



**Alex Sander Assunção**

**Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Doutor Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro  
Setembro de 2004



**Alex Sander Assunção**

**Procedimento experimental para avaliação  
metroológica do desempenho de uma microturbina  
utilizada para geração de energia elétrica.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título 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. Alcir de Faro Orlando**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Marcos Sebastião Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica – 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, 01 de setembro de 2004

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

### **Alex Sander Assunção**

Graduado em Física pelo CUMSB (Centro Universitário Moacyr Sreder Bastos) em 2001. Técnico Especial em Instrumentação pelo SENAI-RJ, 1995. Técnico de Mecânica pela ETEVM (Escola Técnica Estadual Visconde de Mauá), em 1989.

#### Ficha Catalográfica

Assunção, Alex Sander

Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica / Alex Sander Assunção; orientador: Professor Doutor Alcir de Faro Orlando. – Rio de Janeiro: PUC, Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2004.

v., 159 f. : il.; 29,7 cm

1. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia.

Inclui referências bibliográficas

1. Metrologia; 2. Incerteza de medição; 3. Microturbinas; 4. Gás natural; 5. Comissionamento; 6. Geração de energia.

Agradeço a Deus a perseverança que me foi dada para a realização de mais uma etapa em minha vida. Dedico esta dissertação a minha esposa Shirlei e à filha Bruna.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Amauri e Carolina, pela formação da base intelectual e moral que me permitiu trilhar, com firmeza e tranqüilidade, o caminho que escolhi.

A minha esposa Shirlei e filha Bruna, por acreditarem no meu potencial, por partilharem comigo decisões e momentos importantes e por me ajudarem a crescer como pessoa e como profissional.

Ao meu orientador, Professor Alcir de Faro Orlando, pelo apoio e parceria fundamentais na elaboração deste trabalho.

Ao meu coordenador, Professor Maurício Nogueira Frota e à Professora Elisabeth Costa Monteiro, pela confiança e estímulo durante o curso.

Ao professor Carlos Eduardo Reuther pela inestimável colaboração que tanto contribuiu para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Reginaldo e Alfredo, pela amizade sincera e pelo companheirismo nos estudos.

A todos os docentes e funcionários do Pós-MQI, pelos ensinamentos e pela ajuda, em especial às secretárias do Pós-MQI Eliane Albanez e Márcia Ribeiro.

## Resumo

Assunção, Alex Sander; Orlando, Alcir de Faro. **Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2004. 159p. 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.

O uso de tecnologias para incrementar a geração distribuída de energia elétrica, particularmente microturbinas a gás, tem aumentado ultimamente devido à crise de energia que muitos países, como o Brasil têm passado o que é um incentivo à produção independente de energia elétrica.

Procedimentos têm sido desenvolvidos para verificar os dados de desempenho de microturbinas, com objetivo de comissionamento. Quando alguém compra um sistema de geração de energia, sua partida pode apenas ser efetivada quando os dados do fabricante concordam com os de projeto, dentro de uma faixa de incerteza acordada, qualificando, portanto, estudos de viabilidade anteriormente realizados. Muitos procedimentos são detalhados para verificar os dados de desempenho sob condições de teste, extrapolando-os para outras diferentes.

Potência, consumo de gás, emissão dos gases, qualidade da energia elétrica (incluindo distorção harmônica e frequência) estão entre os parâmetros normalmente medidos. A frequência de aquisição de dados é normalmente especificada para atender as características de desempenho do equipamento sob condições estáveis de teste. Também, a incerteza dos instrumentos de medição é normalmente especificada, sem qualquer referência à incerteza expandida dos parâmetros calculados, que são usados para caracterizar seu desempenho.

Este trabalho descreve um método para avaliação dos dados de desempenho de uma microturbina a gás, juntamente com uma metodologia para calcular a incerteza dos parâmetros que caracterizam seu desempenho, com objetivos de comissionamento, a partir da incerteza dos instrumentos de medição, e fazendo uma análise crítica dos objetivos de medição a serem alcançados.

A metodologia é baseada nos conceitos metrológicos mais recentes, de forma que resultados confiáveis possam ser alcançados, utiliza condições de referência, estabelecidas por norma internacional [ISO-2314, 1973], para especificação dos dados de desempenho dos equipamentos, com objetivo de comparação, e segue as diretrizes da U.S. Environmental Protection Agency para especificação do desempenho a ser alcançado.

## **Palavras-chave**

Metrologia; Microturbinas à gás; Gás natural; Comissionamento; Incerteza de medição; Geração de energia; Avaliação metrológica de microturbinas à gás.

## Abstract

Assunção, Alex Sander; Orlando, Alcir de Faro. **Experimental procedure for a metrological evaluation of the performance of a microturbine used for electric energy generation.** Rio de Janeiro, 2004. 159p. Dissertatio - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de Concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of technologies for increasing distributed electric energy generation, particularly gas fired microturbines, has been lately growing due to the energies crisis many countries, including Brasil, have experienced, which is an incentive to an independent electric energy production.

Procedures have been developed to check microturbine performance data for commissioning purposes. When somebody buys an energy production plant, its start-up can only be accomplished when manufacturer's data matches the design data within an agreed uncertainty band, thus qualifying the previously made feasibility studies. Many procedures are detailed for checking the performance data under testing conditions, and extrapolating them for different ones.

Power, gas consumption, gas emissions, electric energy quality (including harmonic distortion and frequency) are among the usually measured parameters. Data acquisition frequency is usually specified to match specified equipment behaviour under stable test conditions. Also, the uncertainty of the measurement instruments are usually specified, without, however, defining the expanded uncertainty of the calculated parameters, which are used to characterize their performance.

This work presents a method for evaluating the gas fired microturbine performance data for electric energy generation, together with a methodology for calculating the uncertainty of parameters that characterize its performance for commissioning purposes, starting up from the uncertainty of the measurement instruments, and making a critical analysis of the measurement goals.

The methodology is based on most recently used metrology concepts, so that reliable results can be achieved, uses ISO reference conditions for

specifying equipment performance data for comparison purposes and follows U.S. Environment Protection Agency directions for specifying performance goals.

## **Keywords**

Metrology; Microturbine; Natural gas; commissioning; Mensuration uncertainty; Energy geration; Metrological evaluation of gas microturbines.

# Sumário

<b>1- Introdução</b>	19
1.1- Gás natural	22
1.1.1- Características e Vantagens	22
1.1.2- Justificativa	24
1.1.3- Combustão	25
1.2- Microturbina a Gás para Geração de Energia	26
1.2.1- Princípio de Funcionamento de uma Microturbina a Gás	27
1.3- Comissionamento do Sistema de Microturbina	29
1.3.1- Descrição	29
1.3.1.1- Desempenho da Produção de Energia	30
1.3.1.2- Desempenho de Qualidade da Energia Elétrica	31
1.3.1.3- Desempenho Operacional	32
1.3.1.4- Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar	33
1.3.1.5- Estimativa da Emissão de $\text{NO}_x$	34
1.4- Objetivo	34
1.5- Estrutura da Dissertação	35
<b>2- Fundamentos Teóricos</b>	37
2.1- Termodinâmica de Microturbinas	37
2.1.1- Ciclo Ideal da Microturbina a Gás	37
2.1.2- Microturbina a Gás Operando em Ciclo Aberto	38
2.1.3- O Ciclo da Microturbina a Gás com Regenerador	40
2.2- Expressão das Incertezas de Medição	41
2.2.1- Componentes da Incerteza	41
2.2.2- Incertezas Tipo A e Tipo B	43
2.2.2.1 Avaliação da Incerteza do Tipo A	43
2.2.2.2 Avaliação da Incerteza do Tipo B	44
2.2.3- Incerteza Padrão	45
2.2.4- Incerteza Padrão Combinada	46
2.2.5- Número de Graus de Liberdade Efetivo	48
2.2.6- Incerteza Expandida	48

2.2.7-	Roteiro de Cálculo	50
2.3-	Desenvolvimento Metodológico	51
2.3.1-	Desempenho da Produção de Calor e Energia	52
2.3.1.1-	Determinação da Produção de Calor e Energia	53
2.3.1.2-	Produção Média de Energia Elétrica	54
2.3.1.3-	Quantidade de Energia Média de Entrada	54
2.3.1.4-	Eficiência Elétrica	56
2.3.1.5-	Medição da Eficiência Térmica e Troca de Calor	58
2.3.1.6-	Eficiência Térmica	59
2.3.2-	Desempenho da Qualidade da Energia Elétrica	60
2.3.2.1-	Frequência Elétrica Média	60
2.3.2.2-	Tensão Elétrica	62
2.3.2.3-	Corrente Elétrica	63
2.3.2.4-	Tensão e Corrente Elétrica Total de Distorção de Harmônicos (THD)	63
2.3.2.5-	Fator de Potência	64
2.3.3-	Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar	64
2.3.3.1-	Determinação da Taxa de Emissão de Gases	64
2.3.3.2-	Estimativa de Emissão de NO <sub>x</sub>	66
2.4-	Combustão	67
2.4.1-	Combustão Completa	67
2.4.2-	Combustão Incompleta ou Parcial	68
2.4.3-	Combustão Real	68
2.4.4-	Balanços da Combustão	68
2.5-	Poder Calorífico	70
2.5.1-	Mistura de Gases Perfeitos	71
2.5.2-	Cálculo da Incerteza do PCI	71
<b>3-</b>	<b>Instrumentação</b>	<b>75</b>
3.1-	Medidores de Pressão e Temperatura	75
3.2-	Medidor de Vazão Tipo Turbina	77
3.3-	Calibração Transmissor de Pressão	79
3.3.1-	Objetivo	79
3.3.2-	Características dos Instrumentos Padrões	79
3.3.3-	Características do Instrumento a ser Calibrado	80

3.3.4-	Procedimentos de Calibração	80
3.3.5-	Considerações	81
3.3.6-	Resultados Obtidos	81
3.4-	Calibração do Pt-100	83
3.4.1-	Objetivo	83
3.4.2-	Características dos Instrumentos Padrões	83
3.4.3-	Características do Instrumento a ser Calibrado	84
3.4.4-	Procedimentos de Calibração	84
3.4.5-	Considerações	84
3.4.6-	Resultados Obtidos	85
3.5-	Calibração do Medidor de Vazão Tipo Turbina	86
3.5.1-	Objetivo	86
3.5.2-	Características dos Instrumentos Padrões	86
3.5.3-	Características do Instrumento a ser Calibrado	86
3.5.4-	Procedimentos de Calibração	87
3.5.5-	Considerações	90
3.5.6-	Resultados Obtidos	92
<b>4-</b>	<b>Resultados e Análise</b>	<b>93</b>
4.1-	Valores Desejáveis para a Incerteza de Medição	93
4.2-	Procedimento para o Cálculo da Incerteza de Medição	94
4.2.1-	Medição da Produção de Energia Elétrica	95
4.2.2-	Medição da Tensão e Corrente Elétrica	95
4.2.3-	Medição da Frequência Elétrica	96
4.2.4-	Cálculo da Energia Média de Entrada	96
4.2.5-	Cálculo da Eficiência Elétrica	96
4.2.6-	Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI)	97
<b>5-</b>	<b>Conclusões</b>	<b>99</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>103</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>107</b>
	<b>Anexos</b>	<b>143</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Montagem de uma microturbina a gás, utilizada como dispositivo experimental da presente pesquisa (Fabricante: Capstone, modelo C60)	26
<b>Figura 2:</b> Gerador da microturbina (Fabricante: Capstone, modelo C60)	27
<b>Figura 3:</b> Diagrama esquemático de uma microturbina a gás simples	28
<b>Figura 4:</b> Exemplo da variação do tempo de partida a frio da microturbina	33
<b>Figura 5:</b> Ciclo Brayton simples	37
<b>Figura 6:</b> Estado termodinâmico do ar e dos gases de combustão em cada ponto do ciclo aberto da microturbina a gás	39
<b>Figura 7:</b> Diagrama temperatura-entropia do ciclo aberto	39
<b>Figura 8:</b> Diagrama temperatura-entropia para a definição da eficiência do regenerador	40
<b>Figura 9:</b> Exemplo da frequência elétrica em função do tempo [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]	61
<b>Figura 10:</b> Exemplo de emissões em microturbinas para varias potência [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]	66
<b>Figura 11:</b> Curva de resposta típica dos transmissores	75
<b>Figura 12:</b> Expressão gráfica da incerteza do instrumento de medição	77
<b>Figura 13:</b> Vista explodida do medidor de vazão tipo turbina	78
<b>Figura 14:</b> Esquema pneumático utilizado para a calibração de medidor de vazão tipo turbina	87
<b>Figura 15:</b> Leitura do medidor de vazão tipo turbina a cada segundo	88
<b>Figura 16:</b> Leitura do medidor de vazão tipo turbina a cada 2 segundos	88
<b>Figura 17:</b> Leitura do medidor de vazão tipo turbina a cada 3 segundos	88
<b>Figura 18:</b> Leitura do medidor de vazão tipo turbina a cada 4 segundos	89
<b>Figura 19:</b> Leitura do medidor de vazão tipo turbina a cada 5 segundos	89
<b>Figura 20:</b> Curva de calibração do medidor de vazão tipo turbina	90
<b>Figura 21:</b> Esquema Elétrico para Calibração do Medidor de Vazão Tipo Turbina	142

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Condições de referência [ISO 2314, 1973]	31
<b>Tabela 2:</b> Divisores para distribuição de probabilidade (nível de 95,45 % de confiança)	42
<b>Tabela 3:</b> Nível de confiança e fator de abrangência	42
<b>Tabela 4:</b> Valores de t-student para diferentes níveis de confiabilidade	49
<b>Tabela 5:</b> Variáveis com seus valores esperados [GHG-SRI-QAP-27, 2002]	51
<b>Tabela 6:</b> Limites máximos para variações dos parâmetros [PTC-22, 1997]	53
<b>Tabela 7:</b> Exemplo de valores da frequência elétrica [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]	62
<b>Tabela 8:</b> Exemplo de valores da corrente e tensão elétrica [SRI/USEPA-GHG-GD-03,2002]	64
<b>Tabela 9:</b> Valores máximo e mínimo do $PCI_i$ , em kJ/mol [NIST, 2004]	72
<b>Tabela 10:</b> Incerteza do $PCI$ dos componentes do gás natural [NIST, 2004]	73
<b>Tabela 11:</b> Valores medidos no transmissor de pressão	81
<b>Tabela 12:</b> Análise da incerteza do transmissor de pressão	82
<b>Tabela 13:</b> Escolha da curva de ajuste do transmissor de pressão	82
<b>Tabela 14:</b> Valores dos coeficientes de calibração dos Pt-100	85
<b>Tabela 15:</b> Calibração do medidor de vazão tipo turbina	92
<b>Tabela 16:</b> Metas pré-definidas para projeto [GHG-SRI-QAP-27, 2002] e valores encontrados	93
<b>Tabela 17:</b> Calibração do Pt-100 – 01	107
<b>Tabela 18:</b> Análise das incertezas do Pt-100 – 01	110
<b>Tabela 19:</b> Calibração do Pt-100 – 02	113
<b>Tabela 20:</b> Análise das incertezas do Pt-100 – 02	116
<b>Tabela 21:</b> Calibração do Pt-100 – 03	119
<b>Tabela 22:</b> Análise das incertezas do Pt-100 – 03	122
<b>Tabela 23:</b> Calibração do Pt-100 – 04	125
<b>Tabela 24:</b> Análise das incertezas do Pt-100 – 04	128
<b>Tabela 25:</b> Calibração do Pt-100 – 05	131

<b>Tabela 26:</b> Análise das incertezas do Pt-100 – 05	134
<b>Tabela 27:</b> Dados de calibração da balança Alfa	137
<b>Tabela 28:</b> Dados de calibração do transmissor de pressão (nº 1)	139
<b>Tabela 29:</b> Dados de calibração do transmissor de pressão (nº 3)	140

## Abreviaturas Utilizadas

### Siglas

ANP - Agência Nacional de Petróleo

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ANSI - American National Standards Institute

CNTP - Condições normais de temperatura e pressão

ISO - International Organization for Standardization

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

ITUC - Instituto Tecnológico da PUC-Rio

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LPT - Laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio

NSPS - New Soucer Performance Standards

NIST - National Institute of Standards and Technology

PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

VIM - Vocabulário Internacional de Termos Técnicos Fundamentais e Gerais de Metrologia

### Grandezas Físicas e suas Respectiveas Unidades

c - Calor específico, kJ/mol

F - Frequência elétrica, Hz

g - Aceleração da gravidade local,  $m/s^2$

$g_n$  - Aceleração da gravidade normal,  $m/s^2$

h – Entalpia de formação, kJ/kg

I - Corrente elétrica, A

k - Fator de abrangência

K - Calor Recuperado, kJ/kg

m – Vazão mássica do gás natural, kg/s

M - Massa molecular, mol

n - Número de medições

ppmV - Parte por milhão de volume seco  
PCI- Poder calorífico Inferior do Gás Natural, kJ/mol  
PCS - Poder calorífico Superior do Gás Natural, kJ/mol  
 $p$  - Pressão  
P - Produção média de energia elétrica  
Q - Quantidade de calor, J  
rpm – Rotações por minutos  
R - Resistência elétrica,  $\Omega$   
 $R_0$  - Resistência elétrica a 0° C  
s - Desvio padrão  
t – Temperatura, K  
Tempo, s  
T- Tensão elétrica, V  
 $T_{urb}$ - Leitura do medidor de vazão, em mA  
THC - Hidrocarbonetos  
THD - Distorção total de harmônicos  
u - Incerteza padrão  
 $u_c$  - Incerteza padrão combinada  
U - Incerteza expandida  
VOC - Compostos Orgânicos Voláteis  
V - Vazão volumétrica de gás natural, m<sup>3</sup>/s  
Z - Fator de compressibilidade

### **Símbolos em Letras Gregas**

$\alpha$  e  $\beta$  - Coeficientes de ajuste do Pt-100  
 $\alpha_c$  e  $\alpha_p$  - Coeficiente de deformação térmico linear  
 $\lambda$  - Coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro  
 $\rho$  - Densidade  
 $\eta$  - Eficiência  
 $\nu_{ef}$  - Número de graus de liberdade efetivo  
 $\Delta T$  - Variação de temperatura

“Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo,  
não precisa temer o resultado de cem batalhas.  
Se você se conhece mas não conhece o inimigo,  
para cada vitória ganha sofrerá também uma derrota.  
Se você não conhece nem o inimigo nem a si  
mesmo, perderá todas as batalhas.”

Sun Tzu