Terreno com perfil terreno senoidal: $f(x) = 2 \cdot \sin(0,2x)$, tempo de duração de 3s.

Analisando a Fig. 69, que ilustra as velocidades do robô para ambos os modelos analisados, nota-se que ambas convergem para a velocidade desejada e apresentam curvas semelhantes qualitativamente, divergindo apenas em relação ao tempo de convergência.

A velocidade do robô, quando utilizado o modelo rígido, converge mais rapidamente do que quando empregado o modelo flexível. Isso se deve ao fato que em terrenos acidentados a flexibilidade da suspensão altera a dinâmica do sistema ao longo da direção do movimento em relação ao modelo de suspensão rígida. Essa alteração deve-se ao fato que o robô com suspensão flexível apresenta um certo atraso para sentir os efeitos provenientes das forças de tração aplicadas pelo controle ao sistema. Esse atraso ocorre devido à aceleração gerada pelas forças de atrito entre as rodas e o solo não ser transmitida instantaneamente da suspensão para o chassi do veículo robótico, como no modelo rígido, apresentando um certo retardo nessa transferência devido a dinâmica própria da suspensão. Assim, como a velocidade do sistema é dependente da aceleração do mesmo, a velocidade do robô para o modelo flexível fica retardada em relação a velocidade do mesmo para o modelo rígido.

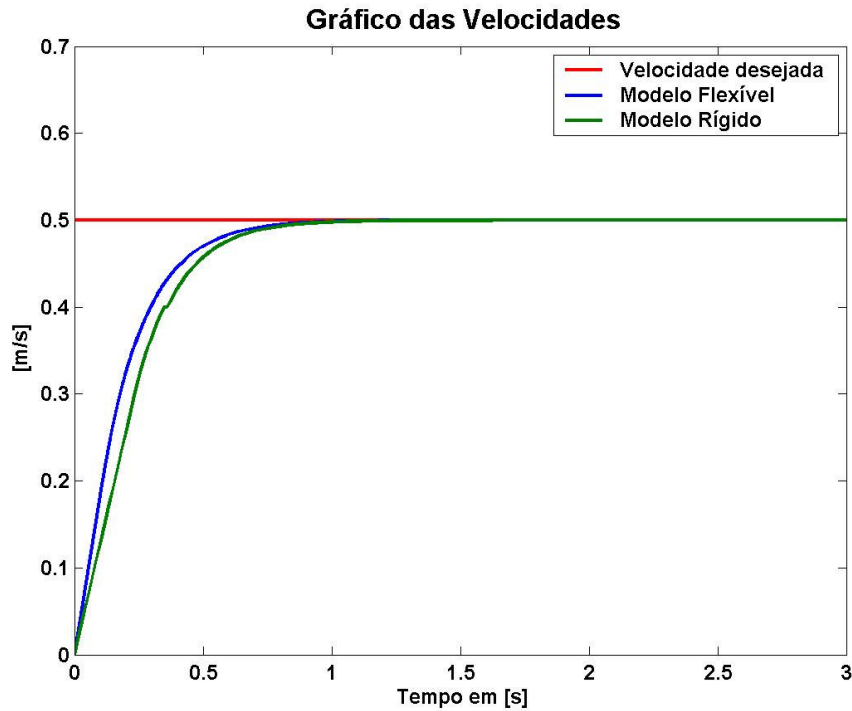


Figura 69 - Velocidade desejada e real do robô no perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para os modelos flexível e rígido.

A Fig. 70 traz o gráfico da potência, mostrando novamente um certo retardo da curva do modelo flexível em relação à curva do modelo rígido, que ocorre pelos motivos acima explicados. Outra característica revelada pelo gráfico é uma diferença quantitativa das duas curvas, sendo que o modelo rígido apresenta uma maior potência requerida que o modelo flexível. Esse maior requerimento de potência do modelo rígido é devido ao forte acoplamento entre as forças de tração e as forças normais agindo sobre o sistema, o que faz com parte haja uma menor contribuição das forças de tração para a efetivação do movimento (pois parte dessas forças atua forçando a roda oposta contra o solo) do sistema quando modelado como rígido em relação ao modelo flexível.

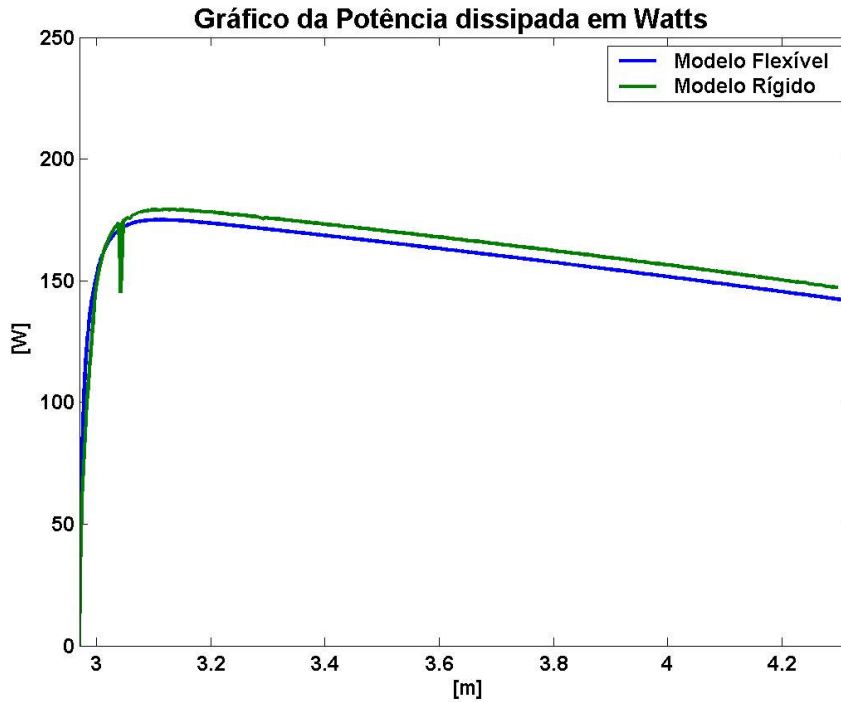


Figura 70 - Potência requerida para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para os modelos de corpo rígido e com suspensão flexível.

As Figuras 72 e 73 mostram os gráficos da razão da força de tração pela força normal para a roda 1 e 2, respectivamente. Analisando estas figuras nota-se que as curvas provenientes do modelo flexível apresenta um comportamento semelhante às obtidas através do modelo rígido. No entanto, há algumas diferenças que devem ser discutidas.

A Fig. 72, que representa a razão da força de tração pela força normal da roda traseira (roda 1), ilustra que a curva do modelo rígido apresenta algumas perturbações. Essas perturbações ocorrem devido ao forte acoplamento entre as forças de tração e as forças normais, que faz com que a região D (dos possíveis valores de forças de atrito entre as rodas e o solo) variar consideravelmente de um estado para o outro do sistema quando em terrenos acidentados, essa variação faz com haja alterações significativas nas possíveis forças de tração que o controle pode aplicar ao sistema para obter os objetivos desejados, sendo que a magnitude dessas variações é fortemente influenciada pelas características do terreno como: inclinação, curvatura, etc.. O gráfico da Fig. 72 mostra ainda que a partir da coordenada $x=4\text{m}$ as curvas de ambos diferem também quanto a sua forma, sendo que a curva proveniente do modelo flexível apresenta um valor nulo para a razão

$|F_1|/N_1$ enquanto a curva do modelo rígido continua decrescendo. Essa diferença ocorre devido ao controle no modelo flexível tirar proveito do desacoplamento entre a força de tração atuando em uma dada roda e a força normal da roda oposta, para otimizar o consumo de potência através do acionamento da roda que mais contribui para o movimento desejado do sistema., enquanto no modelo rígido devido ao forte acoplamento entre as forças de tração as forças normais isso não ser possível.

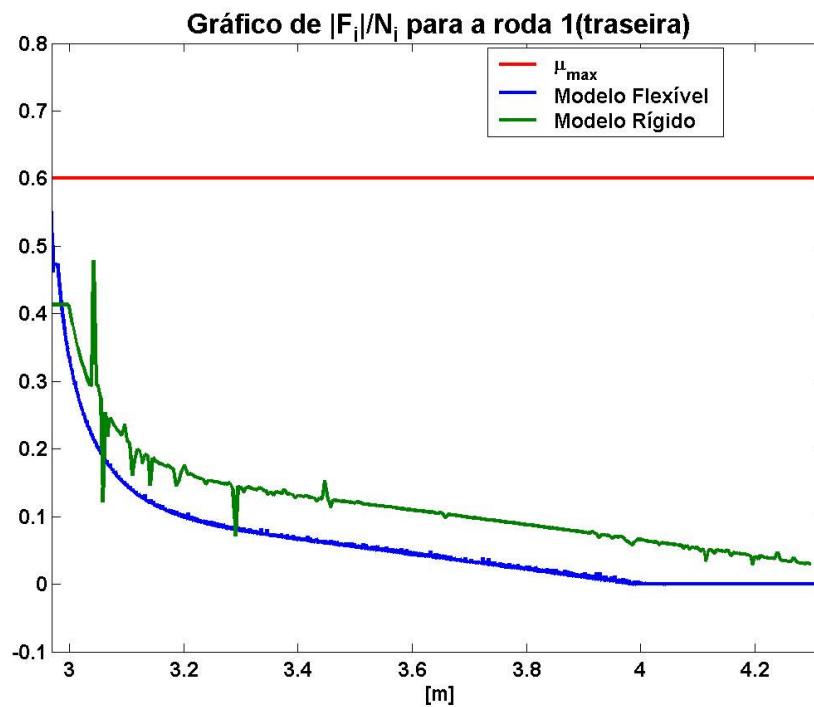


Figura 71 - Razão $|F_1|/N_1$ para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

A Fig. 73 ilustra que a razão $|F_2|/N_2$ apresenta-se no valor máximo permitido para ambos os modelos, excetuando-se a parte final da simulação onde a curva referente ao modelo flexível passa a ser decrescente. A curva referente ao modelo rígido tem também uma perturbação pouco de depois de $x=3\text{m}$, que ocorre devido a mudança de concavidade da curva do perfil do terreno que altera de modo significativo a região D do modelo rígido e conseqüentemente os valores das forças de tração que devem ser aplicadas ao robô.

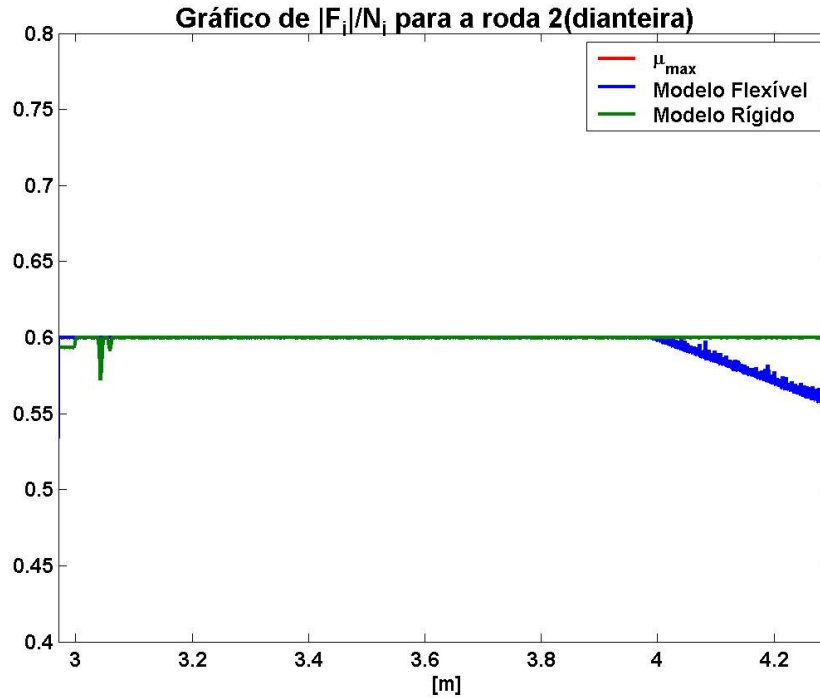


Figura 72- Razão $|F_2|/N_2$ para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

Os gráficos das forças de tração da roda 1 e 2 é mostrado nas Figuras 74 e 75, respectivamente. Analisando esses gráficos nota-se que, como nos gráficos da razão entre a força de tração e a normal agindo em cada roda, as curvas apresentam certa semelhança qualitativa. Eles também mostram que no modelo rígido há algumas perturbações e a força de tração da roda 1 é zerada a partir de $x=4$ m quando utilizado o modelo flexível divergindo assim do modelo rígido, essas características ocorrem devido aos mesmos fatores explicados quando da análise das Figuras 72 e 73.

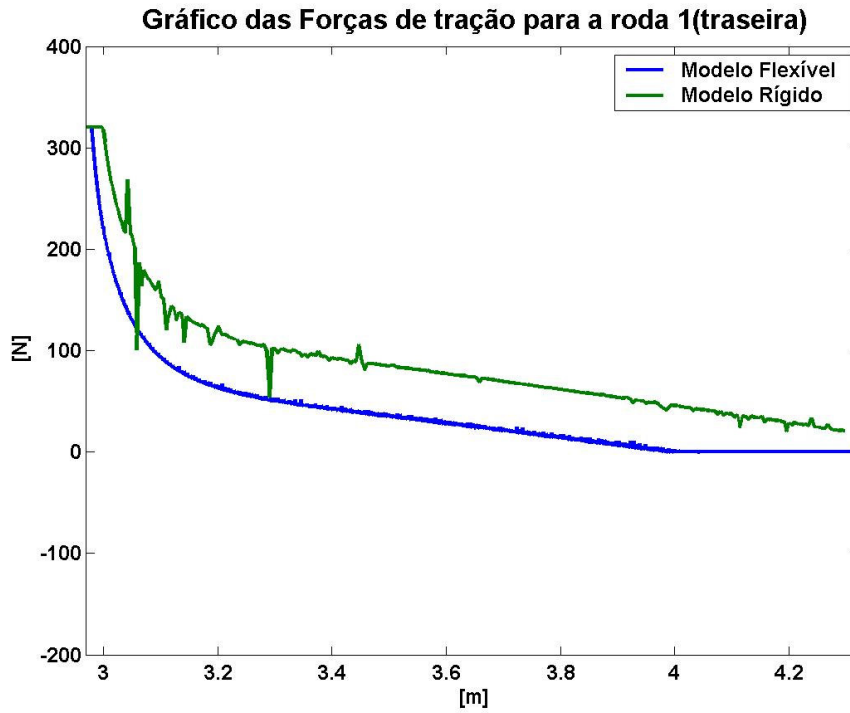


Figura 73 - Força de tração da roda 2 (F_2) calculada para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

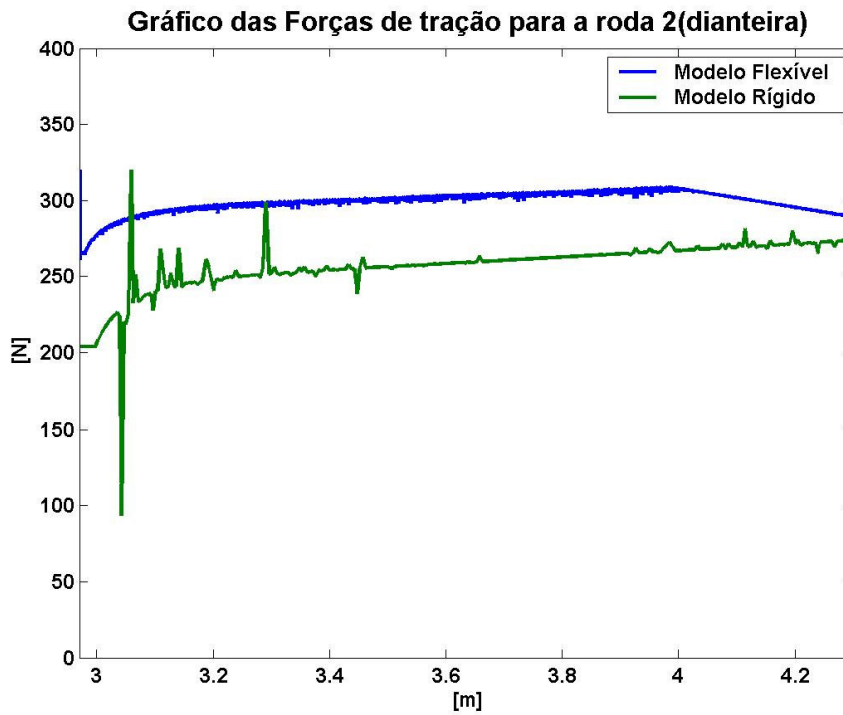


Figura 74- Força de tração da roda 1 (F_1) calculada para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

As Figuras 76 e 77 mostram os gráficos das forças normais agindo na roda 1 e 2, respectivamente. Analisando-os pode-se notar que as curvas das forças normais do modelo rígido apresentam algumas perturbações, que são devidas ao perfil acidentado do terreno e do forte acoplamento entre forças de tração e forças normais neste modelo. Nota-se ainda, que as curvas são semelhantes em termos qualitativos e que a diferença entre os valores da força normal da roda 1 e da roda 2 são menores para o modelo flexível devido, como já explicado para o perfil plano, neste modelo o robô se ajustar melhor ao solo e conseqüentemente distribuindo melhor a força peso entre as rodas.

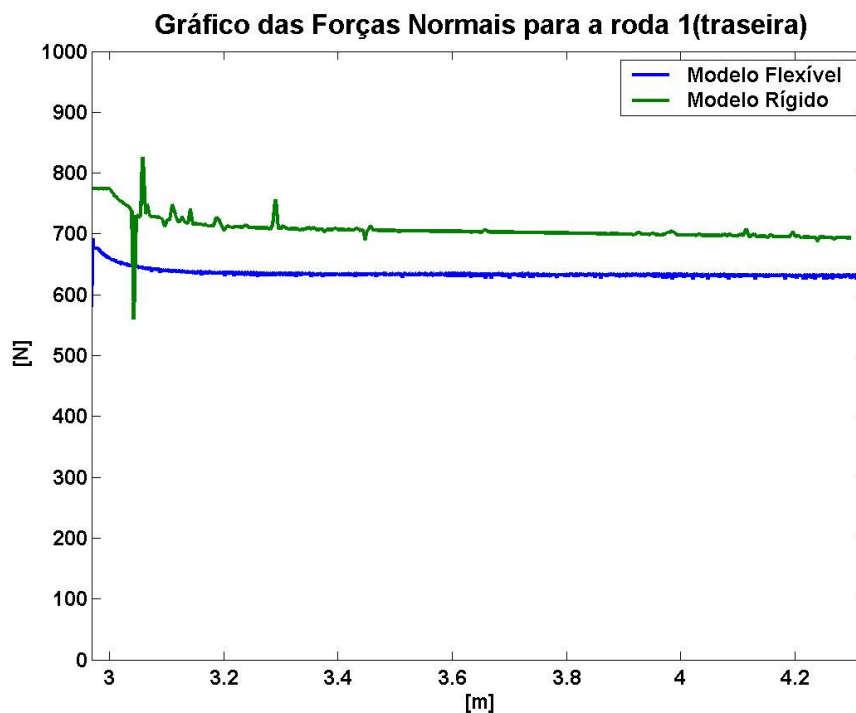


Figura 75- Força normal N_1 para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

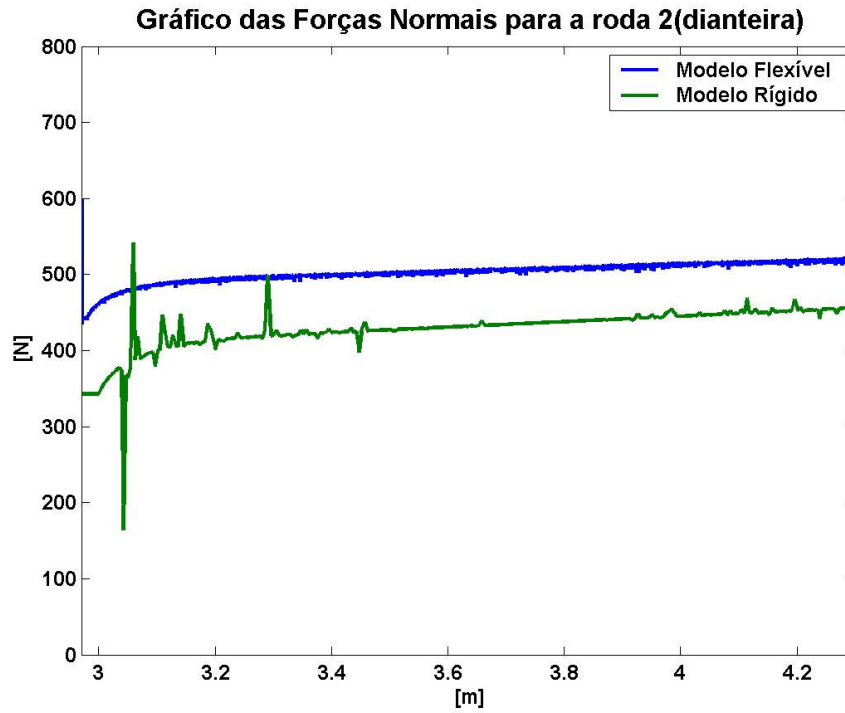


Figura 76 - Força normal N_2 para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.

Assim pode-se verificar que os dois modelos apresentam um comportamento semelhante, a menos de algumas situações acima citadas, validando desta forma a abordagem utilizada para suas obtenções.