



Alexandre Francisco Barral Silva

**Modelagem de Sistemas Robóticos Móveis
para Controle de Tração em Terrenos
Acidentados**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Abril de 2007



Alexandre Francisco Barral Silva

**Modelagem de Sistemas Robóticos Móveis
para Controle de Tração em Terrenos
Acidentados**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Marco Antonio Meggiolaro

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Mauro Speranza Neto

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Carlos Alberto de Almeida

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Max Suell Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alexandre Francisco Barral Silva

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Pará (Belém, Pará) em 2005.

Ficha Catalográfica

Silva, Alexandre Francisco Barral

Modelagem de sistemas robóticos móveis para controle de tração em terrenos acidentados / Alexandre Francisco Barral Silva ; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2007.

194 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Controle de tração. 3. Ângulos de contato. 4. Minimização de potência. 5. Terrenos acidentados. I. Maggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A Deus, minha mãe Eliete, meu filho Paulo,
minha esposa Elayne e meus irmãos Rubens
e Rosana.

Agradecimentos

Ao professor Marco Antonio Meggiolaro, pela orientação durante o desenvolvimento do curso de Mestrado.

Ao professor Mauro Speranza Neto pela cordialidade e ajuda dispensada.

A Leonardo Dantas, Auleri Santos, Breno Figueredo e Pedro Gonzáles, pela ajuda dispensada.

A todos do Laboratório de Robótica do CENPES (Petrobras), os quais agradeço através da pessoa do engenheiro Ney Robinson

A ANP e ao professor Arthur Braga, pelo suporte financeiro.

Aos professores da PUC – RIO, pelo ensino.

A todos os colegas da pós-graduação.

A todos os funcionários do departamento de Engenharia Mecânica, pela ajuda concedida durante este tempo.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e seus funcionários em geral.

Resumo

Silva, Alexandre F. B.; Meggiolaro, Marco Antonio. **Modelagem de Sistemas Robóticos Móveis para Controle de Tração em Terrenos Acidentados**. Rio de Janeiro - RJ, 2007. 194p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em terrenos acidentados é crítico para robôs móveis manter uma adequada tração nas rodas, pois um excessivo deslizamento das mesmas pode fazer o robô 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. Para se evitar os problemas acima citados e ainda otimizar o consumo de energia em terrenos planos, a presente dissertação desenvolveu um controle de tração para terrenos acidentados com o intuito de aplicá-lo ao Robô Ambiental Híbrido (RAH) da Petrobrás. O RAH é um robô móvel anfíbio que está em fase de desenvolvimento no Laboratório de Robótica do CENPES (Petrobras), que poderá ser comandado por um operador ou se deslocar autonomamente. Esse robô faz parte do projeto Cognitus, braço tecnológico do projeto Piatam (Potenciais Impactos e Riscos Ambientais da Indústria de Óleo e Gás na Amazônia), e será aplicado na monitoração e coleta de dados do meio ambiente de dois gasodutos da Petrobrás na região Amazônica, o gasoduto Urucu (AM)- Porto Velho (RO) e o gasoduto Coari (AM) – Manaus (AM). A técnica de controle de tração de veículos robóticos em terrenos acidentados desenvolvida visa controlar a velocidade ao mesmo tempo em que garante a estabilidade dinâmica, não deslizamento das rodas, evita a saturação dos motores, e em certas condições ainda permite minimizar a potência requerida através do conhecimento dos ângulos de contato entre as rodas e o terreno. Foram feitas duas modelagens independentes, uma considerando a suspensão do robô flexível e a outra considerando o veículo robótico como um corpo rígido, sendo ambas para o caso plano (2D). Foram realizadas simulações em terrenos suaves e acidentados, as quais comprovaram a eficácia das técnicas de controle propostas.

Palavras-chave

Controle de tração; ângulos de contato, minimização de potência, terrenos acidentados.

Abstract

Silva, Alexandre F. Barral Silva; Meggiolaro, Marco Antonio. **Traction Control to Mobile Robotic Systems in Rough Terrain**. Rio de Janeiro, 2004. 194 p. MSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In rough terrain it is critical for mobile robots to maintain adequate wheel traction, because excessive sliding could cause the robot to roll over or deviate from its intended path. Also, if an excessive force is applied onto the terrain, the soil may fail and trap the robot wheels. To avoid these problems, and also minimize the power consumption on even terrain, the present work develops a rough terrain traction control to be applied to the Hybrid Environmental Robot (HER) from Petrobras. The HER is an amphibious mobile robot developed by the Robotics Laboratory from CENPES (Petrobras). It can be commanded by an operator or autonomously. This robot is part of the Cognitus Project, technological branch of the Piatam project (Potential Impacts and Environmental Risks of the Oil and Gas Industry in the Amazon). It will be used for monitoring and environmental data collecting along two gas pipelines in the Amazon region, the Urucu (AM) - Porto Velho (RO) and the Coari (AM) - Manaus (AM). The developed traction control of robotic vehicles in rough terrain aims to control the speed at the same time that it guarantees dynamic stability, no slip of the wheels, prevents motor saturation, and under certain conditions it may also allow for the minimization of the required power. This control needs the knowledge of the current state of the robot, including the contact angles between its wheels and the terrain. Two independent 2D models have been proposed, one including the suspension compliance and one considering the robotic vehicle as a rigid body. Simulations have been performed in even and rough terrains, proving the effectiveness of the proposed control techniques.

Keywords

Traction control, contact angles, rough terrain, minimum power consumption.

Sumário

1	Introdução	19
2	Modelagem 2D do veículo como corpo rígido	28
2.1.	Coordenadas Generalizadas	28
2.2.	Ângulos de Contato e Curva de Centros	28
2.3.	Cinemática Direta	30
2.4.	Cinemática Inversa	33
2.5.	Análise Estática	36
2.6.	Análise Dinâmica	46
3	Modelagem 2D do veículo com suspensão flexível	57
4	Controle de Tração	64
4.1.	Cálculo das forças de atrito para obtenção da velocidade desejada	65
4.2.	Minimização do consumo de potência do sistema	70
5	Simulador	78
5.1.	Módulo I: Entrada de dados do Sistema	78
5.2.	Módulo II: Ajuste do veículo robótico	88
5.3.	Módulo III: Cálculo dos parâmetros do problema dinâmico	91
5.4.	Módulo IV: Controle de Tração	93
5.5.	Módulo V: Cálculo do novo estado do sistema	99
6	Resultados	101
6.1.	Parâmetros Analisados	102
6.2.	Valores dos parâmetros físicos e geométricos do sistema utilizados nas simulações	102
6.3.	Perfis do terreno	103
6.4.	Resultados das simulações	104

7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	139
Referência Bibliográfica	141
Apêndice A: Prova das Razões da Força de Atrito pela Força Normal (Fat/N) para a Análise Estática	143
Anexo I: Códigos Fonte	146

Lista de figuras

Figura 8 - Coordenadas generalizadas (x_c, y_c, α) , ângulos de contato $(\gamma_1$ e $\gamma_2)$ e pontos de contato $(P_1$ e $P_2)$.	29
Figura 9 - Ponto da curva de centros (x_{cc}, y_{cc}) associado ao ponto de contato $P_i=(x_i, y_i)$.	30
Figura 10 - Características geométricas do veículo.	31
Figura 11 - Direção das velocidades do centro das rodas 1 e 2 $(V_1$ e V_2 , respectivamente).	33
Figura 12 - Velocidades V_1 e V_2 e suas componentes na direção de t e n .	35
Figura 13 - Forças agindo no veículo.	37
Figura 14 - Região de pontos (Fat_1, Fat_2) candidatos a mínimo do problema.	43
Figura 15 - Região D com os pontos extremos P_1 e P_2 .	45
Figura 16 - Modelo do veículo com suspensão flexível.	57
Figura 17 - Forças agindo no chassi do veículo.	58
Figura 18 - Forças e torque agindo em uma roda i do veículo.	59
Figura 19 - Obtenção da região D para a abordagem de corpo rígido.	68
Figura 20 - Obtenção da região D para a abordagem com suspensão flexível.	69
Figura 21 - Região Γ de possíveis valores das forças de atrito para escolha do controle.	70
Figura 22 - Velocidades V_{ci} e V_{ci}^L .	72
Figura 23 - Fluxograma representativo do programa de simulação do sistema.	78
Figura 24 - Exemplo de um perfil de terreno utilizado na simulação	80
Figura 25 - Obtenção do ponto (x_{cc}, y_{cc}) da curva de centros.	81
Figura 26 - Pontos de contato quando $R_c < r$.	84
Figura 27 - Situação de ponto de degeneração da curva do perfil do terreno em que a roda gira em torno do mesmo.	85
Figura 28 - Relação entre θ , α_1 e α_2 .	86
Figura 29 - Grupo de pontos degenerados em que $f'(x_i - \epsilon) < f'(x_i + \epsilon)$.	87
Figura 30 - Parâmetros envolvidos no ajuste inicial do ângulo α	88
Figura 31 - Ajuste do veículo através da fixação do centro das rodas sobre a curva de centros $(g(x))$.	89

Figura 32 - Esquema para o cálculo do centro da roda i (C_i).	90
Figura 33 – Reta associada à velocidade V_L mais próxima de V_d .	97
Figura 34 -Perfil de terreno rampa com equação $f(x)=0,2x$.	104
Figura 35–Perfil de terreno senoidal com equação $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$.	104
Figura 36 – Perfil de terreno senoidal com equação $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$.	105
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.	106
Figura 38- Potência requerida para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle PI e com controle proposto.	107
Figura 39- Razões $ F_{il}/N_i$ para o controle PI.	108
Figura 40- Razões $ F_{il}/N_i$ para o controle proposto.	109
Figura 41- Forças de tração para o perfil de rampa $f(x) = 0,2x$, com controle PI.	110
Figura 42- Forças de tração para o perfil de rampa $f(x) = 0,2x$, com controle proposto.	110
Figura 43- Forças normais para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle PI.	111
Figura 44- Forças normais para o perfil de rampa $f(x)=0,2x$, com controle de tração proposto.	112
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.	113
Figura 46- Potência requerida para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI e com controle proposto.	114
Figura 47- Razões $ F_{il}/N_i$ para o controle PI.	115
Figura 48- Razões $ F_{il}/N_i$ para o controle proposto.	115
Figura 49- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI.	116
Figura 50- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle proposto.	117
Figura 51- Forças normais para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle PI.	118
Figura 52- Forças normais para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,2x)$, com controle de tração proposto.	118

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.	119
Figura 54- Potência requerida para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$, com controle PI e o controle proposto.	120
Figura 55- Razões $ F_i /N_i$ para o controle PI, para o perfil do terreno senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$.	121
Figura 56- Razões $ F_i /N_i$ para o controle proposto, para o perfil do terreno senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$.	121
Figura 57- Forças de tração para o perfil senoidal $f(x)=2\text{sen}(0,3x)$, com controle PI.	122
Figura 59- Gráfico das Fat 's para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$, controle de velocidade e potência	124
Figura 60- Gráfico das Fat 's para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,3x)$, sem controle	124
Figura 61 - Velocidade desejada e real do robô no perfil rampa $f(x)=0,2x$, para os modelos flexível e rígido.	125
Figura 62 - Potência requerida para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para os modelos de corpo rígido e com suspensão flexível.	126
Figura 63- Razão $ F_1 /N_1$ para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.	127
Figura 64 - Razão $ F_2 /N_2$ para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.	127
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.	128
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.	129
Figura 67- Força normal N_1 para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.	130
Figura 68 - Força normal N_2 para o perfil rampa $f(x)=0,2x$, para o modelo flexível e rígido.	130
Figura 69 - Velocidade desejada e real do robô no perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para os modelos flexível e rígido.	132

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.	133
Figura 71 - Razão $ F_1 /N_1$ para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.	134
Figura 72- Razão $ F_2 /N_2$ para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.	135
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.	136
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.	136
Figura 75- Força normal N_1 para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.	137
Figura 76 - Força normal N_2 para o perfil senoidal $f(x)=2.\text{sen}(0,2x)$, para o modelo flexível e rígido.	138

Lista de Símbolos

A	Matriz de coeficientes das forças normais para a análise dinâmica
\bar{A}	Vetor de termos independentes das equações de restrições do sistema
a_L	Aceleração do centro de massa (CM) do veículo longitudinal ao chassi, [m/s ²]
a_0	Aceleração do veículo devido a forças externas e de campo, [m/s ²]
B	Matriz de coeficientes das forças de atrito para a análise dinâmica
c	Constante de amortecimento das suspensões na direção transversal ao chassi do veículo, [N.s/m]
\equiv	
\bar{C}	Matriz de coeficientes das acelerações generalizadas nas equações de restrições do sistema
C_1	Centro da roda 1, (x_{c1}, y_{c1})
C_2	Centro da roda 2, (x_{c2}, y_{c2})
D	Região gerada pelos pontos (Fat_1, Fat_2) que podem ser obtidos para o robô
D'	Intersecção de D com uma dada restrição do problema
$d_{N_2,1}$	Braço de alavanca de N_2 em relação a P_1 , [m]
$d_{N_1,2}$	Braço de alavanca de N_1 em relação a P_2 , [m]
$d_{Fat_2,1}$	Braço de alavanca de Fat_2 em relação a P_1 , [m]
$d_{Fat_1,2}$	Braço de alavanca de Fat_1 em relação a P_2 , [m]
d_{N_2}	Braço de alavanca de N_2 em relação ao CM, [m]
d_{N_1}	Braço de alavanca de N_1 em relação ao CM, [m]
d_{Fat_2}	Braço de alavanca de Fat_2 em relação ao CM, [m]
d_{Fat_1}	Braço de alavanca de Fat_1 em relação ao CM, [m]
dV_L	Módulo do erro entre a velocidade desejada e a velocidade real do centro de massa do robô para o controle proposto, [m/s]
dx	Distância entre os valores de x no perfil do terreno, [m]

E	Erro entre a velocidade desejada e a velocidade real do centro de massa do robô para o controle PI, [m/s]
\bar{E}	Erro médio das coordenadas y em relação à curva de centros, [m]
\vec{F}_{at}	Vetor das forças de atrito
F_{at1}	Força de atrito atuando na roda 1, [N]
F_{at2}	Força de atrito atuando na roda 2, [N]
F_{at1}^o	Força de atrito da roda 1 que otimiza o sistema, [N]
F_{at2}^o	Força de atrito da roda 2 que otimiza o sistema, [N]
F_i	Força de tração na roda i calculada pelo controle PI, [N]
F_{r1}	Força de reação longitudinal da suspensão 1 sobre o chassi, [N]
F_{r2}	Força de reação longitudinal da suspensão 2 sobre o chassi, [N]
F_{sat1}	Força de saturação da roda 1, [N]
F_{sat2}	Força de saturação da roda 2, [N]
$f(x)$	Função representativa da curva do perfil do terreno, $y=f(x)$
$f'(x_i)$	Derivada espacial de $f(x)$ em $x = x_i$.
g	Aceleração local da gravidade, [m/s ²]
g'_1	Derivada espacial de $g(x)$ em x_{c1}
g'_2	Derivada espacial de $g(x)$ em x_{c2}
g''_1	Segunda derivada espacial de $g(x)$ em x_{c1}
g''_2	Segunda derivada espacial de $g(x)$ em x_{c2}
$g(x_{cc})$	Função representativa da curva de centros, $y_{cc}=g(x_{cc})$
h_1	Distância transversal entre C_1 e CM, [m]
h_2	Distância transversal entre C_2 e CM, [m]
\vec{i}	Vetor unitário na direção do eixo x
I	Momento de inércia do robô em relação ao eixo z passando pelo CM, [kg.m ²]
I_c	Corrente elétrica, [A]
I_{c1}	Corrente elétrica do motor de acionamento da roda 1, [A]
I_{c2}	Corrente elétrica do motor de acionamento da roda 2, [A]
I_1	Intervalo de possíveis valores das forças de atrito da roda 1
I_2	Intervalo de possíveis valores das forças de atrito da roda 2

\vec{j}	Vetor unitário na direção do eixo y
K	Constante de rigidez transversal das suspensões, [N/m]
KI	Ganho integral do controle PI;
K_m	Constante de proporcionalidade do motor da roda, [N.m/A]
KP	Ganho proporcional do controle PI;
K_p	Ganho proporcional do controle proposto, [1/s]
L_1	Distância longitudinal entre C_1 e CM, [m]
L_2	Distância longitudinal entre C_2 e CM, [m]
m	Massa do robô, [kg]
M	Matriz de inércia do sistema
\mathbf{n}	Vetor unitário na direção normal ao chassi do robô
\vec{N}	Vetor das forças normais
N_1	Força normal atuando na roda 1, [N]
N_2	Força normal atuando na roda 2, [N]
P	Força peso do veículo robótico, [N]
P_e	Potência do eixo dos motores de acionamento das rodas, [W]
Pot	Potência dissipada por efeito joule, [W]
Pot_1	Potência dissipada por efeito joule pelo motor da roda 1, [W]
Pot_2	Potência dissipada por efeito joule pelo motor da roda 2, [W]
P_T	Potência total dissipada pelo eixo dos motores das rodas, [W]
P_{total}	Potência total dissipada pelas rodas do robô, [W]
P_1	Ponto de contato entre a roda 1 e o solo, (x_1, y_1)
P_2	Ponto de contato entre a roda 2 e o solo, (x_2, y_2)
r	Raio da roda do robô, [m]
R	Resistência elétrica, [Ω]
$R_c(x_i)$	Raio de curvatura de $f(x)$ em x_i .
R_1	Resistência elétrica do motor da roda 1, [Ω]
R_2	Resistência elétrica do motor da roda 2, [Ω]
\mathbf{t}	Vetor unitário na direção paralela ao chassi do robô
\vec{u}	Vetor de termos independentes na equação dinâmica do sistema
V_d	Velocidade desejada do robô, [m/s]
V_L	Velocidade do CM na direção longitudinal ao chassi, [m/s]

0V_L	Velocidade do CM na direção longitudinal no instante t_0 , [m/s]
\mathbf{V}_1	Vetor velocidade do centro da roda 1
\mathbf{V}_2	Vetor velocidade do centro da roda 2
V_1^n	Componente da velocidade do centro da roda 1 ao longo de \mathbf{n} , [m/s]
V_2^n	Componente da velocidade do centro da roda 2 ao longo de \mathbf{n} , [m/s]
V_1^t	Componente da velocidade do centro da roda 1 ao longo de \mathbf{t} , [m/s]
V_2^t	Componente da velocidade do centro da roda 2 ao longo de \mathbf{t} , [m/s]
$\ddot{\mathbf{X}}$	Vetor de acelerações generalizadas do sistema
x_c	Coordenada x do centro de massa do sistema em relação a uma base inercial, [m]
x_{cc}	Coordenada x da curva de centros, [m]
x_{c1}	Coordenada x do centro da roda 1, [m]
x_{c2}	Coordenada x do centro da roda 2, [m]
x_1	Coordenada x do ponto de contato da roda 1 com o solo, [m]
x_2	Coordenada x do ponto de contato da roda 2 com o solo, [m]
\dot{x}_c	Velocidade em x do centro de massa do robô, [m/s]
\dot{x}_{c1}	Velocidade em x do centro da roda 1, [m/s]
\dot{x}_{c2}	Velocidade em x do centro da roda 2, [m/s]
\ddot{x}_c	Aceleração em x do centro de massa do robô, [m/s ²]
\ddot{x}_{c1}	Aceleração em x do centro da roda 1, [m/s ²]
\ddot{x}_{c2}	Aceleração em x do centro da roda 2, [m/s ²]
y_c	Coordenada y do centro de massa do sistema em relação a uma base inercial,[m]
y_{cc}	Coordenada y da curva de centros, [m]
y_{c1}	Coordenada y do centro da roda 1, [m]
y_{c2}	Coordenada y do centro da roda 2, [m]
y_1	Coordenada y do ponto de contato da roda 1 com o solo, [m]
y_2	Coordenada y do ponto de contato da roda 2 com o solo, [m]
\dot{y}_c	Velocidade em y do centro de massa do robô, [m/s]

\dot{y}_{c1}	Velocidade em y do centro da roda 1, [m/s]
\dot{y}_{c2}	Velocidade em y do centro da roda 2, [m/s]
\ddot{y}_c	Aceleração em y do centro de massa do robô, [m/s ²]
\ddot{y}_{c1}	Aceleração em y do centro da roda 1, [m/s ²]
\ddot{y}_{c2}	Aceleração em y do centro da roda 2, [m/s ²]
α	Ângulo de rotação do veículo em torno do eixo z (perpendicular ao plano), [rad]
$\dot{\alpha}$	Velocidade angular do robô, [rad/s]
$\ddot{\alpha}$	Aceleração angular do robô, [m/s ²]
γ_1	Ângulo de contato entre a roda 1 e o solo, [rad]
γ_2	Ângulo de contato entre a roda 2 e o solo, [rad]
η	Termo independente da equação que relaciona o erro das velocidades com a aceleração a_L
η_1	Coefficiente da Fat_1 na equação que relaciona o erro das velocidades com a aceleração a_L
η_2	Coefficiente da Fat_2 na equação que relaciona o erro das velocidades com a aceleração a_L
μ	Coefficiente de atrito estático entre as rodas e o solo
μ_1	Coefficiente de atrito estático entre a roda 1 e o solo
μ_2	Coefficiente de atrito estático entre a roda 2 e o solo
ξ_1	Alongamento / compressão da suspensão 1 na direção transversal ao chassi do veículo, [m]
ξ_2	Alongamento / compressão da suspensão 2 na direção transversal ao chassi do veículo, [m]
$\dot{\xi}_1$	Taxa de variação no tempo do alongamento / compressão da suspensão 1 na direção transversal ao chassi do veículo, [m/s]
$\dot{\xi}_2$	Taxa de variação no tempo do alongamento / compressão da suspensão 2 na direção transversal ao chassi do veículo, [m/s]
ω_1	Velocidade angular do eixo do motor da roda 1, [rad/s]
ω_2	Velocidade angular do eixo do motor da roda 2, [rad/s]