

**Flaviomar Soares de Souza**

**Desenvolvimento de uma metodologia para a calibração de  
uma turbina utilizada para medição do volume deslocado de  
ar e determinação da sua incerteza de medição.**

**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 Orlando Faro, Ph.D.  
Departamento de Engenharia Mecânica/PUC-Rio  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PósMQI/PUC-Rio

Rio de Janeiro

maio de 2007



**Flaviomar Soares de Souza**

**Desenvolvimento de uma metodologia para a calibração de  
uma turbina utilizada para medição do volume deslocado de  
ar e determinação da sua incerteza de medição**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(PUC-Rio)

**Dra. Maria Helena Farias**

INMETRO – Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**Dr. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira**

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

**Prof. Dr. Washington Braga Filho**

Departamento de Engenharia Mecânica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(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, 17 de maio de 2007.

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

### **Flaviomar Soares de Souza**

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema e Computação pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, em 2001. Engenheiro atuando a partir de 2001 na Automação de Equipamento no setor de Desenvolvimento de Projetos, atuando na automação de Laboratórios de Temperatura, Pressão e Volume e Responsável Técnico do Laboratório de Vazão da Transcontrol.

#### Ficha Catalográfica

Souza, Flaviomar Soares de

Desenvolvimento de uma metodologia para a calibração de uma turbina utilizada para medição do volume deslocado de ar e determinação da sua incerteza de medição / Flaviomar Soares de Souza ; orientador: Alcir de Orlando Faro (Departamento de Engenharia Mecânica/PUC-Rio e Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PósMQI/PUC-Rio). – 2007. 203 f. : il. (col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Turbina. 3. Procedimento de calibração. 4. Incerteza de medição. I. Faro, Alcir de Orlando. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Dedico este trabalho à minha esposa e a meu filho pela compreensão e  
paciência por todo o período do curso

## **Agradecimentos**

A Deus pela realização desta obra e de um sonho

Aos meus pais

Ao Geraldo Pfaltzgraff e demais colegas da Transcontrol que prestaram uma grande colaboração

Ao Prof. Alcir, por acreditar na proposta e ser um grande incentivador

Ao Prof. Maurício, que sempre esteve atento às demandas do curso

Aos mestrandos que estão caminhando para este dia

E por fim, aos componentes da banca pela participação nesse momento tão importante para mim.

## Resumo

Souza, Flaviomar Soares. **Desenvolvimento de uma metodologia para a calibração de uma turbina utilizada para medição do volume deslocado de ar e determinação da sua incerteza de medição**. Rio de Janeiro, 2007. 203p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Pós-MQI). Área de concentração: Qualidade e Inovação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tendo em vista que as normas existentes não apresentam uma metodologia em relação à calibração de medidores tipo turbina e a determinação da incerteza de medição do volume deslocado de gases neste medidor, este trabalho apresenta uma metodologia para sistematizar os processos de calibração. Para isso, foi utilizado uma bancada de calibração com uma turbina. Com os dados obtidos nos testes foi possível processar os resultados obtidos para a determinação das incertezas de medição das variáveis envolvidas e avaliar o desempenho do medidor. Os dados experimentais de temperatura, pressão e rotação da turbina foram obtidos para ar com uma bancada já existente em um laboratório de calibração, tanto para a turbina *master* como para o objeto, e os resultados obtidos neste estudo estão sendo utilizados para sua acreditação junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC). Os procedimentos de teste foram desenvolvidos a partir de normas existentes, especificação dos equipamentos e seu desempenho, em condições que permitissem a otimização da incerteza de medição, calculada de acordo com o ISO GUM. Assim, foi mostrado que a incerteza de medição de volume com a turbina de teste decresce quando o volume de gás utilizado aumenta, até um valor aproximadamente constante, definindo sua condição de calibração. Finalmente, uma metodologia foi desenvolvida para determinar o fator da turbina (*K-factor*) como uma função contínua do volume indicado pela turbina de teste ao longo da sua faixa de utilização, simplificando o procedimento a ser utilizado.

## Palavras-chave

METROLOGIA; TURBINA; PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO; INCERTEZA DE MEDIÇÃO.

## Abstract

Souza, Flaviomar Soares. **Development of a methodology for calibrating a turbine meter used for measuring the displaced air volume and determination of its uncertainty of measurement.** Rio de Janeiro, 2007. 203p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Pós-MQI). Área de concentração: Qualidade e Inovação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Due to the fact that the existing standards don't have a methodology related to the calibration of turbine meters and determination of the measurement uncertainty of the displaced gas volume in this meter, this research presents a methodology for standardizing the calibration processes. It was made possible by the use of a turbine based calibration rig. By processing the data acquired during the tests, it was possible to determine the measurement uncertainty of the involved variables and to evaluate the meter performance. Its temperature and pressure, together with the turbine speed, were measured in an existing rig of a calibration laboratory, for both master and test turbines, and the results are being used to accredit the laboratory to the Brazilian Calibration Network (RBC). The test procedures were developed from existing standards for similar testes, equipment specification and performance, and test conditions that allow the optimization of the uncertainty of measurement, in accordance to ISO GUM. This way, it was shown that the uncertainty of measurement of volume with the test turbine decreases when the gas volume increases, up to an approximately constant value, which determines the calibration condition. Finally, a methodology was developed to determine the turbine calibration factor (K-Factor) as a continuous function of the indicated value by the teste turbine along its operation range, simplifying the procedure to be used.

## Key-Words

METROLOGY; TURBINE METER; CALIBRATION PROCEDURE; UNCERTAINTY OF MEASUREMENT.

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1 Histórico	17
1.2 Normas e Portaria	18
1.2.1 Norma NBR ISO 9951	18
1.2.2 Norma NBR 14801	19
1.2.3 Portaria INMETRO Nº 114 de 16 de outubro de 1997	19
1.3 Laboratórios de Vazão	20
1.3.1 CTGÁS	20
1.3.2 IPT	24
1.3.3 Transcontrol	25
1.3.4 Método de Calibração da Instalação de Teste Principal no NMI	27
1.4 Objetivos	31
1.5 Estruturação da Dissertação	32
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>33</b>
2.1 Norma NBR ISO 9951	33
2.2 Norma NBR 14801	36
2.3 Portaria nº 114 de 16 de outubro de 1997	38
2.4 Medidores tipo Turbina	41
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>42</b>
3.1 Módulos da Bancada de Calibração	42
3.1.1 Sensor e Transmissor de Temperatura	45
3.1.2 Sensor e Transmissor de Pressão	46
3.1.3 Medidores de Volume	47
3.1.4 Tubulação utilizada na construção da Bancada	48
3.1.5 Interface de Aquisição de Sinais	49
3.1.6 Software Aplicativo	50
3.2 Procedimento de Calibração	51
3.2.1 Procedimento para Calibração dos Sensores de Temperatura	51
3.2.2 Procedimento para Calibração dos Sensores de Pressão	52
3.2.3 Procedimento para Calibração das Turbinas Master	52



3.2.4 Procedimento para Calibração das Turbinas em Teste na Transcontrol	59
3.2.5 Procedimento de Análise de dados obtidos com a bancada de calibração	69
3.3 Cálculo da Incerteza Expandida da Bancada de Calibração de Turbina	71
3.3.1 Equação do <i>k-factor</i>	71
3.3.2 Variância experimental	72
3.3.2.1 Calculando as derivadas parciais (coeficientes de sensibilidade)	73
3.3.3 Cálculo da Variância combinada	75
3.3.4 Cálculo da Incerteza Expandida	75
4 RESULTADO E ANÁLISE	76
4.1 Resultado das calibrações dos sensores de temperatura	76
4.2 Análise dos resultados da calibração dos sensores de temperatura	76
4.3 Resultado das calibrações dos sensores de pressão	80
4.4 Análise dos resultados da calibração dos sensores de Pressão	80
4.5 Análise dos resultados da calibração da Turbina Master	84
4.6 Resultado da Análise de dados obtidos com a bancada de calibração	87
4.6.1 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 10 m <sup>3</sup>	91
4.6.2 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 20 m <sup>3</sup>	93
4.6.3 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 30 m <sup>3</sup>	95
4.6.4 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 40 m <sup>3</sup>	97
4.7 Análise dos resultados do comportamento da turbina em teste	99
4.8 Análise das Incertezas do <i>k-factor</i>	101
4.9 Determinação da Incerteza Expandida do <i>k-factor</i>	106
4.10 Curva de Tendência do <i>k-factor</i>	109
4.11 Determinação da Incerteza Expandida utilizando o Polinômio de Tendência	121
4.12 Análise Final das Incertezas	122

5 CONCLUSÃO	125
5.1 Conclusões	125
5.1.1 Bancada de Teste	125
5.1.2 Procedimento de Calibração	125
5.1.3 Incerteza do <i>k-factor</i>	126
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	127
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

APÊNDICE 1 - Dignóstico para avaliação da aderência às práticas de gestão com base nos requisitos da NBR ISO/IEC 17025 do laboratório de vazão da Transcontrol	130
--	-----

APÊNDICE 2 - Tabelas com os valores de volume, pressão e temperatura adquiridos nos testes realizados	151
---	-----

APÊNDICE 3 - Fundamentos teóricos sobre incerteza de medição	183
--	-----

APÊNDICE 4 - Fundamentos teóricos sobre tips de medidores de vazão	191
--	-----

APÊNDICE 5 – Valores da calibração dos sensores de temperatura e pressão	200
--	-----

## Lista de Figuras

Figura 1: Foto do laboratório de medição de vazão de gás do CTGÁS	20
Figura 2: Foto da Bancada de Alta	21
Figura 3: Padrões da Bancada de Alta	21
Figura 4: Faixa de medição dos padrões usados na bancada de alta vazão	22
Figura 5: Bancada de baixa vazão	23
Figura 6: Faixa de medição dos padrões usados na bancada de baixa vazão	23
Figura 7: Bancada de Alta Vazão	24
Figura 8: Bancada de Calibração de Turbinas	25
Figura 9: Padrões de trabalho da Bancada de Calibração de Turbinas	26
Figura 10: Medidor Tipo Turbina para gás	41
Figura 11: Bancada de Calibração de Turbinas	43
Figura 12: Diagrama de conexão dos elementos da bancada de calibração	44
Figura 13: Fluxograma para calibração de uma turbina	60
Figura 14: Entrada de dados da Turbina a ser Calibrada	61
Figura 15: Dados da Calibração	63
Figura 16: Valores da Corrida	64
Figura 17: Ajustando a Vazão	65
Figura 18: Visualizar e calcular média das vazões e dos erros	67
Figura 19: Consultar dados da Calibração	68
Figura 20: Gráfico da Calibração	68
Figura 21: Gráfico do $k$ -factor obtido passando 10m <sup>3</sup> pela turbina em teste	92
Figura 22: Gráfico do Desvio padrão do $k$ -factor obtido passando 10m <sup>3</sup> pela turbina em teste	93
Figura 23: Gráfico do $k$ -factor obtido passando 20m <sup>3</sup> pela turbina em teste	94
Figura 24: Gráfico do Desvio padrão do $k$ -factor obtido passando 20m <sup>3</sup> pela turbina em teste	94
Figura 25: Gráfico do $k$ -factor obtido passando 30m <sup>3</sup> pela turbina em teste	96
Figura 26: Gráfico do Desvio padrão do $k$ -factor obtido passando 30m <sup>3</sup> pela turbina em teste	96
Figura 27: Gráfico do $k$ -factor obtido passando 40m <sup>3</sup> pela turbina em teste	98
Figura 28: Gráfico do Desvio padrão do $k$ -factor obtido passando 40m <sup>3</sup> pela turbina em teste	98

Figura 29: Gráfico do Comportamento do $k$ -factor nas situações avaliadas	99
Figura 30: Gráfico do Comportamento do Desvio Padrão do $k$ -factor nas situações avaliadas	100
Figura 31: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $10\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 1º Grau	109
Figura 32: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $10\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 2º Grau	110
Figura 33: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $10\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 3º Grau	111
Figura 34: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $20\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 1º Grau	112
Figura 35: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $20\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 2º Grau	113
Figura 36: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $20\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 3º Grau	114
Figura 37: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $30\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 1º Grau	115
Figura 38: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $30\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 2º Grau	116
Figura 39: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $30\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 3º Grau	117
Figura 40: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $40\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 1º Grau	118
Figura 41: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $40\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 2º Grau	119
Figura 42: Gráfico da distribuição do $k$ -factor em $40\text{m}^3$ e da Equação de tendência do 3º Grau	120
Figura 43 : Contribuição da incerteza $u_C$ e $u_{PT}$ na incerteza final	123
Figura 44 : Módulo das incertezas que contribuem para a obtenção de $u_c$ vezes os seus coeficientes de sensibilidade	123
Figura 45 : Incertezas que compõem a incerteza da máster e a incerteza final da Turbina Master	124

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Medidores de referencia utilizados no NMI	27
Tabela 2 : Classificação dos medidores	36
Tabela 3 : Erros máximos admissíveis	39
Tabela 4 : Vazão de transição	40
Tabela 5: Conexão entre os tubos das linhas	48
Tabela 6 : Fator k calculado para cada vazão da turbina máster de 2"	54
Tabela 7 : Fator k calculado para cada vazão da turbina máster de 6"	56
Tabela 8 : Valores das incertezas do Sensor de Temperatura da Linha de Máster	78
Tabela 9: Valores das incertezas do Sensor de Temperatura da Linha de Teste	79
Tabela 10 : Valores das incertezas do Sensor de Pressão da Linha de Master	82
Tabela 11 : Valores das incertezas do Sensor de Pressão da Linha de Teste	83
Tabela 12: Corrida de 10 m <sup>3</sup> em uma vazão de aproximadamente 90 m <sup>3</sup> /h (Master)	87
Tabela 13 : Corrida de 10 m <sup>3</sup> em uma vazão de aproximadamente 90 m <sup>3</sup> /h (Teste)	88
Tabela 14: Corrida de 10 m <sup>3</sup> em uma vazão de aproximadamente 90 m <sup>3</sup> /h (Cálculos)	89
Tabela 15 : Valores dos <i>k-factors</i> utilizando 10 m <sup>3</sup>	91
Tabela 16 : Valores dos <i>k-factors</i> utilizando 20 m <sup>3</sup>	93
Tabela 17 : Valores dos <i>k-factors</i> utilizando 30 m <sup>3</sup>	95
Tabela 18 : Valores dos <i>k-factors</i> utilizando 40 m <sup>3</sup>	97
Tabela 19: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 10m <sup>3</sup>	101
Tabela 20: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 20m <sup>3</sup>	101
Tabela 21: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 30m <sup>3</sup>	102
Tabela 22: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 40m <sup>3</sup>	102
Tabela 23: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 10m <sup>3</sup>	103
Tabela 24: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 20m <sup>3</sup>	103
Tabela 25: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 30m <sup>3</sup>	104
Tabela 26: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 40m <sup>3</sup>	104
Tabela 27 : Incertezas em corridas utilizando 10 m <sup>3</sup>	105

Tabela 28 : Incertezas em corridas utilizando 20 m <sup>3</sup>	105
Tabela 29 : Incertezas em corridas utilizando 30 m <sup>3</sup>	105
Tabela 30 : Incertezas em corridas utilizando 40 m <sup>3</sup>	105
Tabela 31 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 10 m <sup>3</sup>	107
Tabela 32 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 20 m <sup>3</sup>	107
Tabela 33 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 30 m <sup>3</sup>	108
Tabela 34 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 40 m <sup>3</sup>	108
Tabela 35 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 1° Grau	121
Tabela 36 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 2° Grau	121
Tabela 37 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 3° Grau	122

## Lista de Símbolos

Vazão volumétrica	$Q$	$\text{m}^3/\text{s}$
Volume indicado no mensurando	$V_m$	$\text{m}^3$
Temperatura indicada no mensurando	$T_m$	K
Pressão indicada no mensurando	$P_m$	Pa
Densidade do fluido na turbina master	$\rho_M$	$\text{kg}/\text{m}^3$
Densidade do fluido na turbina em teste	$\rho_T$	$\text{kg}/\text{m}^3$
Densidade do fluido na condição de base	$\rho_B$	$\text{kg}/\text{m}^3$
Volume da Turbina master	$V_M$	$\text{m}^3$
Volume da Turbina teste	$V_T$	$\text{m}^3$
Pressão na Turbina master	$P_M$	Pa
Pressão na Turbina teste	$P_T$	Pa
Temperatura na Turbina master	$T_M$	K
Temperatura na Turbina teste	$T_T$	K
Constante Universal dos gases	$R$	
Graus de liberdade	$\nu$	
Graus de liberdade efetivos	$\nu_{eff}$	
Desvio padrão da distribuição normal	$\sigma$	
Tempo de integração	$\tau$	s
Diâmetro interno da tubulação	$D$	m
Distância de influência	$d$	m
Frequência	$f$	$\text{s}^{-1}$
Inteiro	$i$	
Inteiro	$m$	
Inteiros	$n$	
Número de Reynolds (relacionado a D)	$Re_d$	
Tempo	$t$	s
Massa específica do fluido	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$

## **Nomenclaturas**

**AGA** – American Gas Association

**ANP** – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

**API** – American Petroleum Institute

**API MPMS** – Representa a sigla do Manual Petroleum Measurement System

**CB-04** – Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos

**INMETRO** – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

**IPT** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**NMI** – Nederlands Meetinstituut

**OIML** - The International Organization of Legal Metrology

**PósMQI** – Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação

**PUC-Rio** – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**RBC** – Rede Brasileira de Calibração

**RTM** - Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural

**SI** – Sistema Internacional de Unidades

**VIM** – Vocabulário Internacional de Metrologia