



**Alexandre de Lima Spinola**

**Modelagem Integrada da Dinâmica Veicular  
para Controle Homeostático**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ricardo Tanscheit  
Co-orientador: Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro, 08 de julho de 2009



**Alexandre de Lima Spinola**

**Modelagem Integrada da Dinâmica Veicular  
para Controle Homeostático**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Ricardo Tanscheit**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Mauro Speranza Neto**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Marco Antonio Meggiolaro**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. José Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Fernando Ribeiro da Silva**

IME

**Dr. Roberto Ades**

IME

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 08 de julho de 2009

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

### **Alexandre de Lima Spinola**

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação em 2001 e Mestre em Engenharia Elétrica em 2003, ambos na PUC-Rio. Trabalhou na indústria do petróleo, na DSND Consub e na FMC Technologies do Brasil, e na PUC-Rio, como auxiliar de ensino e pesquisa e estagiário em docência do Departamento de Engenharia Elétrica. Fundou a BioGénie Projetos, empresa de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para fabricação de componentes protéticos odontológicos. Atualmente integra a equipe de projetos do Laboratório de Robótica da PUC-Rio, auxiliando no desenvolvimento de projetos e na elaboração de novas propostas para o laboratório.

#### Ficha Catalográfica

Spinola, Alexandre de Lima

Modelagem integrada da dinâmica veicular para controle homeostático / Alexandre de Lima Spinola ; orientador: Ricardo Tanscheit ; co-orientador: Mauro Speranza Neto – 2009.  
186 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.  
Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Dinâmica Veicular. 3. MATLAB. 4. SIMULINK. 5. Controle não-linear. 6. Grafo de ligação. 7. Controle hierarquizado. 8. Homeostase. I Tanscheit, Ricardo. II Speranza Neto, Mauro. III Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para minha esposa, Eliane.

Ao professor Marcos Azevedo da Silveira, que pela vontade de Deus não pôde estar presente à conclusão deste trabalho. Marcos obrigado por seus ensinamentos constantes ao longo destes anos de orientação.

## **Agradecimentos**

A Deus, por sempre ter me dado condições para realizar meu trabalho e chegar até aqui.

Ao CNPq e à PUC pelos incentivos financeiros, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao meu co-orientador, professor Mauro Speranza Neto, pela amizade, estímulo e parceria de sempre para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador de “última hora”, professor Ricardo Tanscheit, por ter aceitado assumir esta tarefa e permitir a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Oscar e Lúcia, e à minha irmã, Cláudia, pelo incentivo, carinho e amor de sempre.

Ao meu amigo e colega Felipe Prado Loureiro, por seus conhecimentos de Matlab e Simulink, fundamentais para resolver os obstáculos e permitir as simulações computacionais deste trabalho.

Aos professores Fernando, Roberto, Marco Antonio e Parise, por terem participado da banca examinadora e avaliado este trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo constante apoio.

A todos os meus amigos, por todo o apoio, paciência e compreensão nos momentos de ausência.

## Resumo

Spinola, Alexandre de Lima; Tanscheit, Ricardo. **Modelagem Integrada da Dinâmica Veicular para Controle Homeostático**. Rio de Janeiro, 2009. 186p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta uma abordagem de modelagem de sistemas dinâmicos, em conjunção com uma nova proposta de controladores embarcados para veículos automotores. Nesta nova proposta, além de ser possível modificar o controle aplicado à dinâmica veicular, por intermédio da habilitação e desligamento sucessivos de controladores locais específicos, também é possível modificar a complexidade do modelo dinâmico do automóvel, fazendo-o se comportar o mais próximo possível de como o homem o percebe: em partes e com complexidades diferentes à medida que se alteram as situações operacionais. Esta abordagem aproxima o veículo do conceito de homeostase empregado nas ciências médicas, que determina o funcionamento normal do corpo humano. Ela reconhece a capacidade de um controlador hierarquizado de alto nível determinar doses de ações de controle para situações críticas distintas conseguindo, com isso, restabelecer uma condição de estabilidade local que, por consequência, tende a garantir a estabilidade global do veículo. Este trabalho apresenta as considerações teóricas e o princípio dos desenvolvimentos para a obtenção do Controlador Homeostático, junto com simulações e aplicações em casos particulares.

## Palavras-chave

Dinâmica veicular; MATLAB; SIMULINK; controle não linear; grafo de ligação, controle hierarquizado; homeostase; modelagem por subsistemas.

## Abstract

Spinola, Alexandre de Lima; Tanscheit, Ricardo (Advisor). **Integrated Modeling of Vehicle Dynamics Towards Homeostatic Control**. Rio de Janeiro, 2009. 186p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a technique for modeling dynamic systems together with a new proposal for the design and development of embedded controllers for automotive systems. In this new approach not only is it possible to modify the applied controller to vehicle dynamics by simply enabling or disabling successive specific local controllers, but it is also possible to change complexity of the dynamic model of the car. With this approach the designer makes the vehicle behave closer to what is perceived by humans: a vehicle in parts and with different complexities as operational situations may change. This approach approximates the vehicle to the homeostasis concept, employed in medical sciences, which determines the normal behavior of the human body. It recognizes the ability of a high level hierarchical controller to determine small control actions for critical specific scenarios. By that the controller reestablishes local stability and, as a direct consequence, ensures global stability of the vehicle. This work presents theoretical considerations and the initial developments in order to achieve the Homeostatic Controller. It also presents simulations and applications to specific cases.

## Keywords

Vehicle dynamics; MATLAB; SIMULINK; nonlinear control; bond graph; hierarchical control homeostasis; modeling by subsystems.

# Sumário

1	Introdução	25
2	Revisão Bibliográfica	29
3	Homeostase Veicular	45
3.1.	O Conceito	45
3.2.	Modelo Global versus Modelo Segmentado	53
3.3.	Como Chegar ao Controlador Homeostático	60
4	Modelagem da Dinâmica Veicular	68
4.1.	Chassi	72
4.1.1.	Cinemática Absoluta em um Referencial Local	72
4.1.2.	Cinemática Absoluta em um Referencial Global	76
4.1.3.	Dinâmica em um Referencial Local	82
4.1.4.	Equilíbrio de Forças Externas	89
4.2.	Suspensão Passiva	95
4.3.	Sistema de Propulsão	96
4.3.1.	Motor	98
4.3.2.	Embreagem	102
4.3.3.	Transmissão	104
4.3.4.	Eixo de Transmissão	106
4.3.5.	Diferencial	108
4.3.6.	Semi-eixo	110
4.3.7.	Integração no Sistema de Propulsão	111
4.4.	Roda e Pneu	112
4.4.1.	Contato Pneu-Solo	116
4.4.2.	Força de Tração, de Frenagem e Derivas Longitudinais	117
4.4.3.	Força Lateral e Ângulo de Deriva	121
4.4.4.	Composição de Forças no Referencial da Roda	124
4.5.	Sistema de Direção	125

4.6. Sistema de Freios	126
5 Simulando a Dinâmica Veicular	129
5.1. Modelo da Roda/Pneu	129
5.2. Modelo da Suspensão	131
5.3. Modelo de Chassi	131
5.4. Modelo de Direção	132
5.5. Sistema de Propulsão	136
5.6. Sistema de Freio	136
5.7. Integração dos Modelos	137
5.8. Testes de Validação	139
5.8.1. Assentamento sobre peso próprio	142
5.8.2. Aceleração Máxima até a Velocidade Limite	146
6 Proposta de um Controlador Homeostático	157
6.1. Estrutura do Controle Homeostático	160
6.2. Controladores Locais: Um Exemplo de Aplicação	163
6.2.1. Controlador Local para Suspensão	165
6.3. Controlador Homeostático	175
6.4. Controlador Central	178
7 Conclusões e Trabalhos Futuros	180
8 Bibliografia	183

## Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de Estímulo-Comportamento.	34
Figura 2: Primeiro cenário para o coordenador.	35
Figura 3: Segundo cenário para o coordenador.	35
Figura 4: Abordagem híbrida.	36
Figura 5: Exemplo de modelagem por subsistemas [29].	43
Figura 6: Exemplo de modelagem por multicorpos, para análises estruturais.	44
Figura 7: Visão segmentada do corpo humano.	46
Figura 8: Comportamento do corpo humano: a) retomada da homeostase, b) falência do organismo, c) funcionamento em homeostase expandida.	48
Figura 9: Homeostase veicular: a) ações locais de controle em paralelo, b) ações locais de controle em série para prevenção de efeitos colaterais.	52
Figura 10: Primeiro automóvel a gasolina, de Karl Benz.	54
Figura 11: Expansão da condição de homeostase veicular no século XX: a) início; b) meados; c) final.	56
Figura 12: Ativação de sistemas de auxílio à direção, como <i>ABS</i> , <i>TCS</i> e <i>ESP</i> .	57
Figura 13: Integração crescente de sistemas de auxílio à direção do veículo.	60
Figura 14: Conjunto de peças e mecanismos que compõem o automóvel.	61
Figura 15: Representação de funcionamento do controlador homeostático.	64
Figura 16: Componentes da dinâmica veicular.	70
Figura 17: Subsistemas componentes da dinâmica veicular.	71
Figura 18: Chassi no sistema de referência global XYZ.	73
Figura 19: Ângulos de Euler $\psi$ , $\theta$ , $\phi$ .	77
Figura 20: Determinação dos ângulos de Euler e da matriz de transformação T.	81
Figura 21: Determinação da trajetória e da atitude do corpo rígido no espaço.	82
Figura 22: Solução das equações de movimento de um corpo rígido no espaço.	86
Figura 23: Grafo de Fluxo de Potência de um corpo rígido no espaço.	87
Figura 24: Diagrama de blocos completo para a dinâmica e a cinemática do chassi no espaço.	88
Figura 25: Equilíbrio de forças externas, vista frontal do veículo.	89
Figura 26: Equilíbrio de forças externas longitudinais e verticais de um	

veículo em movimento. Vista lateral do veículo.	90
Figura 27: Equilíbrio de forças e momentos em torno do eixo x.	92
Figura 28: Distribuição de forças, vista superior do veículo.	93
Figura 29: Equilíbrio de momentos em torno do eixo y.	94
Figura 30: Representação do sistema de suspensão passiva.	95
Figura 31: Modelo em grafo de ligação da suspensão passiva.	96
Figura 32: Componentes do Sistema de Propulsão.	98
Figura 33: Grafo de fluxo de potência da dinâmica veicular longitudinal completa.	99
Figura 34: Curvas de torque e potência de motor central de 3,5l.	100
Figura 36: Grafo de Ligação da embreagem.	103
Figura 37: Grafo de Ligação da caixa de mudanças.	105
Figura 38: Grafo de Ligação do eixo de transmissão.	107
Figura 39: Grafo de Ligação do diferencial.	108
Figura 40: Grafo de ligação do diferencial modificado.	109
Figura 41: Grafo de ligação do sistema de propulsão completo integrado.	112
Figura 42: Integração de sistemas e dinâmicas de um veículo.	113
Figura 43: Distribuição de forças e torques durante o giro da roda.	113
Figura 44: Modelo físico para movimento vertical da roda-pneu.	114
Figura 45: Modelo em grafo de ligação para o pneu, movimento vertical.	114
Figura 46: Variáveis de entrada e saída de potência.	114
Figura 47: Referenciais existentes no conjunto roda-pneu.	117
Figura 48: Variação da força longitudinal, em função do escorregamento do pneu.	121
Figura 49: Comportamento do pneu quando sujeito a uma força lateral.	122
Figura 50: Variação da força lateral, em função do ângulo de deriva do pneu.	123
Figura 51: Identificação do ângulo de deriva.	124
Figura 52: Geometria de Ackermann.	125
Figura 53: Sistema de freio comum e seus componentes.	127
Figura 54: Modelo Pneu/Roda.	130
Figura 55: Modelo de Suspensão Passiva.	131
Figura 56: Sistema de Direção.	132
Figura 57: Modelo de Chassi com seis graus de liberdade.	133

Figura 58: Diagrama de blocos representando o cálculo das forças e momentos externos, atuantes sobre o chassi.	134
Figura 59: Sistema de propulsão e o acoplamento de seus componentes.	135
Figura 60: Sistema de freio em ambiente Simulink.	137
Figura 61: Representação da Dinâmica Veicular completa, em ambiente Simulink.	138
Figura 62: Assentamento das suspensões.	142
Figura 63: Assentamento dos pneus.	142
Figura 64: Assentamento dos pontos de apoio do chassi, sobre as suspensões.	142
Figura 65: Assentamento do centro de massa, no referencial global.	143
Figura 66: Variação da velocidade das massas não-suspensas.	144
Figura 67: Variação das velocidades verticais dos pneus.	144
Figura 68: Variação das velocidades verticais de cada roda.	144
Figura 69: Variação das velocidades locais do CM.	144
Figura 70: Variação da velocidade angular em torno do eixo y local.	144
Figura 71: Variação das velocidades do CM com relação ao referencial global.	144
Figura 72: Variação da força vertical no ponto de contato com o chassi.	145
Figura 73: Variação da força normal, no contato do pneu com o solo.	145
Figura 74: Variação da força vertical que a suspensão exerce sobre o pneu.	145
Figura 75: Variação dos ângulos de Euler no referencial global.	146
Figura 76: Gráfico de velocidade máxima.	147
Figura 77: Tempos para alcançar 400m e 1000m, para determinar características de desempenho.	148
Figura 78: Curvas do Motor e pontos de máximo.	149
Figura 79: Variação do torque propulsor, durante aceleração do veículo.	151
Figura 80: Lugar geométrico das raízes do eixo dianteiro.	151
Figura 81: Lugar geométrico das raízes do eixo traseiro.	152
Figura 82: Lugar geométrico das raízes dos semi-eixos.	152
Figura 83: Variação das velocidades de giro nas rodas.	152
Figura 84: Variação do escorregamento longitudinal das rodas.	153
Figura 85: Variação do ângulo de arfagem.	154
Figura 86: Variação da força normal ao longo da aceleração do veículo.	154
Figura 87: Variação da compressão da suspensão.	154

Figura 88: Variação na compressão dos pneus.	154
Figura 89: Variação da força de tração, ao longo da aceleração.	154
Figura 90: Variação da velocidade vertical, em função da aceleração.	154
Figura 91: Variação da velocidade vertical no contato do pneu com o solo.	155
Figura 92: Variação da velocidade vertical da massa não-suspensa.	155
Figura 93: Variação da redução das marchas.	156
Figura 94: Integração de sistemas e a importância do pneu.	157
Figura 95: Agentes de controle e suas funções específicas.	160
Figura 96: Fluxo de informações e estrutura da 1ª versão do Controle Homeostático.	162
Figura 97: Suspensão semi-ativa.	165
Figura 98: Grafo de ligação para suspensão semi-ativa.	166
Figura 99: Modelo de dinâmica vertical para projeto de controle.	166
Figura 100: Malha de controle para rastreamento de velocidade vertical.	168
Figura 101: Lugar das raízes para malha fechada do controle de velocidade.	169
Figura 102: Resposta ao degrau para controle de velocidade.	170
Figura 103: Malha de controle completa para suspensões.	170
Figura 104: Lugar das raízes para sistema completo em malha fechada.	171
Figura 105: Resposta ao degrau do sistema completo controlado.	172
Figura 106: Variação do posicionamento vertical do chassi.	173
Figura 107: Variação da força normal no sistema controlado.	174
Figura 108: Variação da velocidade longitudinal com controle de suspensão.	174

## Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros utilizados para simular o modelo de Chassi.	140
Tabela 2: Parâmetros utilizados para simular o modelo de Suspensão.	140
Tabela 3: Parâmetros utilizados para simular o Sistema de Propulsão.	141
Tabela 4: Parâmetros utilizados para simular o modelo de Roda e Pneu.	141
Tabela 5: Parâmetros utilizados para simulação do sistema de Direção.	141
Tabela 6: Parâmetros utilizados para simulação do Sistema de Freios.	142
Tabela 7: Comparação entre alguns modelos de Ferrari e o modelo da tese.	148

## Lista de abreviações e símbolos

### Capítulo 1:

*ABS* – *Antilock Brake System* (sistema antitravamento de freio).

*PID* – Proporcional + integral + derivativo, controlador ou controle.

*TCS* – *Traction Control System* (sistema de controle de tração).

### Capítulo 2:

*ARWS* – *Active rear wheel steering* (roda traseira com esterçamento ativo).

*ASUSP* – *Active suspension* (suspensão ativa).

*C* – Função vetorial que leva o estado  $x$  para um espaço  $R$ .

$C_j(x)$  – Variável separativa continuamente diferenciável.

*D* – Domínio de um sistema.

$D_i$  – Subdomínio de  $D$ .

*DYC* – *Dynamic yaw control* (controle dinâmico de guinada).

$f(x)$  – Função de  $x$ .

*LQ* – Linear quadrático, controlador ou controle.

$n$  – Potência.

$P_f$  – Pressão de frenagem.

$r$  – Comportamento resultante, ou final.

$r_d$  – Comportamento dominante.

$R^L$  – Espaço real  $L$  dimensional.

$R^n$  – Espaço real  $n$  dimensional.

$r_{nd}$  – Comportamento não dominante.

*SAT* – Self aligning torque (torque auto-ajustável).

*SQP* – Programação seqüencial quadrática.

*T* – Torque fornecido à roda.

$T_f$  – Torque de frenagem.

$T_m$  – Torque fornecido pelo motor.

*VSS* – *Virtual sensor structure* (estrutura de sensor virtual).

$x$  – Variável de estado.

$\xi$  – Peso do comportamento dominante.

$\gamma$  - Constante de proporcionalidade entre o torque e a pressão de frenagem.

### Capítulo 3

*ECU* – *Electronic control unit* (unidade eletrônica de controle).

*ESP* – *Electronic stability program* (programa de estabilidade eletrônica).

*ESC* – *Electronic stability control* (controle de estabilidade eletrônico).

$F_x$  – Força longitudinal resultante do veículo.

$F_y$  – Força lateral resultante do veículo.

*VDC* – *Vehicle dynamic control* (controle dinâmico do veículo).

$\Theta$  - Domínio de homeostase do veículo.

### Capítulo 4

*Adj()* – Matriz adjunta.

$A_f$  – Corresponde à área frontal do veículo, responsável por gerar o arrasto aerodinâmico.

$A_p$  – Área da seção reta do pistão que movimentava as pinças de frenagem.

$b_d$  – Corresponde à bitola (distância entre as rodas de um mesmo eixo) dianteira.

$b_{c.m.}$  – Amortecimento da caixa de marchas.

$b_{emb}$  – Coeficiente de amortecimento da embreagem.

$b_{e.t.}$  – Amortecimento do eixo de transmissão

$b_m$  – Coeficiente de atrito dinâmico, que ocorre dentro do motor.

$b_p$  – Amortecimento de um pneu.

$b_s$  – Coeficiente de amortecimento da mola de uma suspensão.

$b_t$  – Corresponde à bitola (distância entre as rodas de um mesmo eixo) traseira.

$C$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza um elemento capacitor.

$C_d$  – Corresponde ao coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo.

$c_i$  – Coeficientes que determinam o perfil da curva do motor, onde  $i = [1, 2, 3, 4]$ .

$C_i$  – Rigidez longitudinal de tração do pneu.

$C_l$  – Coeficiente de sustentação aerodinâmico do veículo.

$CM$  – Centro de massa do veículo.

*Cof()* – Matriz cofatora.

$c_{pneu}$  – Compressão de um pneu ( $DE, DD, TE, TD$ ).

$C_s$  – Rigidez longitudinal de frenagem do pneu.

$c_{susp}$  – Compressão de uma suspensão ( $DE, DD, TE, TD$ ).

$CVT$  – Abreviação de “*Continuously Variable Transmission*”, ou Transmissão Continuamente Variável.

$C_\alpha$  - Rigidez lateral do pneu.

$DD$  – Dianteira direita, em referência à posição da roda no carro.

$DE$  – Dianteira esquerda, em referência à posição da roda no carro.

$det$  – Determinante de uma matriz.

$d_f$  – Distância entre o eixo dianteiro e o centro de massa do veículo.

$d_t$  – Distância entre o eixo traseiro e o centro de massa do veículo.

$(e)$  – Variável de esforço de um grafo de ligação.

$(f)$  – Variável de fluxo de um grafo de ligação.

$F_{aero}$  – Corresponde ao somatório de todas as parcelas de forças aerodinâmicas atuantes sobre o veículo, no sentido longitudinal de seu movimento.

$f_d$  – Folga do sistema de direção.

$F_f$  – Força de frenagem.

$f_o$  – Componente estático e constante da resistência ao giro do pneu.

$F_{NDD}$  – Força normal no contato do pneu dianteiro direito com o solo.

$F_{NDE}$  – Força normal no contato do pneu dianteiro esquerdo com o solo.

$F_{ne,d}$  – Força normal exercida no contato dos pneus, direitos e esquerdos, com o solo.

$F_{NTD}$  – Força normal no contato do pneu traseiro direito com o solo.

$F_{NTE}$  – Força normal no contato do pneu traseiro esquerdo com o solo.

$F_s$  – Resultante de forças verticais passada a um conjunto pneu/roda, por uma das suspensões.

$F_t$  – Força de tração.

$F_{ta}$  – Parcela da força de tração onde o pneu está em aderência.

$F_{ts}$  – Parcela da força de tração onde o pneu está escorregando.

$F_x$  – Força longitudinal que corresponde ao somatório das forças longitudinais desenvolvidas em cada pneu individualmente. Também corresponde à força longitudinal resultante do veículo.

$F_{xDD}$  – Força longitudinal desenvolvida na roda dianteira direita.

$F_{xDE}$  – Força longitudinal desenvolvida na roda dianteira esquerda.

$F_{xTD}$  – Força longitudinal desenvolvida na roda traseira direita.

$F_{xTE}$  – Força longitudinal desenvolvida na roda traseira esquerda.

$F_{ye,d}$  – Força lateral exercida no contato dos pneus, direitos e esquerdos, com o solo.

$F_{yDD}$  – Força lateral no contato do pneu dianteiro direito com o solo.

$F_{yDE}$  – Força lateral no contato do pneu dianteiro esquerdo com o solo.

$F_{yTD}$  – Força lateral no contato do pneu traseiro direito com o solo.

$F_{yTE}$  – Força lateral no contato do pneu traseiro esquerdo com o solo.

$F_{y\alpha}$  – Parcela da força lateral onde o pneu está em aderência com o solo.

$F_{zDD}$  – Força vertical no contato do chassi com a suspensão dianteira direita.

$F_{zDE}$  – Força vertical no contato do chassi com a suspensão dianteira esquerda.

$F_{zTD}$  – Força vertical no contato do chassi com a suspensão traseira direita.

$F_{zTE}$  – Força vertical no contato do chassi com a suspensão traseira esquerda.

$\vec{h}$  – Vetor de quantidade de movimento angular do chassi.

$h_{cg}$  – Altura do centro de gravidade do veículo.

$h_D$  – Altura das suspensões dianteiras a partir do contato do pneu com o solo.

$h_T$  – Altura das suspensões traseiras a partir do contato do pneu com o solo.

$I$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza um elemento de inércia.

$i$  – Deriva ou deslizamento longitudinal em tração.

$I_d$  – Matriz identidade.

$i_s$  – Deriva ou deslizamento longitudinal em frenagem.

$J$  – Tensor de inércia do chassi no referencial local.

$J_{c.m.}$  – Inércia de giro da caixa de marchas.

$J_{e.t.}$  – Inércia de giro do eixo de transmissão.

$J_{ii}$  – Momento de inércia em relação ao eixo  $i$ .

$J_{ij}$  – Produto de inércia em relação ao plano  $ij$ .

$J_j$  – Inércia de giro de uma roda, onde  $j = DE, DD, TE, TD$ .

$J_m$  – Inércia de giro do motor.

$k$  – Coeficiente da componente dinâmica da resistência ao giro do pneu, que varia com a velocidade do automóvel.

$k_{c.m.}$  – Rigidez da caixa de marchas.

$k_d$  – Redução da transmissão do sistema de direção.

$k_{e.t.}$  – Rigidez do eixo de transmissão.

$k_p$  – Rigidez de um pneu.

$k_s$  – Coeficiente de rigidez da mola de uma suspensão.

$l$  – Distância entre eixos.

$l_c$  – Área do pneu efetivamente em contato com o solo.

$l_t$  – Banda de rolagem do pneu.

$m$  – Massa do chassi.

$m_{ns}$  – Massa não suspensa do veículo.

$m_s$  – Massa do chassi, ou o total de massas suspensas do veículo.

$m_{total}$  – Corresponde ao somatório de todas as massas do veículo.

$\vec{p}$  – Vetor de quantidade de movimento linear do chassi.

$(p)$  – Quantidade de movimento de um grafo de ligação.

$P_b$  – Pressão do fluido de freio, dentro do circuito de frenagem.

$p_i$  – Ponto qualquer pertencente ao chassi do veículo.

$P_i$  – Matriz de coordenadas que define a posição do ponto  $p_i$ .

$P_t$  – Potência instantânea de translação.

$P_r$  – Potência instantânea de rotação.

$(q)$  – Deslocamento representado em um grafo de ligação.

$R$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza um elemento resistor.

$\vec{r}$  – Vetor de coordenadas de um ponto.

$R_b$  – Raio de frenagem efetivo.

$R_{ci}$  – Raio instantâneo de curvatura.

$\vec{r}_i$  – Vetor de coordenadas do ponto  $p_i$ .

$R_r$  – Raio de uma roda.

$R_{xDD}$  – Força de resistência ao giro do pneu dianteiro direito.

$R_{xDE}$  – Força de resistência ao giro do pneu dianteiro esquerdo.

$R_{xTD}$  – Força de resistência ao giro do pneu traseiro direito.

$R_{xTE}$  – Força de resistência ao giro do pneu traseiro esquerdo.

$S_{aero}$  – Corresponde à parcela vertical do arrasto aerodinâmico exercido sobre o veículo em movimento.

$S_e$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza uma fonte de esforço.

$S_f$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza uma fonte de fluxo.

$T$  – Matriz de transformação do referencial global  $XYZ$  para o referencial local  $xyz$ .

$T_{b_{máx}}$  – Torque de frenagem máximo.

$T_{carga}$  – Carga que o veículo exerce sobre o motor.

$T_{carga_{c.m.}}$  – Carga recebida pela caixa de marchas.

$TD$  – Traseira direita, em referência à posição da roda no carro.

$T_{dif}$  – Torque fornecido pelo diferencial.

$TE$  – Traseira esquerda, em referência à posição da roda no carro.

$T_{emb}$  – Torque fornecido na saída da embreagem, para os demais componentes do sistema de propulsão.

$T_{e.t.}$  – Torque fornecido pelo eixo de transmissão.

$TF$  – Variável utilizada na elaboração de grafos de ligação que simboliza um elemento transformador.

$T_{fren,j}$  – Torque de frenagem aplicado a uma roda, onde  $j = DE, DD, TE, TD$ .

$T_i$  – Matriz que representa a transformação de coordenadas das velocidades de translação e rotação no centro de massa para a posição do ponto  $p_i$ .

$T_j$  – Torque propulsor fornecido a uma roda, onde  $j = DE, DD, TE, TD$ .

$T_m$  – Torque fornecido pela combustão interna do motor (igual ao utilizado no capítulo 2).

$T_{ramo_1}$  – Torque fornecido a um dos ramos de saída de um diferencial.

$T_{ramo_2}$  – Torque fornecido a um dos ramos de saída de um diferencial.

$T^T$  – Matriz transposta.

$T_\varphi$  – Matriz de transformação do referencial  $x''y''z''$  para o referencial local  $xyz$ .

$T_\psi$  – Matriz de transformação do referencial  $XYZ$  para o referencial  $x'y'z'$ .

$T_\theta$  - Matriz de transformação do referencial  $x'y'z'$  para o referencial  $x''y''z''$ .

$T^I$  - Matriz inversa.

$\vec{V}$  - Vetor de velocidade absoluta de translação do centro de massa.

$\vec{V}_i$  - Vetor de velocidade absoluta de translação no referencial local do veículo.

$v_{sp}$  - Velocidade proveniente de um conjunto pneu/roda, passada a uma suspensão.

$v_{sz}$  - Velocidade proveniente do chassi, passada a uma suspensão.

$v_x$  - Velocidade absoluta de translação longitudinal do centro de massa.

$v_{xDD}$  - Velocidade longitudinal da roda dianteira direita.

$v_{xDE}$  - Velocidade longitudinal da roda dianteira esquerda.

$v_{xTD}$  - Velocidade longitudinal da roda traseira direita.

$v_{xTE}$  - Velocidade longitudinal da roda traseira esquerda.

$v_{xi}$  - Velocidade absoluta de translação longitudinal de um ponto  $p_i$ .

$v_y$  - Velocidade absoluta de translação lateral do centro de massa.

$v_{yi}$  - Velocidade absoluta de translação lateral de um ponto  $p_i$ .

$v_z$  - Velocidade absoluta de translação vertical do centro de massa.

$v_{zi}$  - Velocidade absoluta de translação vertical de um ponto  $p_i$ .

$WOB$  - (*Wide Open Brake*) Variável que determina o percentual de frenagem passado pelo motorista.

$WOC$  - (*Wide Open Clutch*) Variável que determina a condição de acoplamento entre o motor e a caixa de mudanças do veículo.

$WOT$  - (*Wide Open Throttle*) Variável que determina o percentual de aceleração passado pelo motorista.

$x$  - Coordenada longitudinal no referencial local.

$x_i$  - Coordenada longitudinal do ponto  $p_i$ .

$xyz$  - Sistema de referência local solidário ao centro de massa do veículo.

$XYZ$  - Sistema de referência global inercial.

$x'y'z'$  - Sistema de coordenadas intermediário obtido após rotação do ângulo  $\psi$ .

$x''y''z''$  - Sistema de coordenadas intermediário obtido após rotação do ângulo  $\theta$ .

$y$  - Coordenada lateral no referencial local.

$y_i$  – Coordenada lateral do ponto  $p_i$ .

$z$  – Coordenada vertical no referencial local.

$z_i$  – Coordenada vertical do ponto  $p_i$ .

$zyx$  – Sequência de rotações para equiparação de um sistema de referência local com o sistema de referência global inercial.

$\alpha_{DE}$  – Ângulo de deriva do pneu dianteiro esquerdo.

$\alpha_{DD}$  – Ângulo de deriva do pneu dianteiro direito.

$\alpha_{TE}$  – Ângulo de deriva do pneu traseiro esquerdo.

$\alpha_{TD}$  – Ângulo de deriva do pneu traseiro direito.

$\beta_j$  – Ângulo formado entre os vetores de velocidade lateral e longitudinal de um pneu, onde  $j = DE, DD, TE, TD$ .

$\gamma$  – Ângulo de cambagem de uma roda.

$\delta$  – Ângulo de esterçamento passado pelo volante.

$\delta_D$  – Ângulo de esterçamento da roda dianteira direita.

$\delta_E$  – Ângulo de esterçamento da roda dianteira esquerda.

$\epsilon_1$  – Redução de saída de um dos ramos de um diferencial.

$\epsilon_2$  – Redução de saída de um dos ramos de um diferencial.

$\zeta$  – Relação de marchas utilizada pelo modelo de sistema de transmissão.

$\eta$  – Redução de entrada de um diferencial.

$\theta$  – Rotação em torno do eixo  $y'$  (pitch ou arfagem).

$\theta_s$  – Corresponde ao ângulo de inclinação da pista no sentido longitudinal do carro, ou ao aclive da pista.

$\mu_b$  – Coeficiente de atrito entre as pastilhas e o disco de freio.

$\mu_p$  – Coeficiente de atrito do pneu com o solo.

$v_{eb}$  – Velocidade de excitação de base.

$\rho$  – Corresponde à densidade do ar, em  $\text{kg/m}^3$ .

$\sum \vec{F}$  – Somatório de forças aplicadas no centro de massa.

$\sum \vec{M}$  – Somatório de momentos aplicados no centro de massa.

$\sum M_x$  – Somatório dos momentos em torno do eixo  $x$ .

$\sum M_y$  – Somatório dos momentos em torno do eixo  $y$ .

$\sum M_z$  – Somatório dos momentos em torno do eixo z.

$\tau$  - Retardo temporal do sistema de frenagem.

$\varphi$  - Rotação em torno do eixo  $x''$  (roll ou rolagem).

$\phi_s$  – Corresponde ao ângulo de inclinação transversal da pista em relação ao movimento do carro.

$\psi$  - Rotação em torno do eixo Z (yaw ou guinada).

$\omega_{carga}$  – Velocidade angular de uma carga.

$\omega_{c.m.}$  – Velocidade de giro da caixa de marchas.

$\omega_{d.c.}$  – Velocidade de giro do diferencial central.

$\omega_{e.t.}$  – Velocidade de giro do eixo de transmissão.

$\omega_j$  – Velocidade angular de uma roda, onde  $j = DE, DD, TE, TD$ .

$\omega_m$  – Velocidade de giro do motor.

$\omega_{ramo_1}$  – Velocidade angular em um dos ramos de saída de um diferencial.

$\omega_{ramo_2}$  – Velocidade angular em um dos ramos de saída de um diferencial.

$\omega_x$  – Velocidade absoluta de rotação em torno do eixo x (rolagem).

$\omega_{xi}$  – Velocidade absoluta de rotação, em torno do eixo x (rolagem), do ponto  $p_i$ .

$\omega_y$  – Velocidade absoluta de rotação em torno do eixo y (arfagem/pitch).

$\omega_{yi}$  – Velocidade absoluta de rotação, em torno do eixo y (arfagem/pitch), do ponto  $p_i$ .

$\omega_z$  – Velocidade absoluta de rotação em torno do eixo z (guinada/yaw).

$\omega_{zi}$  – Velocidade absoluta de rotação, em torno do eixo z (guinada/yaw), do ponto  $p_i$ .

$\vec{\Omega}$  - Vetor de velocidade absoluta de rotação do centro de massa.

$\vec{\Omega}_i$  - Vetor de velocidade absoluta de rotação no ponto  $p_i$ .

## Capítulo 5

CAD – “*Computer Aided Design*” (Projeto Auxiliado por Computador).

## Capítulo 6

4WS – “*Four Wheel Steering*” (Esterçamento nas quatro rodas).

4WD – “*Four Wheel Drive*” (Tração nas quatro rodas).

ACC – “*Adaptive Cruise Control*” (Controle Cruzeiro Adaptativo).

“O cliente pode ter o carro da cor que quiser, contanto que seja preto.”  
Henry Ford