

**José Luiz Dias**

**Metodologia para avaliação metrológica e determinação da  
periodicidade de calibração em sistemas de medição  
fiscal e apropriação de gás**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Professor Orientador:

Alcir de Faro Orlando, Ph.D.  
PósMQI/PUC-Rio

Rio de Janeiro  
Abril de 2007

**José Luiz Dias**

**Metodologia para avaliação metrológica e determinação da periodicidade de calibração em sistemas de medição fiscal e apropriação de gás**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre junto ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação. Aprovada pela Comissão Examinadora, e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, Formalizado pelas respectivas assinaturas.

**Comissão Examinadora:**

**Alcir de Faro Orlando, PhD**  
PósMQI– PUC-Rio

**Paula Medeiros Proença de Gouvêa, PhD**  
Gávea Sensors

**Eloi Fernandez, Dr**  
PUC-Rio

**Mauro Speranza Neto, PhD**  
PUC-RIO

**Coordenação Setorial de Pós-Graduação:**

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial de Pós-Graduação do  
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)  
Rio de Janeiro,  
11 de abril de 2007

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

### **José Luiz Dias**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Gama Filho em 1984 e trabalha desde 1985 na Petrobras como engenheiro da empresa, por ocasião de sua aprovação no concurso público nacional para contratação de engenheiros de equipamentos, onde ocupa atualmente o cargo de engenheiro de equipamentos sênior, exercendo atividades de elaboração e execução de projetos. Fez curso de pós-graduação de economia e finanças pela FGV e pós-graduação em Engenharia de Segurança ministrado pela UFF (Universidade Federal Fluminense).

#### Ficha Catalográfica

Dias, José Luiz

Metodologia para avaliação metrológica e determinação da periodicidade de calibração em sistemas de medição fiscal e apropriação de gás / José Luiz Dias ; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2007.

110 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia para Qualidade e Inovação)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Calibração. 3. Cartas de controle. 4. Indústria de petróleo. 5. Incerteza de medição. 6. Transmissor multivariável. 7. Medição. 8. Periodicidade. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD:389.1

*"Quando morremos, nada pode ser levado conosco, com a exceção das sementes lançadas por nosso trabalho e do nosso conhecimento."*

Dalai Lama

Dedico este trabalho ao meu pai que enquanto vivo sempre me ajudou e apoiou

.

## Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade de existir e por me conceder o privilégio de realizar este curso.

Ao meu orientador Alcir de Faro Orlando, que me fez despertar a tempo para iniciar e concluir os trabalhos experimentais com o que havia disponível.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (Pós-MQI), Maurício Nogueira Frota, por sua dedicação e aconselhamento em momentos importantes.

À minha esposa e filhos por permitir a minha ausência quando na dedicação aos estudos.

À Petrobras por patrocinar e liberar uma vez por semana para realização do curso.

## Resumo

Dias, José Luiz. **Metodologia para avaliação metrológica e determinação da periodicidade de calibração em sistemas de medição fiscal e apropriação de gás.** Rio de Janeiro, 2007. 110p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho, de interesse da indústria de petróleo, é desenvolvida uma metodologia para avaliação metrológica e determinação da periodicidade de calibração em sistemas de medição de vazão de gás natural com placas de orifício, usando históricos de dados bimestrais de medidores instalados em pontos fiscais da bacia de Campos. O estudo analisa dados de calibração de medidores de temperatura, pressão e pressão diferencial de um transmissor eletrônico de vazão multivariável, contribuindo para o entendimento do impacto das incertezas destas variáveis na incerteza total do sistema de medição como um todo. Como resultados das avaliações metrológicas, foram determinados intervalos entre calibrações sucessivas, de modo que as exigências de incerteza de medição da portaria conjunta nº 1 ANP/INMETRO de 19/6/2000 possam ainda ser atendidas nos pontos de medição fiscal e de apropriação. Inicialmente, foi mostrado que os valores de incertezas calculadas de vazão pela norma ISO 5167-2 (2003) atendem os requisitos da portaria. Finalmente, foi mostrado que o intervalo entre calibrações sucessivas dos medidores poderia ser aumentado do valor atualmente requerido pela portaria (2 meses) para pelo menos 6 meses para pressão diferencial e pressão, e 14 meses para temperatura. Este resultado tem um impacto econômico e operacional nas empresas de gás natural.

## Palavras-chave

Transmissor Multivariável; pressão; temperatura; metrologia; incerteza de medição; placa de orifício; medição de vazão; indústria do petróleo.

## Abstract

Dias, José Luiz ; **A methodology for metrological evaluation and determination the frequency of calibration in fiscal and allocation natural gas measurement systems.** Rio de Janeiro, 2007. 110p. MSc. Dissertation – Graduate Program in Metrology. Research area: Metrology for Quality and Innovation. MQI. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil.

In the present work, of interest of the oil industry, a methodology was developed for metrological evaluating and determination the frequency of calibration of natural gas flow rate measurement systems with orifice plates, using calibration data obtained every two months from measurement instruments installed in fiscal points of the Campos Basin. The study evaluates the calibration data of temperature, pressure and differential pressure measurement from a multivariable transmitter, contributing to a better understanding of the influence of those variables in the uncertainty of flow rate as a result of the methodological evaluating, the intervals between two successive calibrations was determined, so that the requirements of the Portaria Conjunta nº 1 ANP/INMETRO, 19/06/2000, could be met in the fiscal and allocation points. First of all, it was shown that the flow rate uncertainty values, as calculated by ISO 5167-2 standard was fully covered by the requirements. Finally, it was shown the interval between successive calibrations could be increased of the value nowadays required by portaria (2 months) to 6 months for pressure and differential pressure, and to 14 months for temperature. This results has an economic and operational impact in the natural gas industry.

## Keywords

Transmitter Multi-variable; pressure; temperature; uncertainty of measurement; orifice plate; flow measurement; metrology; petroleum industry.

# Sumário

1 Introdução	17
1.1 O gás natural	17
1.2 Medição de gás	18
1.3 Legislação	22
1.4 Objetivos	23
1.5 Estrutura da dissertação	23
2 Fundamentos Teóricos	25
2.1 Medição de vazão com placa de orifício	25
2.2 Incerteza de medição de vazão com placa de orifício	26
2.2.1 Expressão fundamental da incerteza	26
2.2.2 Incerteza padrão sobre o coeficiente de descarga, $u(C)$	27
2.2.3 Incerteza padrão sobre o fator de expansão, $u(\varepsilon)$	30
2.2.4 Incerteza padrão sobre a massa molecular, $u(MM)$	30
2.2.5 Incertezas padrão sobre os fatores de compressibilidade do gás: $u(Z_o)$ e $u(Z_b)$	31
2.2.6 Incerteza padrão sobre o diâmetro da placa de orifício: $u(d)$	32
2.2.7 Incerteza padrão sobre o diâmetro do tubo: $u(D)$	32
2.2.8 Incerteza padrão sobre a pressão estática absoluta: $u(P_o)$	32
2.2.9 Incerteza padrão sobre a temperatura absoluta do gás: $u(T_o)$	34
2.2.10 Incerteza padrão sobre a pressão diferencial: $u(\Delta P)$	34
2.2.11 Incerteza padrão sobre a massa específica do gás: $u(\rho_o)$	35
2.2.12 Incerteza padrão sobre a vazão volumétrica: $u(Q_o)$	35
2.3 Balanço das incertezas	35
2.3.1 Balanço de incertezas para a massa específica do gás: $(\rho_o)$	36
2.3.2 Balanço de incertezas para a vazão volumétrica nas condições de	

operação: ( $Q_o$ )	36
2.3.3 Balanço de incertezas para a vazão volumétrica nas condições de referência: ( $Q_o$ )	37
2.4 Metodologia de análise	37
2.4.1 Incerteza da massa molecular	37
2.4.2 Incerteza Máxima permitida pelo regulamento	39
2.4.3 Observação das derivas da pressão diferencial ( $\Delta P$ ) pressão absoluta ( $P$ ) e temperatura ( $T$ )	40
3 Procedimento Experimental	42
3.1 Planta de processo de PPM-1	42
3.2 O processo de verificação nas plataformas	43
3.2.1 Principais componentes	43
3.2.2 Medição de pressão diferencial, Delta P ( $\Delta P$ )	46
3.2.3 Medição de pressão estática absoluta ( $P_a$ )	47
3.2.4 Medição da temperatura absoluta ( $T$ )	48
3.2.5 Procedimento Geral nas verificações ( $\Delta P, P_a, T$ )	48
3.3 Requisitos das especificações dos instrumentos	49
4 Resultados e Análise	51
4.1 Incerteza de medição de vazão em PPM-1	51
4.2 Estimativa dos limites de incerteza das variáveis de pressão diferencial ( $\Delta P$ ) pressão absoluta ( $P$ ) e temperatura ( $T$ )	54
4.3 Análise de dados de calibração	55
4.3.1 Dados de origem	55
4.3.2 Análise de dispersão dos dados originais	57
4.3.3 Eliminação dos dados ruins (“outliers”)	60
4.3.4 Teste de normalidade	61
4.3.5 Intervalo de confiança	62
4.3.6 Teste de estabilidade	66
4.3.7 Análise de variância (ANOVA)	68

4.4 Periodicidade para as calibrações	70
5 Conclusões	78
5.1 Avaliação da influência da exatidão das variáveis de pressão diferencial, pressão estática e temperatura dos medidores multiváriaveis ( $\Delta P, P_a, T$ )	79
5.2 Desenvolvimento de uma metodologia para se expressar a incerteza de medição resultante da combinação dos efeitos caracterizados nos itens anteriores	79
5.3 Avaliação da conformidade metrológica do medidor em relação a periodicidade bimestral de calibração	79
5.4 Desenvolvimento de uma metodologia que permita identificar a real necessidade de intervenções no medidor durante a periodicidade bimestral	80
5.5 Proposição de uma nova periodicidade de calibração	80
5.6 Considerações sobre a periodicidade de calibração	80
5.7 Recomendações para trabalhos futuros	80
6 Referências bibliográficas	82
Anexo A - Terminologia e definições	84
Anexo B - Gráficos de Controle	97
Anexo C -Histogramas	100
Anexo D - Índice de Capacidade de Processo	101
Anexo E - Incerteza padronizada e coeficientes de sensibilidade sobre a vazão volumétrica	103
Anexo F – Funções gráficas utilizadas do Matlab	105

## Lista de figuras

Figura 1- Malha de medição por placa de orifício	20
Figura 2- Instalação típica com transmissor/sensor multivariável com porta placa	21
Figura 3 - Computador de vazão	22
Figura 4 -Variação da incerteza expandida do coeficiente de descarga em função do beta [AGA-3]	28
Figura 5- Variação da incerteza expandida do coeficiente de descarga em função do número de Reynolds [AGA-3]	29
Figura 6 - Variação da incerteza expandida do fator de compressibilidade em função da temperatura e pressão estática [AGA-8]	31
Figura 7 - Identificação da deriva	40
Figura 8- Tendência da deriva	41
Figura 9 – Planta de processo de PPM-1	42
Figura 10 – Computador de vazão FloBoss	43
Figura 11 – Transmissor de vazão multivariável	44
Figura 12 – Vista inferior do manifold do transmissor multivariável	44
Figura 13 – Tela de acesso ao transmissor multivariável	45
Figura 14- Interligação do transmissor multivariável com o padrão gerador de pressão diferencial.	46
Figura 15 - Interligação do transmissor multivariável com o padrão gerador de pressão estática	47
Figura 16 – Tela de calibração do transmissor	49
Figura 17 – Incertezas requeridas delta P	55
Figura 18 – Incertezas requeridas pressão estática	55
Figura 20 – Gráfico de histograma e boxplot delta P UT-1244500	58
Figura 21 – Gráfico de histograma e boxplot pressão estática UT-1244500	58
Figura 22 - Gráfico de histograma e boxplot temperatura UT-1244500	59
Figura 23 - Gráfico de histograma e boxplot delta P UT-1223591	59
Figura 24 - Gráfico de histograma e boxplot pressão estática UT-1223591	59
Figura 25 - Gráfico de histograma e boxplot temperatura UT-1223591	59
Figura 26 –Histogramas das amostras de delta P, pressão estática e temperatura UT-1244500	60
Figura 27 - Histogramas das amostras de delta P, pressão estática e	

temperatura UT-223591	61
Figura 28- Normplot (delta P, Pressão estática , temperatura) UT - 1244 500	61
Figura 29- Normplot (delta P, Pressão estática, temperatura) UT – 1223 591	61
Figura 30- Modelagem análise numérica Delta P - 1244500	62
Figura 31- Modelagem análise numérica Pest – 1244500	63
Figura 32- Modelagem análise numérica Temp - 1244500	63
Figura 33- Modelagem análise numérica Delta P - 1223591	64
Figura 34- Modelagem análise numérica Pest - 1223591	64
Figura 35- Modelagem análise numérica Temp - 1223591	65
Figura 36 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de delta P, UT-124 4500	66
Figura 37 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de Pest, UT-12445 00	67
Figura 38 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de Temp, UT-1244 500	67
Figura 39 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de delta P, UT-122 3591	67
Figura 40 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de Pest, UT-12235 91	68
Figura 41 – Gráfico XBARRA e Schart das amostras de Temp, UT-1223 591	68
Figura 43 – Gráfico de tendência variável Pressão Estática (UT-122359 1)	74
Figura 44 – Gráfico de tendência variável Temperatura (UT-1223591)	75
Figura 45 – Gráfico de tendência variável Delta P (UT-1244500)	75
Figura 46 – Gráfico de tendência variável Pressão Estática (UT-124450 0)	76
Figura 47 – Gráfico de tendência variável Temperatura (UT-1244500)	77

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Composição química do gás natural	18
Tabela 2 - Definições básicas do regulamento	22
Tabela 4 - Balanço das incertezas para a vazão volumétrica nas condições de operação	36
Tabela 5 - Balanço de incertezas para a vazão volumétrica nas condições de referência	37
Tabela 6 - Incerteza relativa da composição do gás natural ( $k=2$ )	38
Tabela 7 - Incertezas da composição do gás com cromatógrafo	38
Tabela 8 - Dados de exatidão e estabilidade do transmissor multivariável	50
Tabela 9 - Incerteza de medição UT-1244500	51
Tabela 10- Incerteza de medição UT-1223586	52
Tabela 11- Incerteza de medição UT-1223587	52
Tabela 12- Incerteza de medição UT-1223591	53
Tabela 13- Incerteza de medição UT-1223592	53
Tabela 14- Incertezas máximas requeridas para os pontos de medição	54
Tabela 15- Dados de calibração do UT-1244500	56
Tabela 16- Dados de calibração do UT -1223591	57
Tabela 17- Intervalo de confiança dos erros	65
Tabela 18 - ANOVA das variáveis Delta P, Pressão est. e temperatura	69
Tabela 19 – Dados tratados para estudo de tendência do UT-1244500	71
Tabela 20 – Dados tratados para estudo de tendência do UT-1223591	72

## Lista de Símbolos

$c_i$  coeficiente de sensibilidade;

$C_d$  Coeficiente de descarga da placa de orifício;

$C(FT)$  É o coeficiente de descarga a um número de Reynolds específico em medidores com tomada de pressão no flange;

$d$  Diâmetro do orifício da placa, calculado à temperatura de operação ( $T_o$ );

$D$  Diâmetro interno do tubo, calculado à temperatura de operação ( $T_o$ );

$E_v$  Fator de aproximação de velocidade,  $E_v = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$ ;

$k$  fator de abrangência;

$M_i$  massa molecular do componente  $i$  do gás natural;

$MM$  Peso molecular, determinado normalmente pelas análises de laboratório ;

$R$  Constante do gás (8314,41 Pa.m<sup>3</sup>/kmol.k)

$R_e$  Número de Reynolds;

$s$  desvio padrão amostral;

$s^2$  variância amostral;

$P_b$  Pressão absoluta do gás nas condições de base;

$P_o$  Pressão absoluta do gás nas condições de operação;

$Q_b$  Vazão volumétrica nas condições de base;

$Q_o$  Vazão volumétrica de gás nas condições de operação;

$Q_{mo}$  Vazão mássica nas condições de operação;

$T_o$  Temperatura do gás nas condições de operação;

$T_b$  Temperatura do gás nas condições de base;

$u$  incerteza padrão;

$u^*$  incerteza relativa;

$u_c$  incerteza padrão combinada;

$u_c^*$  incerteza combinada relativa;

$U$  incerteza expandida;

$x_i$  fração molar do componente  $i$  do gás natural;

$Z_o$  Fator de compressibilidade, geralmente estimado por correlações de temperatura, pressão e propriedades do gás;

$Z_b$  Fator de compressibilidade do gás nas condições de base;

## Lista de Símbolos Gregos

$\beta$  Relação entre os diâmetros do orifício e do tubo de medição( $d / D$ );

$\Delta P$  Pressão diferencial medida entre as tomadas de pressão a montante e a jusante;

$\varepsilon$  Fator de expansão do gás;

$\rho_o$  Massa específica do gás nas condições de pressão e temperatura de operação( $P_o, T_o$ ).

$\rho_b$  Massa específica nas condições de base;

$\sigma$  desvio padrão da população;

$\nu$  graus de liberdade;