



**Ana Carolina Iglezias Lima Caldas**

**Validação Metrológica de um Sistema de Aquisição de  
Dados para Reconstrução de Traçados de Veículos  
Terrestres**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia.

Orientador: Prof. Mauro Speranza Neto, D.Sc.

Rio de Janeiro  
Novembro de 2008



**Ana Carolina Iglezias Lima Caldas**

## **Validação Metrológica de um Sistema de Aquisição de Dados para Reconstrução de Traçados de Veículos Terrestres**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Dr. Mauro Speranza Neto**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Dr. Maurício Nogueira Frota**

Programa de Pós-Graduação em

Metrologia para Qualidade e Inovação (MQI) - PUC-Rio

**Prof. Dr. José Geraldo Telles Ribeiro**

SCT – Secretaria de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro

**Prof. Dr. Marco Antonio Meggiolaro**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Dr. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de novembro de 2008

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

### **Ana Carolina Iglezias Lima Caldas**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Controle de Processos na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2006. Participou de alguns projetos de iniciação científica na área de controle de sistemas na PUC-Rio. Participou por cinco anos de projetos universitários no setor aeronáutico, também pela PUC-Rio. Atualmente trabalha como engenheira na Light SESA, na gerência de Negócios e Desenvolvimento de Mercado, realizando o gerenciamento de projetos de eficiência energética, conforme normativa da ANEEL.

#### Ficha Catalográfica

Caldas, Ana Carolina Iglezias Lima

Validação metrológica de um sistema de aquisição de dados para reconstrução de traçados de veículos terrestres / Ana Carolina Iglezias Lima Caldas; orientador: Mauro Speranza Neto. – 2008.

116 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia para a qualidade e Inovação)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Validação metrológica. 3. Sistema de aquisição de dados. 4. Ensaio veicular. 5. Tratamento de sinais. 6. Reconstrução de dados. I. Speranza Neto, Mauro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Para minha avó, Mercedes Iglesias Lima,  
por todo seu amor, carinho, apoio e  
dedicação.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Mauro Speranza Neto, pela confiança, estímulo, paciência, e parceria para a realização deste e de muitos outros trabalhos.

Ao Professor Maurício Frota, pelo apoio e credibilidade.

Ao Professor Marco Antonio Meggiolaro, pelo apoio e auxílio.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Capitão Marcos José Ferreira Carvalho e ao Tenente Rodrigo José Toledo Resende, do CAEx, pela colaboração na realização dos ensaios experimentais.

Aos meus pais, Celso Caldas e Maria Alice Caldas pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

As minhas amigas Flavia Camerini e Lydia Wanderley que sempre acreditaram que esse trabalho fosse possível.

Ao meu namorado Fernando Hey, por ter me apoiado e ajudado em todos os momentos mais difíceis.

Aos meus amigos da PUC-Rio, que sempre me ajudaram e incentivaram nessa difícil tarefa.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

A todos os professores e funcionários dos Departamentos de Engenharia Elétrica e Mecânica e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industrial pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

## Resumo

Caldas, Ana Carolina Iglesias Lima; Speranza Neto, Mauro. *Validação Metrológica de um Sistema de Aquisição de Dados para Reconstrução de Traçados de Veículos Terrestres*. Rio de Janeiro, 2008. 116p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O principal **objetivo** desse trabalho foi realizar a validação metrológica de um sistema de aquisição de dados comercializado no mercado para utilização em pesquisas com veículos terrestres. A partir das informações coletadas (velocidade de translação, acelerações longitudinal e lateral e as velocidades angulares) foi realizada uma análise de erros e um estudo de variância que permitiu avaliar o equipamento em conformidade as normas técnicas aplicáveis. A validação foi feita a partir da comparação laboratorial dos resultados obtidos com aqueles indicados por equipamentos calibrados específicos para uso em ensaios veiculares, e pela aplicação de um procedimento para reconstrução de traçados. A **motivação** deste trabalho encontra-se na garantia da confiabilidade do equipamento comercial para aplicação em diversos problemas de interesse do Grupo de Sistemas Veiculares e Robóticos nas áreas de modelagem e ensaios veiculares. Este trabalho se insere no **contexto** do emprego de novas tecnologias de controle e monitoração, que estão cada vez mais presentes nos veículos terrestres a fim de melhorar o conforto e segurança de seus passageiros. A **metodologia** empregada foi a de equipar um veículo de passeio com o sistema MQ200-PRO da MaxQData, realizar a coleta das principais variáveis associadas a sua dinâmica em diferentes condições de operação, tratar os dados obtidos e utilizá-los na validação metrológica do equipamento e na reconstrução de traçados. O trabalho discute também diferenças existentes entre os tratamentos de dados estacionário e dinâmico. Como **conclusão** pode-se sinalizar a necessidade do estabelecimento de normas específicas para orientar o emprego deste tipo de equipamento e definir critérios, além daqueles de natureza estática ou estacionária.

**Palavras-chave:**

Metrologia; Validação Metrológica; Sistema de Aquisição de Dados;  
Ensaio Veicular; Tratamento de Sinais; Reconstrução de Traçados.

## Abstract

Caldas, Ana Carolina Iglezias Lima; Speranza Neto, Mauro. *Metrological Validation of a Data Acquisition System for Ground Vehicles Path Reconstruction*. Rio de Janeiro, 2008. Masters Degree - Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The **main objective** of this study was the metrological validation of a common data acquisition system, to use in researches with ground vehicles. From the information collected, such as travel speed, longitudinal and lateral acceleration and angular velocity, was performed an analysis of errors and a study of variance, using the equipment in accordance with the existing technical standards. The validation was made by comparison the results of the collected data with the results collected with calibrated equipment, and by applying a procedure of path reconstruction. The **motivation** of this work is in ensuring the reliability of commercial equipment for use on various issues of interest to the group of Vehicular and Robotics Systems, in the areas of modeling and vehicular testing. This work fits into the **context** of the use of new technologies for control and monitoring, which are increasingly involved in ground vehicles in order to improve the comfort and safety of its passengers. The **methodology** used was to equip a vehicle to run with the system MQ200-PRO from MaxQData, perform the collection of key variables associated with its dynamics in different conditions of operation, process the data and use them in the metrological validation of equipment and path reconstruction. Despite the goals have been achieved, the results showed interesting aspects about the differences between processing stationary and dynamic data. In **conclusion**, it is important to highlight the need of establishment specific rules for employment of such equipment, including criteria not only static or stationary.



**Key words:**

Metrology; Metrological Validation; Data Acquisition System; Tests Application; Treatment of Signals; Path Reconstruction.

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1. Introdução                                       | 17 |
| 1.1. Objetivos                                      | 18 |
| 1.2. Motivação/Relevância                           | 19 |
| 1.3. Metodologia                                    | 19 |
| 1.4. Estrutura do trabalho                          | 21 |
| 2. Revisão Bibliográfica                            | 22 |
| 3. Veículos Terrestres                              | 26 |
| 3.1. Dinâmica longitudinal                          | 28 |
| 3.2. Dinâmica lateral                               | 29 |
| 3.3. Dinâmica vertical                              | 30 |
| 3.4. Quadro resumo das dinâmicas                    | 31 |
| 4. Estudo do Equipamento de Aquisição de Dados      | 32 |
| 4.1. Princípio do funcionamento do GPS              | 33 |
| 4.2. Princípio do funcionamento do acelerômetro     | 35 |
| 4.3. Princípio do funcionamento do girômetro        | 36 |
| 4.4. Central inercial                               | 37 |
| 4.5. MEMS - Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos          | 39 |
| 5. Ensaio para a Validação do Equipamento           | 46 |
| 5.1. Procedimento de aquisição de dados             | 47 |
| 5.2. Resultados obtidos pelo equipamento            | 50 |
| 5.3. Tratamento de sinais                           | 53 |
| 6. Validação Metrológica                            | 60 |
| 6.1. Conceitos e definições aplicáveis a metrologia | 60 |
| 6.2. Comparação laboratorial                        | 63 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.    | Reconstrução de Traçados   | 68  |
| 7.1.  | Cinemática - Conversão do tempo para distância                         | 68  |
| 7.2.  | Método de Compensação do Erro de Aceleração                            | 70  |
| 7.3.  | Método de <i>Stretching</i>  | 71  |
| 7.4.  | Implementação computacional  | 75  |
| 7.5.  | Validação da implementação computacional                               | 79  |
| 7.6.  | Aplicação do Método de <i>Stretching</i>                               | 83  |
| 8.    | Conclusões   | 88  |
| 9.    | Referências Bibliográficas   | 90  |
| 10.   | Anexos   | 92  |
| 10.1. | Certificado de Calibração e Especificações Técnicas do <i>Correvit</i> | 92  |
| 10.2. | Especificações Técnicas do MQ200-PRO                                   | 104 |
| 10.3. | Arquivo <i>Matlab</i> da Simulação Desenvolvida                        | 113 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Reconstrução do traçado feito pelo software do sistema de aquisição de dados utilizado.                             | 18 |
| Figura 2 - Sistema de coordenadas recomendado pela norma SAE J670 (Padrão Americano)   | 26 |
| Figura 3 - Sistema de coordenadas recomendado pelas normas ISO 4130 e DIN 70000 (Padrão Europeu).                              | 26 |
| Figura 4 – Trilateração 2D (Bidimensional).  | 34 |
| Figura 5 – Acelerômetro (ideal) com sensor piezoelétrico e circuito equivalente.   | 34 |
| Figura 6 - Esquema de um girômetro mecânico.   | 35 |
| Figura 7 – Esquema Geral de utilização de uma UMI ou IMU.  | 37 |
| Figura 8 - Esquema de uma Central Inercial com tecnologia MEMS, com a aplicação desejada.                                      | 39 |
| Figura 9 – Acelerômetros MEMS – Piezorresistivos.  | 40 |
| Figura 10 – Acelerômetro Capacitivo Modelo ADXL – 3 eixos.   | 41 |
| Figura 11 – Estrutura interna de um Acelerômetro da família ADXL.  | 41 |
| Figura 12 - Estrutura interna do giroscópio com estrutura em forma de pente.   | 42 |
| Figura 13 - Aspecto da estrutura interna de um giroscópio da família ADXRS.  | 43 |
| Figura 14 – Girômetro com rotor oscilante.   | 43 |
| Figura 15 – Detalhes da estrutura de um Girômetro ressonador <i>wine glass</i> .   | 44 |
| Figura 16 – Sensor de Velocidade do Equipamento <i>Correvit</i> .  | 46 |
| Figura 17 – Equipamento de Aquisição dos dados do <i>Correvit</i> .  | 47 |
| Figura 18 – Sensor de medição das acelerações conectado ao <i>Correvit</i> .   | 47 |
| Figura 19 – Controle de aquisição de dados do equipamento <i>Correvit</i> .  | 47 |
| Figura 20 – Equipamento de aquisição de dados MQ200-PRO junto com transformador para alimentação de 127 V do <i>notebook</i> . | 48 |
| Figura 21 – <i>Notebook</i> e módulo externo do GPS.   | 49 |
| Figura 22 – Tela de visualização do equipamento MQ200-PRO.   | 49 |
| Figura 23 – Pista Real dos ensaios vista no programa <i>Google Earth</i> .   | 50 |
| Figura 24 – Comparação da velocidade aquisitada pelos dois equipamentos.   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 25 – Comparação da aceleração lateral adquirida pelos dois equipamentos.   | 51 |
| Figura 26 - Comparação da aceleração lateral adquirida pelos dois equipamentos, com correção da constante de 0,12G e inversão do sinal no Correvit. | 52 |
| Figura 27 – Tipos de Ruídos em Sensores MEMS.   | 53 |
| Figura 28 - Resposta em Frequência do Filtro de Symonds & Casanova & Sharp [1], Magnitude.  | 54 |
| Figura 29 – Resposta em Frequência do Filtro de Symonds & Casanova & Sharp [1], Fase.   | 54 |
| Figura 30 – Velocidade Longitudinal sem filtragem adquirida por [1].  | 55 |
| Figura 31 – Aceleração Lateral sem filtragem adquirida por [1].   | 55 |
| Figura 32 - Velocidade Longitudinal com filtragem realizada em [1].   | 55 |
| Figura 33 - Aceleração Lateral com filtragem realizada em [1].  | 56 |
| Figura 34 – Velocidade Longitudinal obtida pelo MQ200-PRO no ensaio de 60 km/h.   | 56 |
| Figura 35 – Aceleração Lateral obtida pelo MQ200-PRO no ensaio de 60 km/h.  | 57 |
| Figura 36 - Resposta em Frequência do Filtro utilizado, Magnitude.  | 57 |
| Figura 37 - Resposta em Frequência do Filtro utilizado, Fase.   | 58 |
| Figura 38 – Resultado da filtragem dos dados adquiridos de velocidade longitudinal.   | 58 |
| Figura 39 - Resultado da filtragem e interpolação dos dados adquiridos de aceleração lateral.   | 58 |
| Figura 40 - Descrição Geométrica do Traçado do Circuito.  | 68 |
| Figura 41 – Fluxograma da Implementação Computacional do Método de <i>Stretching</i> – Parte 1.   | 73 |
| Figura 42 – Chamada do <i>Matlab</i> para a simulação no <i>Simulink/Matlab</i> .   | 74 |
| Figura 43 – Modelo real para simulação desenvolvida no <i>Simulink/Matlab</i> do Método de <i>Stretching</i> – Parte 1.                             | 75 |
| Figura 44 – Simulação primeira etapa – variáveis de entrada do sistema.   | 76 |
| Figura 45 – Simulação segunda etapa – cálculo de ângulo tangente $\psi$ .   | 77 |
| Figura 46 – Simulação terceira etapa – cálculo das posições x e y.  | 77 |
| Figura 47 – Resultado da primeira chamada da simulação  |    |

|  |    |
|--|----|
| para Barcelona com $E_\psi / S$ , $E_x / S$ e $E_y / S$ zerados.   | 79 |
| Figura 48 – Resultado da segunda chamada simulação para Barcelona com a correção do ângulo tangente $\psi$ .                                 | 80 |
| Figura 49 - Resultado da terceira chamada simulação para Barcelona com a correção do ângulo tangente $\Psi$ e a correção das posições x e y. | 80 |
| Figura 50 – Resultado obtido por Symonds & Casanova & Sharp [1].   | 81 |
| Figura 51 – Sobreposição do resultado de [1] com o da simulação.   | 82 |
| Figura 52 – Imagem da pista de ensaios obtida pelo programa <i>Google Earth</i> .  | 83 |
| Figura 53 – Resultado da primeira chamada da simulação com $E_\psi / S$ , $E_x / S$ e $E_y / S$ zerados.                                     | 84 |
| Figura 54 – Resultado da segunda chamada da simulação com a correção do ângulo tangente $\Psi$ .   | 85 |
| Figura 55 - Resultado da terceira chamada da simulação com a correção do ângulo tangente $\Psi$ e a correção das posições x e y.             | 85 |
| Figura 56 – Comparação do resultado da simulação realizada com a pista real.   | 86 |

## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Nomenclatura em Relação aos Eixos Coordenados.                               | 26 |
| Tabela 2 – Quadro Resumo das Dinâmicas.   | 29 |
| Tabela 3 – Exatidão e Resolução do equipamento <i>Correvit</i> .                        | 61 |
| Tabela 4 – Valores típicos de velocidade medidos<br>pelos dois equipamentos utilizados. | 63 |
| Tabela 5 - Valores típicos de aceleração lateral medidos<br>pelos dois equipamentos.    | 64 |
| Tabela 6 - Cálculo do Coeficiente de Variação para 50 km/h.                             | 65 |

## Lista de Símbolos

|              |   |
|--------------|---|
| $V_x$        | Velocidade Longitudinal   |
| $V_y$        | Velocidade Lateral  |
| $V_z$        | Velocidade Vertical   |
| $a_x$        | Aceleração Longitudinal   |
| $a_y$        | Aceleração Lateral  |
| $a_z$        | Aceleração Vertical   |
| $g$          | Aceleração da Gravidade   |
| $\theta$     | Ângulo de <i>Pitch</i> (rotação em x)                           |
| $\varphi$    | Ângulo de <i>Roll</i> (rotação em y)                            |
| $\psi$       | Ângulo de <i>Yaw</i> (rotação em z) = Ângulo Tangente           |
| $x$          | Posição no eixo x   |
| $y$          | Posição no eixo y   |
| $k$          | Curvatura da trajetória   |
| $S$          | Comprimento total do traçado                                    |
| $s$          | Comprimento percorrido no tempo t                               |
| $\rho$       | Raio de curvatura   |
| $E_\psi$     | Erro do ângulo tangente $\psi$                                  |
| $E_s$        | Erro da distância percorrida                                    |
| $E_x$        | Erro da posição no eixo x                                       |
| $E_y$        | Erro da posição no eixo y                                       |
| $\mathbf{p}$ | Coefficientes de correção dos erros, $\mathbf{p}=[p_1,p_2,p_3]$ |
| $T$          | Tempo total do percurso   |
| $t$          | Tempo de simulação  |
| $cv$         | Coefficiente de variação  |
| $u$          | Desvio padrão   |
| $u^2$        | Variância   |
| $\bar{m}$    | Média   |