



**Abel Arrieta Castro**

**Identificação de parâmetros e calibração do  
modelo dinâmico de um veículo terrestre**

**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 da PUC-Rio

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro  
Agosto de 2013



**Abel Arrieta Castro**

## **Identificação de parâmetros e calibração do modelo dinâmico de um veículo terrestre**

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

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Fernando Ribeiro da Silva**

Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET

**Prof. Ricardo Teixeira da Costa Neto**

Seção de Engenharia Mecânica – IME

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de agosto de 2013

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

**Abel Arrieta Castro**

Formado em Engenharia Mecatrônica pela Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, Lima, Peru (2005-2010).

Ficha Catalográfica

Arrieta Castro, Abel

Identificação de parâmetros e calibração do modelo dinâmico de um veículo terrestre / Abel Arrieta Castro; orientador: Sergio Leal Braga. — Rio de Janeiro PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

v., 78 f: il. (color) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Estimação de Parâmetros;. 3. Modelo Dinâmico;. 4. Modelo de Caixa-Preta;. 5. Métodos de Otimização;. 6. Calibração do Modelo.. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

Dedicado a minha mãe Nelly, a minha avó Gumercinda e a minha família por  
seu constante apoio.

## Agradecimentos

Ao Prof. Sergio Leal Braga, que sob sua orientação, confiança e suporte acadêmico foi possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Mauro Speranza Neto, pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos Profs. Ricardo Rodríguez Bustinza e Elizabeth Villota Cerna, da Universidade Nacional de Engenharia, pelo apoio para começar meus estudos de pós-graduação na PUC-Rio.

À PUC-Rio, através dos professores e da equipe técnica e administrativa do Departamento de Engenharia Mecânica.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

## Resumo

Arrieta Castro, Abel; Braga, Sergio Leal. **Identificação de parâmetros e calibração do modelo dinâmico de um veículo terrestre**. Rio de Janeiro, 2013. 78p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente nos veículos terrestres a melhora de seu desempenho é permanente. Esta melhora, em grande parte está relacionada com seus sistemas de controle. Para o desenho de sistema de controle, tais como, sistema eletrônico de estabilidade ou controle anti-capotagem é preciso prever o comportamento do veículo sob certas condições dinâmicas. Esta predição do comportamento dinâmico do veículo é feita por meio de modelos matemáticos que dependem diretamente de seus parâmetros, tais como a massa, a posição do centro de gravidade, os momentos de inércia entre outros. Tendo em consideração o contexto apresentado, os parâmetros dinâmicos do veículo tem um papel fundamental na melhora do desempenho do veículo, assim como a otimização de seus subsistemas. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um procedimento de estimação dos parâmetros dinâmicos do veículo e a calibração do modelo matemático desenvolvido. Para o processo de estimação se desenvolvem dois modelos do veículo, um feito em MATLAB® com 4 graus de liberdade (GDL) e ou outro é trabalhado como uma "caixa preta" (*black-box*), que é obtida por meio da biblioteca de ligações dinâmicas (DLL) de um programa de simulação veicular. Métodos de otimização, tais como Evolução Diferencial, *Generalized Pattern Search*, *Mesh Adaptive Pattern Search* e Nelder Mead, são utilizados para estimar os parâmetros dinâmicos do veículo, isto por meio da minimização de um objetivo definido como a diferença entre a resposta real do veículo (obtida do programa de simulação veicular) e a calculada por cada método de otimização. Os parâmetros dinâmicos estimados com o melhor método de otimização, são inseridos no modelo matemático feito em MATLAB® para calibrar o modelo. Finalmente, o modelo já calibrado é simulado com diferentes manobras para comprovar a robustez do método e a coerência dos parâmetros estimados.

## Palavras-chave

Estimação de Parâmetros; Modelo Dinâmico; Modelo de Caixa-Preta; Métodos de Otimização; Calibração do Modelo.

## Abstract

Arrieta Castro, Abel; Braga, Sergio Leal (Advisor) . **Parameter identification and calibration of the dynamic model of a ground vehicle**. Rio de Janeiro, 2013. 78p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays, performance improvement on ground vehicles is predominant. This improvement is highly correlated with its control systems. To design its control system, with parts as electronic system for stabilization or anti-rollover control, it is necessary to provide the behavior of the vehicle in certain dynamic conditions. This prediction, of the dynamic behavior of the vehicle, is done by mathematical models that depend directly on its dynamic parameters such as gravity center position, inertia moments, among others. Taking into account the actual background, dynamic parameters of the vehicle have an important role in the improvement of vehicle's performance, as well as in the optimization of its subsystems. This thesis presents the development of dynamic parameters estimation system of the vehicle and calibration of the mathematical model developed. For the estimation step, two vehicle models were developed, the first one was done in MATLAB® with 4 DOF and the other was treated as a black box, which is obtained by Dynamic-Link Libraries (DLLs) from the free vehicular simulation software. Optimization methods, such as Differential Evolution, Generalized Pattern Search, Mesh Adaptive Pattern Search and Nelder Mead, were used to estimate vehicle's dynamic parameters. The fitness function is defined as a difference between the real response of the vehicle (given by vehicular simulation software) and one calculated with each optimization method. The dynamic parameters estimated with the best optimization method are input for the mathematical model developed in MATLAB® to calibrate the model. Finally, the calibrated model is simulated with different maneuvers, this is done to test the robustness of the method and the coherence of estimated parameters.

## Keywords

Estimation of Parameters; Dynamic Model; Black-Box Model; Optimization Methods; Model Calibration.

# Sumário

Sumário das notações	<b>13</b>
<b>1</b> Introdução	<b>15</b>
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivos do trabalho	18
1.3 Organização da dissertação	19
<b>2</b> Modelagem do Veículo	<b>20</b>
2.1 Introdução	20
2.2 Modelo do Pneu	20
2.2.1 Deslizamento	21
2.2.2 Sistema Pneu	22
2.2.3 Deslizamento Puro e Combinado	23
2.3 Modelo do Chassis	24
2.3.1 Sistema de Coordenadas	25
2.3.2 Movimento no Chassis	27
2.3.3 Modelo de Bicicleta	27
2.3.4 Modelo da Bicicleta e Rolagem	28
2.3.5 Modelo com Bitolas	29
2.4 Validação do Modelo	35
<b>3</b> Métodos de Otimização	<b>38</b>
3.1 Introdução	38
3.2 Definições	38
3.3 Evolução Diferencial	39
3.3.1 Descrição do Método	39
3.3.2 Inicialização	40
3.3.3 Mutação	41
3.3.4 Cruzamento	42
3.3.5 Seleção	42
3.4 Busca Generalizada de Padrões	43
3.4.1 Descrição do Método	43
3.4.2 Etapa <i>Search</i>	44
3.4.3 Etapa <i>Poll</i>	45
3.5 Busca Direta com Malha Adaptativa	46
3.5.1 Etapa <i>Poll</i>	46
3.6 Método de Nelder-Mead	48
3.6.1 Inicialização do <i>Simplex</i>	49
3.6.2 Reflexão do Simplex	49
3.6.3 Expansão do Simplex	50
3.6.4 Contração do Simplex	50
3.6.5 Redução do Simplex	51
<b>4</b> Metodologia da Estimação	<b>54</b>

4.1	Procedimento Numérico	54
4.1.1	Modelos do Veículo e Parâmetros Dinâmicos	55
4.1.2	Plano de Estimção	57
4.2	Configuração dos Métodos de Otimização	60
5	Simulações e Resultados	<b>61</b>
5.1	Configuração dos Métodos de Otimização	61
5.2	Veículo de Referência	61
5.3	Análise de Sensibilidade	62
5.4	Estimção dos Parâmetros	65
5.5	Avaliação Visual	71
6	Conclusões e Sugestões	<b>73</b>
6.1	Trabalhos Futuros	74
	Referências Bibliográficas	<b>75</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1 - Simulação de um veículo realizando uma manobra tipo "Fishhook". O veículo amarelo está com RSC e o cinza sem RSC.	18
Figura 1.2 - Simulação de um veículo realizando uma manobra tipo "DLC". O veículo amarelo está com ESC e o azul sem ESC.	18
Figura 2.1 - Diagrama da roda mostrando seu eixo local de referência, as forças que atuam no ponto de contato, a velocidade angular $\omega$ e a velocidade absoluta $v$ .	21
Figura 2.2 - Relação entre a força lateral $F_y$ e o deslizamento lateral $\alpha$ obtido pela Formula Mágica, Equação (2-7) com $D = 3939,5$ , $C = 1,44$ , $B = 20,37$ e $E = -0,62$ .	24
Figura 2.3 - Elipse de aderência, amostra os máximos valores das forças longitudinais e laterais.	25
Figura 2.4 - Sequência de rotação dos sistemas de coordenadas do veículo.	26
Figura 2.5 - Modelo de Bicicleta. São mostradas as forças laterais dos pneus, a velocidade do centro de massa, o ângulo de deslizamento traseiro e dianteiro e o ângulo de direção.	28
Figura 2.6 - Modelo de Bicicleta incluindo o GDL de rolagem.	29
Figura 2.7 - Modelo de dupla Bitola.	30
Figura 2.8 - Simplificação das suspensões em torno do eixo de rolagem $x$ .	30
Figura 2.9 - Simplificação das suspensões em torno do eixo de arfagem $y$ .	31
Figura 2.10 - Forças produzidas pelos pneus no modelo de dupla bitola.	32
Figura 2.11 - Manobra tipo Fishhook.	36
Figura 2.12 - Aceleração lateral $v_y$ do veículo.	36
Figura 2.13 - O ângulo de rolagem $\phi$ do veículo.	37
Figura 2.14 - Taxa de rolagem $\dot{\phi}$ do veículo.	37
Figura 3.1 - Processo geral de evolução da ED.	40
Figura 3.2 - Exemplo bi-dimensional do processo de mutação.	41
Figura 3.3 - Processo de criação do <i>trial vector</i> $u_{i,G+1}$ .	42
Figura 3.4 - Malha ao redor da solução atual $x_k$ .	44
Figura 3.5 - Exemplo das malhas no GPS: $P_k = \{x_k + \Delta_k d : d \in D_k\} = p_1, p_2, p_3$ para diferentes valores de $\Delta_k^m$ . Em todas a figuras $M_k$ é a intersecção de todas a linhas.	45
Figura 3.6 - Exemplo das malhas no MADS: $P_k = \{x_k + \Delta_k d : d \in D_k\} = p_1, p_2, p_3$ para diferentes valores de $\Delta_k^m$ e $\Delta_k^p$ . Em todas a figuras $M_k$ é a intersecção de todas a linhas.	47
Figura 3.7 - Simplex após um passo de reflexão.	49
Figura 3.8 - Simplex após um passo de expansão.	50
Figura 3.9 - Simplex após um passo de contração.	51
Figura 3.10 - Simplex após um passo de redução.	51
Figura 4.1 - Diagrama esquemático do modelo de 4GDL.	55

Figura 4.2 - Exemplo de um arquivo <i>simfile</i> construído pelo programa de simulação na inicialização do programa.	56
Figura 4.3 - Fluxo de dados para o controle do programa de simulação usando da plataforma <i>MATLAB</i> .	57
Figura 4.4 - Fluxo de dados para a estimação do parâmetros dinâmicos, utilizando o modelo de 4GDL desenvolvido na plataforma <i>MATLAB</i> .	58
Figura 4.5 - Fluxo de dados para a estimação do parâmetros dinâmicos, utilizando o modelo feito com a biblioteca do simulador.	59
Figura 4.6 - Fluxo de dados para a estimação do parâmetros dinâmicos, utilizando dados reais obtidos por um Sistema de Aquisição de Dados.	59
Figura 5.1 - Diagrama de fluxo do análise de sensibilidade.	63
Figura 5.2 - Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra <i>Step Steer</i> .	64
Figura 5.3 - Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra Sinusoidal.	64
Figura 5.4 - Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra <i>Double Lane Change</i> (DLC).	65
Figura 5.5 - Comparação dos tempos de simulação da estimação obtidos com os diferentes métodos de otimização.	67
Figura 5.6 - Comparação do ângulo de rolagem $\phi$ numa manobra do tipo <i>Step Steer</i> .	68
Figura 5.7 - Comparação da velocidade angular de guinada $\dot{\psi}$ numa manobra do tipo <i>Step Steer</i> .	68
Figura 5.8 - Comparação da velocidade lateral do veículo $v_y$ numa manobra do tipo <i>Step Steer</i> .	69
Figura 5.9 - Comparação do ângulo de rolagem $\phi$ numa manobra do tipo sinusoidal.	69
Figura 5.10 - Comparação da velocidade angular de guinada $\dot{\psi}$ numa manobra do tipo sinusoidal.	70
Figura 5.11 - Comparação da velocidade lateral do veículo $v_y$ numa manobra do tipo sinusoidal.	70
Figura 5.12 - Comparação das trajetórias do veículo com a manobra tipo <i>Step Steer</i> .	71
Figura 5.13 - Comparação das trajetórias do veículo com a manobra tipo <i>Sinusoidal Steer</i> .	71

## Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Modelos de veículo recentemente estudados	16
Tabela 2.1 - Parâmetros do veículo	35
Tabela 4.1 - Características do Métodos de Otimização	60
Tabela 5.1 - Parâmetros de entrada dos métodos de otimização.	61
Tabela 5.2 - Lista de parâmetros nominais do veículo.	62
Tabela 5.3 - Resultados da Estimação	66
Tabela 5.4 - Erros de Estimação	66

## Sumário das notações

### Símbolos romanos

$x$	posição longitudinal do veículo no sistema de referência
$y$	posição lateral do veículo no sistema de referência
$z$	posição vertical do veículo no sistema de referência
$v_x$	velocidade longitudinal instantânea do veículo
$v_y$	velocidade lateral instantânea do veículo
$a_x$	aceleração longitudinal instantânea do veículo
$a_y$	aceleração lateral instantânea do veículo
$m$	massa do veículo
$h$	altura do centro de gravidade do veículo
$I_{xx}$	momento de inércia do veículo em torno do eixo $x$
$I_{yy}$	momento de inércia do veículo em torno do eixo $y$
$I_{zz}$	momento de inércia do veículo em torno do eixo $z$
$K_\phi$	rigidez total de rolagem
$C_\phi$	amortecimento total de rolagem
$K_\theta$	rigidez total de arfagem
$C_\theta$	amortecimento total de arfagem
$v_{sx}$	velocidade longitudinal de deslizamento dos pneus
$v_{sy}$	velocidade lateral de deslizamento dos pneus
$F_x$	força longitudinal do pneu
$F_y$	força lateral do pneu
$F_z$	força vertical do pneu
$M_z$	torque de auto-alinhamento
$R_0$	radio do pneu sem carga
$R_e$	raio de rolamento efetivo
$R_e^{nom}$	raio de rolamento nominal efetiva
$C_x$	rigidez longitudinal (frenagem)
$C_y$	rigidez lateral (curva)
$C_\lambda$	rigidez longitudinal com respeito de $\lambda$
$C_\alpha$	rigidez longitudinal com respeito de $\alpha$
$C_m$	rigidez de auto-alinhamento
$C_D$	rigidez lateral dianteira
$C_T$	rigidez lateral traseira
$t$	tempo

$GDL$  graus de liberdade

### Símbolos gregos

$\alpha$	ângulo de deslizamento
$\beta$	ângulo sideslip
$\lambda$	deslizamento longitudinal
$\dot{\psi}$	velocidade angular de guinada
$\phi$	ângulo de rolagem
$\dot{\phi}$	velocidade angular de rolagem
$\theta$	ângulo de arfagem
$\omega$	velocidade de rotação da roda
$\omega_0$	velocidade de rotação da roda (rotação livre)
$\gamma$	ângulo camber
$\mu$	coeficiente de atrito entre o pneu e a roda

### Subscritos

$I$	grandeza expressado no sistema referencial fixo
$v$	grandeza expressado no sistema referencial do veículo
$c$	grandeza expressado no sistema referencial do chassi
$b$	grandeza expressado no sistema referencial do corpo
$i, G$	população numa geração
$r$	vetores aleatórios numa determinada população