

4 Controle

Para implementar o controle, é necessário um joystick analógico. Ele permite enviar comandos de alto nível, informando a direção e velocidades desejadas a partir da movimentação do manete (*pad*) (**Anexo C**). O controle recebe os dados e calcula o torque de cada roda.

Este trabalho implementou o algoritmo de controle dinâmico para terrenos acidentados (CDTA) de estabilidade 2D proposto por Silva [56] para terrenos acidentados, que visa manter a tração nas rodas sempre inferior ao limite de atrito dado por μN , as forças normais sob cada roda sempre positivas (tentando mantê-las sempre em contato com o terreno), não saturar os motores e minimizar a potência dissipada neles.

Para tal, a força de tração da roda i (F_{xi}) deverá atender aos seguintes critérios:

1. $|F_{x_i}| < F_{sat_i}$
2. $|F_{x_i}| < F_{n_i}$
3. $|F_{x_i}| < F_{tmax_i}$

onde $F_{sat_i} = T_{sat} \cdot r_i$, onde T_{sat} é o limite de saturação do motor e r_i é o raio da roda; F_{n_i} é o limite sobre o qual a força normal continuará positiva (como visualizado na próxima equação) e F_{tmax_i} é a força máxima de tração proposta pelo autor como μN .

$$F_i < \frac{F_{susp_i}}{\sin(\gamma_i - \alpha)} \quad (4.1)$$

No entanto, houve a necessidade de usar o coeficiente D , da Equação (3.31), que corresponde o valor máximo da força de tração utilizada na “**Fórmula Mágica**”, pois no simulador desenvolvido nesta dissertação o modelo de tração implementado é mais realista. Com isso, $F_{t,max_i} = D$ da Equação (3.31), onde os coeficientes a_1 e a_2 são respectivamente -21,3 e 1144, como mostra a Tabela 5. Essas restrições e condições formam uma região D admissível de forças de tração para as rodas, como mostra a Figura 32.

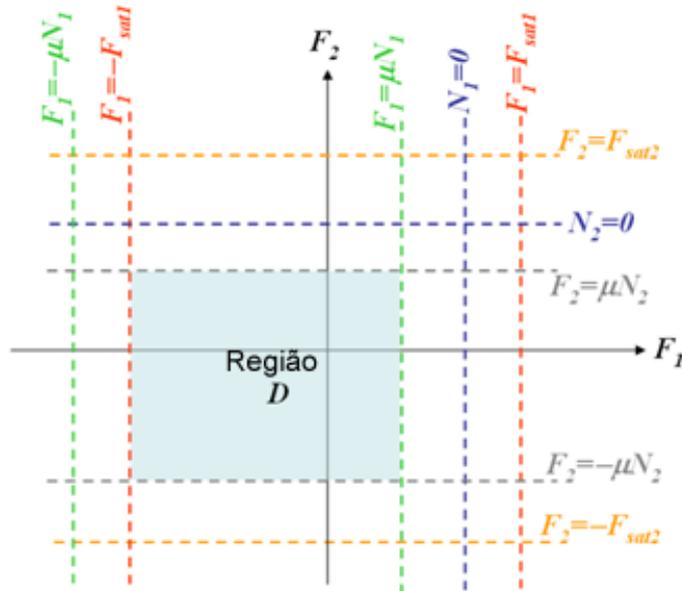


Figura 32 – Região admissível para as forças de tração nas rodas 1 e 2 [56]

A dinâmica longitudinal do veículo foi modelada conforme [56]:

$$a_1 = n_1 \cdot F_1 + n_2 \cdot F_2 + a_0 \tag{4.2}$$

onde a_1 é aceleração do veículo, F_i é a força escalar de tração da roda i , n_i é um fator que depende da inclinação do veículo (α), do ângulo de contato da roda i com o terreno (γ_i) e da massa do veículo (m), e a_0 é a aceleração devida à inclinação do terreno e depende de α , de γ_i , da força F_{susp_i} da suspensão e de m .

Como a aceleração do veículo é proporcional às forças de tração das rodas, o controle de velocidade pode ser definido como um controlador proporcional. Ou seja,

$$U := K_p(V_d - V_l) \quad (4.3)$$

onde K_p é o ganho proporcional, V_d é a velocidade desejada, V_l é a velocidade lida e U é o sinal de controle.

Com isso, combinando as equações (4.2) e (4.3),

$$n_1 \cdot F_1 + n_2 \cdot F_2 + a_0 = K_p(V_d - V_l) \quad (4.4)$$

A equação fornece uma relação linear entre as forças, gerando mais uma restrição para as combinações das forças. Esse conjunto de combinações denominado Γ pode ser visto na Figura 33.

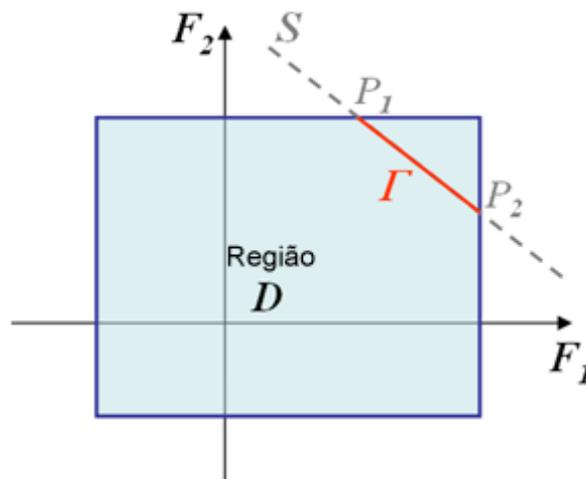


Figura 33 – Combinações da região D e Γ [56]

Geralmente, a interseção entre os conjuntos D e Γ provê infinitas combinações para as forças nas rodas traseiras e dianteiras. Nesses casos, a escolha das forças é feita mediante a minimização da potência dissipada nos motores.

A potência total, por sua vez, foi modelada em [56] como:

$$P_t = \nabla_1 \cdot |F_1| + \nabla_2 \cdot |F_2| \quad (4.5)$$

onde ∇_i depende da velocidade desejada (Vd), da aceleração angular do veículo ($\dot{\alpha}$), da distância vertical entre o centro de massa da roda e o centro de massa do veículo, e de α e γ_i .

Essa restrição de potência gera regiões de combinações de forças onde a potência é a mesma, em forma de um diamante (Figura 34). A minimização da potência ocorre ao se chegar à menor região que intersecta Γ , como mostra a Figura 34.

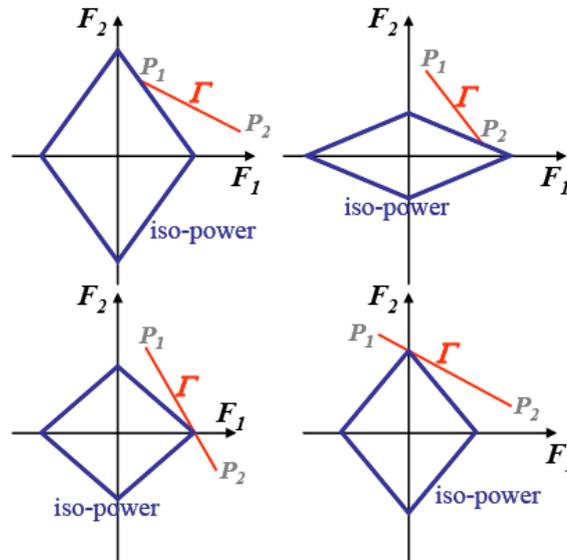


Figura 34 – Pontos de interseção entre Γ e o menor diamante das linhas de mesma potência para os quatro casos básicos

O algoritmo de controle consiste então de calcular as potências nos pontos P_1 e P_2 e as interseções do conjunto Γ com os eixos, e de escolher a combinação com a menor potência.

A abordagem utilizada para o cálculo de estabilidade é o método desenvolvido em [52] para medir a estabilidade veicular, chamado de momento de estabilidade SM (*stability moment*) [50 e 51]. Esse sistema é um cálculo da influência das componentes das forças de contato entre roda e terreno agindo sobre um veículo [52].

Em princípio, pode-se estimar a força de contato entre roda e terreno, necessária para calcular o SM , por meio de sensores de força embarcados na roda. Entretanto, esses sensores têm um alto custo e normalmente não estão presentes em veículos de passageiros. Para evitar o uso deste tipo de sensor, Peters e Iagnemma [52] propuseram uma alternativa chamada Cálculo Indireto do

Momento de Estabilidade. Nesse cálculo, a expressão é montada com os termos inerciais que podem ser medidos na prática com sensores de baixo custo.

$$\left[\sum_{i=1}^l p_b^i \times F_b^i \right] \cdot r_b^j = \left[\sum_{i=1}^{l+1} R_b^i (\omega_i \times I_i \varpi_i + I_i \dot{\varpi}_i) + \sum_{i=1}^{l+1} c_b^i \times m_i a_b^i - \sum_{i=1}^k q_b^i \times B_b^i \right] \cdot r_b^j \quad (4.6)$$

A expressão na direita da igualdade na Equação (4.6) é o método indireto com o somatório de momentos usado no aplicativo VirtualBotz 3D, e a expressão da esquerda é o método direto, dependente de sensores de alto custo.

O método *SM* indireto requer o conhecimento ou medidas dos seguintes valores:

- (1) Velocidade angular, aceleração angular e aceleração linear do chassi do veículo e rodas, expressas em um eixo de coordenada de um corpo fixo.
- (2) Conhecimento do centro de gravidade do chassi e rodas relativos ao ponto de contato entre roda e terreno.
- (3) Conhecimento da magnitude e direção de qualquer tipo de força não desprezível em *B*. Essas forças podem incluir arrasto aerodinâmico ou colisões com outros corpos.
- (4) O termo *r* diz respeito aos eixos de estabilidade.

A Figura 35 mostra os eixos de estabilidade utilizados no sistema, levando em conta que eles devem formar um polígono convexo. Os eixos representados por r^j são linhas adjacentes conectadas aos pontos de contato entre rodas e terreno.

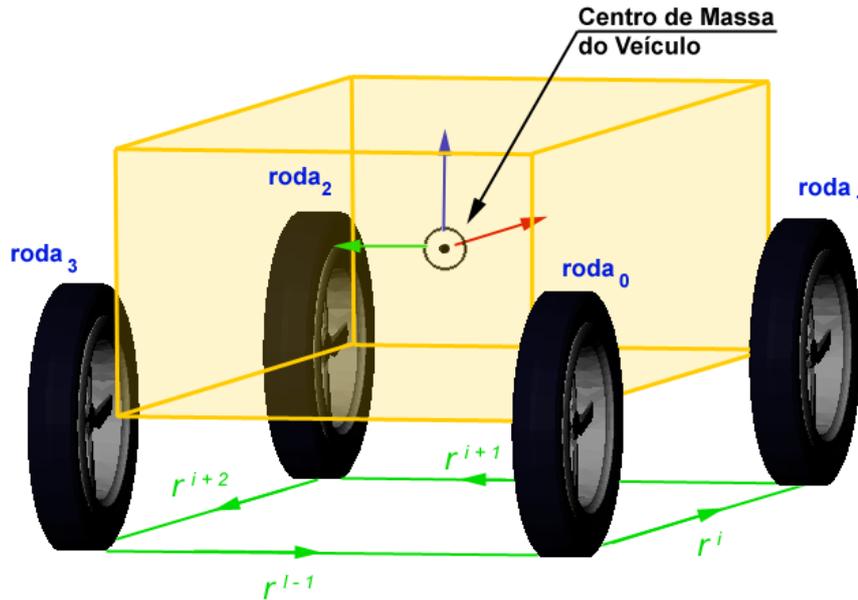


Figura 35 – Sistema de cálculo dos eixos de estabilidade

Cálculo de r^i :

$$r^i = \frac{p^{i+1} - p^i}{\|p^{i+1} - p^i\|}, \quad \text{onde } i \in \{1, \dots, l-1\} \quad (4.7)$$

$$r^l = \frac{p^1 - p^l}{\|p^1 - p^l\|}, \quad i = l \quad (4.8)$$

A força de contato entre roda e terreno causa um momento sobre todos os eixos que não deve ultrapassar a linha de força da ação. A magnitude desse momento é empregada como base proposta ao cálculo de estabilidade do veículo, o termo SM .

Para melhor visualização das forças agindo sobre o veículo robótico, foi implementado no aplicativo VirtualBotz 3D um gráfico simples em 2D apenas para mostrar o SM durante uma simulação.

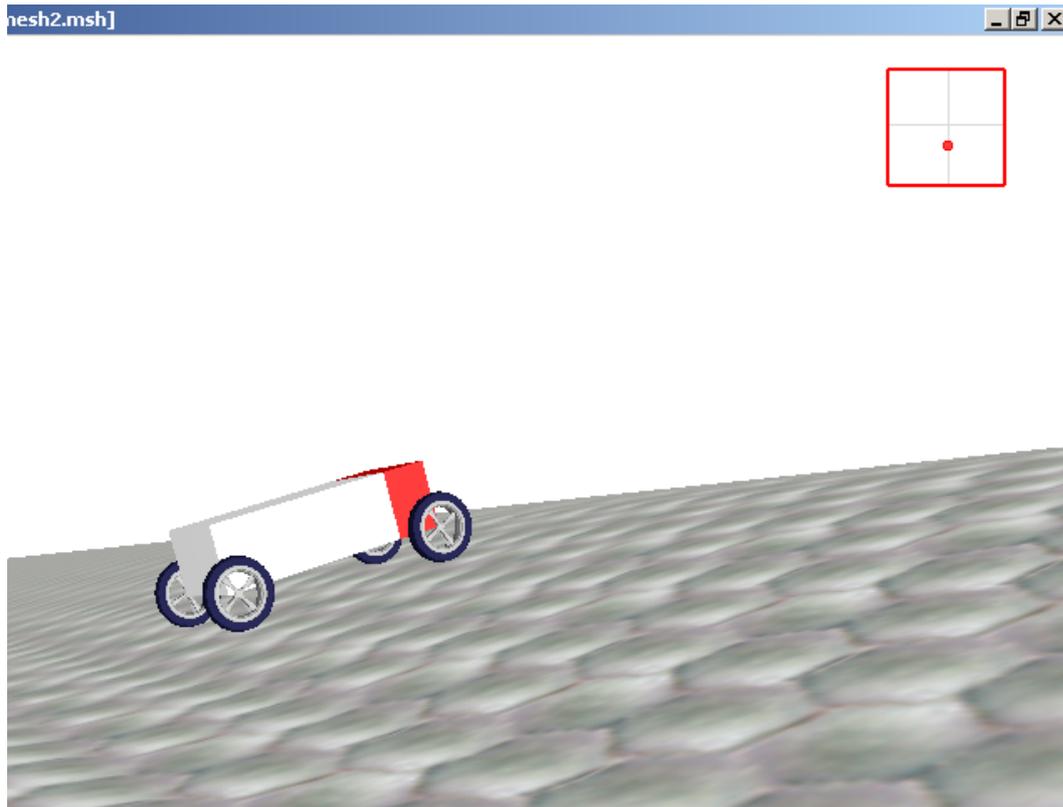


Figura 36 – Gráfico 2D do momento de estabilidade do veículo robótico na tela de visualização do aplicativo VirtualBotz 3D

Para que o veículo se encontre estável, com as quatro rodas em contato com o terreno, é preciso que a medida de estabilidade SM seja maior que -1 e menor do que 1, como mostrado abaixo.

$$-1 < SM_{long} < 1 \quad \text{e} \quad -1 < SM_{trans} < 1 \quad (4.9)$$

onde, para SM , tem-se a direção longitudinal e transversal, ou seja,

$$SM_{long} = \frac{SM_F - SM_B}{SM_F + SM_B} \quad \text{e} \quad SM_{trans} = \frac{SM_L - SM_R}{SM_L + SM_R} \quad (4.10)$$

No próximo capítulo, a validação do software, desenvolvido no presente estudo, é apresentada.